



# 母材と溶接金属の強度比を考慮した隅肉溶接継目の最大耐力評価

塚大, 空哉

---

(Degree)

博士 (政治学)

(Date of Degree)

2025-09-25

(Date of Publication)

2026-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9319号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100498359>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

母材と溶接金属の強度比を考慮した  
隅肉溶接継目の最大耐力評価

2 0 2 5 年 7 月

神戸大学大学院工学研究科

塚大 空哉

## 目次

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 記号の定義 .....              | 1  |
| 第1章 序論                   |    |
| 1.1 研究背景と目的 .....        | 4  |
| 1.2 既往の研究 .....          | 6  |
| 1.3 研究の概要 .....          | 8  |
| 第2章 崩壊荷重                 |    |
| 2.1 はじめに .....           | 9  |
| 2.2 基礎式 .....            | 10 |
| 2.3 斜方等脚隅肉溶接継目 .....     | 12 |
| 2.3.1 崩壊荷重 .....         | 15 |
| 2.3.2 極限解析 .....         | 17 |
| 2.3.3 解析結果 .....         | 19 |
| 2.3.4 有限要素数値解析との比較 ..... | 24 |
| 2.4 斜方異形隅肉溶接継目 .....     | 34 |
| 2.4.1 崩壊荷重 .....         | 38 |
| 2.4.2 極限解析 .....         | 41 |
| 2.4.3 解析結果 .....         | 44 |
| 2.4.4 有限要素数値解析との比較 ..... | 52 |
| 2.5 まとめ .....            | 62 |
| 第3章 最大耐力                 |    |
| 3.1 はじめに .....           | 63 |
| 3.2 斜方等脚隅肉溶接継目 .....     | 63 |
| 3.2.1 実験計画概要 .....       | 63 |
| 3.2.2 実験結果概要 .....       | 69 |
| 3.2.3 FEA 概要 .....       | 70 |
| 3.2.4 実験と FEA の比較 .....  | 73 |
| 3.3 斜方異形隅肉溶接継目 .....     | 78 |
| 3.3.1 実験計画概要 .....       | 78 |
| 3.3.2 実験結果概要 .....       | 83 |
| 3.3.3 FEA 概要 .....       | 84 |
| 3.3.4 実験と FEA の比較 .....  | 87 |
| 3.4 まとめ .....            | 88 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第4章 最大耐力の推定           |     |
| 4.1 はじめに              | 89  |
| 4.2 斜方等脚隅肉溶接継目        | 89  |
| 4.2.1 界面のせん断応力        | 89  |
| 4.2.2 推定方法            | 90  |
| 4.2.3 推定結果            | 91  |
| 4.3 斜方異形隅肉溶接継目        | 92  |
| 4.3.1 界面のせん断応力        | 92  |
| 4.3.2 推定方法            | 93  |
| 4.3.3 推定結果            | 94  |
| 4.4 耐力評価式             | 95  |
| 4.4.1 極限解析結果          | 95  |
| 4.4.2 崩壊機構の範囲分け       | 97  |
| 4.4.3 各範囲の耐力評価式       | 102 |
| 4.5 まとめ               | 110 |
| 第5章 曲げとせん断力を受ける隅肉溶接継目 |     |
| 5.1 はじめに              | 111 |
| 5.2 極限解析              | 112 |
| 5.2.1 崩壊荷重            | 112 |
| 5.2.2 解析結果            | 119 |
| 5.2.3 FEA との比較        | 121 |
| 5.3 最大耐力              | 127 |
| 5.3.1 実験計画概要          | 127 |
| 5.3.2 実験結果概要          | 142 |
| 5.3.3 FEA 概要          | 143 |
| 5.3.4 実験と FEA の比較     | 146 |
| 5.4 最大耐力の推定           | 147 |
| 5.4.1 推定方法            | 147 |
| 5.4.2 推定結果            | 148 |
| 5.5 耐力評価式             | 150 |
| 5.5.1 極限解析結果          | 150 |
| 5.5.2 耐力評価式           | 151 |
| 5.6 まとめ               | 156 |
| 第6章 結論                | 157 |
| 参考文献                  | 159 |
| 論文リスト                 | 162 |
| 謝辞                    | 166 |

## 記号の定義

|             |                                                |
|-------------|------------------------------------------------|
| $C$         | : AISCの表8-4に記載されているせん断スパンによる係数                 |
| $C_1$       | : AISCの表8-3に記載されている溶接金属の規格強度による係数              |
| $EL$        | : 破断伸び                                         |
| $K$         | : 初期剛性                                         |
| $L$         | : せん断スパン                                       |
| $L/d$       | : せん断スパン比                                      |
| $M$         | : モーメント                                        |
| $P$         | : 荷重                                           |
| $P_p$       | : 極限解析から得られる崩壊荷重                               |
| $_{FEA}P_p$ | : 有限要素数値解析から得られる塑性耐力                           |
| $P_u$       | : 極限解析から得られる最大耐力                               |
| $_{FEA}P_u$ | : 有限要素数値解析から得られる最大耐力                           |
| $P_{max}$   | : 実験から得られる最大耐力                                 |
| $Q$         | : せん断力                                         |
| $S$         | : 脚長                                           |
| $S_1$       | : マクロ試験から得られる板の突合せ部からの高さ                       |
| $S_2$       | : マクロ試験から得られる脚長側の長さ                            |
| $S_3$       | : マクロ試験から得られる溶け込み側の長さ                          |
| $T$         | : 引張力                                          |
| $U$         | : 溶接線直交方向変形                                    |
| $U_i$       | : 要素 $i$ の溶接線直交方向の塑性変形増分                       |
| $V$         | : 溶接線方向変形                                      |
| $V_0$       | : 崩壊機構で仮定する溶接重心の溶接線方向変形                        |
| $V_i$       | : 要素 $i$ の溶接線方向の塑性変形増分                         |
| $W$         | : 降伏面の単位厚さおよび単位長さあたりの内力仕事                      |
| $W_1$       | : 降伏面①における溶接線方向単位長さあたりの内力仕事                    |
| $W_2$       | : 降伏面②における溶接線方向単位長さあたりの内力仕事                    |
| $X$         | : 荷重の作用方向とそれに直交する方向の塑性変形増分の比                   |
| $X_i$       | : $u_i$ と $v_i$ の比 ( $= v_i / u_i$ )           |
| $X_{t1}$    | : $\theta=\theta_t$ のときの $X$                   |
| $X_{ti}$    | : $\theta=\theta_t$ のときの $X_i$                 |
| $YR$        | : 材料の降伏比                                       |
| $a$         | : のど厚                                          |
| $d$         | : 溶接長                                          |
| $\Delta d$  | : 分割された溶接線の微小長さ                                |
| $l_\beta$   | : 降伏面①の長さ                                      |
| $n$         | : 溶接線の分割数                                      |
| $q_p$       | : 各崩壊荷重のうち, 最小の値 ( $=\min(wq_p, bq_p, sq_p)$ ) |

|                    |                                                     |
|--------------------|-----------------------------------------------------|
| $wq_p$             | : 機構Wのときの単位溶接長さあたりの崩壊荷重                             |
| $sq_p$             | : 機構Sのときの単位溶接長さあたりの崩壊荷重                             |
| $bq_p$             | : 機構Bのときの単位溶接長さあたりの崩壊荷重                             |
| $q_{p90}$          | : $\rho_y=1.0$ の場合の側面溶接 ( $\theta=90^\circ$ ) の崩壊荷重 |
| $FEAq_p$           | : 有限要素数値解析から得られる単位溶接長さあたりの塑性耐力                      |
| $q_u$              | : 各最大耐力のうち, 最小の値 ( $=\min(wq_u, bq_u, sq_u)$ )      |
| $wq_u$             | : 機構Wのときの単位溶接長さあたりの最大耐力                             |
| $sq_u$             | : 機構Sのときの単位溶接長さあたりの最大耐力                             |
| $bq_u$             | : 機構Bのときの単位溶接長さあたりの最大耐力                             |
| $q_{u0}$           | : $\theta=0^\circ$ の時の単位溶接長さあたりの最大耐力                |
| $cq_u$             | : 近似式より得られる単位溶接長さあたりの最大耐力                           |
| $q_i$              | : 要素 <i>i</i> に作用する荷重                               |
| $q_{pi}$           | : $X$ と $X_i$ の交点から得られる要素 <i>i</i> の崩壊荷重            |
| $q_{xi}$           | : $q_{pi}$ の溶接線直交方向成分                               |
| $q_{yi}$           | : $q_{pi}$ の溶接線方向成分                                 |
| $q_{ui}$           | : $X$ と $X_i$ の交点から得られる要素 <i>i</i> の最大耐力            |
| $u$                | : 荷重方向変形                                            |
| $u_i$              | : 要素 <i>i</i> の荷重作用方向の塑性変形増分                        |
| $v$                | : 荷重直交方向変形                                          |
| $v_i$              | : 要素 <i>i</i> の荷重直交方向の塑性変形増分                        |
| $y_i$              | : 溶接重心に対する要素 <i>i</i> のy座標                          |
|                    |                                                     |
| $\alpha_1$         | : 溶接断面形状を定義する溶込み側の角度                                |
| $\alpha_2$         | : 溶接断面形状を定義する脚長側の角度                                 |
| $\beta$            | : 荷重作用面と降伏面①のなす角度                                   |
| $\gamma$           | : 近似式に用いる係数                                         |
| $\gamma_{nt}$      | : <b>n-t</b> 平面におけるせん断ひずみ                           |
| $\gamma_{tw}$      | : <b>t-w</b> 平面におけるせん断ひずみ                           |
| $\gamma_{wn}$      | : <b>w-n</b> 平面におけるせん断ひずみ                           |
| $\Delta$           | : 2剛体間の微小幅                                          |
| $\delta_n$         | : <b>n</b> 軸方向の変位                                   |
| $\delta_t$         | : <b>t</b> 軸方向の変位                                   |
| $\delta_w$         | : <b>w</b> 軸方向の変位                                   |
| $\varepsilon'$     | : 単軸引張実験による真歪                                       |
| $\varepsilon_n$    | : <b>n</b> 軸方向の垂直ひずみ                                |
| $\varepsilon_t$    | : <b>t</b> 軸方向の垂直ひずみ                                |
| $\varepsilon_w$    | : <b>w</b> 軸方向の垂直ひずみ                                |
| $\varepsilon_{eq}$ | : 相当塑性歪                                             |
| $\eta$             | : 応力三軸度                                             |
| $\theta$           | : 斜方角度                                              |

|               |                                                            |
|---------------|------------------------------------------------------------|
| $\theta_i$    | : 要素 <i>i</i> に作用する荷重の斜方角度                                 |
| $\theta_p$    | : 溶接線直交方向に対する変形方向                                          |
| $\theta_t$    | : 崩壊機構がせん断変形の上に切り替わる斜方角度                                   |
| $\rho_y$      | : 母材と溶接金属の降伏点の比 ( $=\sigma_{wy}/\sigma_{by}$ )             |
| $\rho_u$      | : 母材と溶接金属の引張強さの比 ( $=\sigma_{wu}/\sigma_{bu}$ )            |
| $\sigma'$     | : 単軸引張実験による真応力                                             |
| $\sigma_n$    | : <b>n</b> 軸方向の垂直応力                                        |
| $\sigma_t$    | : <b>t</b> 軸方向の垂直応力                                        |
| $\sigma_w$    | : <b>w</b> 軸方向の垂直応力                                        |
| $\sigma_y$    | : 単軸引張実験による降伏点                                             |
| $\sigma_{wy}$ | : 溶接金属の降伏点                                                 |
| $\sigma_{by}$ | : 母材の降伏点                                                   |
| $\sigma_{sy}$ | : 溶接金属の降伏点 $\sigma_{wy}$ と母材の降伏点 $\sigma_{by}$ のうち, 最小の値   |
| $\sigma_{my}$ | : 溶接金属の降伏点 $\sigma_{wy}$ と母材の降伏点 $\sigma_{by}$ の平均値        |
| $\sigma_u$    | : 単軸引張実験による引張強さ                                            |
| $\sigma_{wu}$ | : 溶接金属の引張強さ                                                |
| $\sigma_{bu}$ | : 母材の引張強さ                                                  |
| $\sigma_{su}$ | : 溶接金属の引張強さ $\sigma_{wu}$ と母材の引張強さ $\sigma_{bu}$ のうち, 最小の値 |
| $\sigma_{mu}$ | : 溶接金属の引張強さ $\sigma_{wu}$ と母材の引張強さ $\sigma_{bu}$ の平均値      |
| $\tau_{nt}$   | : <b>n-t</b> 平面内のせん断応力                                     |
| $\tau_{tw}$   | : <b>t-w</b> 平面内のせん断応力                                     |
| $\tau_{wn}$   | : <b>w-n</b> 平面内のせん断応力                                     |
| $\varphi_0$   | : 崩壊機構で仮定する溶接重心の回転角                                        |

## 第 1 章 序論

### 1.1 研究背景と目的

鋼構造の接合方法の一つである隅肉溶接は、接合材に対して準備工作が不要であるという利点を持っており、多方面で用いられる溶接継目である。古くから隅肉溶接に関する研究は、国内外で多数行われている<sup>例えば 1)~5)</sup>。しかし、実際に隅肉溶接継目に作用する荷重方向は様々であり、これらの研究では荷重の作用方向は考慮されていない。

本稿で対象とする隅肉溶接は、図 1.1.1 に示す斜方溶接継目であり、ブレース接合部のガセットプレート溶接部など、鋼構造建築物で多用されている溶接継目である。斜方溶接継目の研究も行われてきたが、理論的研究は少ない。例えば、橋本、田沼らは隅肉溶接の最大耐力の評価式を A.G.Kamtekar<sup>5)</sup>の考え方に基づき誘導した<sup>6)~7)</sup>。その評価式は当時の実験結果と良い対応を示しており、冶金的寸法効果係数として、 $\beta=1.26$  をかけると各角度の実験結果と良く整合することを報告している。これらの研究に基づき、鋼構造限界状態設計指針・同解説<sup>8)</sup>において、斜方から荷重を受ける隅肉溶接継目の以下の最大耐力の算定式が定められており、現行の鋼構造接合部設計指針<sup>9)</sup>にも引き継がれている。

$$q_u = (1 + 0.4 \cos \theta) a \cdot \frac{\sigma_u}{\sqrt{3}} \quad (1.2.1)$$

安井、吹田、井上らは溶接金属と母材の強度が同程度の場合（イーブンマッチ）の斜方隅肉溶接継目を対象に、継目に降伏面を設け、極限解析を用いて、斜方角度 $\theta$ と最大耐力および破面角度の理論的關係を求めている<sup>10)</sup>。しかし、理論解は実験値を過小評価しており、改良の余地がある。

海外に目を向けると Miazga, Kennedy は破断面における最大せん断応力理論により、下界を導いている<sup>11)</sup>。しかし、評価式には実験係数が含まれており半実験式の段階である。Lesik, Kennedy は Miazga らの研究成果を元に近似式を誘導<sup>12)</sup>しており、AISC の Steel Construction Manual<sup>13)</sup>にも以下の式が記載されている。

$$q_u = 1 + 0.5 \cos^{\frac{3}{2}} \theta \quad (1.2.2)$$

これらの理論解について、側面隅肉溶接の耐力で除して無次元化して比較すると、図 1.1.2 のように前面隅肉溶接から斜方角度が大きくなるに従い耐力は低下し、前面隅肉溶接の耐力は側面隅肉溶接の耐力の 1.26 倍～1.5 倍となる。これらの間の角度にあたる斜方隅肉溶接の耐力はその間の値を取り、斜方角度が大きくなるにつれて耐力は減少するが、その傾向は異なっている。これらの理論解では溶接金属と母材の強度比は考慮されておらず、破面は溶接金属内に発生することを前提条件として導出されている。橋本、田沼らの理論解では、破面の概念は存在しない。安井、吹田、井上らは斜方角度 $\theta$ と破面角度 $\beta$ の理論的關係を求めているが、そこでは強度比に関係なく一律に破面角度が決定されており、一般的な強度比では適用できるが全てを網羅することはできていない。Miazga, Kennedy らは、せん断応力が溶接部の破壊性状を支配していることに基づき、破面角度 $\beta$ を斜方角度 $\theta$ と係数  $a$  の関数として与えている。しかし、係数  $a$  は当時行われていた実験の平均破面角度 $\beta$ と斜方角度 $\theta$ から決定されおり、こちらも適用可能な材料は限定的であると考えられる。

また、溶接金属の母材への溶込みにより、耐力が上昇すると考えられるが、これらの理論解には溶込みの概念はなく、一律に溶込みの無い等脚隅肉形状で理論解を導いているため、実際の耐力を過小評価する。一方、異形隅肉溶接の強度については理論的に研究された例が少ない。例えば、森川ら<sup>14)</sup>は井上ら<sup>10)</sup>の上界定理に基づき導かれた理論解を参考にし、前面異形隅肉溶接継目の終局強度を求めている。しかし、前面異形隅肉溶接継目に関する研究に留まっており、図 2 に示すような溶接部が斜方角度 $\theta$ 方向に荷重 $P$ を受けた場合については言及されていない。杉山ら<sup>16)</sup>は円形鋼管柱に外ダイアフラムを溶接する場合に着目し、斜方角度を持つ異形隅肉溶接を対象とした実験を行い、平面ひずみ状態を考慮に入れた von Mises の降伏条件を適用して最大耐力評価式を提案している。しかし、のど断面の降伏のみを仮定しており、材料の強度比は考慮されていない。さらに、梁端ウェブ接合部などでは隅肉溶接継目に曲げとせん断が作用するため、溶接線に作用している応力は一様ではない。そこで本研究では、溶接金属と母材の強度が異なる溶接継目について、まず初めに図 1.1.3 に示す溶接部が斜方角度 $\theta$ 方向に荷重 $P$ を受けた場合の理論的な耐力評価法を得るため、溶接継目形状を $\alpha_1=0^\circ$ 、 $\alpha_2=45^\circ$ とした等脚隅肉溶接、 $\alpha_1=\alpha_2=30^\circ$ および $\alpha_1=\alpha_2=40^\circ$ とした異形隅肉溶接を対象とした理論値を導出する。理論値の導出は溶接継目に降伏面を設け、極限解析の上界定理を用いて崩壊荷重 $P_u$ と斜方角度 $\theta$ の関係を求めた。次に曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目を対象とし、斜方隅肉溶接継目の極限解析から得られた結果を応用して、変形から応力状態を導出する手法により、せん断スパン比の影響を考慮した耐力評価を行う。さらに既報の実験結果および有限要素数値解析により、最大耐力の理論解を導出および検証し、最大耐力の耐力評価法を提案する。そして、極限解析から得られる最大耐力について、近似式を誘導することで耐力評価式を陽な表現で表した。

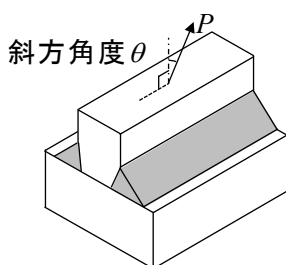


図 1.1.1 斜方隅肉溶接継目

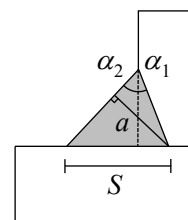


図 1.1.3 溶接部の断面形状

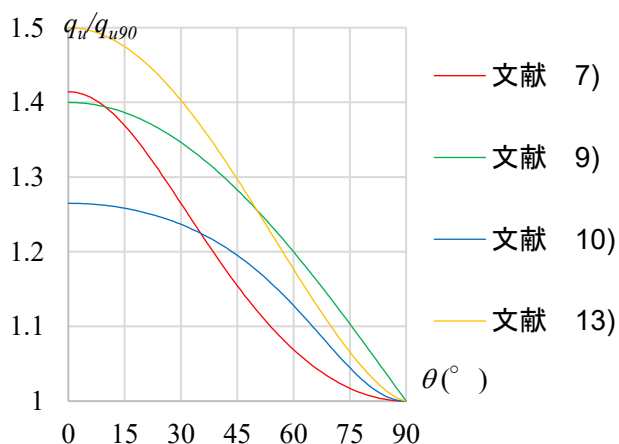


図 1.1.2 斜方隅肉溶接継目の耐力評価式の比較

## 1.2 既往の研究

以下に溶接継目に関する既往の研究<sup>6),7),9)</sup>についてまとめる.

題目：低温化施工による十字継手すみ肉溶接継目の強度(文献 6, 7)

著者：橋本健一，田沼吉伸，鎌田正巳

掲載誌：日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）C 構造，pp.1041-1042，1987.10

概要：文献 6 にて，溶接施工温度，接合材板厚，溶接方法(手溶接，Co<sub>2</sub> 半自動溶接)，脚長，および加力方向に対する溶接線方向の角度  $\theta$  を変動因子とした実験を行い，斜方隅肉溶接継目の最大耐力は加力方向に対する溶接線方向の角度  $\theta$  に依存し，他の因子には大きく影響されないとしている．そこで実験結果を元に，隅肉溶接の最大耐力の評価式を

A.G.Kamtekar の考え方に基づき誘導した．その評価式は当時の実験結果と良い対応を示しており，冶金的寸法効果係数として， $\beta=1.26$  をかけると各角度の実験結果と良く整合することを報告している．

最大耐力評価式は以下で表される．

$$P_{max} = \frac{1}{\sqrt{1.5 + 1.5 \sin^2 \theta}} \cdot A_w \cdot \sigma_{wu} \quad (1.2.3)$$

ここで， $A_w$  はのど断面積

図 1.1.4 のように以下の式と合わせて当時の実験結果と比較検討している．

(i)IIW Sub.XV A 案

$$P_{max} = \frac{1}{\sqrt{0.98 \cos^2 \theta + 1.47 \sin^2 \theta}} \cdot A_w \cdot \sigma_{wu} \quad (\text{Fe360}) \quad (1.2.4)$$

$$P_{max} = \frac{1}{\sqrt{1.445 \cos^2 \theta + 2.168 \sin^2 \theta}} \cdot A_w \cdot \sigma_{wu} \quad (\text{Fe510}) \quad (1.2.5)$$

(ii)Van der EB 案

$$P_{max} = \frac{1}{\sqrt{1.4 + 0.4 \sin^2 \theta}} \cdot A_w \cdot \sigma_{wu} \quad (1.2.6)$$

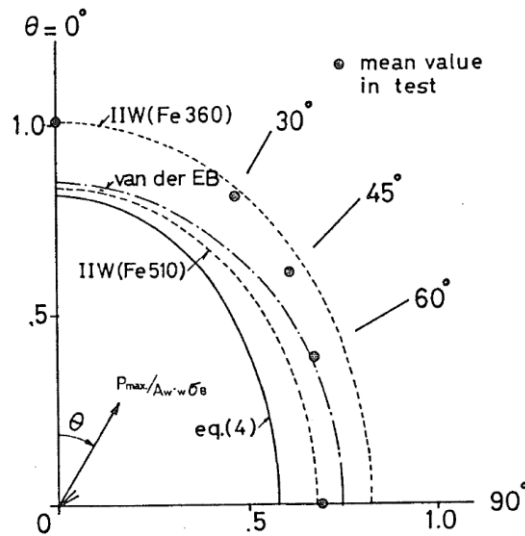


図 1.1.4 各最大耐力評価式の比較<sup>7)</sup>

題目：斜方隅肉溶接継目の破壊機構と最大耐力(文献 9)

著者：安井信行，吹田啓一郎，井上一朗

掲載誌：日本建築学会構造系論文集 第 579 号 2004 年 5 月 pp.111-118

概要：斜方隅肉溶接継目は，鋼構造建築物で多用されるにもかかわらず，理論的研究は少ない．側面隅肉溶接継目の破壊面はのど断面であり，前面隅肉溶接継目はのど断面でなく脚断面に近い位置にある．また，前面隅肉溶接継目の耐力は側面隅肉溶接継目の耐力よりも高く，これは隅肉溶接継目の耐力が破壊角度と深い関係をもつことを示唆している．

そこで，溶接金属と母材の強度が同じ場合の斜方隅肉溶接継目について，斜方角度と最大耐力，および斜方角度と破断角度の関係を与える理論解を，図 1.1.5，図 1.1.6 に示す破壊機構を想定して，上界定理に基づいて導いている．また，得られた理論解の妥当性を検証するために斜方隅肉溶接継目の載荷実験を行い，実験結果と理論解を比較・考察している．

- ・破断面内に生じる垂直応力  $\sigma_t$  を 0 とみなし，さらに荷重作用方向と直交する方向の塑性変形増分を無視した下式で得られる最大耐力  $wq_u$  は実験値に比べ過小であるが，実用上，十分な精度で評価できる．

$$wq_u = \sqrt{\frac{2(1 + \cos^2\theta)}{2 + 3\cos^2\theta}} \cdot \frac{a\sigma_u}{\sqrt{3}} \quad (1.2.7)$$

また，破断角度  $\beta$  は以下の式で評価できる．

$$\tan\beta = \frac{1}{3\cos^2\theta + 1} \quad (1.2.8)$$

- ・提案する破壊機構において，有限要素解析の結果を参考に導いた  $\sigma_t$  を考慮した力学モデルでは，斜方角度による最大耐力の変化を精度よく評価できる．

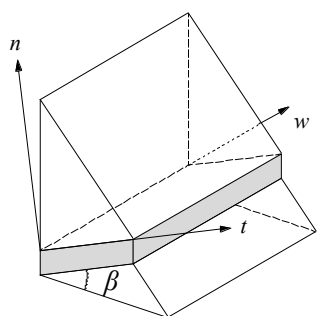


図 1.1.5 破壊機構と座標軸

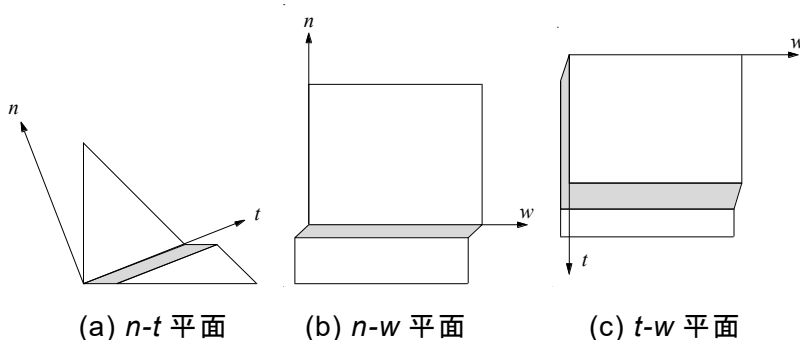


図 1.1.6 各座標面における破壊機構と塑性変形

### 1.3 研究の概要

第 2 章では、隅肉溶接継目が斜方角度  $\theta$  方向に荷重  $P$  を受けた場合の耐力評価を行う。まずは崩壊荷重を求め、極限解析および数値解析により最小の耐力を得た。そして、応力歪関係を完全弾塑性型とした有限要素数値解析から得られる塑性耐力と比較することで理論解の妥当性の検証を行った。

第 3 章では、斜方隅肉溶接継目の最大耐力を評価するために既報の実験結果と試験体の隅肉形状および機械的性質をモデル化した FEA 結果と比較し検証する。

第 4 章では、2 章で得られた理論解を準用および 3 章で得られた有限要素数値解析の結果を用いて、斜方隅肉溶接継目の最大耐力を得る。そして、実験結果および FEA 結果と最大耐力を比較、検証を行う。さらに溶込みを 0 とし、強度比の影響を考慮した極限解析から得られる最大耐力について、近似式を誘導することで耐力評価式を導出する。

第 5 章では、2 章に示した斜方隅肉溶接継目の崩壊荷重を用いて、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目についての極限解析を行い、耐力を推定する。そして応力歪関係を完全弾塑性型とした有限要素数値解析結果と比較することで理論解の妥当性の検証を行う。さらに 4 章で得られた斜方隅肉溶接継目の最大耐力を用いて、最大耐力の理論解を導出し、せん断スパン比を実験因子とした実験結果および有限要素解析結果との比較により、理論解の妥当性を検証する。最後に、溶込みを 0 とし、強度比の影響を考慮した極限解析から得られた最大耐力について、近似式を誘導することで耐力評価式を導出する。

第 6 章では、本論文で得られた知見を列挙し、結論を示す。

## 第 2 章 崩壊荷重

### 2.1 はじめに

本章では，図 2.1.1 に示すブレース接合部のガセットプレート端部のように隅肉溶接継目が斜方から荷重を受けるとき，溶接金属と母材の強度が異なる場合について，以下の仮定に基づき，溶接継目に降伏面を設けた理論値を導出し，極限解析の上界定理を用いて崩壊荷重  $P_p$  と斜方角度  $\theta$  の関係を求める．

- (1) 溶接線長さは脚長  $S$  に比べて十分大きく，溶接線方向の伸縮は生じない．
- (2) 溶接部断面の変形は，溶接線方向に対して一様である．
- (3) 塑性変形に伴う体積変化は 0 とする（非圧縮性）．
- (4) von Mises の降伏条件に従う．
- (5) 降伏面により崩壊機構が形成される．

さらに，得られた理論解について，入力する材料特性を完全弾塑性とした有限要素数値解析を用いて，妥当性を検証する．

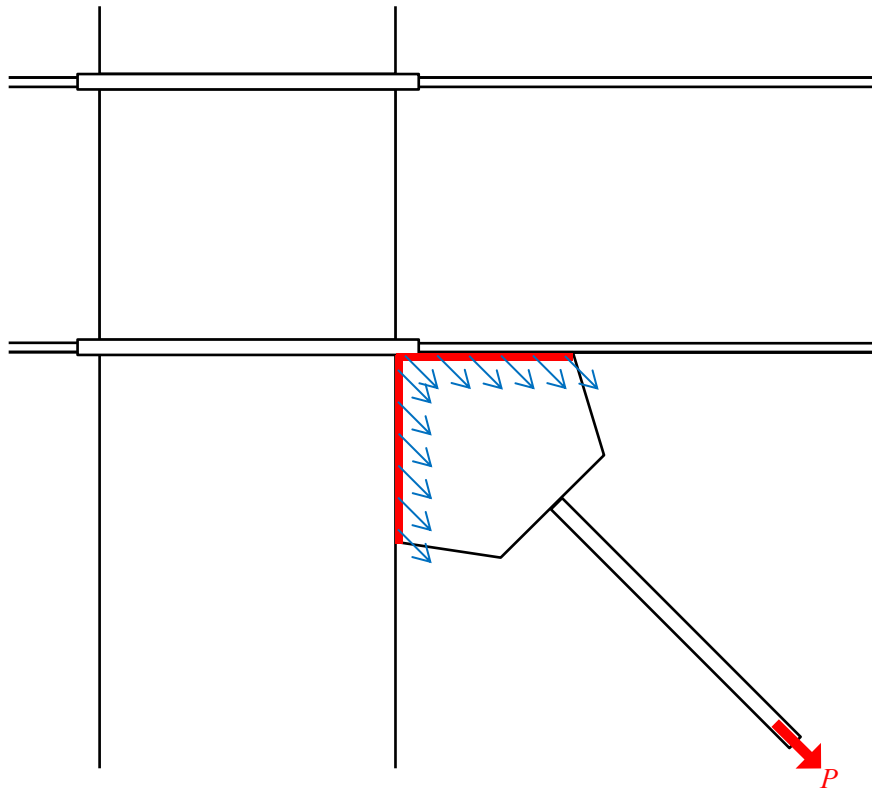


図 2.1.1 該当箇所の例

## 2.2 基礎式

溶接部継目に降伏面を仮定して、継目耐力を求める。降伏面においてなされる内力仕事は、図 2.2.1 に示す 2 つの剛体間の微小幅  $\Delta$  に一様な変位場が生じると仮定して導くことができる。図 2.2.1 に示す  $n$ - $t$ - $w$  直交座標系に対して、各歪は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_n &= \delta_n / \Delta, \quad \varepsilon_t = 0, \quad \varepsilon_w = 0 \\ \gamma_{nt} &= \delta_t / \Delta, \quad \gamma_{wn} = \delta_w / \Delta, \quad \gamma_{tw} = 0\end{aligned}\quad (2.2.1)$$

塑性歪によって体積は変わらない塑性的非圧縮性を仮定すると、

$$\varepsilon_n + \varepsilon_t + \varepsilon_w = 0 \quad (2.2.2)$$

となる。式(2.2.1)および式(2.2.2)より、式(2.2.3)が得られる。

$$\varepsilon_n = \varepsilon_t = \varepsilon_w = 0 \quad (2.2.3)$$

すなわち、 $n$  軸方向の変位は、 $\varepsilon_n = 0$  となり、平面歪状態に適用されるすべり線場理論と同様に、降伏面上ではすべりだけが許容されることになる。

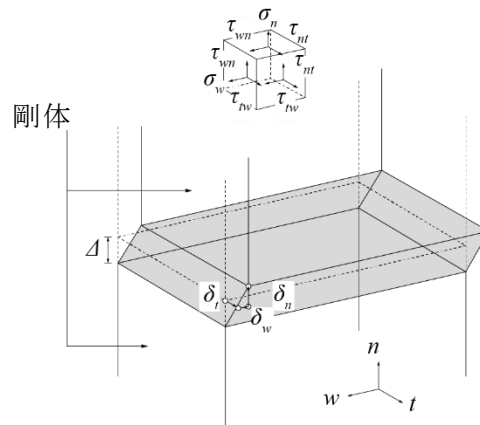


図 2.2.1  $n$ - $t$ - $w$  直交座標系

von Mises の降伏条件を仮定する．すなわち，

$$\Phi = (\sigma_n - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_w)^2 + (\sigma_w - \sigma_n)^2 + 6(\tau_{nt}^2 + \tau_{tw}^2 + \tau_{wn}^2) - 2\sigma_y^2 \quad (2.2.4)$$

塑性流れの法線則および式(2.2.1)，式(2.2.4)より次式が得られる．

$$\begin{aligned} \partial\Phi/\partial\sigma_n &= 2(\sigma_n - \sigma_t) + 2(\sigma_w - \sigma_n) = \lambda \cdot \varepsilon_n = 0 \\ \partial\Phi/\partial\sigma_t &= 2(\sigma_t - \sigma_w) + 2(\sigma_n - \sigma_t) = \lambda \cdot \varepsilon_t = 0 \\ \partial\Phi/\partial\sigma_w &= 2(\sigma_w - \sigma_n) + 2(\sigma_t - \sigma_w) = \lambda \cdot \varepsilon_w = 0 \\ \partial\Phi/\partial\tau_{nt} &= 12\tau_{nt} = \lambda \cdot \gamma_{nt} = \lambda \cdot \delta_t/\Delta \\ \partial\Phi/\partial\tau_{tw} &= 12\tau_{tw} = \lambda \cdot \gamma_{tw} = 0 \\ \partial\Phi/\partial\tau_{wn} &= 12\tau_{wn} = \lambda \cdot \gamma_{wn} = \lambda \cdot \delta_w/\Delta \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

式(2.2.5)より次式が得られる．

$$\sigma_n = \sigma_t = \sigma_w = 0, \quad \tau_{tw} = 0 \quad (2.2.6)$$

式(2.2.4)に式(2.2.6)を代入すると，降伏面における降伏条件が得られる．

$$\Phi = 3(\tau_{nt}^2 + \tau_{wn}^2) - \sigma_y^2 = 0 \quad (2.2.7)$$

また，式(2.2.5)より以下の式(2.2.8)が得られる．

$$\tau_{nt}/\tau_{wn} = \delta_t/\delta_w \quad (2.2.8)$$

式(2.2.8)の関係を式(2.2.7)に代入すると以下の式(2.2.9)が得られる．

$$\tau_{nt} = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + (\delta_w/\delta_t)^2}} \cdot \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}, \quad \tau_{wn} = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + (\delta_t/\delta_w)^2}} \cdot \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (2.2.9)$$

降伏線の単位厚さ( $t$  方向)および単位長さ( $w$  方向)あたりの内力仕事  $W$  は次式で与えられる．

$$W = (\tau_{nt} \gamma_{nt} + \tau_{wn} \gamma_{wn}) \cdot \Delta \quad (2.2.10)$$

式(2.2.1)および式(2.2.9)を式(2.2.10)に代入すると式(2.2.11)が得られる．

$$W = \left( \frac{\delta_t/\Delta}{\sqrt{1 + (\delta_w/\delta_t)^2}} + \frac{\delta_w/\Delta}{\sqrt{1 + (\delta_t/\delta_w)^2}} \right) \cdot \Delta \cdot \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} = \sqrt{\delta_t^2 + \delta_w^2} \cdot \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (2.2.11)$$

内力仕事  $W$  は微小幅  $\Delta$  に依存せず， $\Delta$  を 0 に近づけたときの極限が降伏面であり，すべり量  $\delta_t$  および  $\delta_w$  を仮定すれば， $W$  を式(2.2.11)により求めることができる．

## 2.3 斜方等脚隅肉溶接継目

図 2.3.1 に示す理想化された断面形状を有する隅肉溶接継目が斜方角度  $\theta$  の方向に载荷された場合の単位長さ当たりの崩壊荷重を求める．溶接継目の断面形状は図 2.3.2 に示すとおりサイズ  $S$  (ルートから止端までの距離) および角度  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  によって与えられる．溶け込みの無い等脚隅肉溶接の場合,  $\alpha_1=0^\circ$ ,  $\alpha_2=45^\circ$  となる．

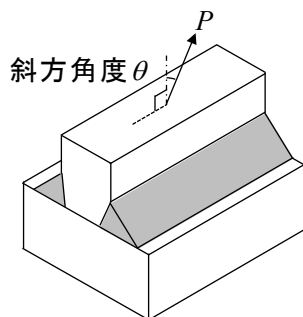


図 2.3.1 斜方溶接継目

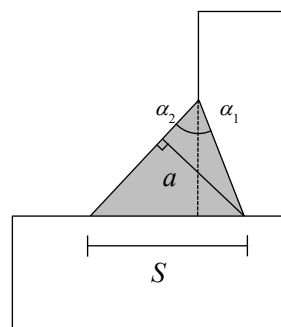


図 2.3.2 隅肉溶接の断面形状

図 2.3.3 に示すように隅肉溶接継目の荷重作用線方向の変位を  $u$ , それと直交する方向の変位を  $v$  とし,  $X=v/u$  とする．溶接線方向の変位  $V$  およびそれと直交する方向の変位  $U$  は, 次式で表される．

$$U = u \cos \theta - v \sin \theta \quad (2.3.1)$$

$$V = u \sin \theta + v \cos \theta \quad (2.3.2)$$

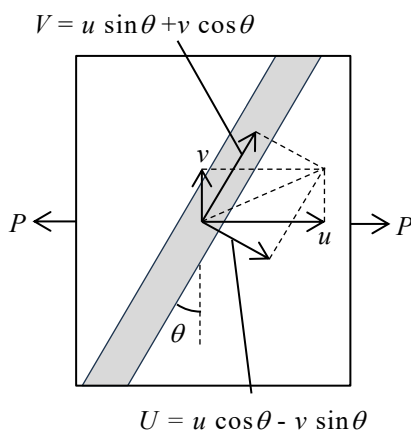


図 2.3.3 塑性変形増分

崩壊機構を図 2.3.4 に示すように仮定する．ルート部から  $\beta$  の角度で降伏面①が形成され，発生場所により (a)溶接金属 (b)界面に場合分けされる．ただし，降伏面①では，すべりだけが許容されるため，降伏面②を仮定する．この崩壊機構に対して，降伏面①内の溶接線方向を  $w$  軸， $w$  軸に直交する方向を  $t$  軸，降伏面①に直交する方向を  $n$  軸とした  $n$ - $t$ - $w$  直交座標系を設定する．それぞれの座標面での崩壊機構を図 2.3.5 に示す．

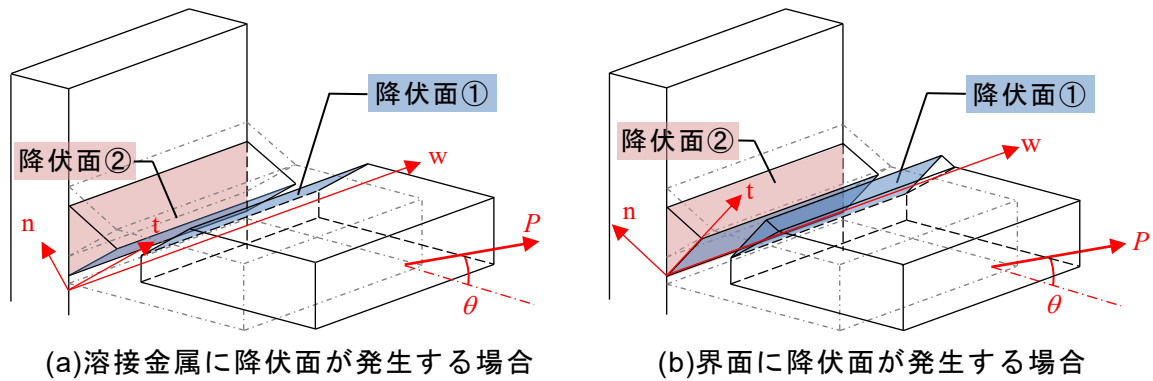


図 2.3.4 崩壊機構の概念図

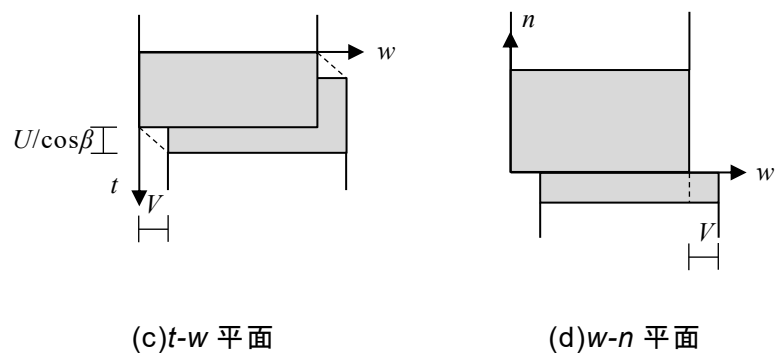
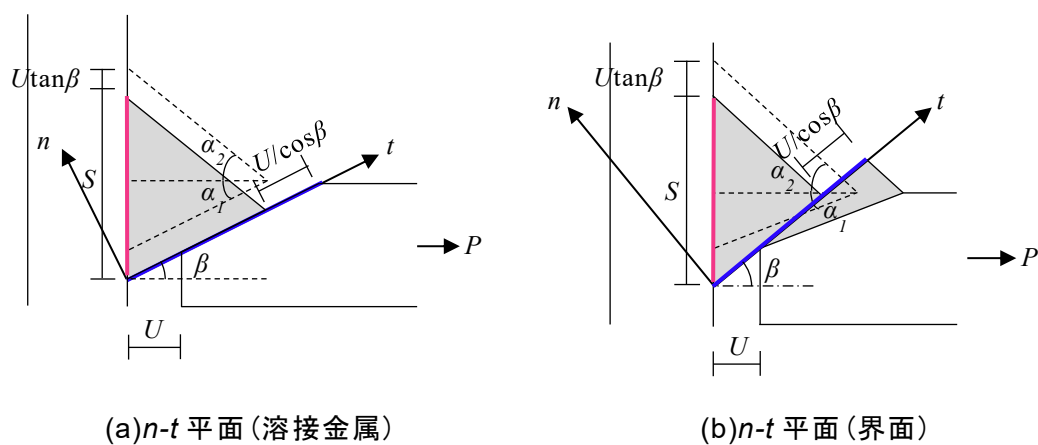


図 2.3.5 各座標面での崩壊機構

図 2.3.6 に仮定した降伏面を示す．図 2.3.6 中の  $\beta$  は，荷重作用方向から降伏面①までの角度を表す．崩壊機構は降伏面の形成される位置によって機構 W と機構 S の二つに分けられる．図 2.3.6 (a)に示す機構 W は，降伏面①が溶接金属内に形成され，降伏面②が溶接金属と母材の界面に形成される場合である．図 2.3.6 (b)に示す機構 S は，降伏面①が溶接金属と母材の界面に形成され，降伏面②が溶接金属と母材の界面に形成される場合である．ただし，斜方角度が特定の角度より大きくなり，降伏面②が形成されない場合も含まれる．

ここで，以下の仮定を設ける．

- 1) 溶接金属と母材の界面に形成される降伏面の内力仕事の算定には，溶接金属と母材のうち小さい方の降伏点  $\sigma_{sy}$  を用いる．
- 2) 図 2.3.5(c)(d)に示す溶接線方向の変位  $V$  は，降伏面①に生じる．

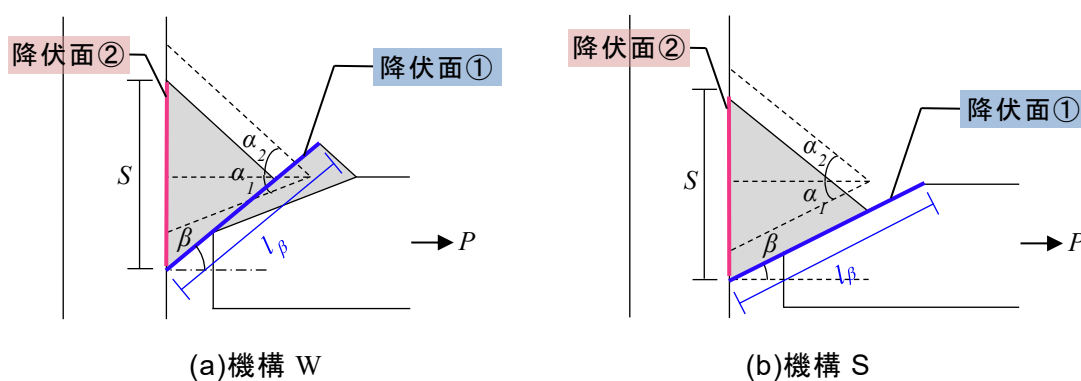


図 2.3.6 降伏面の位置

### 2.3.1 崩壊荷重

#### 【機構 W】

図 2.3.6 (a)に示す崩壊機構 W は降伏面①が溶接金属内に形成され，降伏面②が母材と溶接金属の界面に形成される機構である．すなわち図 2.3.6 (a)に示す降伏面①を決定する角度 $\beta$ は以下の式の範囲にある．

$$\alpha_1 < \beta \leq 90^\circ \quad (2.3.3)$$

降伏面①では，

$$\delta_t = U/\cos \beta, \quad \delta_w = V \quad (2.3.4)$$

となるので， $w$  方向単位長さあたりの内力仕事  $W_1$  は，式(2.2.11)を用いて次式で表される．

$$W_1 = \frac{\sqrt{U^2 + V^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta} \cdot l_\beta \cdot \frac{\sigma_{wy}}{\sqrt{3}} \quad (2.3.5)$$

ここで， $l_\beta$  は降伏面①の  $t$  方向の長さであり，幾何学的関係より次式で表される．

$$l_\beta = \frac{S}{\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2} \quad (2.3.6)$$

降伏面②では，

$$\delta_t = U \tan \beta, \quad \delta_w = 0 \quad (2.3.7)$$

となるので， $w$  方向単位長さあたりの内力仕事  $W_2$  は次式で表される．

$$W_2 = |U| \tan \beta \cdot S \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sqrt{3}} \quad (2.3.8)$$

機構 W の  $w$  方向(溶接線方向)単位長さあたりの崩壊荷重  ${}_wq_p$  は，外力仕事  ${}_wq_p \cdot u$  と内力仕事の和  $W_1 + W_2$  を等値することにより得られる．式(2.3.5)および式(2.3.8)に式(2.3.1)および式(2.3.2)を代入すると，

$$\begin{aligned} {}_wq_p \cdot u = & \left\{ \frac{\sqrt{(u \cos \theta - v \sin \theta)^2 + (u \sin \theta + v \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{wy} \right. \\ & \left. + |u \cos \theta - v \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

両辺を  $u$  で除し， $X = v/u$  と置くと式(2.3.10)が得られる．

$$\begin{aligned} {}_wq_p = & \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{wy} \right. \\ & \left. + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.3.10)$$

ここで， $\sigma_{wy}$  : 溶接部の降伏点(N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{sy}$  : 母材と溶接金属のうち小さい方の降伏点(N/mm<sup>2</sup>)

### 【機構 S】

図 2.3.6 (b)に示す崩壊機構 S は降伏面①が界面に形成され、降伏面②も母材と溶接金属の界面に形成される機構である。すなわち図 2.3.6 (b)に示す降伏面①を決定する角度 $\beta$ は以下の式のように溶接部形状を決定する $\alpha_1$ に等しくなる。

$$\beta = \alpha_1 \quad (2.3.11)$$

降伏面①では、

$$\delta_t = U/\cos \beta, \quad \delta_w = V \quad (2.3.12)$$

となるので、 $w$  方向単位長さあたりの内力仕事  $W_1$  は、式(2.2.11)を用いて次式で表される。

$$W_1 = \frac{\sqrt{U^2 + V^2 \cos^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1} \cdot l_\beta \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sqrt{3}} \quad (2.3.13)$$

ここで、 $l_\beta$  は降伏面①の  $t$  方向の長さであり、幾何学的関係より次式で表される。

$$l_\beta = \frac{S}{\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2} \quad (2.3.14)$$

降伏面②では、

$$\delta_t = U \tan \alpha_1, \quad \delta_w = 0 \quad (2.3.15)$$

となるので、 $w$  方向単位長さあたりの内力仕事  $W_2$  は次式で表される。

$$W_2 = |U| \tan \alpha_1 \cdot S \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sqrt{3}} \quad (2.3.16)$$

機構 S の  $w$  方向(溶接線方向)単位長さあたりの崩壊荷重  ${}_s q_p$  は、外力仕事  ${}_s q_p \cdot u$  と内力仕事の和  $W_1 + W_2$  を等値することにより得られる。式(2.3.13)および式(2.3.16)に式(2.3.1)および式(2.3.2)を代入すると、

$${}_s q_p \cdot u = \left\{ \frac{\sqrt{(u \cos \theta - v \sin \theta)^2 + (u \sin \theta + v \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{sy} + |u \cos \theta - v \sin \theta| \cdot \tan \alpha_1 \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.3.17)$$

両辺を  $u$  で除し、 $X = v/u$  と置くと式(2.3.18)が得られる。

$${}_s q_p = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{sy} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \alpha_1 \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.3.18)$$

ここで、 $\sigma_{sy}$  : 母材と溶接金属のうち小さい方の降伏点(N/mm<sup>2</sup>)

### 2.3.2 極限解析

崩壊機構 W における未知数は  $\beta$  および  $X$  であり, 崩壊機構 S における未知数は  $X$  である. ある  $\theta$  に対して,  $\beta$  および  $X$  を変化させて, 各崩壊機構における最小の崩壊荷重を数値計算により求めた. 任意の斜方角度  $\theta$  において, 得られた  ${}_wq_p, {}_sq_p$  の内, 最小の値を単位長さ当たりの崩壊荷重  $q_p$  とした.

#### 【機構 W】

任意の断面形状を有する隅肉溶接継目について, 機構 W の崩壊荷重は以下の式で示される.

$${}_wq_p = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{wy} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.3.19)$$

ある斜方角度  $\theta$  に対する崩壊機構の未知数は,  $\beta$  および  $X$  であり, 以下の式によって上界が得られる.

$$\frac{\partial {}_wq_p}{\partial \beta} = 0, \quad \frac{\partial {}_wq_p}{\partial X} = 0 \quad (2.3.20)$$

式(2.3.19)を  $X$  で偏微分すると以下の式が得られる.

$$\frac{\partial {}_wq_p}{\partial X} = \left\{ \frac{-\sin \theta \cos \theta + X \sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \cos^2 \beta + X \cos^2 \theta \cos^2 \beta}{(\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2) \cos \beta \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}} \cdot \sigma_{wy} - \sin \theta \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.3.21)$$

式(2.3.20)より,

$$\left\{ \frac{-\sin \theta \cos \theta + X \sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \cos^2 \beta + X \cos^2 \theta \cos^2 \beta}{(\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2) \cos \beta \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}} \cdot \sigma_{wy} - \sin \theta \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} = 0 \quad (2.3.22)$$

式(2.3.22)を整理すると,

$$\begin{aligned} & \left\{ X (\cos^2 \theta \cos^2 \beta + \sin^2 \theta) + \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \beta - 1) \right\} \cdot \sigma_{wy} \\ &= \sin \theta \sin \beta (\sin \beta + \cos \beta \tan \alpha_2) \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta} \cdot \sigma_{sy} \end{aligned} \quad (2.3.23)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで,} \quad a &= \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \cos^2 \beta \\ b &= \sin^2 \theta \sin^2 \beta (\sin \beta + \cos \beta \tan \alpha_2)^2 \\ c &= \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \beta - 1) \end{aligned} \quad (2.3.24)$$

とおき,

$$\begin{aligned} \text{さらに,} \quad A &= a(a \cdot \sigma_{wy}^2 - b \cdot \sigma_{sy}^2) \\ B &= c(a \cdot \sigma_{wy}^2 - b \cdot \sigma_{sy}^2) \\ C &= c^2 \cdot \sigma_{sy}^2 - b(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \beta) \cdot \sigma_{sy}^2 \end{aligned} \quad (2.3.25)$$

とおく.

式(2.3.23)の両辺を 2 乗し,  $X$  について解くと, 以下の  $\beta$  と  $X$  の関係が得られる.

$$X = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (2.3.26)$$

### 【機構 S】

任意の断面形状を有する隅肉溶接継目について、機構 S の崩壊荷重は以下の式で示される。

$$s q_p = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{sy} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \alpha_1 \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.3.27)$$

ある斜方角度  $\theta$  に対する崩壊機構の未知数は、 $X$  であり、以下の式によって上界が得られる。

$$\frac{\partial_w q_p}{\partial X} = 0 \quad (2.3.28)$$

式(2.3.27)を  $X$  で偏微分すると以下の式が得られる。

$$\frac{\partial_s q_p}{\partial X} = \left\{ \frac{-\sin \theta \cos \theta + X \sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \cos^2 \alpha_1 + X \cos^2 \theta \cos^2 \alpha_1}{(\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2) \cos \alpha_1 \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}} \cdot \sigma_{sy} - \sin \theta \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.3.29)$$

式(2.3.28)より、

$$\left\{ \frac{-\sin \theta \cos \theta + X \sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \cos^2 \alpha_1 + X \cos^2 \theta \cos^2 \alpha_1}{(\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2) \cos \alpha_1 \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}} \cdot \sigma_{sy} - \sin \theta \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} = 0 \quad (2.3.30)$$

式(2.3.30)を整理すると、

$$X (\cos^2 \theta \cos^2 \alpha_1 + \sin^2 \theta) + \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \alpha_1 - 1) = \sin \theta \sin \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \tan \alpha_2) \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1} \quad (2.3.31)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \quad a &= \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \cos^2 \alpha_1 \\ b &= \sin^2 \theta \sin^2 \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \tan \alpha_2)^2 \\ c &= \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \alpha_1 - 1) \end{aligned} \quad (2.3.32)$$

とおき、

$$\begin{aligned} \text{さらに、} \quad A &= a(a - b) \\ B &= c(a - b) \\ C &= c^2 - b(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \beta) \end{aligned} \quad (2.4.33)$$

とおく。

式(2.3.31)の両辺を 2 乗し、 $X$  について整理すると、以下の  $X$  が得られる。

$$X = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (2.3.34)$$

### 2.3.3 解析結果

図 2.3.7 に示す等脚隅肉溶接( $\alpha_1=0^\circ$ ,  $\alpha_2=45^\circ$ )を対象として, 斜方角度 $\theta(=0^\circ\sim 90^\circ)$ および強度比 $\rho_y(=0.6\sim 1.6)$ を変化させた数値計算を行った.

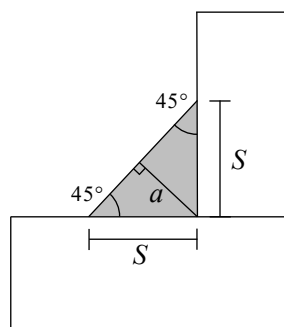


図 2.3.7 等脚隅肉溶接

#### (i) $\rho_y=1.0$ の場合の解析結果

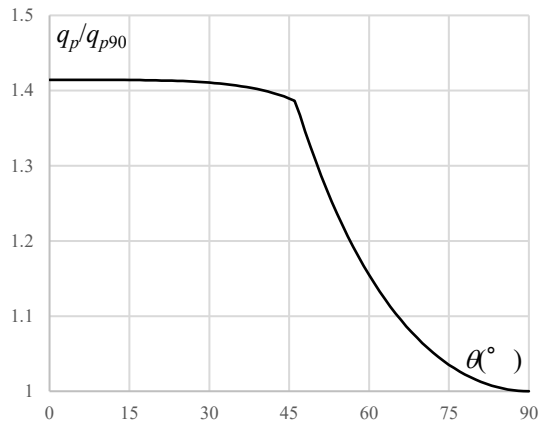
等脚隅肉で溶接部と母材の強度が同強度( $\rho_y=1.0$ )のときの解析結果を図 2.3.8 に示す.

(a)に崩壊荷重  $q_u$  と斜方角度  $\theta$  の関係を示す. なお, 図の縦軸は, 側面隅肉溶接の耐力  $q_{p90}$  で除して無次元化している.  $\rho_y=1.0$  の場合,  $\theta=0^\circ$ (前面隅肉溶接)の  $q_p$  は  $\theta=90^\circ$ (側面隅肉溶接)の  $q_p$  の  $\sqrt{2}=1.41$  倍となる. 斜方角度  $\theta=0^\circ$  から約  $\theta=46^\circ$  までの範囲では前面隅肉の耐力とほぼ同等の値をとり,  $\theta=47^\circ$  以上になると耐力は側面隅肉の耐力へと急激に漸近する. その境界を詳細に検証すると,  $46.1813^\circ$  から  $46.1814^\circ$  の間で崩壊機構がせん断変形の上に切り替わる.

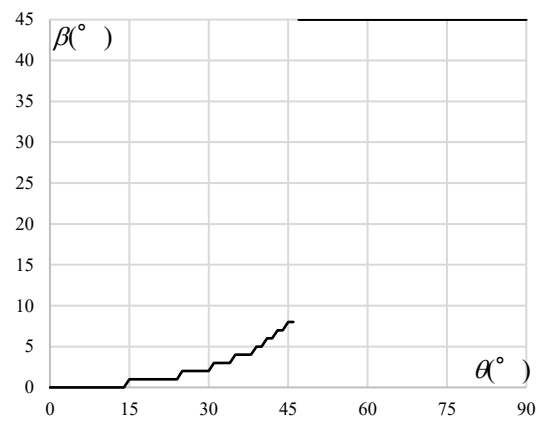
(b)に荷重作用面と降伏面①のなす降伏面角度  $\beta$  と斜方角度  $\theta$  の関係を示す.  $\theta=0^\circ$  のとき,  $\beta=0^\circ$  であり,  $\theta$  が大きくなると,  $\beta$  も大きくなる.  $\theta=47^\circ$  以上になると  $\beta=45^\circ$  となり, 降伏面はのど断面と一致する. 段階的に変化しているように見えるのは, 斜方角度, 降伏面角度ともに  $1^\circ$  刻みで検討しているためである.

(c)に荷重作用方向と荷重作用直交方向の塑性変形増分の比  $X$  と斜方角度  $\theta$  の関係を示す.  $\theta=0^\circ$ ,  $90^\circ$  のとき,  $X=0$  となり, 荷重作用方向にのみ塑性変形が生じている.  $\theta=0^\circ$  および  $90^\circ$  ではないとき,  $X>0$  となり, 荷重作用直交方向にも塑性変形が生じている.

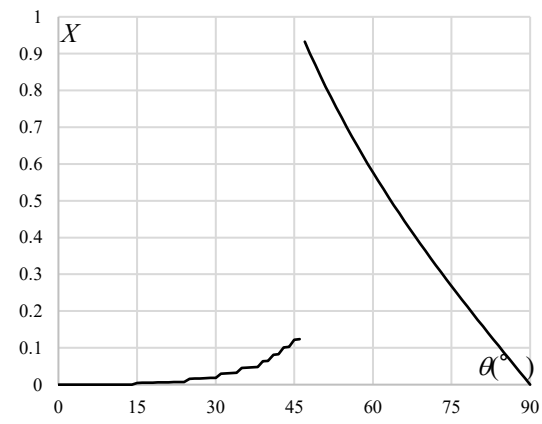
(d)に溶接継目に対する変形方向  $\theta_p$  の関係と斜方角度  $\theta$  を示す.  $\theta=0^\circ$  のとき溶接線の直交する方向に変形し,  $\theta=90^\circ$  のとき溶接線方向に変形することを表す.  $\theta=0^\circ$  から  $\theta=46^\circ$  の範囲では, 変形は荷重作用方向とほぼ一致し,  $\theta=47^\circ$  以上になると溶接線方向に変形が生じている.



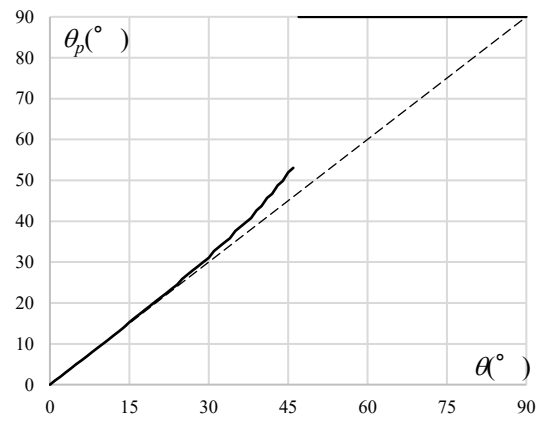
(a)最大耐力



(b)荷重作用面と降伏面①のなす角度



(c) $X$



(d)変形方向

図 2.3.8 解析結果

## (ii)強度比の影響

溶接部と母材の強度比 $\rho_y$ を0.6,0.8,1.0,1.2,1.4,1.6に変化させたときの崩壊荷重 $q_p$ と斜方角度 $\theta$ の関係を図2.3.9に示す．なお，縦軸は強度比 $\rho_y=1.0$ の側面溶接の崩壊荷重 $q_{p90}$ で無次元化している．また，図2.3.10に $q_p$ を決定している崩壊機構を示す．

$\alpha_1 = 0^\circ$ ， $\alpha_2 = 45^\circ$ の隅肉形状は特殊で，強度比 $\rho_y=1.0$ の場合， $0^\circ \leq \theta \leq 14.7^\circ$ の範囲では，降伏面①のみが界面( $\beta = \alpha_1 = 0^\circ$ )に形成される崩壊機構 S となる．降伏面①の内力仕事だけで $q_p$ が決定されるため， $q_p$ は $\theta$ によらず，一定の値となる． $14.7^\circ < \theta \leq 46.1^\circ$ の範囲では，溶接部脚断面に近い位置( $1^\circ \leq \beta \leq 8^\circ$ )に降伏面①が形成され，降伏面②が界面に形成される崩壊機構 W となり，斜方角度 $\theta$ が大きくなるに伴い，崩壊荷重が若干低下する．

$46.1^\circ < \theta \leq 90^\circ$ の範囲では崩壊機構 W( $\beta = 45^\circ$ )となり，降伏面①のみがのど断面に形成され，溶接線方向のせん断変形のみが発生し，斜方角度 $\theta$ が大きくなるに従い，崩壊荷重が低下する．強度比 $\rho_y = 1.0$ 以下の範囲では，強度比 $\rho_y = 1.0$ と同様の崩壊機構を示し，溶接金属強度が低くなるにつれ耐力が低下する．強度比 $\rho_y=1.2$ の場合， $0^\circ \leq \theta \leq 58^\circ$ の範囲では降伏面①のみが界面( $\beta = \alpha_1 = 0^\circ$ )に形成される崩壊機構 S となる． $58^\circ < \theta \leq 90^\circ$ の範囲では崩壊機構 W( $\beta = 45^\circ$ )となり，降伏面①のみがのど断面に形成され，溶接線方向のせん断変形のみが発生する．強度比1.023までは溶接部脚断面に近い位置( $1^\circ \leq \beta \leq 8^\circ$ )に降伏面①が形成される崩壊機構 W を示し，さらに強度比が大きくなるにつれて $\theta$ が大きな範囲でも崩壊機構 S を示すようになり，強度比 $\rho_y = 1.41$ を超えると崩壊機構 S のみとなる．崩壊機構 S となる範囲ではオーバーマッチの場合は母材の降伏点 $\sigma_{by}$ によって耐力が決定されるため，溶接金属強度が高くなっても耐力は上昇しない．

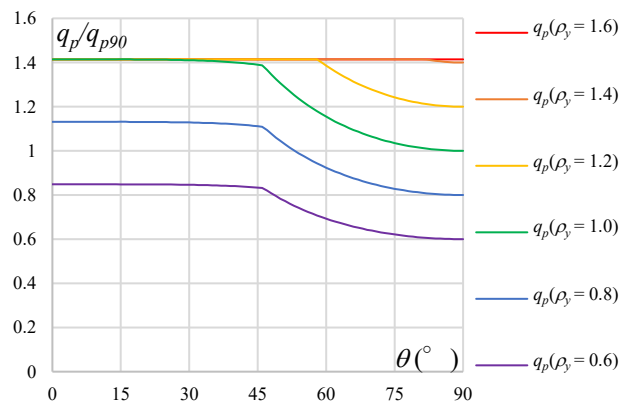


図 2.3.9 極限解析結果（強度比の影響）

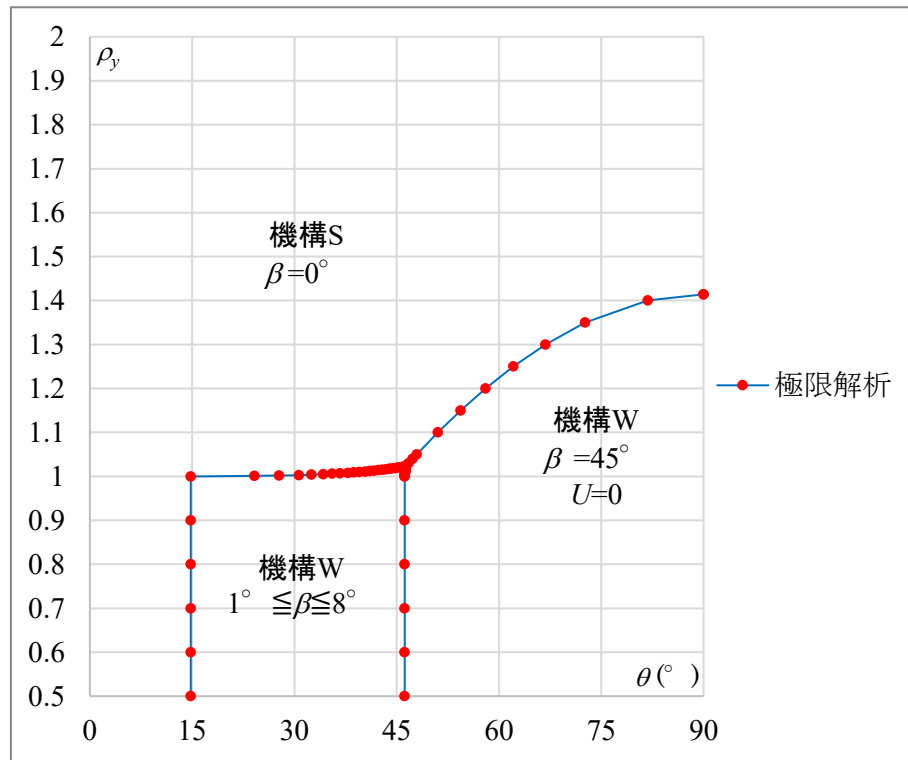


図 2.3.10 極限解析における崩壊機構の分類

### (iii)溶込みの影響

図 2.3.11 に強度比 $\rho_y = 1.0$ ,  $\alpha_2 = 45^\circ$  の場合を対象として, 斜方角度 $\theta$ および溶込みを $\alpha_1 = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  と変化させた極限解析結果を示し, 溶け込みの影響を検討する.

溶込み無しの $\alpha_1 = 0^\circ$  の場合は前述している強度比 $\rho_y = 1.0$ と同様である. 溶込み $\alpha_1 = 10^\circ$  の場合,  $0^\circ \leq \theta \leq 46^\circ$  の範囲では, 降伏面①が界面( $\beta = \alpha_1 = 10^\circ$ )に形成され, 降伏面②も形成される崩壊機構 S となる.  $\theta = 0^\circ$  の場合,  $\alpha_1 = 10^\circ$  では $\alpha_1 = 0^\circ$  と比較して崩壊荷重 $q_p$  は 1.24 倍となり, 斜方角度 $\theta$ が大きくなるに伴い, 崩壊荷重 $q_p$  が低下する.  $47^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  の範囲では, 崩壊機構 W( $\beta = 45^\circ$ )となり, 降伏面①のみがのど断面に形成され, 溶接線方向のせん断変形に支配される崩壊機構となる.  $\theta = 90^\circ$  である側面隅肉溶接の場合,  $\alpha_1 = 0^\circ$  と比較して, のど断面積が上昇する分, 崩壊荷重が上昇し, 1.18 倍となる. 溶込み $\alpha_1 = 20^\circ$  の場合,  $0^\circ \leq \theta \leq 44^\circ$  の範囲では, 降伏面①が界面( $\beta = \alpha_1 = 20^\circ$ )に形成され, 降伏面②も形成される崩壊機構 S となる.  $\theta = 0^\circ$  の場合,  $\alpha_1 = 20^\circ$  では $\alpha_1 = 0^\circ$  と比較して崩壊荷重は 1.63 倍となり, 斜方角度 $\theta$ が大きくなるに伴い,  $\alpha_1 = 10^\circ$  の場合より崩壊荷重 $q_p$  の減少率大きい.  $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  の範囲では, 崩壊機構 W( $\beta = 45^\circ$ )となり, 降伏面①のみがのど断面に形成され, 溶接線方向のせん断変形に支配される崩壊機構となる.  $\theta = 90^\circ$  である側面隅肉溶接の場合,  $\alpha_1 = 0^\circ$  と比較して, 崩壊荷重 $q_p$  が上昇し, 1.36 倍となる.

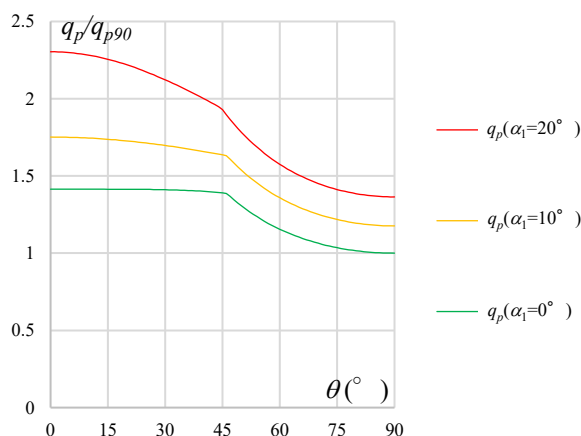


図 2.3.11 極限解析結果 (溶込みの影響)

## 2.3.4 有限要素数値解析との比較

2.3.3 節で得られた理論解の妥当性を検証するため、有限要素数値解析による塑性耐力との比較を行った。解析には汎用有限要素法解析プログラム ABAQUS2019 を用いた。塑性域における構成方程式は von Mises の降伏条件、等方硬化則および連合流れ則に従うものとした。

### 【解析計画】

過去の実験に供した試験体に基づき作成した FEA モデルを図 2.3.12 に示す。解析モデルは図 2.3.12 (a)に示すように試験体に治具を溶接した形状とし、8 節点ソリッド要素(C3D8R)を用いて作成した 1/2 モデルである。溶接部形状は脚長  $S$  を 7mm とした溶け込みの無い等脚隅肉溶接の設計寸法(図 2.3.12 (b)参照)でモデル化した。载荷は上下端をピンおよびローラー固定とし、垂直方向に強制変位を与えた。表 2.3.1 に解析モデル一覧を示す。材料特性には溶接部と母材の強度比  $\rho_f$  を 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 および 1.6 とした完全弾塑性型の応力-ひずみ関係を入力した。斜方角度  $\theta$  は  $0^\circ \sim 90^\circ$  までを  $15^\circ$  刻みとした各 7 体の計 42 体である。

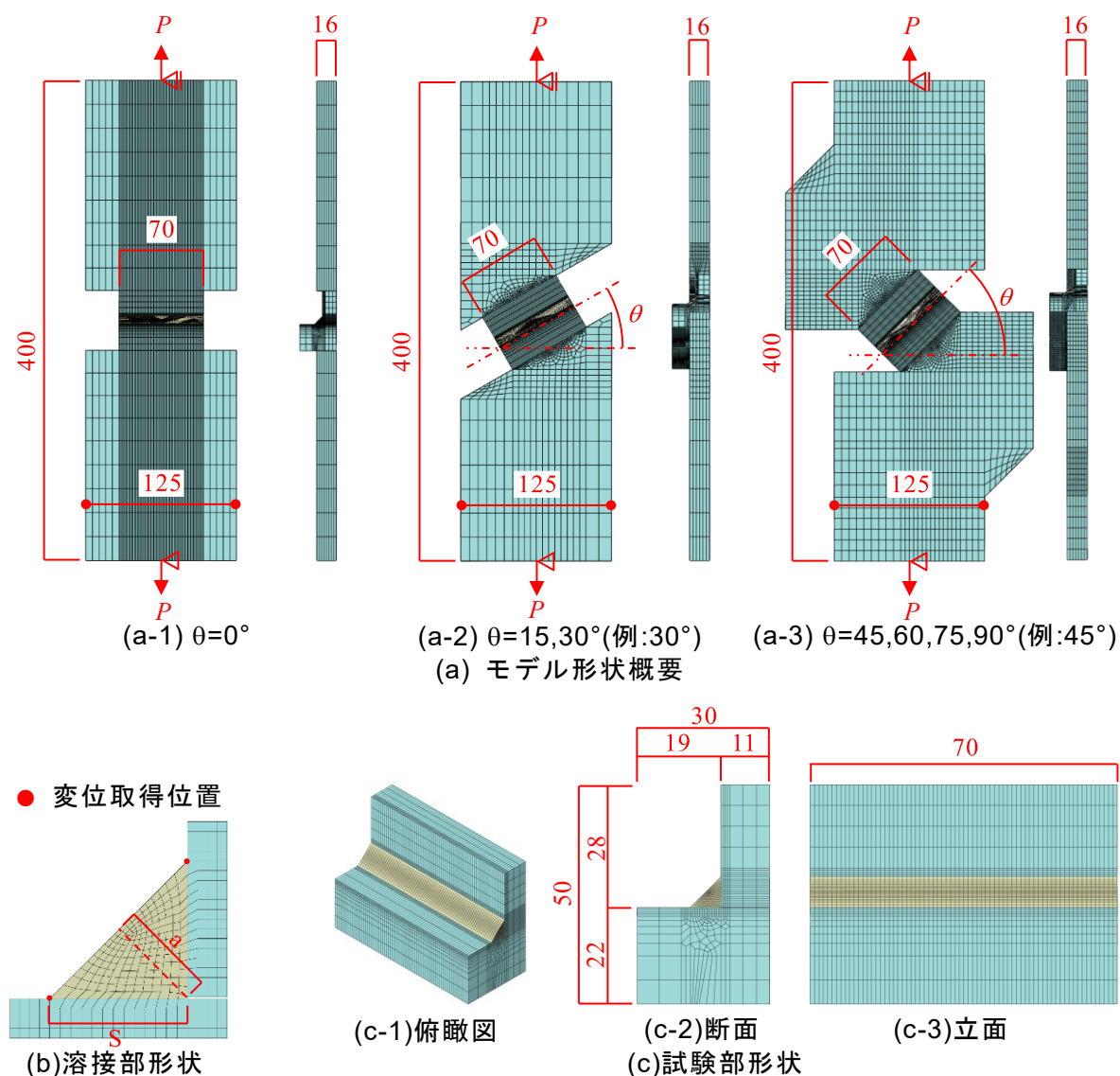


図 2.3.12 解析モデル図(mm)

表 2.3.1 解析モデル一覧

|           | S    | a    | $\alpha_1$     | $\alpha_2$     | $\theta$       | $\sigma_{wy}$         | $\sigma_{by}$         | $\rho_y$ |
|-----------|------|------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------|
|           | (mm) | (mm) | ( $^{\circ}$ ) | ( $^{\circ}$ ) | ( $^{\circ}$ ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) |          |
| FW-0-1.6  | 7    | 4.9  | 0              | 45             | 0              | 520                   | 325                   | 1.6      |
| FW-15-1.6 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| FW-30-1.6 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| FW-45-1.6 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| FW-60-1.6 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| FW-75-1.6 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| FW-90-1.6 |      |      |                |                | 90             |                       |                       |          |
| FW-0-1.4  |      |      |                |                | 0              | 455                   |                       | 1.4      |
| FW-15-1.4 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| FW-30-1.4 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| FW-45-1.4 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| FW-60-1.4 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| FW-75-1.4 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| FW-90-1.4 |      |      |                |                | 90             |                       |                       |          |
| FW-0-1.2  |      |      |                |                | 0              | 390                   |                       | 1.2      |
| FW-15-1.2 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| FW-30-1.2 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| FW-45-1.2 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| FW-60-1.2 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| FW-75-1.2 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| FW-90-1.2 |      |      |                |                | 90             |                       |                       |          |
| FW-0-1.0  |      |      |                |                | 0              | 325                   |                       | 1        |
| FW-15-1.0 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| FW-30-1.0 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| FW-45-1.0 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| FW-60-1.0 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| FW-75-1.0 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| FW-90-1.0 |      |      |                |                | 90             |                       |                       |          |
| FW-0-0.8  |      |      |                |                | 0              | 260                   |                       | 0.8      |
| FW-15-0.8 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| FW-30-0.8 | 30   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| FW-45-0.8 | 45   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| FW-60-0.8 | 60   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| FW-75-0.8 | 75   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| FW-90-0.8 | 90   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| FW-0-0.6  | 0    | 195  | 0.6            |                |                |                       |                       |          |
| FW-15-0.6 | 15   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| FW-30-0.6 | 30   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| FW-45-0.6 | 45   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| FW-60-0.6 | 60   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| FW-75-0.6 | 75   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| FW-90-0.6 | 90   |      |                |                |                |                       |                       |          |

### 【解析結果】

図 2.3.13 において、FEA から取得する塑性耐力  $FEAP_p$  を強度比  $\rho_y=1.0$  を例として、荷重  $P$  と荷重方向変形  $u$  の関係において●印で示す。  $\theta=0$  を例として示すように、塑性耐力は接線剛性が初期剛性の  $1/100$  に低下した時の荷重と定義しており、完全弾塑性の材料特性を入力した解析モデルにおいて、荷重変形関係における荷重がほとんど上昇しなくなった状態である。ここで、荷重方向変形  $u$  は図 2.3.12 (b)に赤点で示す節点の変位を溶接線中央断面で取得し、それら 2 点の相対変位とした。

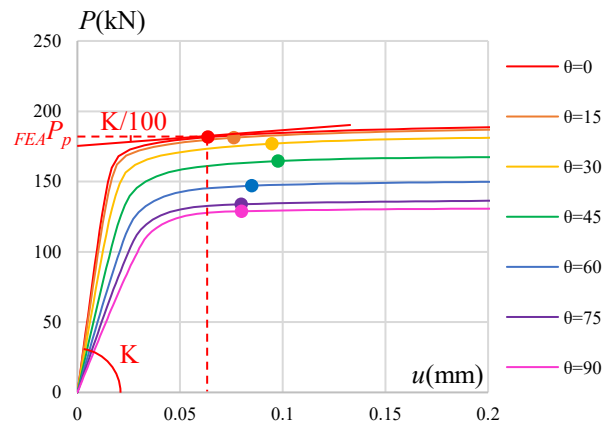
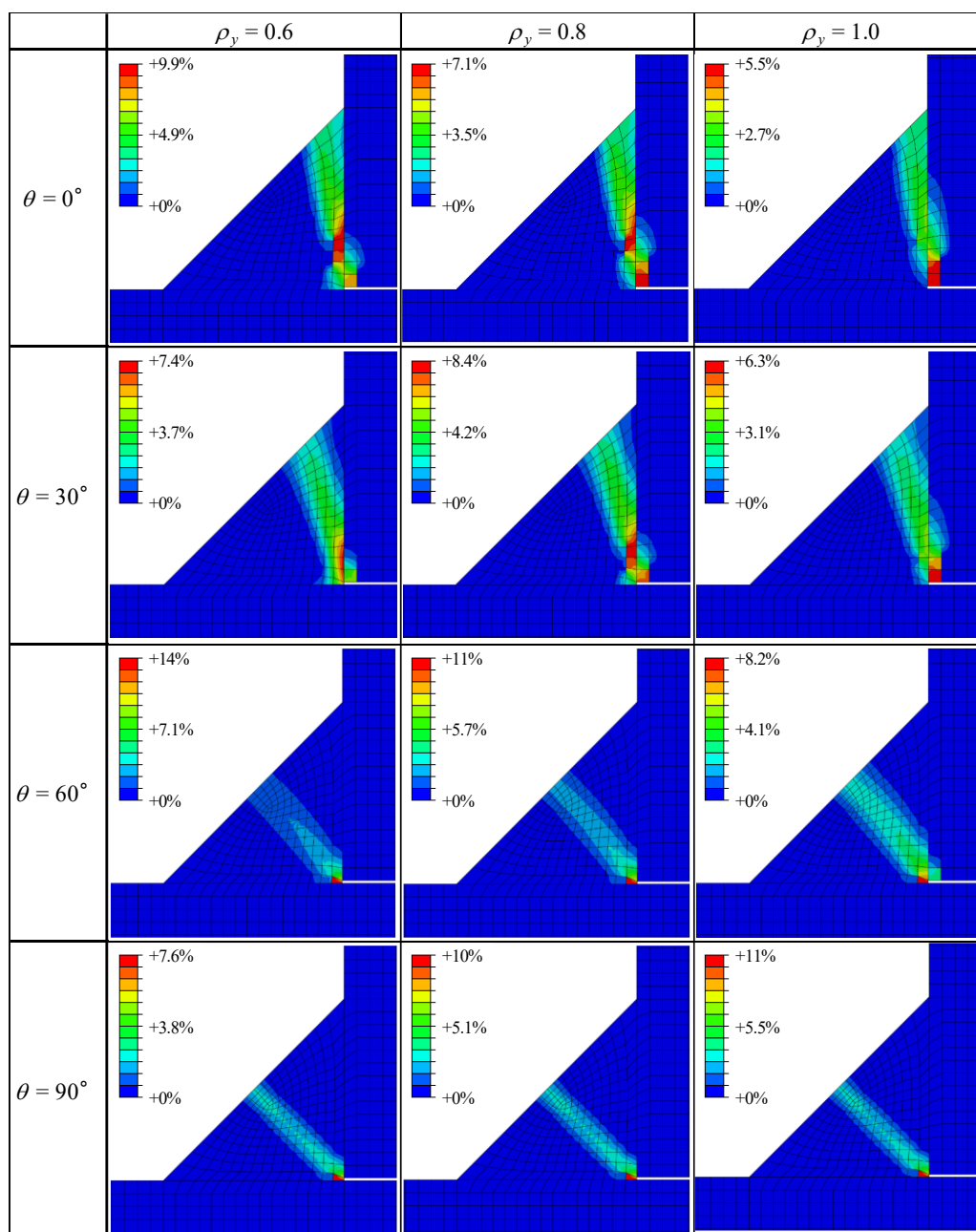


図 2.3.13  $P-u$  関係（強度比  $\rho_y=1.0$ ）

### (i)強度比の影響

$\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ について、接線剛性が初期剛性の  $1/100$  に低下した時のステップの相当塑性歪のコンター図を図 2.3.14 に示す。コンター図から、 $\theta=0^\circ$  の場合、界面において強度の低い方の塑性化が卓越していることがわかる。崩壊機構が界面に形成される場合、母材と溶接金属の低い方の強度を使用する仮定と概ね一致する。ただし、ルート部の母材側あるいは溶接止端部においては、周囲からの拘束や応力集中の影響を受け、強度の高い方の塑性化が進展する部分も存在する。 $\theta=90^\circ$  の場合、 $\rho_y=1.4, 1.6$  を除き、のど断面のせん断変形により崩壊機構が決定される。これはのど断面長さと脚長の比が $\sqrt{2}=1.41$ なので $\rho_y=1.4, 1.6$  の場合は界面に近い範囲の塑性化が進展している。強度比に着目すると、 $\rho_y=1.4$  以下では、斜方角度が大きくなるに伴い、降伏面の発生場所がのど断面に近づき、 $\rho_y=1.6$  では、 $\theta$  の全領域にわたり、界面の母材側の塑性化が卓越している。以上に述べた傾向は、崩壊機構の降伏面の形成パターンと対応している。



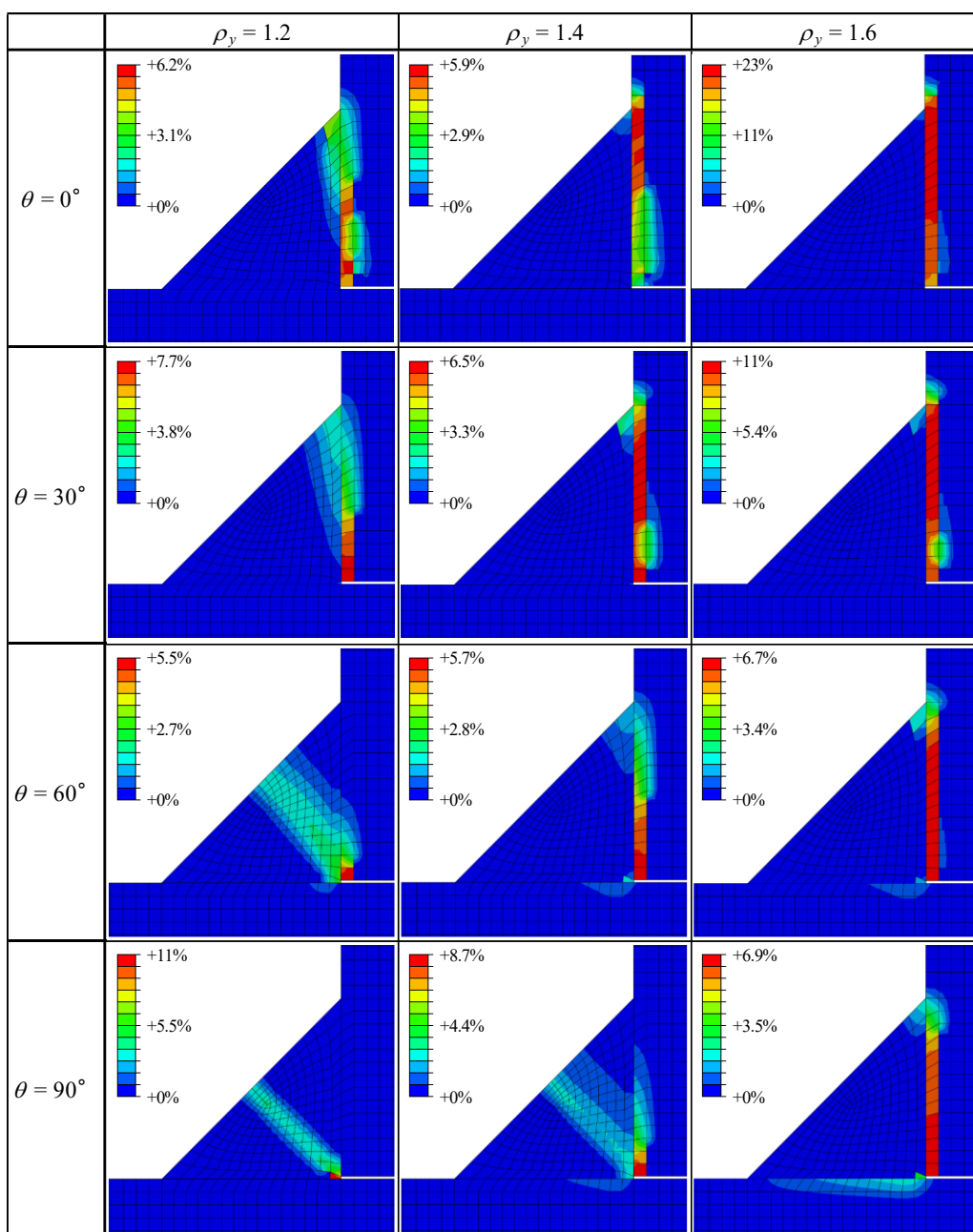


図 2.3.14 相当塑性歪の分布図（強度比の影響）

崩壊荷重の理論値  $P_p$  と FEA から取得した塑性耐力  $FEAP_p$  の比較を表 2.3.2 および図 2.3.15 に示す。脚長は 7mm，溶接長は 70mm とした。イーブンマッチとなる強度比を 1.0 とした場合では， $FEAP_p$  と  $P_p$  の比率が  $FEAP_p/P_p=0.91\sim1.00$ (平均値 0.97)。オーバーマッチとなる強度比を 1.2 とした場合では  $0.95\sim1.08$ (平均値 1.01)，強度比を 1.4 とした場合では  $0.97\sim1.10$ (平均値 1.04)，強度比を 1.6 とした場合では  $1.00\sim1.12$ (平均値 1.06) となった。アンダーマッチとなる強度比を 0.8 とした場合では  $0.95\sim1.08$ (平均値 1.02)，強度比 0.6 とした場合では  $0.98\sim1.20$ (平均値 1.06)。強度比が  $\rho_y=1.0$  から離れるに従い， $\theta=0^\circ$  近傍において  $P_p$  は  $FEAP_p$  を過小評価する傾向にある。 $\theta=0^\circ$  近傍では機構 S に支配され，降伏面①は母材と溶接金属の界面に形成される。FEA では，強度の高い側が低い側の塑性化を拘束し，強度比に差が生じるほどこの塑性拘束の影響が大きく表れることになる。このため，溶接金属強度と母材強度の小さい方ですべり耐力を算定した極限解析の結果  $P_p$  が  $FEAP_p$  を過小評価したと考えられる。しかし， $\theta$  および  $\rho_y$  の変化に伴う塑性耐力の変化の傾向を概ね捉えており，崩壊荷重  $q_p$  は耐力評価法として有効である。

表 2.3.2  $FEAP_p$  と  $P_p$  の比較

| モデル名      | $FEAP_p$<br>(kN) | $P_p$<br>(kN) | $FEAP_p/P_p$ |
|-----------|------------------|---------------|--------------|
| FW-0-1.6  | 206.1            | 183.9         | 1.12         |
| FW-15-1.6 | 204.0            | 183.9         | 1.11         |
| FW-30-1.6 | 200.6            | 183.9         | 1.09         |
| FW-45-1.6 | 195.2            | 183.9         | 1.06         |
| FW-60-1.6 | 190.1            | 183.9         | 1.03         |
| FW-75-1.6 | 185.6            | 183.9         | 1.01         |
| FW-90-1.6 | 183.5            | 183.9         | 1.00         |
| FW-0-1.4  | 202.1            | 183.9         | 1.10         |
| FW-15-1.4 | 200.9            | 183.9         | 1.09         |
| FW-30-1.4 | 197.6            | 183.9         | 1.07         |
| FW-45-1.4 | 191.6            | 183.9         | 1.04         |
| FW-60-1.4 | 184.9            | 183.9         | 1.01         |
| FW-75-1.4 | 179.7            | 183.9         | 0.98         |
| FW-90-1.4 | 177.2            | 182.0         | 0.97         |
| FW-0-1.2  | 197.7            | 183.9         | 1.08         |
| FW-15-1.2 | 195.3            | 183.9         | 1.06         |
| FW-30-1.2 | 191.9            | 183.9         | 1.04         |
| FW-45-1.2 | 183.4            | 183.9         | 1.00         |
| FW-60-1.2 | 170.7            | 180.2         | 0.95         |
| FW-75-1.2 | 159.1            | 161.5         | 0.99         |
| FW-90-1.2 | 154.3            | 156.0         | 0.99         |
| FW-0-1.0  | 181.8            | 183.9         | 0.99         |
| FW-15-1.0 | 181.7            | 183.9         | 0.99         |
| FW-30-1.0 | 175.4            | 183.4         | 0.96         |
| FW-45-1.0 | 164.7            | 180.7         | 0.91         |
| FW-60-1.0 | 147.3            | 150.1         | 0.98         |
| FW-75-1.0 | 134.1            | 134.6         | 1.00         |
| FW-90-1.0 | 128.9            | 130.0         | 0.99         |
| FW-0-0.8  | 159.6            | 147.1         | 1.08         |
| FW-15-0.8 | 157.6            | 147.1         | 1.07         |
| FW-30-0.8 | 151.8            | 146.7         | 1.03         |
| FW-45-0.8 | 137.5            | 144.5         | 0.95         |
| FW-60-0.8 | 119.6            | 120.1         | 1.00         |
| FW-75-0.8 | 107.2            | 107.7         | 1.00         |
| FW-90-0.8 | 103.4            | 104.0         | 0.99         |
| FW-0-0.6  | 132.7            | 110.3         | 1.20         |
| FW-15-0.6 | 128.7            | 110.3         | 1.17         |
| FW-30-0.6 | 120.2            | 110.0         | 1.09         |
| FW-45-0.6 | 106.3            | 108.4         | 0.98         |
| FW-60-0.6 | 91.3             | 90.1          | 1.01         |
| FW-75-0.6 | 80.6             | 80.8          | 1.00         |
| FW-90-0.6 | 77.5             | 78.0          | 0.99         |

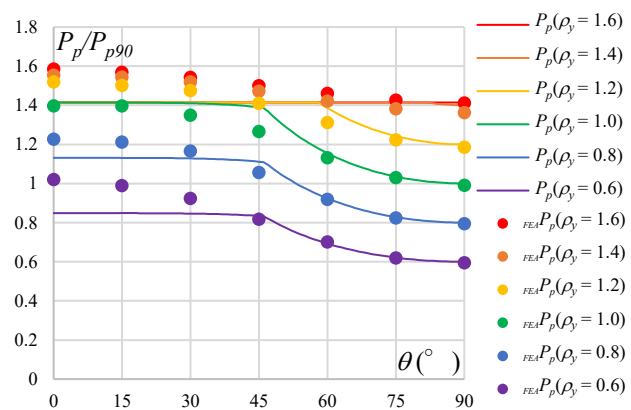
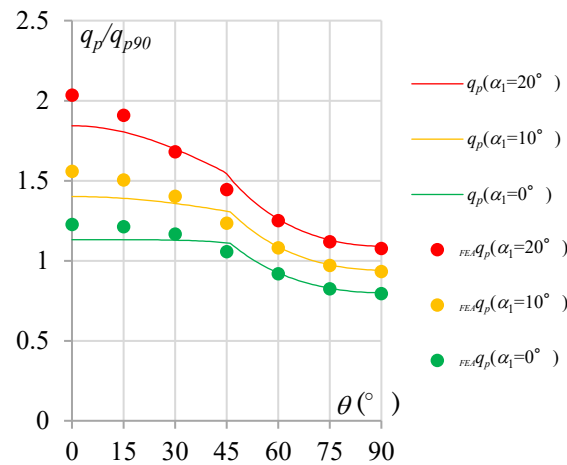


図 2.3.15  $FEAP_p$  と  $P_p$  の比較(強度比の影響)

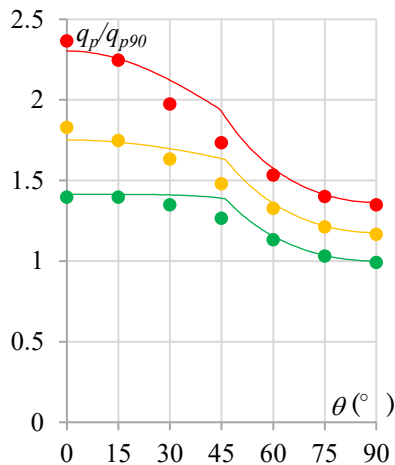
## (ii)溶込みの影響

溶接部は脚長を 7mm とした隅肉溶接の設計寸法から、溶込みを  $\alpha_1=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  と変化させたモデルを作成した。材料特性は  $\rho_y = 0.8, 1.0, 1.2$  とし、斜方角度は  $0^\circ \sim 90^\circ$  までも  $15^\circ$  刻みとした各 7 体の計 63 体である。

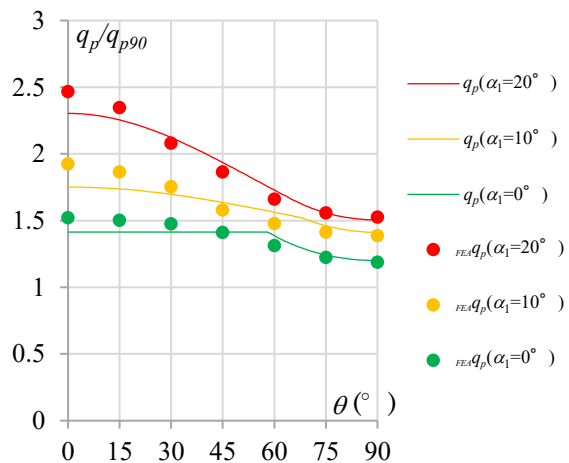
極限解析より得られた単位長さ当たりの崩壊荷重  $q_p$  と FEA から得られる塑性耐力  $FEAq_p$  の比較を図 2.3.16 に示す。 $q_p$  と  $FEAq_p$  の比は、 $\rho_y = 1.0$  とした場合では、 $FEAP_p / P_p = 0.90 \sim 1.04$  (平均値 0.98),  $\rho_y = 1.2$  とした場合では  $0.95 \sim 1.10$  (平均値 1.01),  $\rho_y = 0.8$  とした場合では  $0.94 \sim 1.11$  (平均値 1.02) となり、オーバーマッチおよびアンダーマッチでは斜方角度の小さい範囲で崩壊荷重が過小評価傾向となるが、これは強度比の影響で前述している理由と同様である。しかし、 $\theta$  および  $\rho_y$  の変化に伴う塑性耐力の変化の傾向を概ね捉えており、崩壊荷重  $q_p$  は溶込みを設けた場合でも耐力評価法として有効である。



(a)  $\rho_y=0.8$



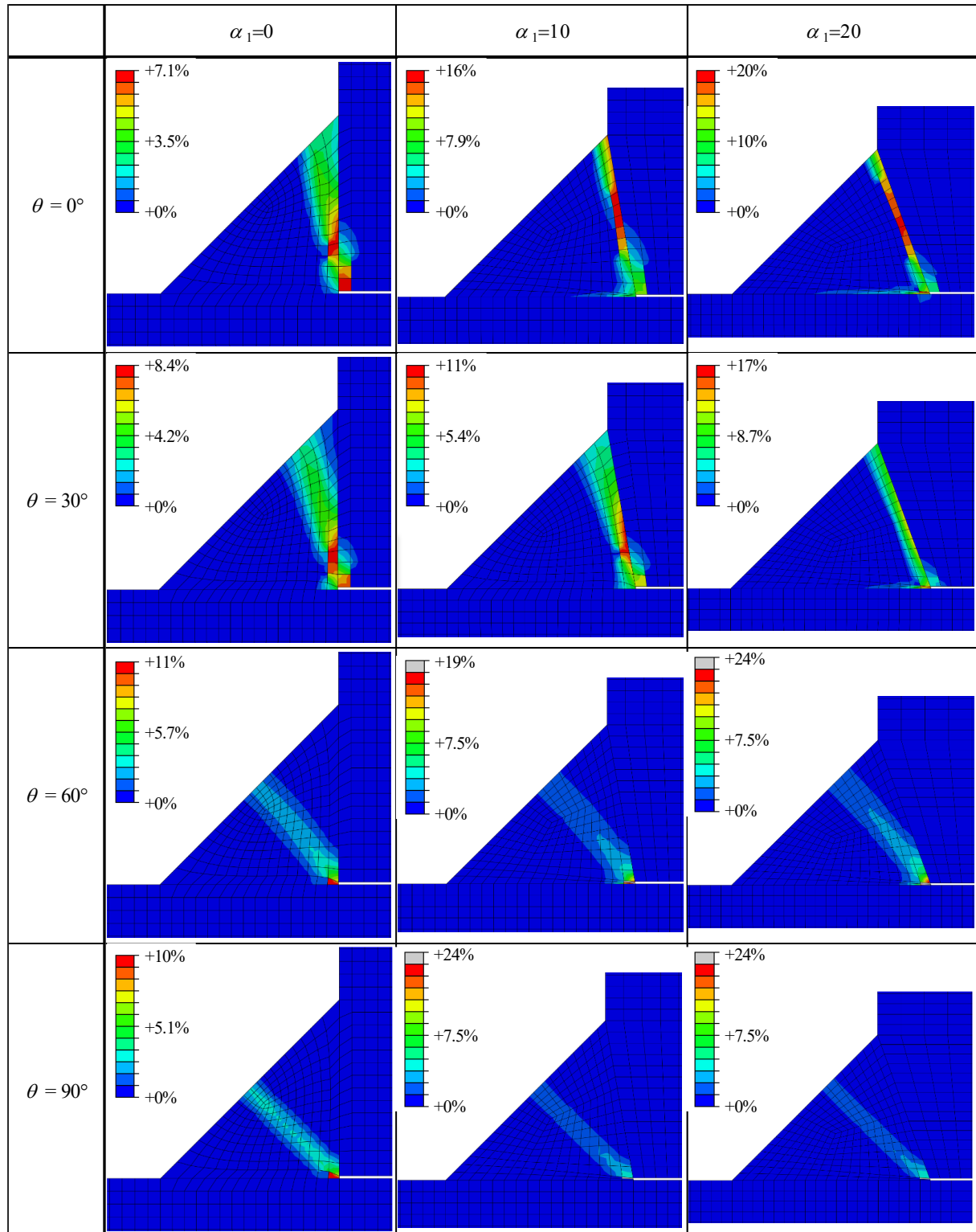
(b)  $\rho_y=1.0$



(c)  $\rho_y=1.2$

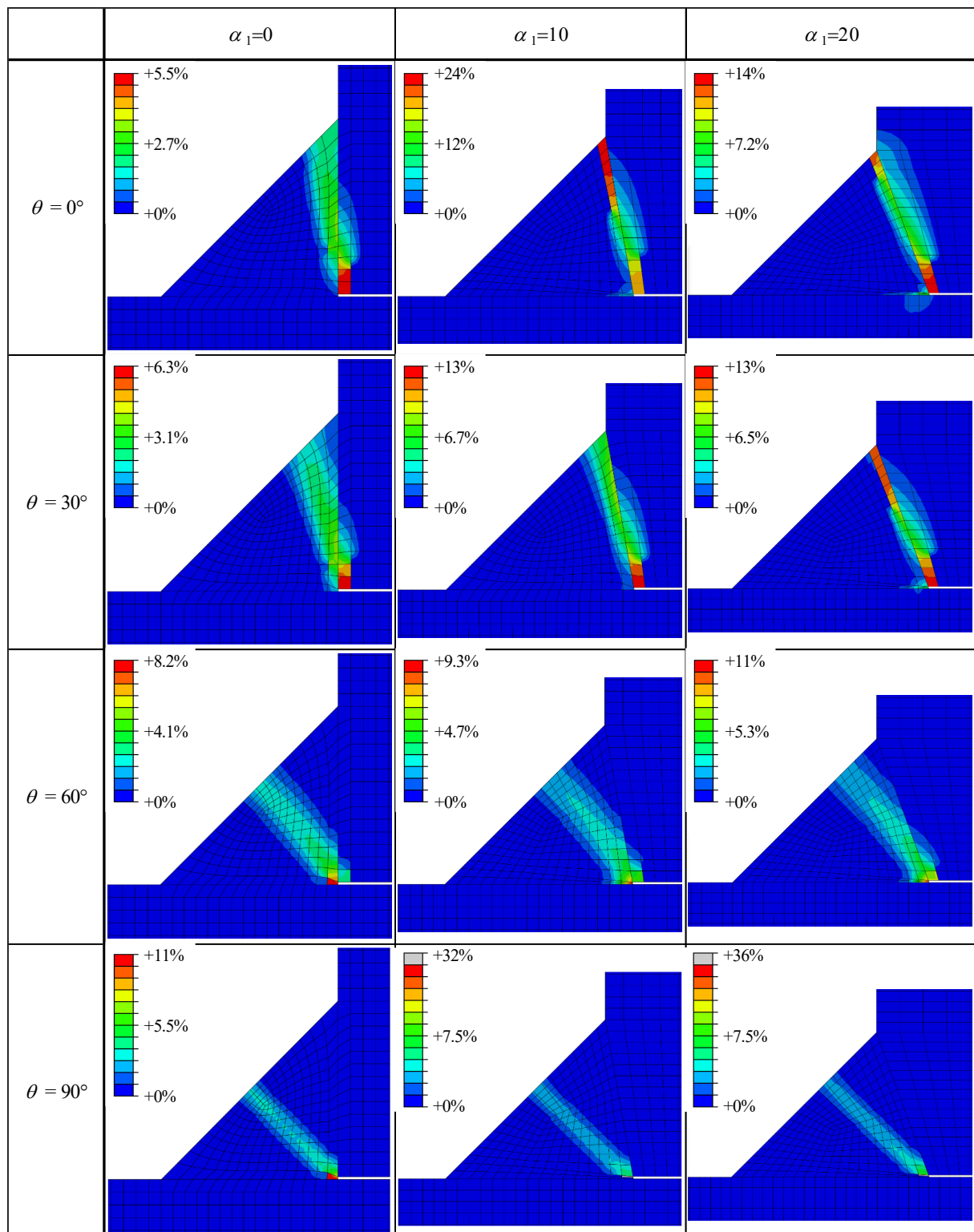
図 2.3.16  $FEAq_p$  と  $q_p$  の比較 (溶け込みの影響)

相当塑性歪のコンター図の例を図 2.3.17 に示す． $\theta = 0^\circ$  に着目すると，各強度比で  $\alpha_1 = 0^\circ$  から溶込みが大きくなるに伴い，降伏面②に該当する位置に塑性化が表れる．ただし，相当塑性歪の値は，降伏面①に該当する位置の値に比べて小さい．一方， $\theta = 90^\circ$  では， $\rho_y = 0.8, 1.0$  の場合，のど断面の塑性化のみが卓越し， $\rho_y = 1.2$  の場合， $\alpha_1 = 20^\circ$  では界面の母材側が塑性化している．これはのど断面と脚断面の長さの比が 1.10 であるため，

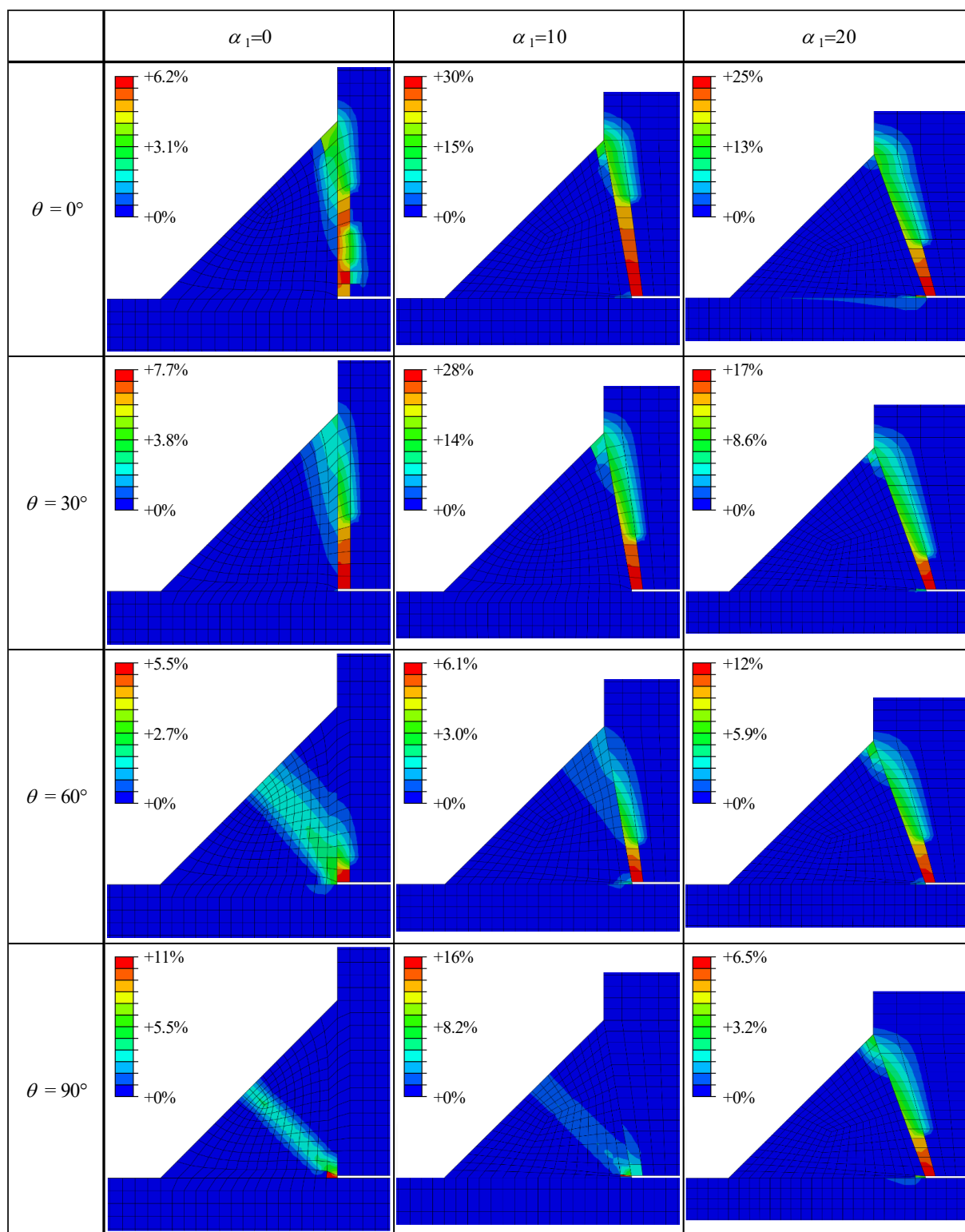


(a)  $\rho_y = 0.8$

$\rho_y = 1.2$  の  $\alpha_1 = 20^\circ$  では界面の母材側に降伏面が発生する。また、 $\theta$  の増加に伴い、降伏面②の相当塑性歪は小さくなり、降伏面①の発生場所はどの断面に近づいていく。



(b)  $\rho_y = 1.0$



(c)  $\rho_y=1.2$

図 2.3.17 相当塑性歪の分布図（溶け込みの影響）

## 2.4 斜方異形隅肉溶接継目

図 2.4.1 に示す理想化された断面形状を有する異形隅肉溶接継目が斜方角度  $\theta$  の方向に載荷された場合の単位長さ当たりの崩壊荷重を求める．溶接継目の断面形状は図 2.4.2 に示すとおりサイズ  $S$ (ルートから止端までの距離)および角度  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  によって与えられる．今回対象とする異形隅肉溶接において,  $\alpha_1=\alpha_2=30^\circ$ となる場合を GW,  $\alpha_1=\alpha_2=40^\circ$ となる場合を 50W と呼ぶ．

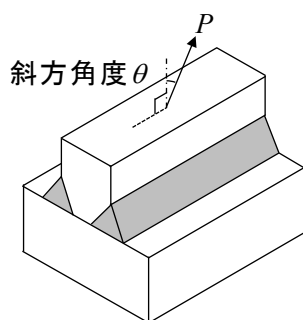


図 2.4.1 斜方溶接継目

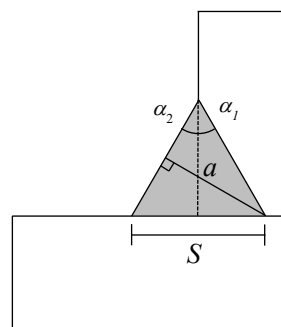


図 2.4.2 隅肉溶接の断面形状

図 2.4.3 に示すように隅肉溶接継目の荷重作用線方向の変位を  $u$ , それと直交する方向の変位を  $v$  とし,  $X=v/u$  とする．溶接線方向の変位  $V$  およびそれと直交する方向の変位  $U$  は, 次式で表される．

$$U = u \cos \theta - v \sin \theta \quad (2.4.1)$$

$$V = u \sin \theta + v \cos \theta \quad (2.4.2)$$

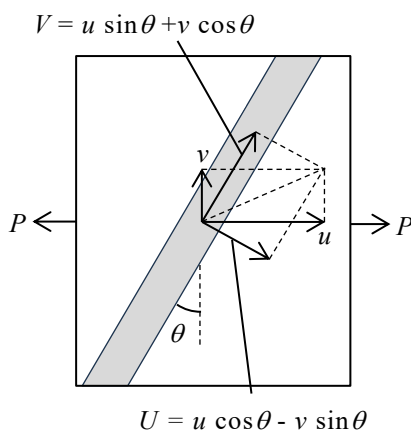


図 2.4.3 塑性変形増分

崩壊機構を図 2.4.4 に示すように仮定する．ルート部から  $\beta$  の角度で降伏面①が形成され，発生場所により (a)溶接金属 (b)界面 (c)母材に場合分けされる．ただし，降伏面①では，すべりだけが許容されるため，降伏面②を仮定する．この崩壊機構に対して，降伏面①内の溶接線方向を  $w$  軸， $w$  軸に直交する方向を  $t$  軸，降伏面①に直交する方向を  $n$  軸とした  $n$ - $t$ - $w$  直交座標系を設定する．それぞれの座標面での崩壊機構を図 2.4.5 に示す．

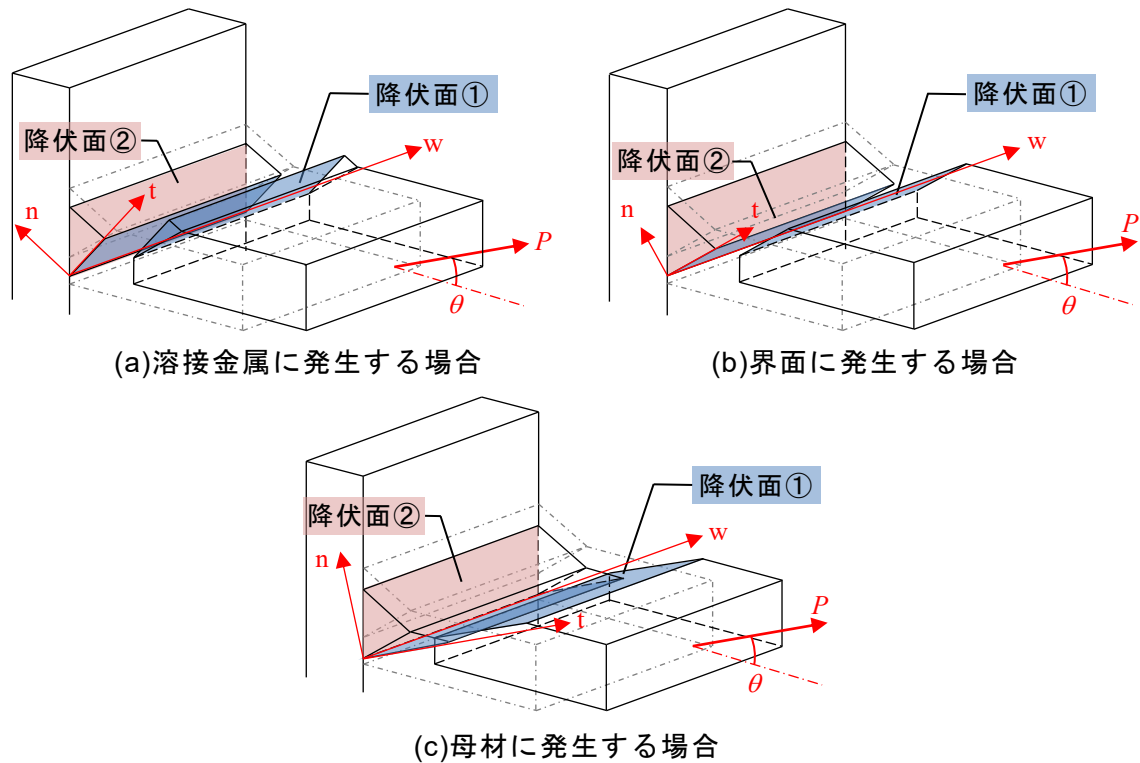
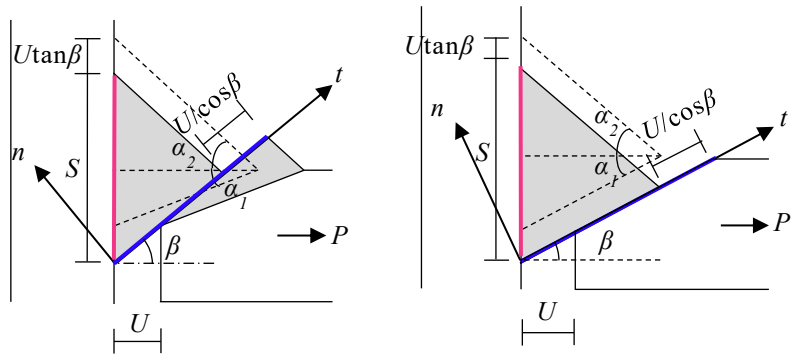
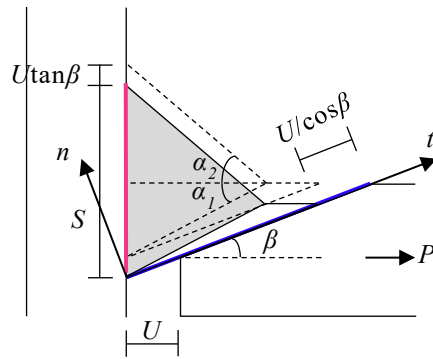


図 2.4.4 崩壊機構の概念図

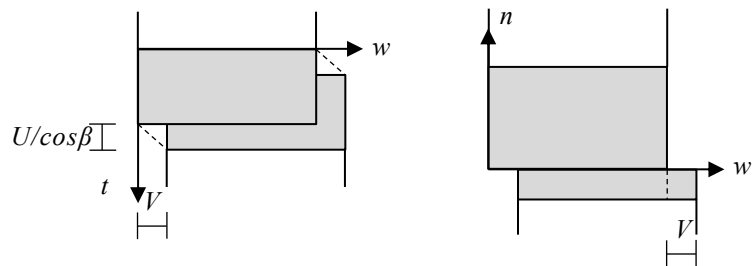


(a)  $n$ - $t$  平面 (溶接金属)

(b)  $n$ - $t$  平面 (界面)



(c)  $n$ - $t$  平面 (母材)



(d)  $t$ - $w$  平面

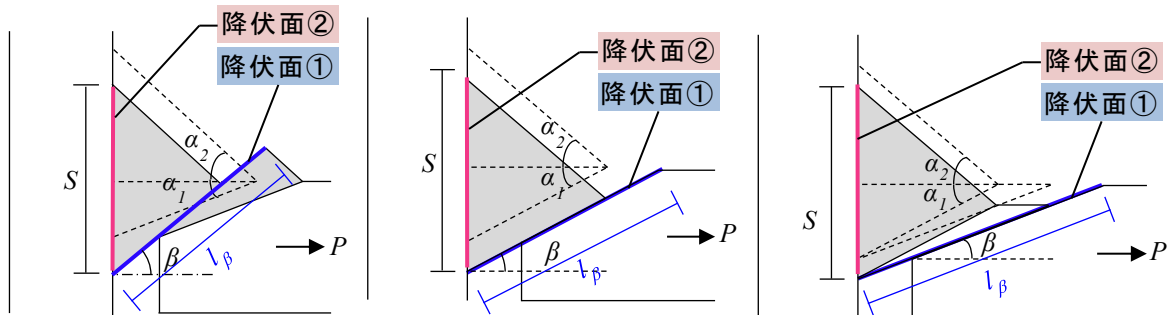
(e)  $w$ - $n$  平面

図 2.4.5 各座標面での崩壊機構

図 2.4.6 に仮定した降伏面を示す．図 2.4.6 中の  $\beta$  は，荷重作用方向から降伏面①までの角度を表す．崩壊機構は降伏面の形成される位置によって機構 W，機構 S，機構 B の 3 パターンに分けられる．図 2.4.6(a) に示す機構 W は，降伏面①が溶接金属内に形成され，降伏面②が溶接金属と母材の界面に形成される場合である．図 2.4.6(b) に示す機構 S は，降伏面①が溶接金属と母材の界面に形成され，降伏面②が溶接金属と母材の界面に形成される場合である．図 2.4.6(c) に示す機構 B は，降伏面①が母材に形成され，降伏面②が溶接金属と母材の界面に形成される場合である．ただし，斜方角度が特定の角度より大きくなり，降伏面②が形成されない場合も含まれる。

ここで，以下の仮定を設ける．

- 1) 溶接金属と母材の界面に形成される降伏面の内力仕事の算定には，溶接金属と母材のうち小さい方の降伏点  $\sigma_{sy}$  を用いる．
- 2) 図 2.4.5(d)(e) に示す溶接線方向の変位  $V$  は，降伏面①に生じる．



(a)機構 W

(b)機構 S

(c)機構 B

図 2.4.6 降伏面の位置

### 2.4.1 崩壊荷重

#### 【機構 W】

図 2.4.6(a)に示す崩壊機構 W は降伏面①が溶接金属内に形成され、降伏面②が母材と溶接金属の界面に形成される機構である。すなわち図 2.4.6(a)に示す降伏面①を決定する角度  $\beta$  は以下の式の範囲にある。

$$\alpha_1 < \beta \leq 90^\circ \quad (2.4.3)$$

降伏面①では、

$$\delta_t = U/\cos \beta, \quad \delta_w = V \quad (2.4.4)$$

となるので、 $w$  方向単位長さあたりの内力仕事  $W_1$  は、式(2.2.11)を用いて次式で表される。

$$W_1 = \frac{\sqrt{U^2 + V^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta} \cdot l_\beta \cdot \frac{\sigma_{wy}}{\sqrt{3}} \quad (2.4.5)$$

ここで、 $l_\beta$  は降伏面①の  $t$  方向の長さであり、幾何学的関係より次式で表される。

$$l_\beta = \frac{S}{\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2} \quad (2.4.6)$$

降伏面②では、

$$\delta_t = U \tan \beta, \quad \delta_w = 0 \quad (2.4.7)$$

となるので、 $w$  方向単位長さあたりの内力仕事  $W_2$  は次式で表される。

$$W_2 = |U| \tan \beta \cdot S \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sqrt{3}} \quad (2.4.8)$$

機構 W の  $w$  方向(溶接線方向)単位長さあたりの崩壊荷重  ${}_wq_p$  は、外力仕事  ${}_wq_p \cdot u$  と内力仕事の和  $W_1 + W_2$  を等値することにより得られる。式(2.4.5)および式(2.4.8)に式(2.4.1)および式(2.4.2)を代入すると、

$$\begin{aligned} {}_wq_p \cdot u = & \left\{ \frac{\sqrt{(u \cos \theta - v \sin \theta)^2 + (u \sin \theta + v \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{wy} \right. \\ & \left. + |u \cos \theta - v \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.4.9)$$

両辺を  $u$  で除し、 $X = v/u$  と置くと式(2.4.10)が得られる。

$$\begin{aligned} {}_wq_p = & \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{wy} \right. \\ & \left. + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.4.10)$$

ここで、 $\sigma_{wy}$  : 溶接部の降伏点(N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{sy}$  : 母材と溶接金属のうち小さい方の降伏点(N/mm<sup>2</sup>)

### 【機構 S】

図 2.4.6(b)に示す崩壊機構 S は降伏面①が界面に形成され、降伏面②も母材と溶接金属の界面に形成される機構である。すなわち図 2.4.6(b)に示す降伏面①を決定する角度 $\beta$ は以下の式のように溶接部形状を決定する $\alpha_1$ に等しくなる。

$$\beta = \alpha_1 \quad (2.4.11)$$

降伏面①では、

$$\delta_t = U/\cos \beta, \quad \delta_w = V \quad (2.4.12)$$

となるので、 $w$  方向単位長さあたりの内力仕事  $W_1$  は、式(2.2.11)を用いて次式で表される。

$$W_1 = \frac{\sqrt{U^2 + V^2 \cos^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1} \cdot \ell_\beta \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sqrt{3}} \quad (2.4.13)$$

ここで、 $\ell_\beta$  は降伏面①の  $t$  方向の長さであり、幾何学的関係より次式で表される。

$$\ell_\beta = \frac{S}{\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2} \quad (2.4.14)$$

降伏面②では、

$$\delta_t = U \tan \alpha_1, \quad \delta_w = 0 \quad (2.4.15)$$

となるので、 $w$  方向単位長さあたりの内力仕事  $W_2$  は次式で表される。

$$W_2 = |U| \tan \alpha_1 \cdot S \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sqrt{3}} \quad (2.4.16)$$

機構 S の  $w$  方向(溶接線方向)単位長さあたりの崩壊荷重  $sq_p$  は、外力仕事  $sq_p \cdot u$  と内力仕事の和  $W_1 + W_2$  を等値することにより得られる。式(2.4.13)および式(2.4.16)に式(2.4.1)および式(2.4.2)を代入すると、

$$sq_p \cdot u = \left\{ \frac{\sqrt{(u \cos \theta - v \sin \theta)^2 + (u \sin \theta + v \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{sy} + |u \cos \theta - v \sin \theta| \cdot \tan \alpha_1 \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.4.17)$$

両辺を  $u$  で除し、 $X = v/u$  と置くと式(2.4.18)が得られる。

$$sq_p = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{sy} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \alpha_1 \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.4.18)$$

ここで、 $\sigma_{sy}$  : 母材と溶接金属のうち小さい方の降伏点(N/mm<sup>2</sup>)

## 【機構 B】

図 2.4.6(c)に示す崩壊機構 B は降伏面①が母材に形成され，降伏面②は母材と溶接金属の界面に形成される機構である．すなわち図 2.4.6(c)に示す降伏面①を決定する角度 $\beta$ は以下の式以下の式の範囲にある．

$$0 \leq \beta < \alpha_1 \quad (2.4.19)$$

降伏面①では，

$$\delta_t = U/\cos \beta, \quad \delta_w = V \quad (2.4.20)$$

となるので， $w$  方向単位長さあたりの内力仕事  $W_1$  は，式(2.2.11)を用いて次式で表される．

$$W_1 = \frac{\sqrt{U^2 + V^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta} \cdot \ell_\beta \cdot \frac{\sigma_{by}}{\sqrt{3}} \quad (2.4.21)$$

ここで， $\ell_\beta$  は降伏面①の  $t$  方向の長さであり，幾何学的関係より次式で表される．

$$\ell_\beta = \frac{S}{(1 + \tan \alpha_2 / \tan \alpha_1) \sin \beta} \quad (2.4.22)$$

降伏面②では，

$$\delta_t = U \tan \beta, \quad \delta_w = 0 \quad (2.4.23)$$

となるので， $w$  方向単位長さあたりの内力仕事  $W_2$  は次式で表される．

$$W_2 = |U| \tan \beta \cdot S \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sqrt{3}} \quad (2.4.24)$$

機構 B の  $w$  方向(溶接線方向)単位長さあたりの崩壊荷重  $bq_p$  は，外力仕事  $bq_p \cdot u$  と内力仕事の和  $W_1 + W_2$  を等値することにより得られる．式(2.4.21)および式(2.4.24)に式(2.4.1)および式(2.4.2)を代入すると，

$$bq_p \cdot u = \left\{ \frac{\sqrt{(u \cos \theta - v \sin \theta)^2 + (u \sin \theta + v \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{(1 + \tan \alpha_2 / \tan \alpha_1) \sin \beta \cdot \cos \beta} \cdot \sigma_{by} + |u \cos \theta - v \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.4.25)$$

両辺を  $u$  で除し， $X = v/u$  と置くと式(2.4.26)が得られる．

$$bq_p = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{(1 + \tan \alpha_2 / \tan \alpha_1) \sin \beta \cdot \cos \beta} \cdot \sigma_{by} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.4.26)$$

ここで， $\sigma_{by}$  : 母材の降伏点(N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{sy}$  : 母材と溶接金属のうち小さい方の降伏点(N/mm<sup>2</sup>)

## 2.4.2 極限解析

崩壊機構 W および崩壊機構 B における未知数は  $\beta$  および  $X$  であり，崩壊機構 S における未知数は  $X$  である．ある  $\theta$  に対して， $\beta$  および  $X$  を変化させて，各崩壊機構における最小の崩壊荷重を数値計算により求めた．任意の斜方角度  $\theta$  において，得られた  ${}_wq_p$ ， ${}_sq_p$ ， ${}_bq_p$  の内，最小の値を単位長さ当たりの崩壊荷重  $q_p$  とした．

### 【機構 W】

任意の断面形状を有する隅肉溶接継目について，機構 W の崩壊荷重は以下の式で示される．

$${}_wq_p = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{wy} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.4.27)$$

ある斜方角度  $\theta$  に対する崩壊機構の未知数は， $\beta$  および  $X$  であり，以下の式によって上界が得られる．

$$\frac{\partial {}_wq_p}{\partial \beta} = 0, \quad \frac{\partial {}_wq_p}{\partial X} = 0 \quad (2.4.28)$$

式(2.4.27)を  $X$  で偏微分すると以下の式が得られる．

$$\frac{\partial {}_wq_p}{\partial X} = \left\{ \frac{-\sin \theta \cos \theta + X \sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \cos^2 \beta + X \cos^2 \theta \cos^2 \beta}{(\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2) \cos \beta \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}} \cdot \sigma_{wy} - \sin \theta \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.4.29)$$

式(2.4.28)より，

$$\left\{ \frac{-\sin \theta \cos \theta + X \sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \cos^2 \beta + X \cos^2 \theta \cos^2 \beta}{(\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2) \cos \beta \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}} \cdot \sigma_{wy} - \sin \theta \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} = 0 \quad (2.4.30)$$

式(2.4.30)を整理すると，

$$\begin{aligned} & \left\{ X (\cos^2 \theta \cos^2 \beta + \sin^2 \theta) + \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \beta - 1) \right\} \cdot \sigma_{wy} \\ &= \sin \theta \sin \beta (\sin \beta + \cos \beta \tan \alpha_2) \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta} \cdot \sigma_{sy} \end{aligned} \quad (2.4.31)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで,} \quad a &= \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \cos^2 \beta \\ b &= \sin^2 \theta \sin^2 \beta (\sin \beta + \cos \beta \tan \alpha_2)^2 \\ c &= \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \beta - 1) \end{aligned} \quad (2.4.32)$$

とおき，

$$\begin{aligned} \text{さらに,} \quad A &= a(\sigma_{wy}^2 - b \cdot \sigma_{sy}^2) \\ B &= c(a \cdot \sigma_{wy}^2 - b \cdot \sigma_{sy}^2) \\ C &= c^2 \cdot \sigma_{sy}^2 - b(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \beta) \cdot \sigma_{sy}^2 \end{aligned} \quad (2.4.33)$$

とおく．

式(2.4.31)の両辺を 2 乗し， $X$  について整理すると，以下の  $\beta$  と  $X$  の関係が得られる．

$$X = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (2.4.34)$$

### 【機構 S】

任意の断面形状を有する隅肉溶接継目について、機構 S の崩壊荷重は以下の式で示される。

$$s q_p = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{sy} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \alpha_1 \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.4.35)$$

ある斜方角度  $\theta$  に対する崩壊機構の未知数は、 $X$  であり、以下の式によって上界が得られる。

$$\frac{\partial s q_p}{\partial X} = 0 \quad (2.4.36)$$

式(2.4.35)を  $X$  で偏微分すると以下の式が得られる。

$$\frac{\partial s q_p}{\partial X} = \left\{ \frac{-\sin \theta \cos \theta + X \sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \cos^2 \alpha_1 + X \cos^2 \theta \cos^2 \alpha_1}{(\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2) \cos \alpha_1 \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}} \cdot \sigma_{sy} - \sin \theta \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.4.37)$$

式(2.4.36)より、

$$\left\{ \frac{-\sin \theta \cos \theta + X \sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \cos^2 \alpha_1 + X \cos^2 \theta \cos^2 \alpha_1}{(\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2) \cos \alpha_1 \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}} \cdot \sigma_{sy} - \sin \theta \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} = 0 \quad (2.4.38)$$

式(2.4.38)を整理すると、

$$\begin{aligned} & X (\cos^2 \theta \cos^2 \alpha_1 + \sin^2 \theta) + \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \alpha_1 - 1) \\ & = \sin \theta \sin \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \tan \alpha_2) \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1} \end{aligned} \quad (2.4.39)$$

ここで、 $a = \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \cos^2 \alpha_1$

$$b = \sin^2 \theta \sin^2 \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \tan \alpha_2)^2 \quad (2.4.40)$$

$$c = \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \alpha_1 - 1)$$

とおき、

$$\text{さらに、} \quad A = a(a - b)$$

$$B = c(a - b) \quad (2.4.41)$$

$$C = c^2 - b(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \beta)$$

とおく。

式(2.4.39)の両辺を 2 乗し、 $X$  について整理すると、以下の  $X$  が得られる。

$$X = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (2.4.42)$$

## 【機構 B】

任意の断面形状を有する隅肉溶接継目について、機構 B の崩壊荷重は以下の式で示される。

$${}_b q_p = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{(1 + \tan \alpha_2 / \tan \alpha_1) \sin \beta \cdot \cos \beta} \cdot \sigma_{by} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.4.43)$$

ある斜方角度  $\theta$  に対する崩壊機構の未知数は、 $\beta$  および  $X$  であり、以下の式によって上界が得られる。

$$\frac{\partial {}_b q_p}{\partial \beta} = 0, \quad \frac{\partial {}_b q_p}{\partial X} = 0 \quad (2.4.44)$$

式(2.4.43)を  $X$  で偏微分すると以下の式が得られる。

$$\frac{\partial {}_b q_p}{\partial X} = \left\{ \frac{-\sin \theta \cos \theta + X \sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \cos^2 \beta + X \cos^2 \theta \cos^2 \beta}{(1 + \tan \alpha_2 / \tan \alpha_1) \sin \beta \cdot \cos \beta \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}} \sigma_{by} - \sin \theta \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (2.4.45)$$

式(2.4.44)より、

$$\left\{ \frac{-\sin \theta \cos \theta + X \sin^2 \theta + \sin \theta \cos \theta \cos^2 \beta + X \cos^2 \theta \cos^2 \beta}{(1 + \tan \alpha_2 / \tan \alpha_1) \sin \beta \cdot \cos \beta \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}} \sigma_{by} - \sin \theta \tan \beta \cdot \sigma_{sy} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} = 0 \quad (2.4.46)$$

式(2.4.46)を整理すると、

$$\begin{aligned} & \left\{ X (\cos^2 \theta \cos^2 \beta + \sin^2 \theta) + \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \beta - 1) \right\} \cdot \tan \alpha_1 \cdot \sigma_{by} \\ & = (1 + \tan \alpha_2 / \tan \alpha_1) \sin^2 \beta \cdot \sin \theta \sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta} \cdot \sigma_{sy} \end{aligned} \quad (2.4.47)$$

ここで、 $a = \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \cos^2 \beta$

$$c = \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \beta - 1) \quad (2.4.48)$$

$$d = \sin^2 \theta \sin^4 \beta (1 + \tan \alpha_2 / \tan \alpha_1)^2$$

とおき、

$$\begin{aligned} \text{さらに、} \quad A &= a(a \cdot \sigma_{by}^2 - b \cdot \sigma_{sy}^2) \\ B &= c(a \cdot \sigma_{by}^2 - d \cdot \sigma_{sy}^2) \\ C &= c^2 \cdot \sigma_{by}^2 - d(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \beta) \cdot \sigma_{sy}^2 \end{aligned} \quad (2.4.49)$$

とおく。

式(2.4.47)の両辺を 2 乗し、 $X$  について整理すると、以下の  $X$  が得られる。

$$X = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (2.4.50)$$

### 2.4.3 解析結果

#### 【異形隅肉溶接 (GW)】

図 2.4.7 に示す異形隅肉溶接( $\alpha_1=\alpha_2=30^\circ$ )を対象として、斜方角度 $\theta(=0^\circ\sim90^\circ)$ および強度比 $\rho_y(=0.6\sim1.6)$ を変化させた数値計算を行った。

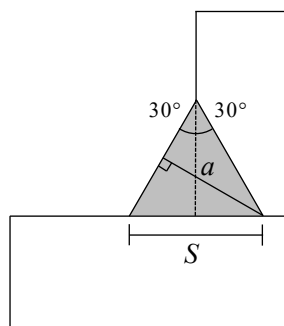


図 2.4.7 異形隅肉溶接( $\alpha_1=\alpha_2=30^\circ$ )

#### (i) $\rho_y=1.0$ の場合の解析結果

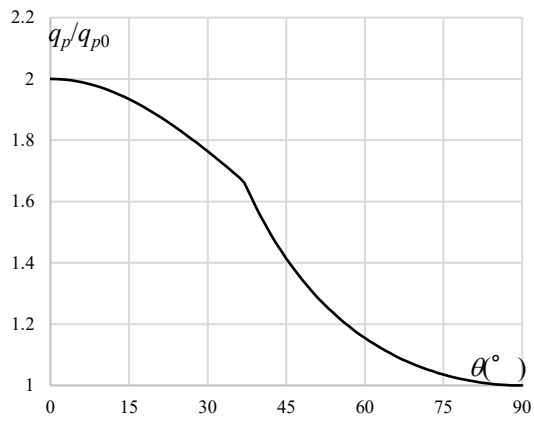
溶接部と母材の強度が同強度( $\rho_y=1.0$ )のときの解析結果を図 2.4.8 に示す。

(a)に崩壊荷重  $q_p$  と斜方角度  $\theta$  の関係を示す。なお、図の縦軸は、側面隅肉溶接の耐力で除して無次元化している。 $\rho_y=1.0$  の場合、 $\theta=0^\circ$ (前面隅肉溶接)の  $q_p$  は  $\theta=90^\circ$ (側面隅肉溶接)の  $q_p$  の 2 倍となる。斜方角度が  $\theta=0^\circ$  から約  $\theta=36^\circ$  までの範囲では  $\theta$  が増加するとともに徐々に耐力が減少し、 $\theta=37^\circ$  以上になると耐力の減少傾向が変化する。その境界を詳細に検証すると、 $36.7227^\circ$  から  $36.7228^\circ$  の間で崩壊機構がせん断変形のみになり切り替わる。

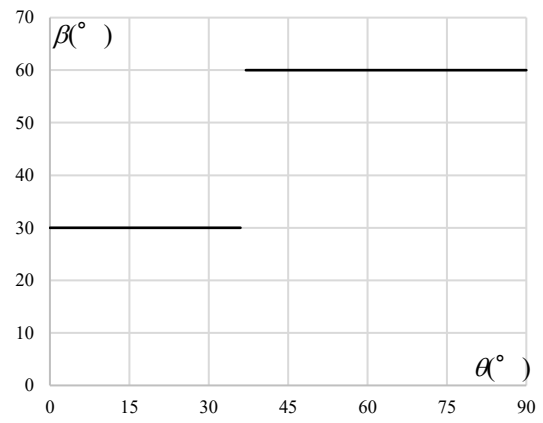
(b)に荷重作用面と降伏面①のなす降伏面角度  $\beta$  と斜方角度  $\theta$  の関係を示す。 $\theta=0^\circ$  のとき、 $\beta=30^\circ$  であり、 $\theta=37^\circ$  以上になると  $\beta=60^\circ$  となり、降伏面はのど断面と一致する。

(c)に荷重方向と荷重作用直交方向の塑性変形増分の比  $X$  と斜方角度  $\theta$  の関係を示す。 $\theta=0^\circ$ 、 $90^\circ$  のとき、 $X=0$  となり、荷重方向にのみ塑性変形が生じている。 $\theta=0^\circ$  および  $90^\circ$  ではないとき、 $X>0$  となり、荷重直交方向にも塑性変形が生じている。

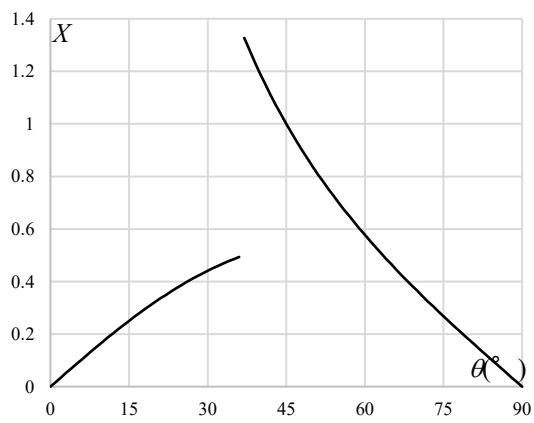
(d)に溶接継目に対する変形方向  $\theta_p$  の関係と斜方角度  $\theta$  を示す。 $\theta=0^\circ$  のとき溶接線の直交する方向に変形し、 $\theta=90^\circ$  のとき溶接線方向に変形することを表す。 $\theta=0^\circ$  から  $\theta=36^\circ$  の範囲では、変形は荷重方向から溶接線方向に傾き、 $\theta=37^\circ$  以上になると溶接線方向に変形が生じている。



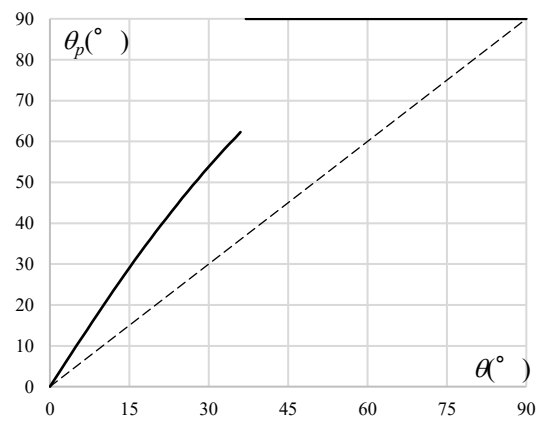
(a)最大耐力



(b)荷重作用面と降伏面①のなす角度



(c) $X$



(d)変形方向

図 2.4.8 解析結果

## (ii)強度比の影響

溶接部と母材の強度比 $\rho_y$ を0.6,0.8,1.0,1.2,1.4,1.6に変化させたときの崩壊荷重 $q_p$ と斜方角度 $\theta$ の関係を図2.4.9に示す。なお、縦軸は強度比 $\rho_y=1.0$ の側面溶接の崩壊荷重 $q_{p90}$ で無次元化している。また、図2.4.10に $q_p$ を決定している崩壊機構を示す。

図2.4.9において、強度比 $\rho_y=1.0$ の場合、GWの前面隅肉溶接の耐力は側面隅肉溶接の値の2倍となっており、強度比が変化しても、同様の傾向が見られ、2倍程度の値となっている。また、図2.4.10において、強度比 $\rho_y=1.0$ の場合、 $0^\circ \leq \theta \leq 36.8^\circ$ の範囲では、降伏面①が界面( $\beta = \alpha_1 = 30^\circ$ )に形成され、降伏面②も形成される崩壊機構Sとなる。

$36.8^\circ < \theta \leq 90^\circ$ の範囲では、降伏面①のみがのど断面に形成される崩壊機構W( $\beta = 60^\circ$ )となり、溶接線方向のせん断変形のみが発生し、斜方角度 $\theta$ が大きくなるに従い、崩壊荷重が低下する。強度比 $\rho_y=1.0$ 以下の範囲では、強度比 $\rho_y=1.0$ と同様の崩壊機構を示し、溶接金属強度が低くなるにつれ耐力が低下する。強度比 $\rho_y=1.155$ 以上の場合、 $0^\circ \leq \theta < 60^\circ$ の範囲では、降伏面①が界面( $\beta = \alpha_1 = 30^\circ$ )に形成され、降伏面②も形成される崩壊機構Sとなる。次に $60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲では降伏面①のみが界面に形成される崩壊機構S( $\beta = \alpha_1 = 30^\circ$ )となり、溶接線方向のせん断変形のみが発生し、斜方角度 $\theta$ が大きくなるに伴い、崩壊荷重が低下する。また、強度比 $1.0 \leq \rho_y \leq 1.155$ の間は崩壊機構Sから崩壊機構Wに切り替わる斜方角度は曲線的に変化している。なお、崩壊機構Sとなる範囲ではオーバーマッチの場合は母材の降伏点 $\sigma_{by}$ によって耐力が決定され、溶接金属強度が高くなっても耐力は上昇しないため、 $\rho_y=1.2$ 以上は全ての $\theta$ の範囲でグラフが重なっている。

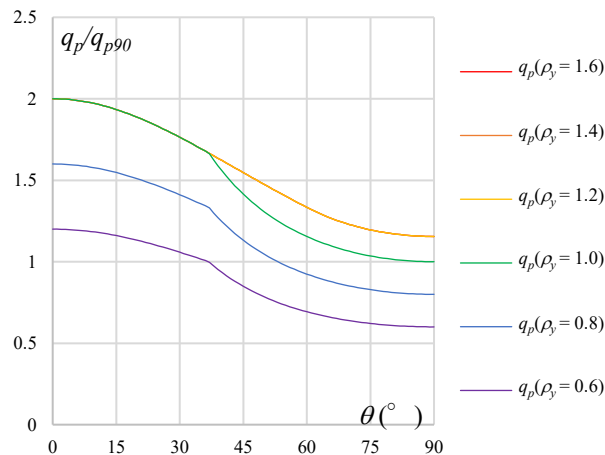


図 2.4.9 極限解析結果（強度比の影響）

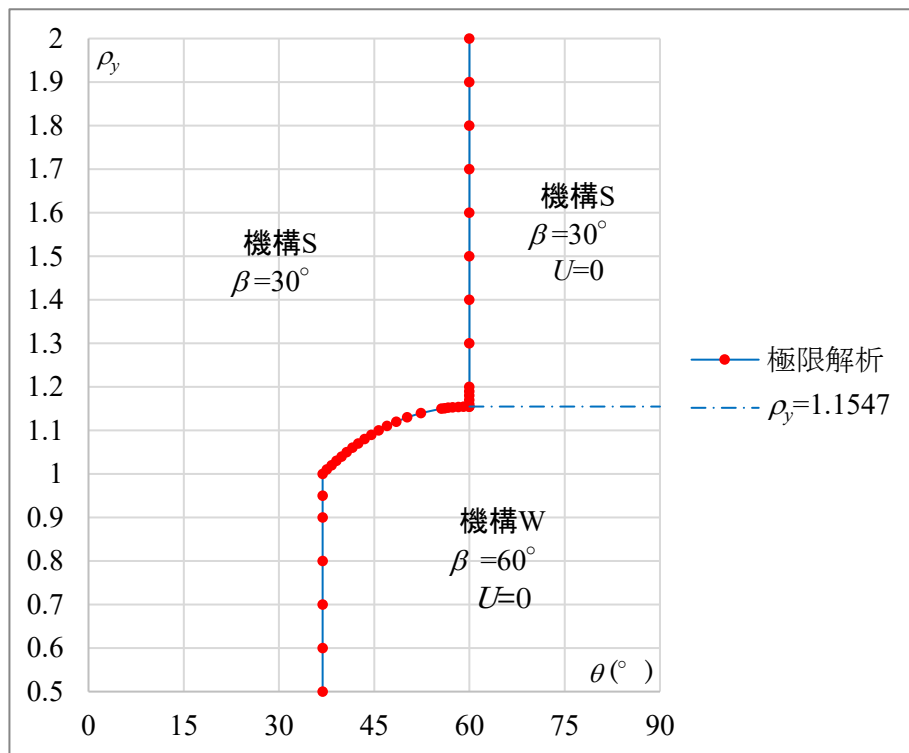


図 2.4.10 極限解析における崩壊機構の分類

### 【異形隅肉溶接（50W）】

図 2.4.11 に示す異形隅肉溶接( $\alpha_1=\alpha_2=40^\circ$ )を対象として、斜方角度 $\theta(=0^\circ\sim 90^\circ)$ および強度比 $\rho_y(=0.6\sim 1.6)$ を変化させた数値計算を行った。

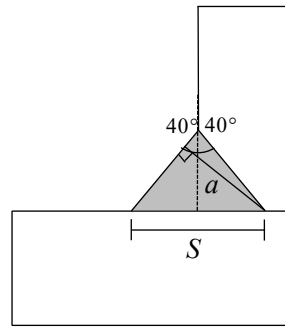


図 2.4.11 異形隅肉溶接( $\alpha_1=\alpha_2=40^\circ$ )

#### (i) $\rho_y=1.0$ の場合の解析結果

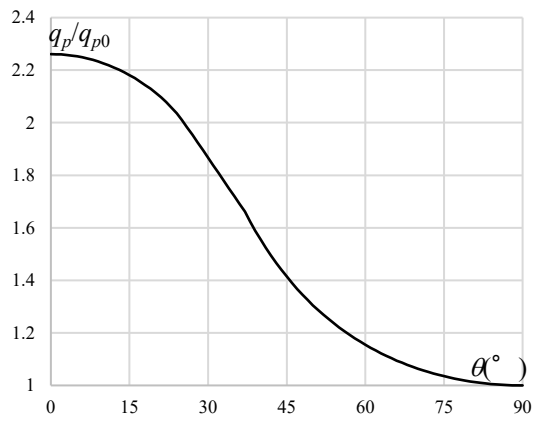
溶接部と母材の強度が同強度( $\rho_y=1.0$ )のときの解析結果を図 2.4.12 に示す。

(a)に崩壊荷重  $q_p$  と斜方角度  $\theta$  の関係を示す。なお、図の縦軸は、側面隅肉溶接の耐力で除して無次元化している。 $\rho_y=1.0$  の場合、 $\theta=0^\circ$ (前面隅肉溶接)の  $q_p$  は  $\theta=90^\circ$ (側面隅肉溶接)の  $q_p$  の 2.26 倍となる。斜方角度が  $\theta=0^\circ$  から約  $\theta=37^\circ$  までの範囲と  $\theta=37^\circ$  以上の範囲では耐力の減少傾向が異なる。その境界を詳細に検証すると、 $37.0311^\circ$  から  $36.7228^\circ$  の間で崩壊機構がせん断変形の上に切り替わる。

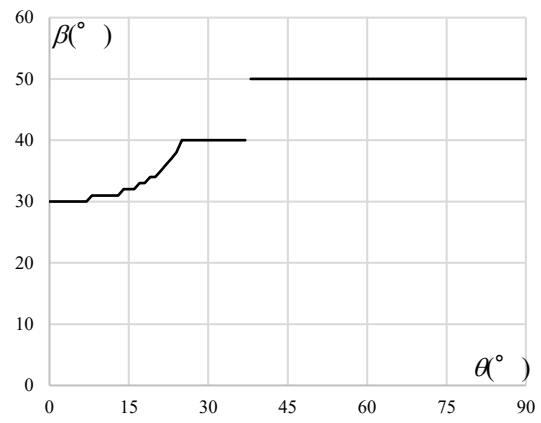
(b)に荷重作用面と降伏面①のなす降伏面角度  $\beta$  と斜方角度  $\theta$  の関係を示す。 $\theta=0^\circ$  のとき、 $\beta=30^\circ$  であり母材内に降伏面①が発生する。 $\theta=25^\circ$  から  $\theta=37^\circ$  では  $\beta=40^\circ$  となり界面に降伏面①が発生する。 $\theta=38^\circ$  以上では  $\beta=50^\circ$  となり、降伏面はのど断面と一致する。

(c)に荷重方向と荷重作用直交方向の塑性変形増分の比  $X$  と斜方角度  $\theta$  の関係を示す。 $\theta=0^\circ$ ,  $90^\circ$  のとき、 $X=0$  となり、荷重方向にのみ塑性変形が生じている。 $\theta=0^\circ$  および  $90^\circ$  ではないとき、 $X>0$  となり、荷重直交方向にも塑性変形が生じている。

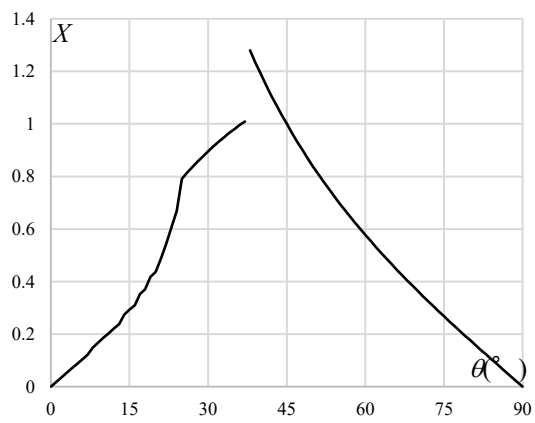
(d)に溶接継目に対する変形方向  $\theta_p$  の関係と斜方角度  $\theta$  を示す。 $\theta=0^\circ$  のとき溶接線の直交する方向に変形し、 $\theta=90^\circ$  のとき溶接線方向に変形することを表す。 $\theta=0^\circ$  から  $\theta=37^\circ$  の範囲では、変形は荷重方向から溶接線方向に傾き、 $\theta=38^\circ$  以上になると溶接線方向に変形が生じている。



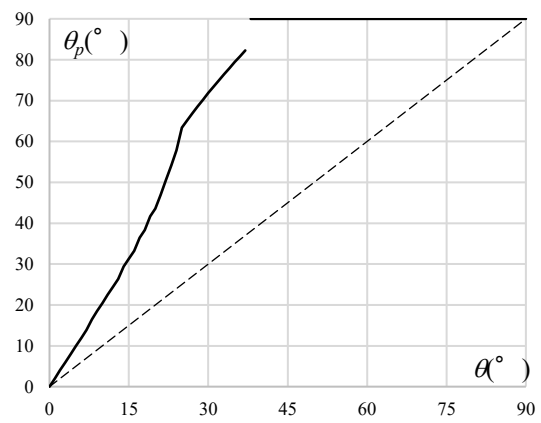
(a)最大耐力



(b)荷重作用面と降伏面①のなす角度



(c) $X$



(d)変形方向

図 2.4.12 解析結果

## (ii)強度比の影響

50W で溶接部と母材の強度比 $\rho_y$ を 0.6,0.8,1.0,1.2,1.4,1.6 に変化させたときの崩壊荷重  $q_p$  と斜方角度  $\theta$  の関係を図 2.4.13 に示す．なお，縦軸は強度比 $\rho_y=1.0$  の側面溶接の崩壊荷重  $q_{p90}$  で無次元化している．また，図 2.4.14 に  $q_p$  を決定している崩壊機構を示す．

図 2.4.13 において，強度比 1.0 の場合，50W の前面隅肉溶接の耐力は側面溶接の値の 2.26 倍となっており，強度比が変化しても，同様の傾向が見られ，2.3 倍程度の値となっている．また，図 2.4.14 において，強度比 $\rho_y = 1.0$  の場合， $0^\circ \leq \theta \leq 24.6^\circ$  の範囲では，降伏面①が母材( $30^\circ \leq \beta \leq 38^\circ$ )に形成され，降伏面②も形成される崩壊機構 B となる．次に  $24.6^\circ < \theta \leq 37^\circ$  の範囲では，降伏面①が界面( $\beta = \alpha_1 = 40^\circ$ )に形成され，降伏面②も形成される崩壊機構 S となる． $37^\circ < \theta \leq 90^\circ$  の範囲では，降伏面①のみがのど断面に形成される崩壊機構 W( $\beta = 50^\circ$ )となり，溶接線方向のせん断変形のみが発生し，斜方角度  $\theta$  が大きくなるに従い，崩壊荷重が低下する．強度比 $\rho_y = 0.903$  以下の場合， $0^\circ \leq \theta \leq 37^\circ$  の範囲では，降伏面①が界面( $\beta = \alpha_1 = 40^\circ$ )に形成され，降伏面②も形成される崩壊機構 S となる． $37^\circ < \theta \leq 90^\circ$  の範囲では，降伏面①のみがのど断面に形成される崩壊機構 W( $\beta = 50^\circ$ )となり，溶接線方向のせん断変形のみが発生し，斜方角度  $\theta$  が大きくなるに従い，崩壊荷重が低下する．強度比 $\rho_y = 1.2$  以上の場合， $0^\circ \leq \theta \leq 24.6^\circ$  の範囲では，降伏面①が母材( $30^\circ \leq \beta \leq 38^\circ$ )に形成され，降伏面②も形成される崩壊機構 B となる．次に  $24.6^\circ < \theta \leq 42.8^\circ$  の範囲では，降伏面①が界面( $\beta = \alpha_1 = 40^\circ$ )に形成され，降伏面②も形成される崩壊機構 S となる． $42.8^\circ < \theta \leq 90^\circ$  の範囲では，降伏面①のみが界面に形成される崩壊機構 S( $\beta = \alpha_1 = 40^\circ$ )となり，溶接線方向のせん断変形のみが発生し，斜方角度  $\theta$  が大きくなるに従い，崩壊荷重が低下する．また，強度比  $0.903 \leq \rho_y \leq 1.0$  の間で崩壊機構 B から崩壊機構 S に切り替わる斜方角度および強度比  $1.0 \leq \rho_y \leq 1.15$  の間で崩壊機構 S から崩壊機構 W に切り替わる斜方角度は曲線的に変化している．なお，崩壊機構 B および崩壊機構 S となる範囲ではオーバーマッチの場合は母材の降伏点 $\sigma_{by}$ によって耐力が決定されられ，溶接金属強度が高くなっても耐力は上昇しないため， $\rho_y = 1.2$  以上は全ての  $\theta$  の範囲でグラフが重なっている．

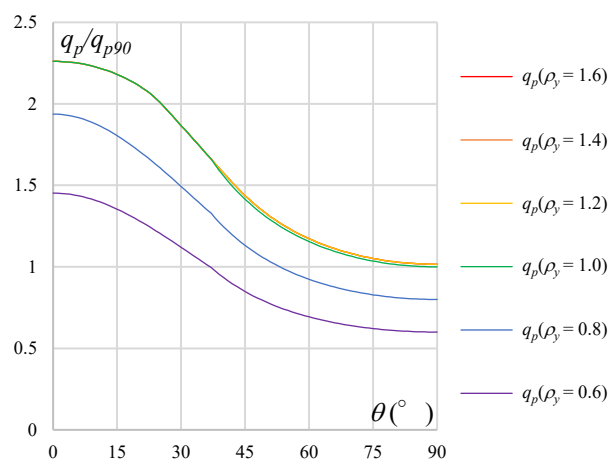


図 2.4.13 極限解析結果（強度比の影響）

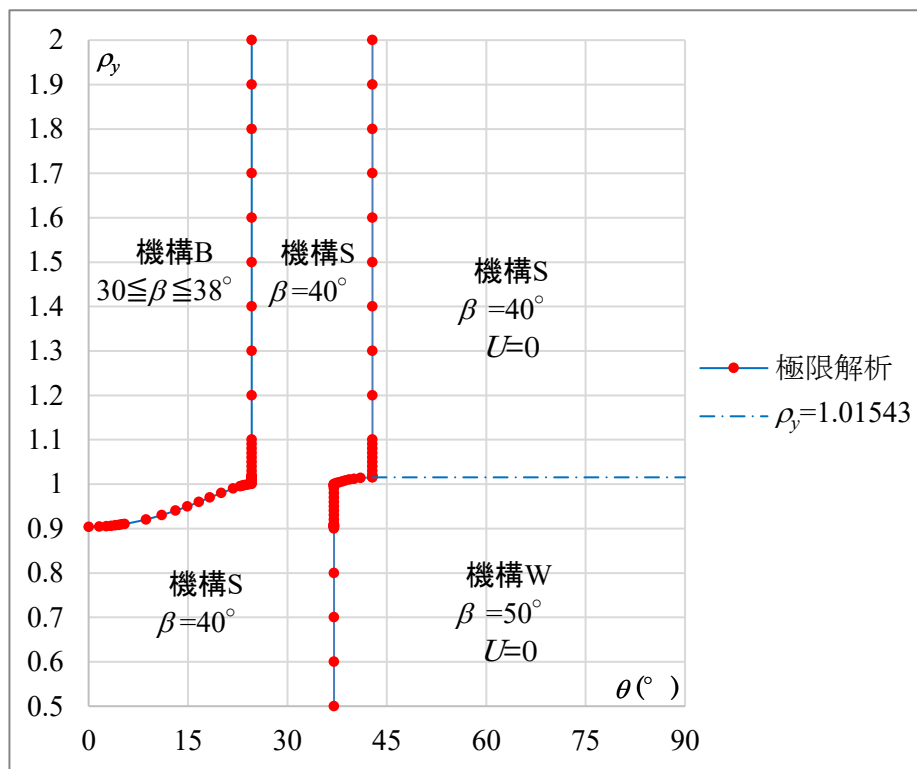


図 2.4.14 極限解析における崩壊機構の分類

## 2.4.4 有限要素数値解析との比較

2.4.3 節で得られた理論解の妥当性を検証するため、有限要素数値解析による塑性耐力との比較を行った。解析には汎用有限要素法解析プログラム ABAQUS2019 を用いた。塑性域における構成方程式は von Mises の降伏条件、等方硬化則および連合流れ則に従うものとした。

### 【解析計画】

過去の実験に供した試験体に基づき作成した FEA モデルを図 2.4.15 に示す。解析モデルは図 2.4.15 (a)に示すように試験体に治具を溶接した形状とし、8 節点ソリッド要素(C3D8R)を用いて作成した 1/2 モデルである。溶接部形状は GW の脚長  $S$  を 5.8mm および 50W の脚長  $S$  を 6.7mm とした溶け込みの無い異形隅肉溶接の設計寸法(図 2.4.15(b)および(c)参照)でモデル化した。荷重は上下端をピンおよびローラー固定とし、垂直方向に強制変位を与えた。表 2.4.1 および表 2.4.2 に解析モデル一覧を示す。材料特性には溶接部と母材の強度比  $\rho_y$  を 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 および 1.6 とした完全弾塑性型の応力-ひずみ関係を入力した。斜方角度は  $0^\circ \sim 90^\circ$  までを  $15^\circ$  刻みとした各 7 体の計 84 体である。

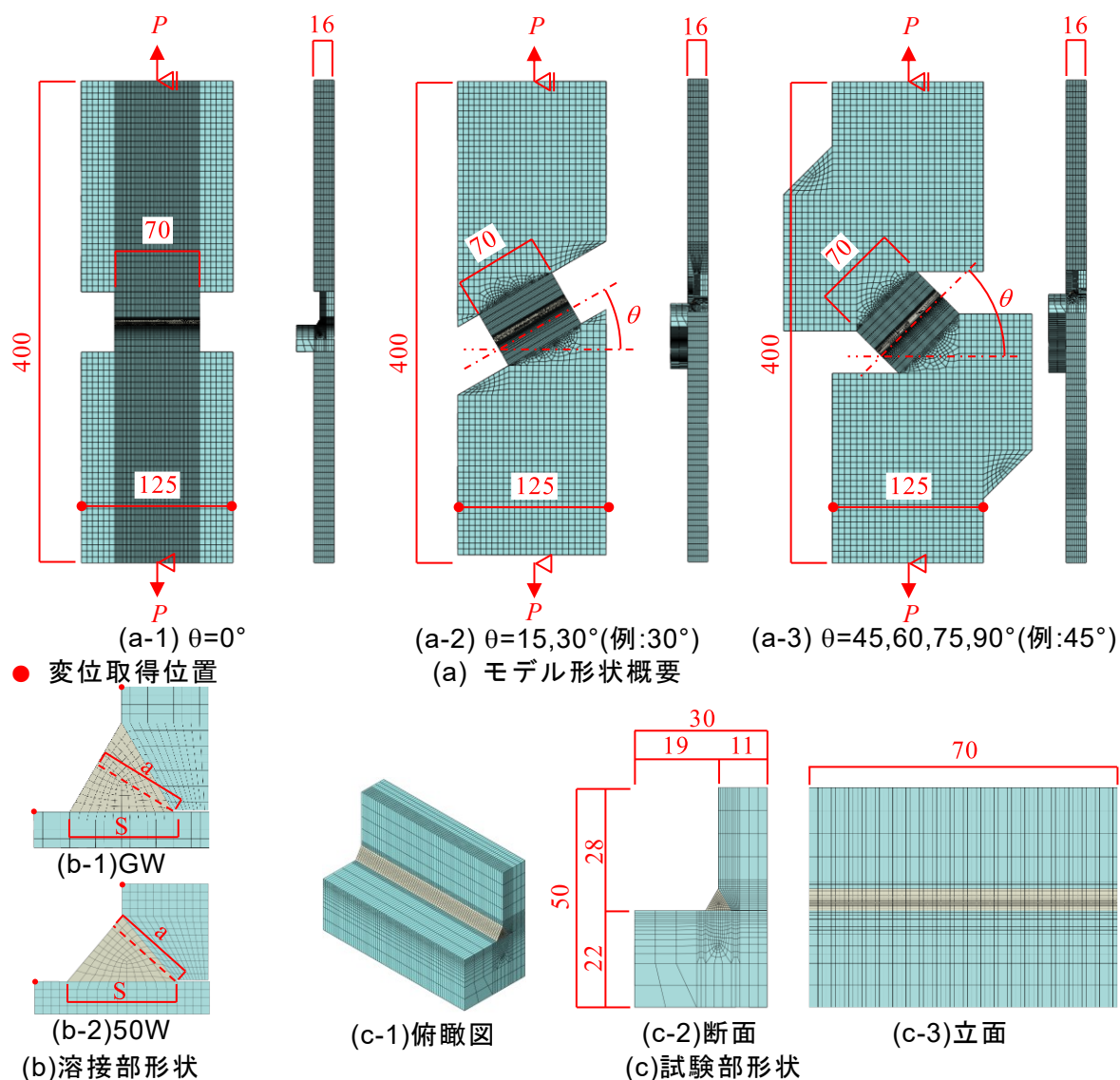


図 2.4.15 解析モデル図

表 2.4.1 GW 解析モデル一覧

|           | S    | a    | $\alpha_1$     | $\alpha_2$     | $\theta$       | $\sigma_{wy}$         | $\sigma_{by}$         | $\rho_v$ |
|-----------|------|------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------|
|           | (mm) | (mm) | ( $^{\circ}$ ) | ( $^{\circ}$ ) | ( $^{\circ}$ ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) |          |
| GW-0-1.6  | 5.8  | 5    | 30             | 30             | 0              | 520                   | 325                   | 1.6      |
| GW-15-1.6 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| GW-30-1.6 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| GW-45-1.6 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| GW-60-1.6 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| GW-75-1.6 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| GW-90-1.6 |      |      |                |                | 90             | 455                   |                       | 1.4      |
| GW-0-1.4  |      |      |                |                | 0              |                       |                       |          |
| GW-15-1.4 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| GW-30-1.4 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| GW-45-1.4 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| GW-60-1.4 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| GW-75-1.4 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| GW-90-1.4 |      |      |                |                | 90             | 390                   |                       | 1.2      |
| GW-0-1.2  |      |      |                |                | 0              |                       |                       |          |
| GW-15-1.2 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| GW-30-1.2 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| GW-45-1.2 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| GW-60-1.2 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| GW-75-1.2 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| GW-90-1.2 |      |      |                |                | 90             | 325                   |                       | 1        |
| GW-0-1.0  |      |      |                |                | 0              |                       |                       |          |
| GW-15-1.0 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| GW-30-1.0 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| GW-45-1.0 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| GW-60-1.0 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| GW-75-1.0 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| GW-90-1.0 |      |      |                |                | 90             | 260                   |                       | 0.8      |
| GW-0-0.8  |      |      |                |                | 0              |                       |                       |          |
| GW-15-0.8 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| GW-30-0.8 | 30   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| GW-45-0.8 | 45   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| GW-60-0.8 | 60   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| GW-75-0.8 | 75   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| GW-90-0.8 | 90   | 195  | 0.6            |                |                |                       |                       |          |
| GW-0-0.6  | 0    |      |                |                |                |                       |                       |          |
| GW-15-0.6 | 15   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| GW-30-0.6 | 30   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| GW-45-0.6 | 45   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| GW-60-0.6 | 60   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| GW-75-0.6 | 75   |      |                |                |                |                       |                       |          |
| GW-90-0.6 | 90   |      |                |                |                |                       |                       |          |

表 2.4.2 50W 解析モデル一覧

|            | S    | a    | $\alpha_1$     | $\alpha_2$     | $\theta$       | $\sigma_{wy}$         | $\sigma_{by}$         | $\rho_v$ |
|------------|------|------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------|
|            | (mm) | (mm) | ( $^{\circ}$ ) | ( $^{\circ}$ ) | ( $^{\circ}$ ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) | (kN/mm <sup>2</sup> ) |          |
| 50W-0-1.6  | 6.71 | 5.1  | 40             | 40             | 0              | 520                   | 325                   | 1.6      |
| 50W-15-1.6 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| 50W-30-1.6 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| 50W-45-1.6 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| 50W-60-1.6 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| 50W-75-1.6 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| 50W-90-1.6 |      |      |                |                | 90             |                       |                       |          |
| 50W-0-1.4  |      |      |                |                | 0              | 455                   |                       | 1.4      |
| 50W-15-1.4 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| 50W-30-1.4 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| 50W-45-1.4 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| 50W-60-1.4 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| 50W-75-1.4 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| 50W-90-1.4 |      |      |                |                | 90             |                       |                       |          |
| 50W-0-1.2  |      |      |                |                | 0              | 390                   |                       | 1.2      |
| 50W-15-1.2 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| 50W-30-1.2 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| 50W-45-1.2 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| 50W-60-1.2 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| 50W-75-1.2 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| 50W-90-1.2 |      |      |                |                | 90             |                       |                       |          |
| 50W-0-1.0  |      |      |                |                | 0              | 325                   |                       | 1        |
| 50W-15-1.0 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| 50W-30-1.0 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| 50W-45-1.0 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| 50W-60-1.0 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| 50W-75-1.0 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| 50W-90-1.0 |      |      |                |                | 90             |                       |                       |          |
| 50W-0-0.8  |      |      |                |                | 0              | 260                   |                       | 0.8      |
| 50W-15-0.8 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| 50W-30-0.8 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| 50W-45-0.8 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| 50W-60-0.8 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| 50W-75-0.8 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| 50W-90-0.8 |      |      |                |                | 90             |                       |                       |          |
| 50W-0-0.6  |      |      |                |                | 0              | 195                   |                       | 0.6      |
| 50W-15-0.6 |      |      |                |                | 15             |                       |                       |          |
| 50W-30-0.6 |      |      |                |                | 30             |                       |                       |          |
| 50W-45-0.6 |      |      |                |                | 45             |                       |                       |          |
| 50W-60-0.6 |      |      |                |                | 60             |                       |                       |          |
| 50W-75-0.6 |      |      |                |                | 75             |                       |                       |          |
| 50W-90-0.6 |      |      |                |                | 90             |                       |                       |          |

### 【解析結果】

図 2.4.16 において, FEA から取得する塑性耐力  $FEAP_p$  を GW の強度比  $\rho_y=1.0$  を例として, 荷重  $P$  と荷重方向変形  $u$  の関係において●印で示す.  $\theta=0$  を例として示すように, 塑性耐力は接線剛性が初期剛性の  $1/100$  に低下した時の荷重と定義しており, 完全弾塑性の材料特性を入力した解析モデルにおいて, 荷重変形関係における荷重がほとんど上昇しなくなった状態である. ここで, 荷重方向変形  $u$  は図 2.4.15 (b)および(c)に赤点で示す節点の変位を溶接線中央断面で取得し, それら 2 点の相対変位とした.

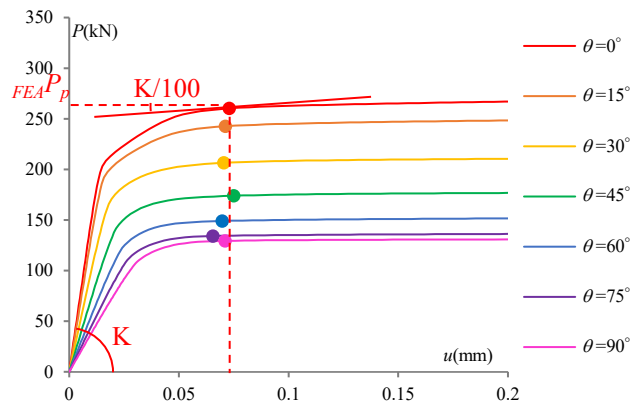
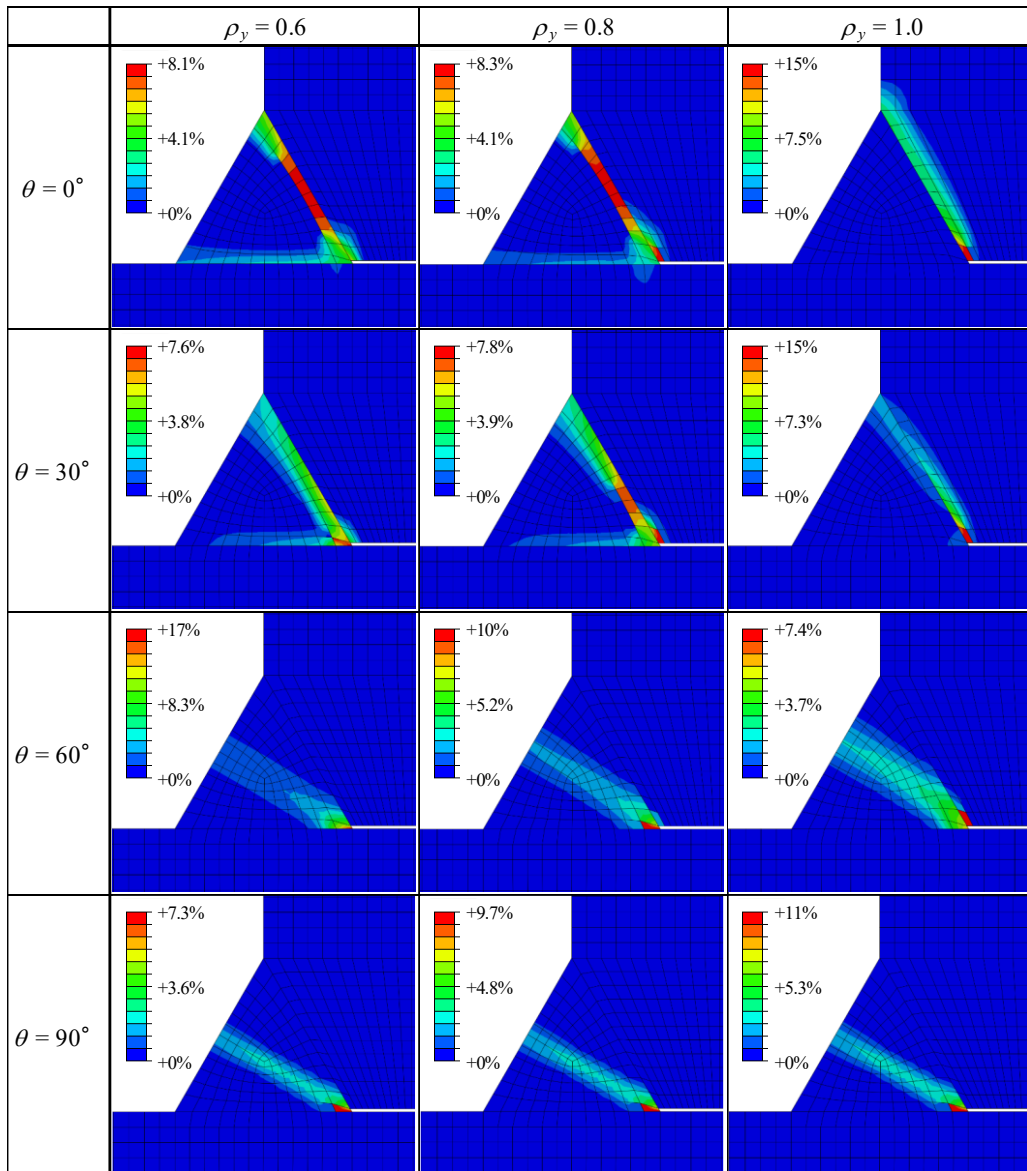


図 2.4.16  $P-u$  関係 (例 : GW)

(i)GW

$\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ について、接線剛性が初期剛性の  $1/100$  に低下した時のステップの相当塑性歪のコンター図を図 2.4.17 に示す．コンター図から、 $\theta=0^\circ$  の場合、界面において強度の低い方の塑性化が卓越していることがわかる．崩壊機構が界面に形成される場合、母材と溶接金属の低い方の強度を使用する仮定と概ね一致する．ただし、ルート部の母材側あるいは溶接止端部においては、周囲からの拘束や応力集中の影響を受け、強度の高い方の塑性化が進展する部分も存在する． $\theta=90^\circ$  の場合は、 $\rho_y=0.6, 0.8, 1.0$  ではのど断面のせん断変形により崩壊機構が決定され、 $\rho_y=1.2, 1.4, 1.6$  では界面のせん断変形により崩壊機構が決定される．これはのど断面長さと同脚長の比が  $2/\sqrt{3}=1.15$  なので、 $\rho_y=1.2$  を境界に崩壊機構が変化している．強度比に着目すると、 $\rho_y=1.0$  以下では、斜方角度が大きくなるに伴い、降伏面の発生場所がのど断面に近づき、 $\rho_y=1.2$  以上では、 $\theta$  の全領域にわたり、界面の母材側の塑性化が卓越している．以上に述べた傾向は、崩壊機構の降伏面の形成パターンと対応している．



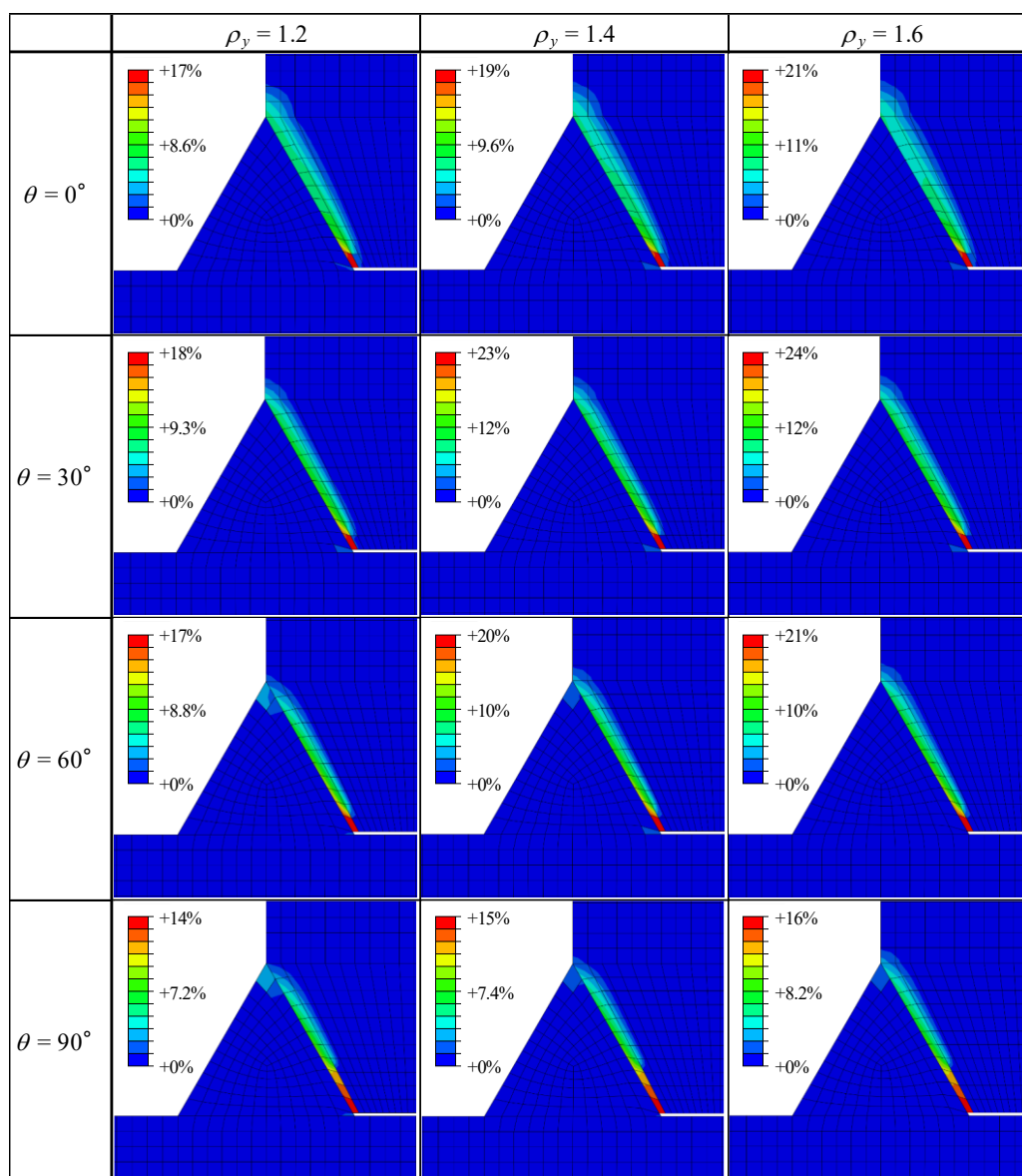


図 2.4.17 相当塑性歪の分布図

崩壊荷重の理論値  $P_p$  と FEA から取得した塑性耐力  $FEAP_p$  の比較を表 2.4.3 および図 2.4.18 に示す。イーブンマッチとなる強度比を 1.0 とした場合では、 $FEAP_p$  と  $P_p$  の比率が  $FEAP_p/P_p=0.89\sim0.99$ (平均値 0.96). オーバーマッチとなる強度比を 1.2 とした場合では 0.92 $\sim$ 1.02(平均値 0.97), 強度比を 1.4 とした場合では 0.94 $\sim$ 1.04(平均値 0.99), 強度比を 1.6 とした場合では 0.95 $\sim$ 1.05(平均値 1.00)となった。アンダーマッチとなる強度比を 0.8 とした場合では 0.95 $\sim$ 1.10(平均値 1.00), 強度比 0.6 とした場合では 0.98 $\sim$ 1.17(平均値 1.04). 強度比が  $\rho_y=1.0$  から離れるに従い、 $\theta=0^\circ$  近傍において  $P_p$  は  $FEAP_p$  を過小評価する傾向にある。 $\theta=0^\circ$  近傍では機構 S に支配され、降伏面①は母材と溶接金属の界面に形成される。FEA では、強度の高い側が低い側の塑性化を拘束し、強度比に差が生じるほどこの塑性拘束の影響が大きく表れることになる。このため、溶接金属強度と母材強度の小さい方ですべり耐力を算定した極限解析の結果  $P_p$  が  $FEAP_p$  を過小評価したと考えられる。しかし、 $\theta$  および  $\rho_y$  の変化に伴う塑性耐力の変化の傾向を概ね良く捉えており、崩壊荷重  $P_p$  は耐力評価法として有効である。

表 2.4.3  $FEAP_p$  と  $P_p$  の比較

| モデル名      | $FEAP_p$<br>(kN) | $P_p$<br>(kN) | $FEAP_p/P_p$ |
|-----------|------------------|---------------|--------------|
| GW-0-1.6  | 276.05           | 263.90        | 1.05         |
| GW-15-1.6 | 258.06           | 255.20        | 1.01         |
| GW-30-1.6 | 223.93           | 232.72        | 0.96         |
| GW-45-1.6 | 193.41           | 204.12        | 0.95         |
| GW-60-1.6 | 171.37           | 175.93        | 0.97         |
| GW-75-1.6 | 159.16           | 157.74        | 1.01         |
| GW-90-1.6 | 155.24           | 152.36        | 1.02         |
| GW-0-1.4  | 273.45           | 263.90        | 1.04         |
| GW-15-1.4 | 256.23           | 255.20        | 1.00         |
| GW-30-1.4 | 222.27           | 232.72        | 0.96         |
| GW-45-1.4 | 191.46           | 204.12        | 0.94         |
| GW-60-1.4 | 169.80           | 175.93        | 0.97         |
| GW-75-1.4 | 157.57           | 157.74        | 1.00         |
| GW-90-1.4 | 153.43           | 152.36        | 1.01         |
| GW-0-1.2  | 269.15           | 263.90        | 1.02         |
| GW-15-1.2 | 252.11           | 255.20        | 0.99         |
| GW-30-1.2 | 217.56           | 232.72        | 0.93         |
| GW-45-1.2 | 187.46           | 204.12        | 0.92         |
| GW-60-1.2 | 166.02           | 175.93        | 0.94         |
| GW-75-1.2 | 153.99           | 157.74        | 0.98         |
| GW-90-1.2 | 150.28           | 152.36        | 0.99         |
| GW-0-1.0  | 260.26           | 263.90        | 0.99         |
| GW-15-1.0 | 242.61           | 255.20        | 0.95         |
| GW-30-1.0 | 206.48           | 232.72        | 0.89         |
| GW-45-1.0 | 173.90           | 186.61        | 0.93         |
| GW-60-1.0 | 148.97           | 152.36        | 0.98         |
| GW-75-1.0 | 134.16           | 136.60        | 0.98         |
| GW-90-1.0 | 129.40           | 131.95        | 0.98         |
| GW-0-0.8  | 231.80           | 211.12        | 1.10         |
| GW-15-0.8 | 212.53           | 204.16        | 1.04         |
| GW-30-0.8 | 176.82           | 186.18        | 0.95         |
| GW-45-0.8 | 144.61           | 149.28        | 0.97         |
| GW-60-0.8 | 121.27           | 121.89        | 0.99         |
| GW-75-0.8 | 108.22           | 109.28        | 0.99         |
| GW-90-0.8 | 103.75           | 105.56        | 0.98         |
| GW-0-0.6  | 185.07           | 158.34        | 1.17         |
| GW-15-0.6 | 169.11           | 153.12        | 1.10         |
| GW-30-0.6 | 138.33           | 139.63        | 0.99         |
| GW-45-0.6 | 111.26           | 111.96        | 0.99         |
| GW-60-0.6 | 93.05            | 91.42         | 1.02         |
| GW-75-0.6 | 81.27            | 81.96         | 0.99         |
| GW-90-0.6 | 77.81            | 79.17         | 0.98         |

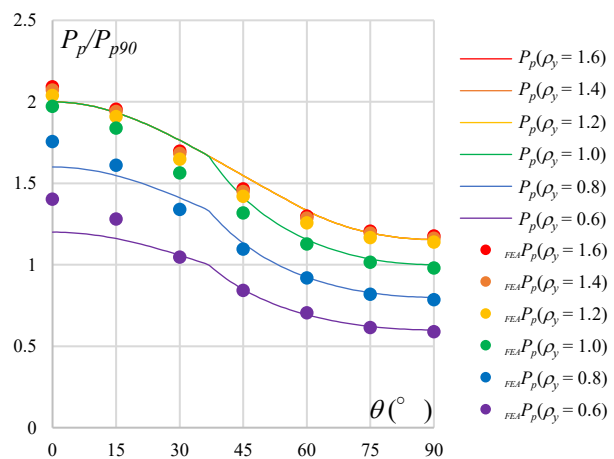
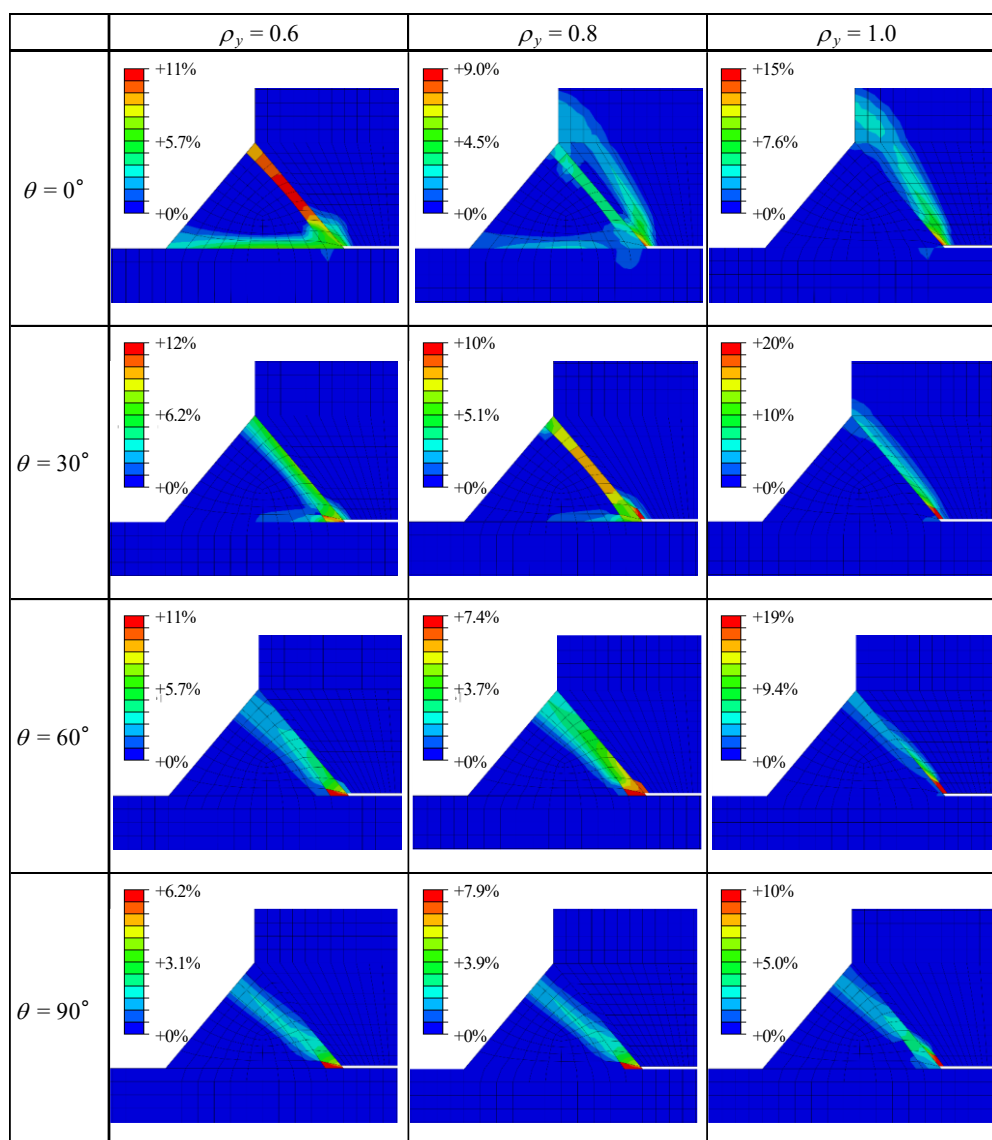


図 2.4.18  $FEAP_p$  と  $P_p$  の比較

(ii)50W

$\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ について、接線剛性が初期剛性の  $1/100$  に低下した時のステップの相当塑性歪のコンター図を図 2.4.19 に示す。コンター図から、 $\theta=0^\circ$  の場合、 $\rho_y=0.6$  では、界面において強度の低い溶接金属の塑性化が卓越しており、 $\rho_y=0.8$  では界面において強度の低い溶接金属および母材の塑性化が発生しており、 $\rho_y=1.0$  以上では、母材の塑性化が卓越している。 $\theta=90^\circ$  の場合は、 $\rho_y=0.6, 0.8, 1.0$  ではのど断面のせん断変形により崩壊機構が決定され、 $\rho_y=1.2, 1.4, 1.6$  では界面のせん断変形により崩壊機構が決定される。これはのど断面長さとのど脚長の比が  $1/\cos 10^\circ = 1.015$  なので、 $\rho_y=1.2$  を境に崩壊機構が変化している。強度比に着目すると、 $\rho_y=0.6$  では、 $\theta$  の全領域にわたり、界面の溶接金属側の塑性化が卓越している。 $\rho_y=0.8, 1.0$  では、斜方角度が大きくなるに伴い、降伏面の発生場所が母材から界面、界面からのど断面に変化していき、 $\rho_y=1.2$  以上では、 $\theta=0^\circ$  の場合、母材の塑性化が卓越しており、斜方角度が大きくなるに伴い、界面の母材側のへと塑性化領域が変化していく。以上に述べた傾向は、崩壊機構の降伏面の形成パターンと概ね対応している。



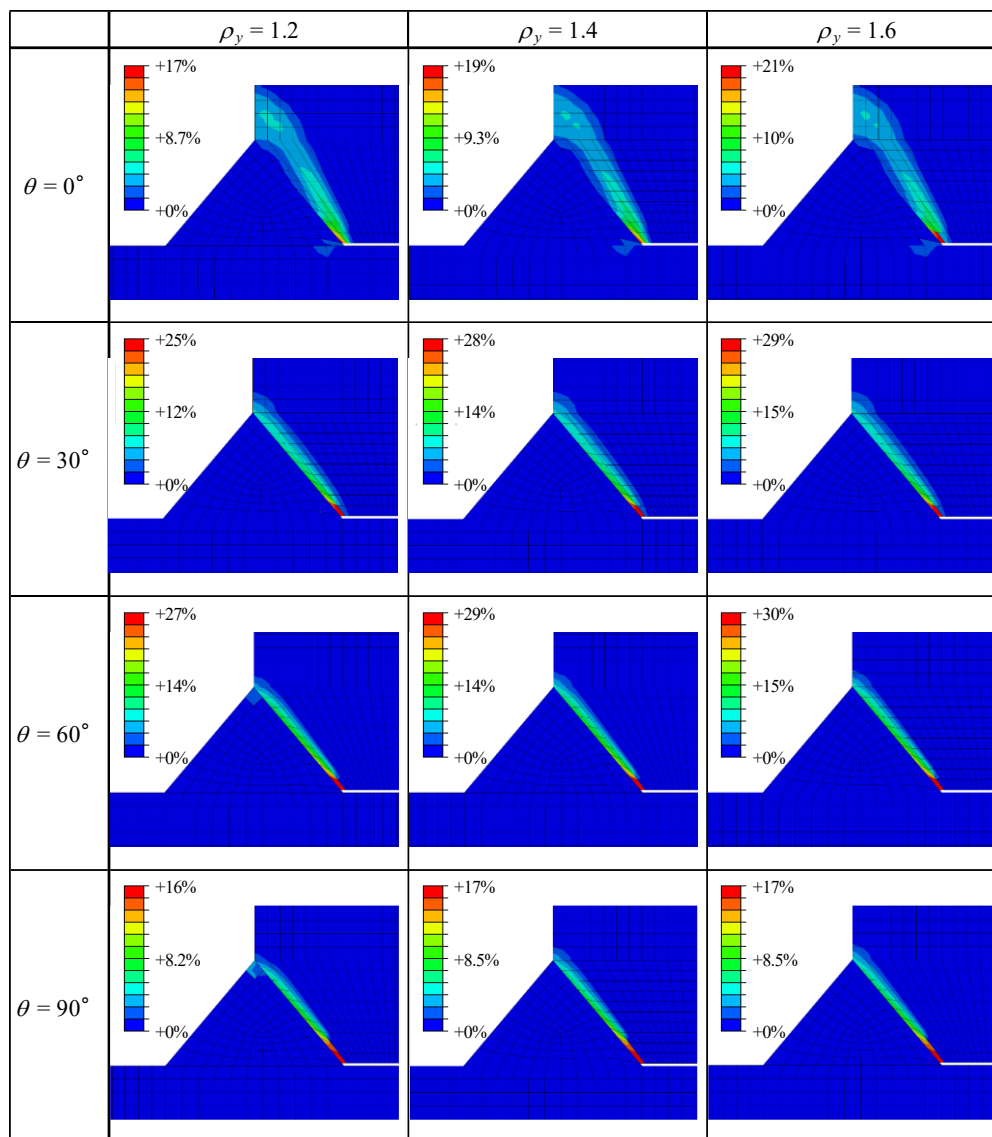


図 2.4.19 相当塑性歪の分布図

崩壊荷重の理論値  $P_p$  と FEA から取得した塑性耐力  $FEAP_p$  の比較を表 2.4.4 および図 2.4.20 に示す。イーブンマッチとなる強度比を 1.0 とした場合では、 $FEAP_p$  と  $P_p$  の比率が  $FEAP_p/P_p=0.88\sim0.99$ (平均値 0.95)。オーバーマッチとなる強度比を 1.2 とした場合では 0.92 $\sim$ 1.01(平均値 0.98)、強度比を 1.4 とした場合では 0.93 $\sim$ 1.02(平均値 0.99)、強度比を 1.6 とした場合では 0.94 $\sim$ 1.02(平均値 1.00)となった。アンダーマッチとなる強度比を 0.8 とした場合では 0.96 $\sim$ 1.05(平均値 1.00)、強度比 0.6 とした場合では 0.99 $\sim$ 1.19(平均値 1.04)。強度比が  $\rho_y=1.0$  から離れるに従い、 $\theta=0^\circ$  近傍において  $P_p$  は  $FEAP_p$  を過小評価する傾向にある。 $\theta=0^\circ$  近傍では機構 S に支配され、降伏面①は母材と溶接金属の界面に形成される。FEA では、強度の高い側が低い側の塑性化を拘束し、強度比に差が生じるほどこの塑性拘束の影響が大きく表れることになる。このため、溶接金属強度と母材強度の小さい方ですべり耐力を算定した極限解析の結果  $P_p$  が  $FEAP_p$  を過小評価したと考えられる。しかし、 $\theta$  および  $\rho_y$  の変化に伴う塑性耐力の変化の傾向を概ね良く捉えており、崩壊荷重  $q_p$  は耐力評価法として有効である。

表 2.4.4  $FEAP_p$  と  $P_p$  の比較

| モデル名       | $FEAP_p$<br>(kN) | $P_p$<br>(kN) | $FEAP_p/P_p$ |
|------------|------------------|---------------|--------------|
| 50W-0-1.6  | 310.99           | 305.31        | 1.02         |
| 50W-15-1.6 | 286.02           | 294.49        | 0.97         |
| 50W-30-1.6 | 237.34           | 252.11        | 0.94         |
| 50W-45-1.6 | 193.78           | 193.91        | 1.00         |
| 50W-60-1.6 | 161.22           | 158.32        | 1.02         |
| 50W-75-1.6 | 144.20           | 141.95        | 1.02         |
| 50W-90-1.6 | 140.15           | 137.11        | 1.02         |
| 50W-0-1.4  | 307.76           | 305.31        | 1.01         |
| 50W-15-1.4 | 283.09           | 294.49        | 0.96         |
| 50W-30-1.4 | 235.54           | 252.11        | 0.93         |
| 50W-45-1.4 | 192.62           | 193.91        | 0.99         |
| 50W-60-1.4 | 160.68           | 158.32        | 1.01         |
| 50W-75-1.4 | 144.11           | 141.95        | 1.02         |
| 50W-90-1.4 | 140.06           | 137.11        | 1.02         |
| 50W-0-1.2  | 303.60           | 305.31        | 0.99         |
| 50W-15-1.2 | 278.94           | 294.49        | 0.95         |
| 50W-30-1.2 | 231.27           | 252.11        | 0.92         |
| 50W-45-1.2 | 189.28           | 193.91        | 0.98         |
| 50W-60-1.2 | 159.21           | 158.32        | 1.01         |
| 50W-75-1.2 | 143.14           | 141.95        | 1.01         |
| 50W-90-1.2 | 138.70           | 137.11        | 1.01         |
| 50W-0-1.0  | 295.64           | 305.31        | 0.97         |
| 50W-15-1.0 | 269.98           | 294.49        | 0.92         |
| 50W-30-1.0 | 221.11           | 252.11        | 0.88         |
| 50W-45-1.0 | 179.17           | 190.96        | 0.94         |
| 50W-60-1.0 | 151.52           | 155.92        | 0.97         |
| 50W-75-1.0 | 137.97           | 139.79        | 0.99         |
| 50W-90-1.0 | 132.35           | 135.03        | 0.98         |
| 50W-0-0.8  | 274.27           | 261.51        | 1.05         |
| 50W-15-0.8 | 247.30           | 243.76        | 1.01         |
| 50W-30-0.8 | 192.64           | 201.68        | 0.96         |
| 50W-45-0.8 | 151.26           | 152.77        | 0.99         |
| 50W-60-0.8 | 125.34           | 124.73        | 1.00         |
| 50W-75-0.8 | 112.01           | 111.83        | 1.00         |
| 50W-90-0.8 | 106.93           | 108.02        | 0.99         |
| 50W-0-0.6  | 232.78           | 196.14        | 1.19         |
| 50W-15-0.6 | 199.57           | 182.82        | 1.09         |
| 50W-30-0.6 | 151.55           | 151.26        | 1.00         |
| 50W-45-0.6 | 116.90           | 114.58        | 1.02         |
| 50W-60-0.6 | 96.62            | 93.55         | 1.03         |
| 50W-75-0.6 | 84.16            | 83.88         | 1.00         |
| 50W-90-0.6 | 80.25            | 81.02         | 0.99         |

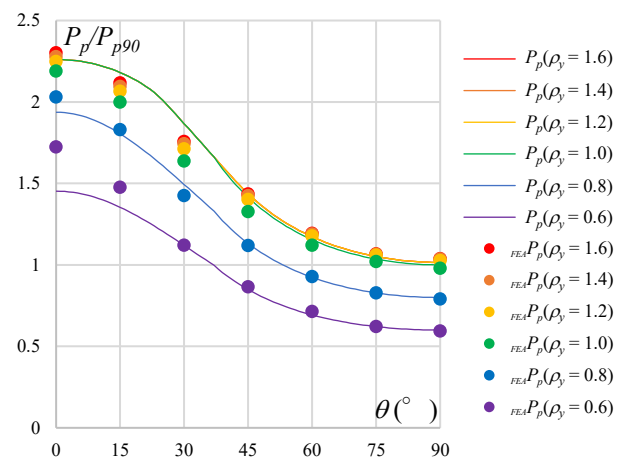


図 2.4.20  $FEAP_p$  と  $P_p$  の比較

## 2.5 まとめ

本章では，等脚隅肉溶接継目および異形隅肉溶接継目の崩壊機構を提案し，上界定理による極限解析に基づき，崩壊荷重を与える理論解を導出した．さらに，有限要素数値解析を用いて導出した理論解の妥当性を検証した．

- 1) 任意の断面形状を有する等脚隅肉溶接継目および異形隅肉溶接継目について，崩壊機構を仮定し，溶接継目の崩壊荷重を与える理論解を導出した．
- 2) 各種溶接継目について，斜方角度 $\theta(=0^\circ\sim90^\circ)$ および強度比を 0.6～1.6 まで変化させた数値計算を行い，強度比が崩壊機構および耐力に与える影響を示した．
- 3) 等脚隅肉溶接から溶け込みを $\alpha_1=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ と変化させた極限解析結果を用いて，溶け込みの増加による耐力の上昇傾向を示した．
- 4) 材料特性に完全弾塑性型の応力-ひずみ関係を入力した有限要素数値解析から，塑性耐力を取得し，崩壊荷重の理論解と比較したところ，変化の傾向を良く捉えており，崩壊荷重の理論解は溶接継目の耐力評価法として有効であることを示した．
- 5) 有限要素数値解析から得られる相当塑性歪のコンター図より，理論解の崩壊機構の形成パターンと対応していることを示した．

## 第3章 最大耐力

### 3.1 はじめに

本章では、2章に示した崩壊荷重を準用し、斜方隅肉溶接継目の最大耐力を評価するために、既報の実験結果<sup>16),17)</sup>と試験体の隅肉形状および機械的性質をモデル化した FEA 結果を比較する。

### 3.2 斜方等脚隅肉溶接継目

#### 3.2.1 実験計画概要

試験体形状の例を図 3.2.1 に示し、試験体一覧を表 3.2.1 に示す。I シリーズの試験体は斜方角度を  $0^\circ \sim 90^\circ$  までも  $15^\circ$  刻みとした 7 体、II シリーズの試験体は  $15^\circ$ 、 $75^\circ$  を除いた各 5 体の計 27 体とした。I シリーズは母材 SM490A と溶接ワイヤー YGW11 の組合せである。II シリーズの FW1 は母材 H-SA700 と溶接ワイヤー G78A の組合せ、FW2 は母材 H-SA700 と溶接ワイヤー YGW11 の組合せ、FW3 は母材 SM490A と溶接ワイヤー G78A の組合せ、FW4 は母材 SM490A と溶接ワイヤー YGW11 の組合せである。

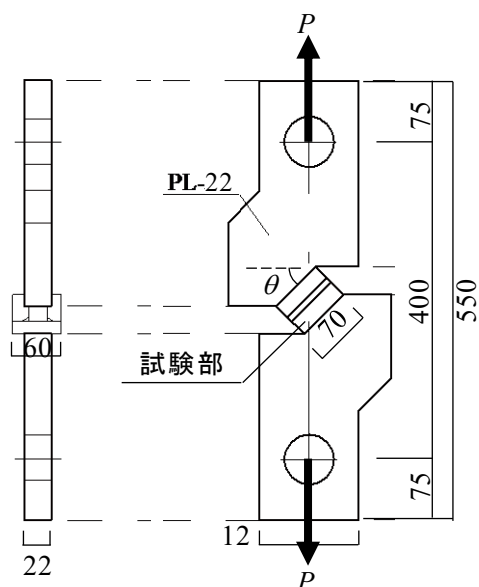


図 3.2.1 試験体形状例 ( $\theta = 45^\circ$ )

表 3.2.1 試験体一覧

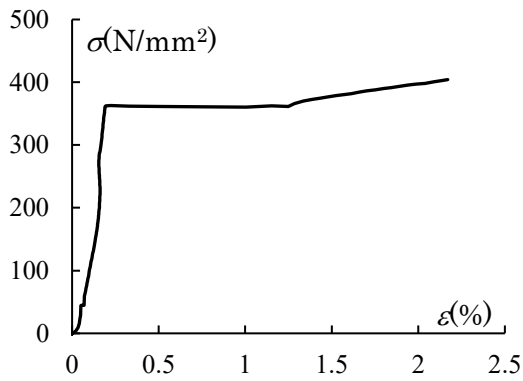
|                        | モデル    | 母材       | 溶接金属  | 斜方角度 $\theta$<br>[°] | のど厚 $a$<br>[mm] | 溶接長 $L$<br>[mm] |
|------------------------|--------|----------|-------|----------------------|-----------------|-----------------|
| I<br>シ<br>リ<br>ー<br>ズ  | FW-0   | SM490A   | YGW11 | 0                    | 5               | 70              |
|                        | FW-15  |          |       | 15                   |                 |                 |
|                        | FW-30  |          |       | 30                   |                 |                 |
|                        | FW-45  |          |       | 45                   |                 |                 |
|                        | FW-60  |          |       | 60                   |                 |                 |
|                        | FW-75  |          |       | 75                   |                 |                 |
|                        | FW-90  |          |       | 90                   |                 |                 |
| II<br>シ<br>リ<br>ー<br>ズ | FW1-0  | H-SA700B | G78A  | 0                    | 5               | 70              |
|                        | FW1-30 |          |       | 30                   |                 |                 |
|                        | FW1-45 |          |       | 45                   |                 |                 |
|                        | FW1-60 |          |       | 60                   |                 |                 |
|                        | FW1-90 |          |       | 90                   |                 |                 |
|                        | FW2-0  | H-SA700B | YGW11 | 0                    | 5               | 70              |
|                        | FW2-30 |          |       | 30                   |                 |                 |
|                        | FW2-45 |          |       | 45                   |                 |                 |
|                        | FW2-60 |          |       | 60                   |                 |                 |
|                        | FW2-90 |          |       | 90                   |                 |                 |
|                        | FW3-0  | SM490A   | G78A  | 0                    | 5               | 70              |
|                        | FW3-30 |          |       | 30                   |                 |                 |
|                        | FW3-45 |          |       | 45                   |                 |                 |
|                        | FW3-60 |          |       | 60                   |                 |                 |
|                        | FW3-90 |          |       | 90                   |                 |                 |
|                        | FW4-0  | SM490A   | YGW11 | 0                    | 5               | 70              |
|                        | FW4-30 |          |       | 30                   |                 |                 |
|                        | FW4-45 |          |       | 45                   |                 |                 |
|                        | FW4-60 |          |       | 60                   |                 |                 |
|                        | FW4-90 |          |       | 90                   |                 |                 |

### 【材料の機械的性質】

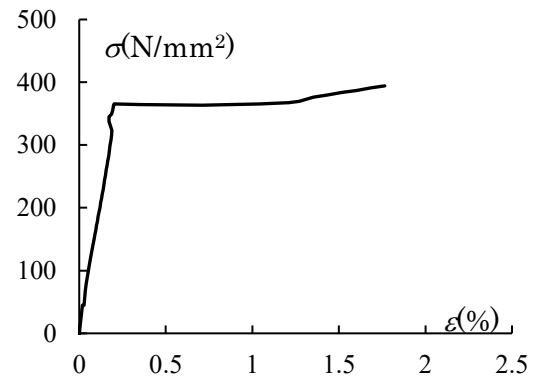
材料の機械的性質を表 3.2.2 に示し、応力歪関係を図 3.2.2 および図 3.2.3 に示す．降伏点は降伏棚の有無にかかわらず，0.2%offset 値を用いた．なお，それぞれの材料について二回ずつ引張試験を行っており，その平均値を示している．溶接金属の引張強さ  $\sigma_{wu}$  と母材の引張強さ  $\sigma_{bu}$  の比  $\rho_u$  は I シリーズでは  $\rho_u=1.19$ ，II シリーズの FW1 では  $\rho_u=1.10$ ，FW2 では  $\rho_u=0.83$ ，FW3 では  $\rho_u=1.87$  および FW4 では  $\rho_u=1.30$  である．また，溶接金属の降伏点  $\sigma_{wy}$  と母材の降伏点  $\sigma_{by}$  の比  $\rho_y$  は I シリーズでは  $\rho_y=1.38$ ，II シリーズの FW1 では  $\rho_y=0.86$ ，FW2 では  $\rho_y=0.77$ ，FW3 では  $\rho_y=2.08$  および FW4 では  $\rho_y=1.59$  である．

表 3.2.2 材料の機械的性質

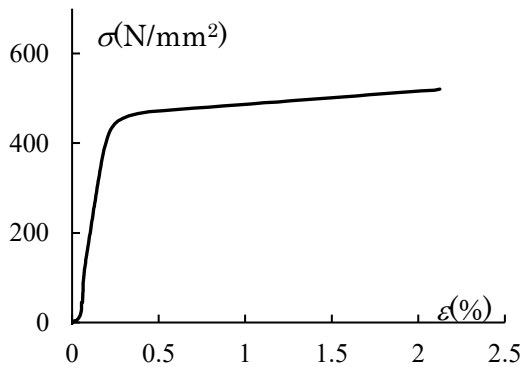
|                        | 鋼材又は<br>溶接ワイヤ | $\sigma_y$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_u$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | YR<br>[%] | EL<br>[%] |
|------------------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|
| I<br>シ<br>リ<br>ー<br>ズ  | SM490A        | 363                                | 515                                | 70.4      | 31.5      |
|                        | YGW11         | 502                                | 613                                | 82.8      | 25.7      |
| II<br>シ<br>リ<br>ー<br>ズ | H-SA700B      | 764                                | 826                                | 92.5      | 14.4      |
|                        | SM490A        | 341                                | 523                                | 65.2      | 49.9      |
|                        | G78A(FW1)     | 656                                | 908                                | 72.2      | 17.7      |
|                        | YGW11(FW2)    | 587                                | 689                                | 85.3      | 20.7      |
|                        | G78A(FW3)     | 710                                | 980                                | 72.4      | 16.8      |
|                        | YGW11(FW4)    | 541                                | 678                                | 79.9      | 22.9      |



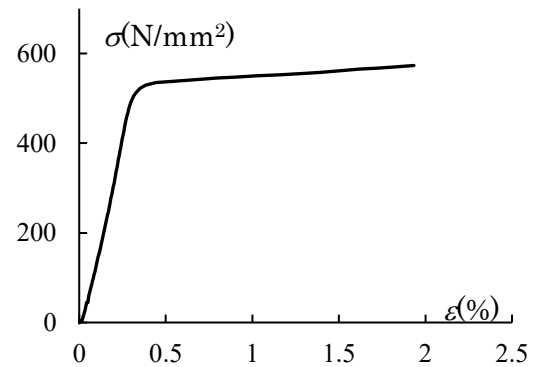
(a)PL-1



(b)PL-2

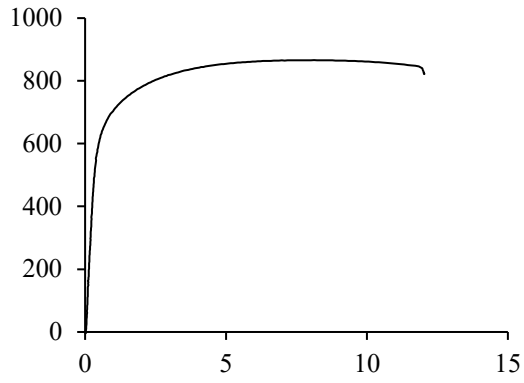


(c)FW-1

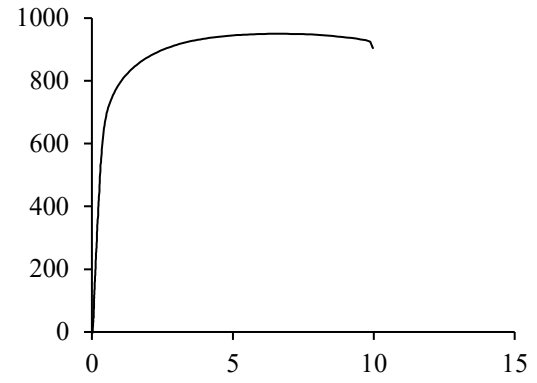


(d)FW-2

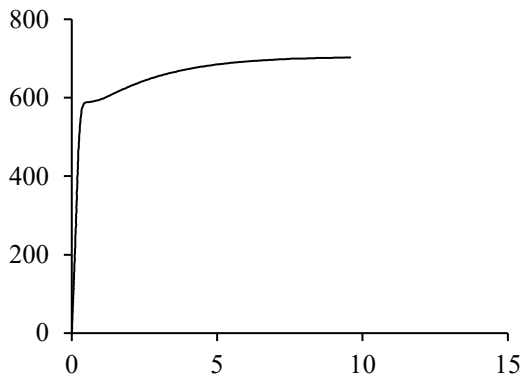
図 3.2.2 応力-歪関係 (I シリーズ)



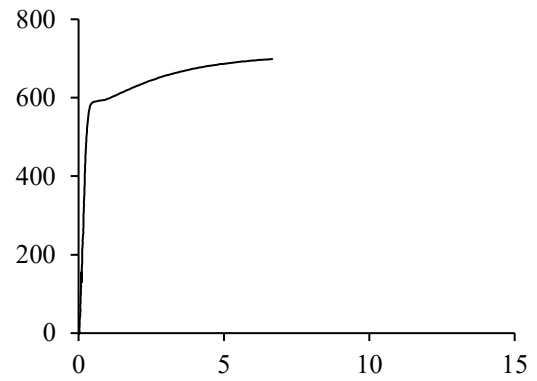
(a)FW1-1



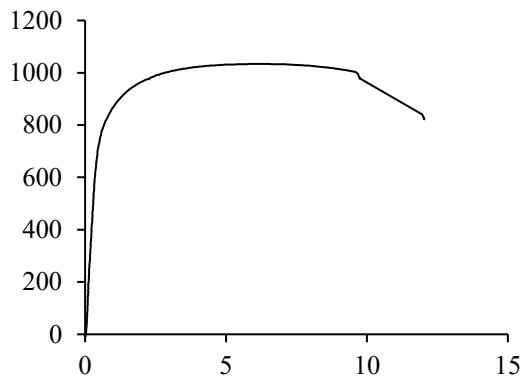
(b)FW1-2



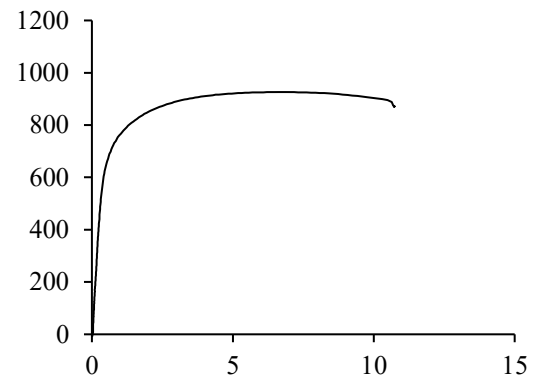
(c)FW2-1



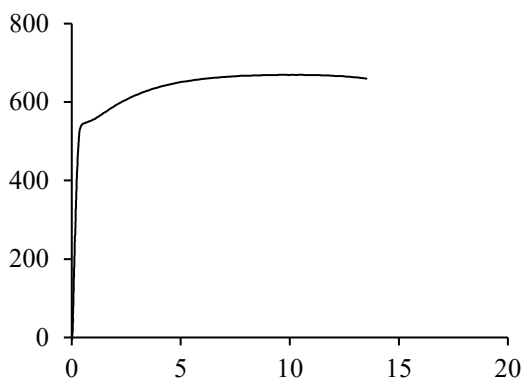
(d)FW2-2



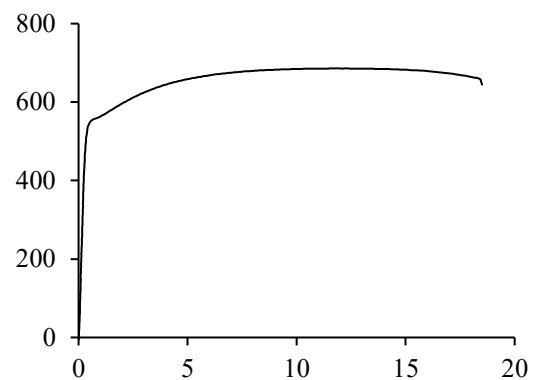
(e)FW3-1



(f)FW3-2



(g)FW4-1



(h)FW4-2

図 3.2.3 応力-歪関係 (II シリーズ)

### 【マクロ試験】

写真 3.2.1 に示すマクロ試験写真から、図 3.2.4 に示す溶接部寸法を測定し、各溶接継目の角度 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、および寸法 $S$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ を平均した結果を表 3.2.3 に示す。

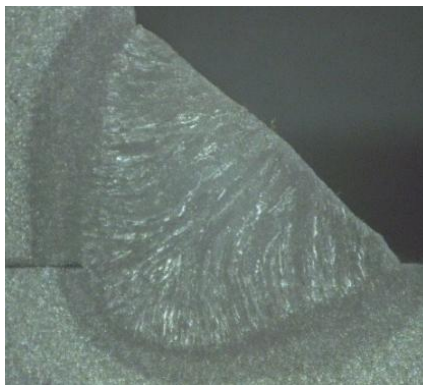


写真 3.2.1 マクロ試験写真

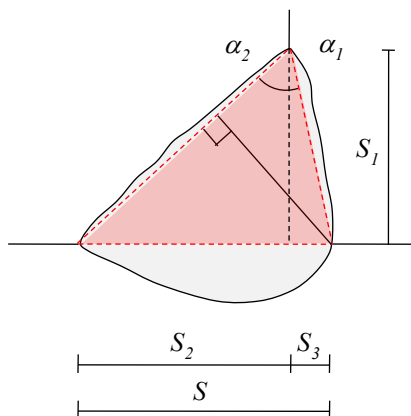


図 3.2.4 溶接部寸法詳細

表 3.2.3 溶接部寸法測定結果

|            | モデル<br>名称 | $S_1$<br>[mm] | $S_2$<br>[mm] | $S_3$<br>[mm] | $S$<br>[mm] | $\alpha_1$<br>[degree] | $\alpha_2$<br>[degree] |
|------------|-----------|---------------|---------------|---------------|-------------|------------------------|------------------------|
| I<br>シリーズ  | FW        | 7.96          | 8.63          | 1.57          | 10.2        | 11.2                   | 47.3                   |
| II<br>シリーズ | FW1       | 7.35          | 7.01          | 3.33          | 10.3        | 24.3                   | 43.6                   |
|            | FW2       | 7.4           | 6.92          | 3.29          | 10.2        | 24                     | 43.1                   |
|            | FW3       | 6.66          | 7.53          | 2.72          | 10.2        | 22.2                   | 48.5                   |
|            | FW4       | 7.36          | 7.43          | 3.28          | 10.7        | 24.1                   | 45.3                   |

### 【実験方法】

裁荷にはアムスラー型万能試験機を用いて単調引張荷重を与えた．図 3.2.5 に治具を含む試験体全体図を示す．試験部は連続して溶接した長尺の材料を 70mm に切断することで同一の溶接条件となるようにした．その後，試験部に所定の角度の荷重が作用するように引張用プレートを溶接し，上下に取り付けたピン治具を介して試験機に固定した．

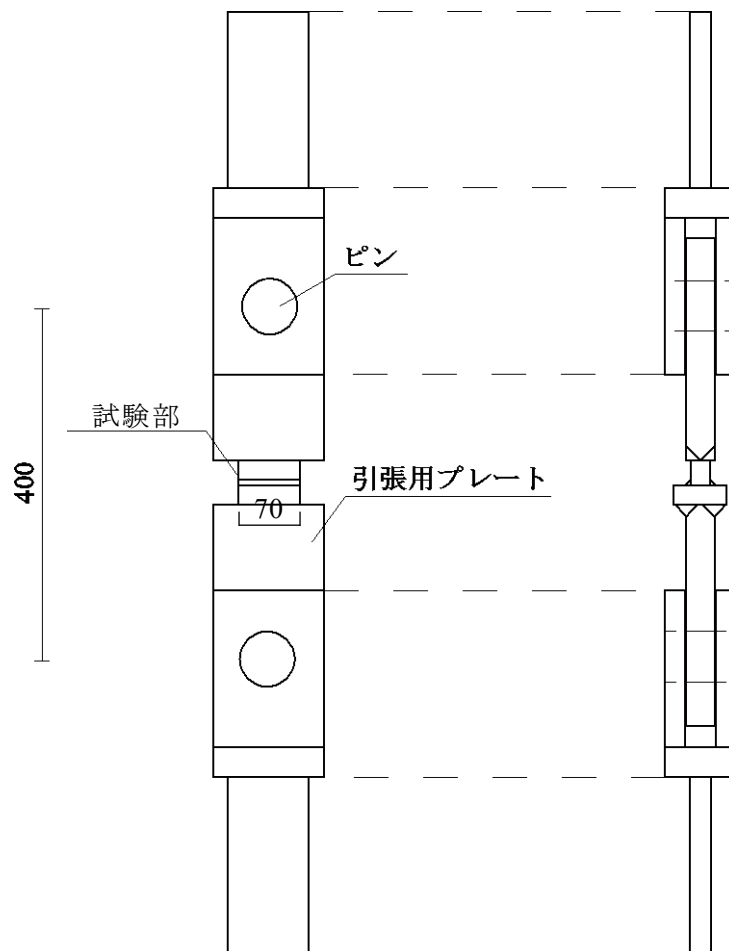


図 3.2.5 試験体全体図

### 【測定方法】

変位の測定については，図 3.2.6 に示す位置に変位計を設置し測定した．

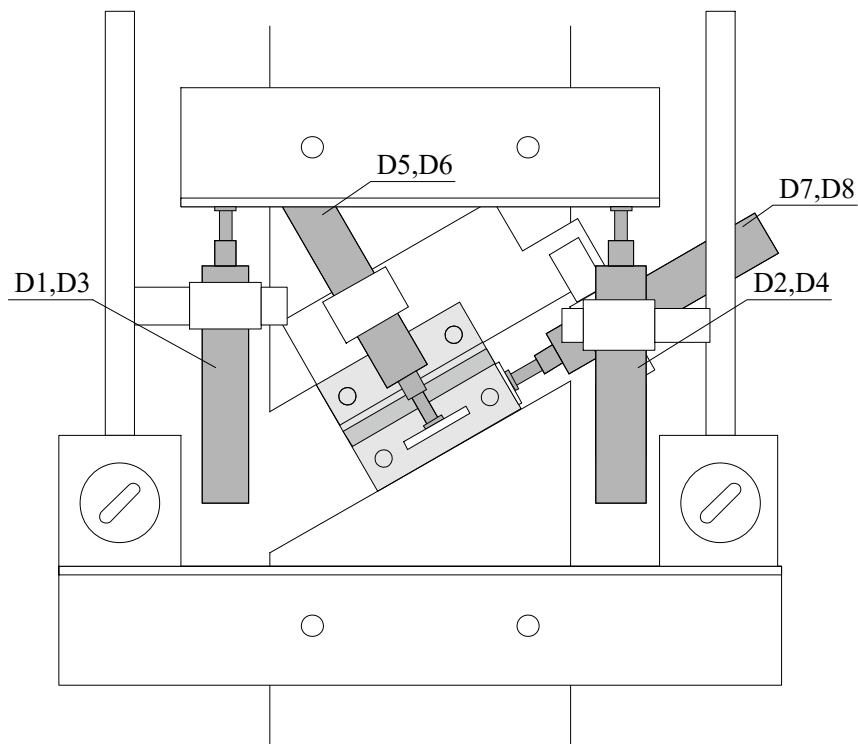


図 3.2.6 変位測定位置

D1～4：荷重方向全体変形（左右，表裏で 4 か所）

D5, D6：溶接部局部変形(溶接線直交方向)

D7, D8：溶接部局部変形(溶接線方向)

溶接部の荷重方向変形  $u$  および荷重直交方向変形  $v$  を次のように求めた．

$$u = \frac{1}{2}(D5 + D6) \cdot \cos \theta + \frac{1}{2}(D7 + D8) \cdot \sin \theta$$

$$v = -\frac{1}{2}(D5 + D6) \cdot \sin \theta + \frac{1}{2}(D7 + D8) \cdot \cos \theta$$

### 3.2.2 実験結果概要

表 3.2.4 に実験の最大耐力一覧を示す.

表 3.2.4 最大耐力一覧

|                        | モデル    | $P_u$<br>(kN) |
|------------------------|--------|---------------|
| I<br>シ<br>リ<br>ー<br>ズ  | FW-0   | 469.2         |
|                        | FW-15  | 465.0         |
|                        | FW-30  | 445.1         |
|                        | FW-45  | 413.1         |
|                        | FW-60  | 383.9         |
|                        | FW-75  | 371.0         |
|                        | FW-90  | 394.7         |
|                        |        |               |
| II<br>シ<br>リ<br>ー<br>ズ | FW1-0  | 702.4         |
|                        | FW1-30 | 736.4         |
|                        | FW1-45 | 671.6         |
|                        | FW1-60 | 619.8         |
|                        | FW1-90 | 528.9         |
|                        | FW2-0  | 718.6         |
|                        | FW2-30 | 633.3         |
|                        | FW2-45 | 550.7         |
|                        | FW2-60 | 498.2         |
|                        | FW2-90 | 535.4         |
|                        | FW3-0  | 628.7         |
|                        | FW3-30 | 599.3         |
|                        | FW3-45 | 508.3         |
|                        | FW3-60 | 545.5         |
|                        | FW3-90 | 509.0         |
|                        | FW4-0  | 619.3         |
|                        | FW4-30 | 619.2         |
|                        | FW4-45 | 539.6         |
|                        | FW4-60 | 481.3         |
|                        | FW4-90 | 509.4         |

### 3.2.3 FEA 概要

I シリーズと II シリーズの実験を再現したモデルを作成し解析を行った．解析モデルは図 3.2.7(a)に示すように試験体に治具を溶接した形状とし，8 節点ソリッド要素(C3D8R)を用いて作成した 1/2 モデルである．表 3.2.3 に示すマクロ試験結果を用いて図 3.2.4 に赤点線で示すように止端とルートをつなぐ直線により溶接部を三角形でモデル化したモデル①（図 3.2.7(b)）および溶接部のマクロ試験結果と硬さ試験結果に基づき詳細に溶込み形状および熱影響部をモデル化したモデル②（図 3.2.7(c)）を作成した．

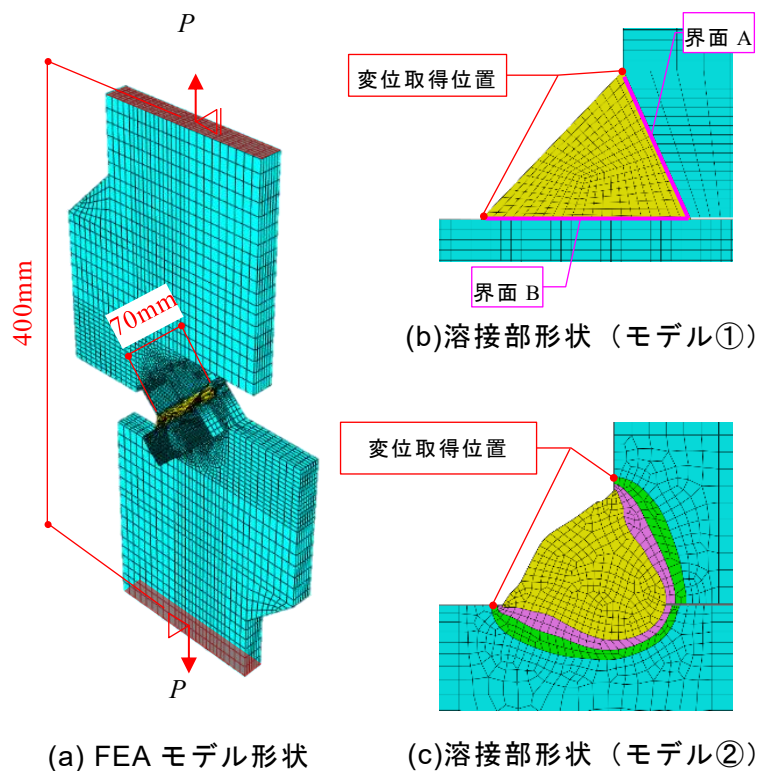


図 3.2.7 FEA モデルの例

FEA に入力した塑性域の材料特性を図 3.2.8 に示す． 入力した真応力-真ひずみ関係は引張試験から得られた公称応力  $\sigma'$  および公称ひずみ  $\varepsilon'$  を以下の式を用いて，真応力  $\sigma$  および真ひずみ  $\varepsilon$  に換算した後，多折線で近似した．なお，弾性域にはヤング係数を  $205000(\text{N}/\text{mm}^2)$ ，ポアソン比を  $0.3$  とした材料特性を入力した．

$$\sigma^t = \sigma^n (\varepsilon^n + 12) \quad (3.2.1)$$

$$\varepsilon^t = \ln(\varepsilon^t + 1) \quad (3.2.2)$$

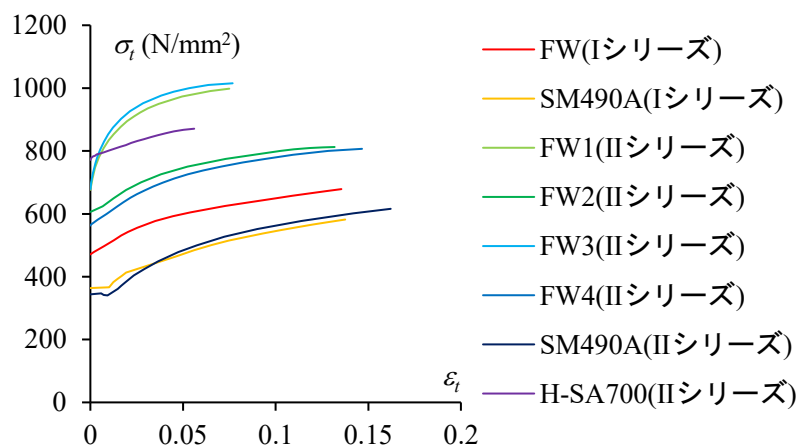


図 3.2.8 真応力-真ひずみ関係(真ひずみの塑性成分)

本稿の FEA では, 破断現象を追跡できないため最大耐力を知ることはできない. そこで, 桑村らによる研究<sup>18)</sup>および劉らの研究<sup>19)</sup>に基づき, 図 3.2.9 (a) に示すように母材と溶接金属の界面に接する 4 個の要素および(b) に示すように HAZ 部と溶接金属の界面に接する 4 個の要素について, (c)および(d)に示すように応力三軸度 $\eta$ -相当塑性歪 $\varepsilon_{eq}$  関係と延性き裂発生限界曲線の交点となるステップを取得し, 最も早いステップの荷重を FEA の最大耐力 $_{FEA}P_u$ と定義した. なお, 劉らの研究<sup>19)</sup>については実験から得られる係数を用いているが, 本実験においても適用可能と仮定して最大耐力を取得した. 図 3.2.10 に FEA より得られた荷重変形関係の例を示すととも,  $_{FEA}P_u$ を●印で示す. 良く知られているように, 斜方角度 $\theta$ の減少に伴い, 最大耐力 $_{FEA}P_u$ に到達する時の変形量は小さくなっている.

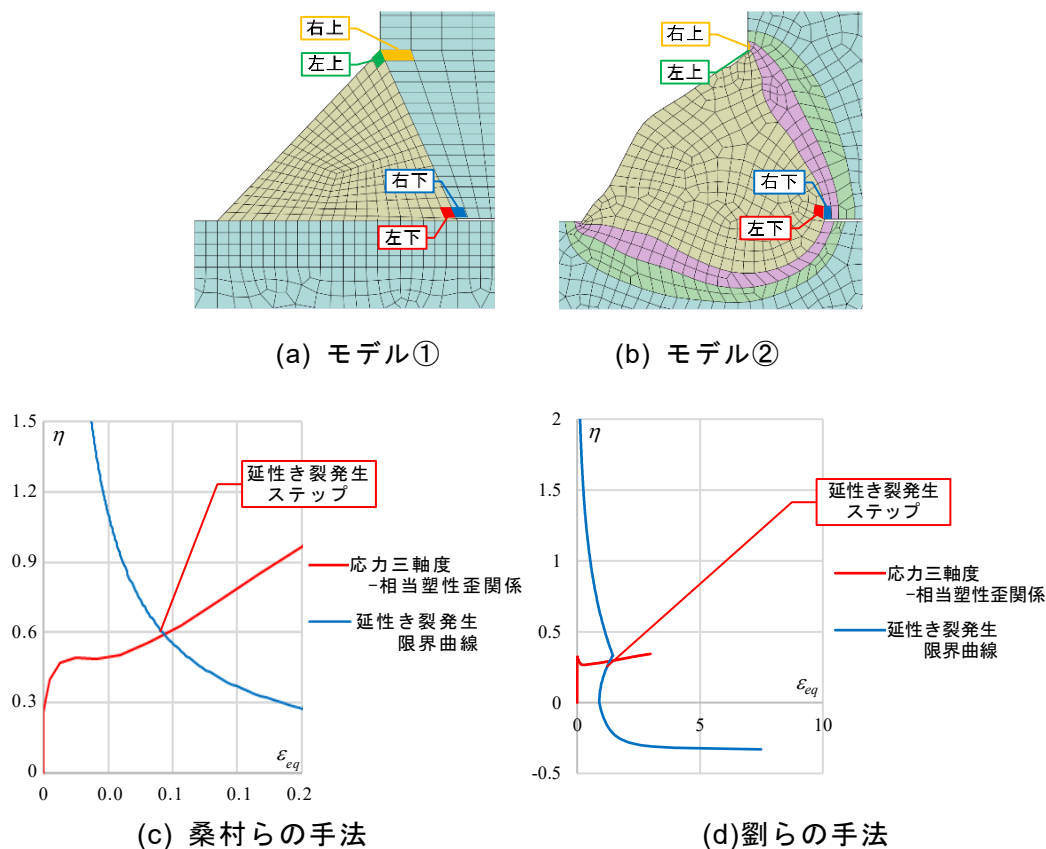
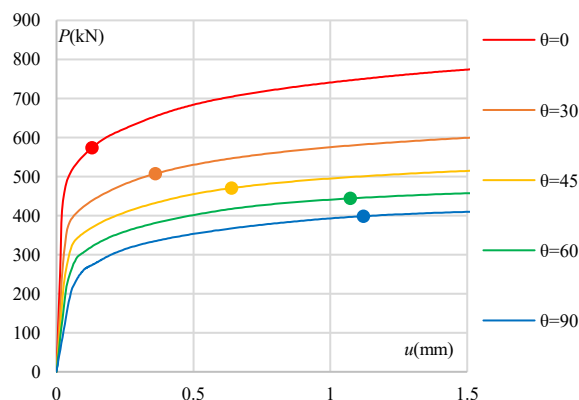


図 3.2.9 延性き裂発生ステップの取得方法



### 3.2.4 実験と FEA の比較

#### 【モデル①】

文献 16), 17) の実験の最大荷重  $P_{max}$  と FEA の最大耐力  $FEAP_u$  (モデル①) の比較を図 3.2.11 に示す. I シリーズについては,  $P_{max}$  と  $FEAP_u$  の比  $P_{max}/FEAP_u = 0.965 \sim 1.15$  (平均値 1.02) であり, 良い対応を示している. II シリーズについては, FW1 および FW2 では, 試験体 FW1-0 を除き,  $P_{max}$  と  $FEAP_u$  は概ね良い対応を示す. FW1 では,  $\theta = 0^\circ$  で  $P_{max}/FEAP_u = 0.864$ , その他の角度では  $P_{max}/FEAP_u = 0.925 \sim 1.04$  (平均 1.00) である. FW1 は, H-SA700 と G78A の組合せであり,  $\theta = 0^\circ$  の場合, 実験ではほとんど塑性変形が生じずに破断に至っている. 後述するビッカース硬さ試験の結果によると熱影響部の硬さは 400HV を超えており熱影響部の脆化に伴い, 前面隅肉溶接では溶接線全域が十分に塑性化する前に破断に至った可能性がある. FW2 では,  $P_{max}/FEAP_u = 0.964 \sim 1.11$  (平均値 1.02) である.

一方, FW3 および FW4 では,  $FEAP_u$  は  $P_{max}$  を過小評価する傾向にある. FW3 では,  $P_{max}/FEAP_u = 1.15 \sim 1.35$  (平均値 1.25), FW4 では,  $P_{max}/FEAP_u = 1.08 \sim 1.28$  (平均値 1.16) である.

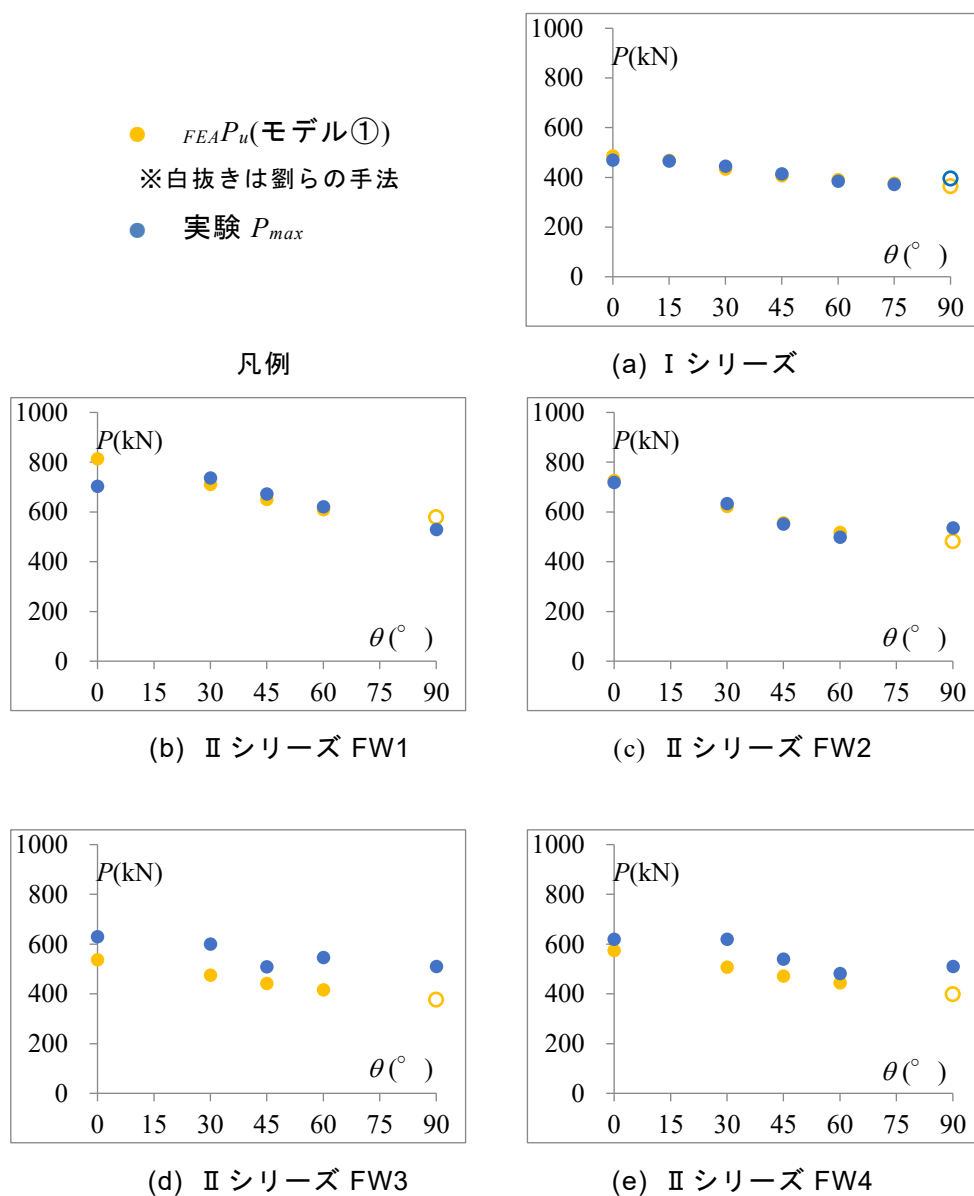


図 3.2.11  $P_{max}$  と  $FEAP_u$  (モデル①) の比較

## 【モデル②】

Ⅱシリーズの $\rho_u$ が大きいFW3およびFW4において、解析値が実験値を過小評価する原因として、実際には熱影響部（以下、HAZ）が溶接部の周囲に存在していることが挙げられる。その影響を調べるために、Ⅱシリーズについてマクロ試験写真をもとに溶接部の溶込み形状およびHAZを詳細にモデル化したモデル②を作成した。HAZの材料特性は図3.2.12に示すビッカース硬さ試験結果を硬さ換算表（SAE規格J417）によって引張強さに換算し、文献20)および21)を参照して、 $n$ 乗硬化則により、真応力-真ひずみ関係を推定した。なお、HAZの硬さはボンド部から母材へと連続的に変化しているが、図3.2.13に示す赤色の2点の硬さ平均をHAZ内側、青色の2点の硬さ平均をHAZ外側として、2層に分けて材料特性を入力した。FEAに入力した真応力-真歪関係を図3.2.14に示す。その他の条件はFEA概要に示すものと同様である。

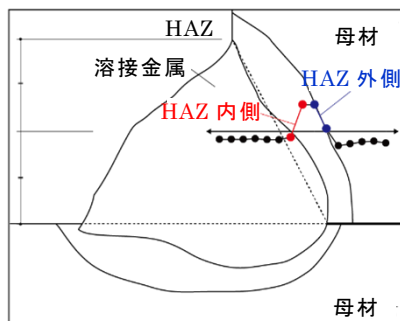
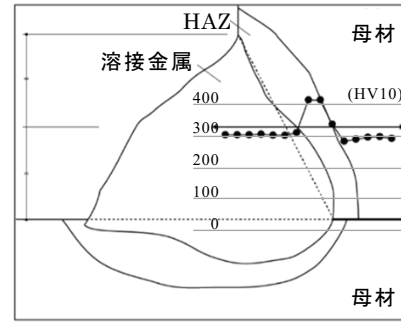
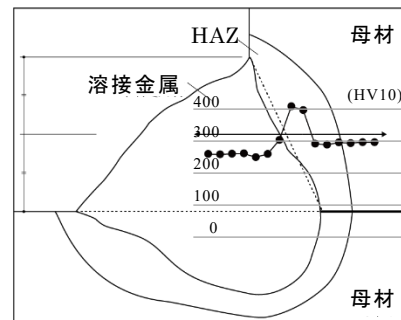


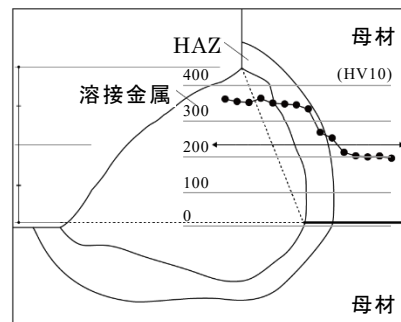
図 3.2.13 ビッカース硬さ分布



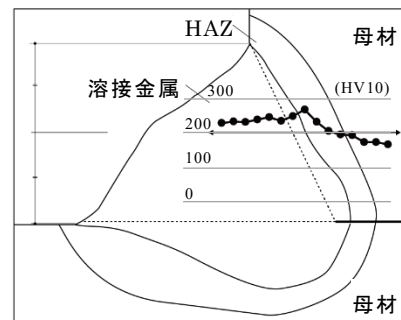
(a) FW1



(b) FW2

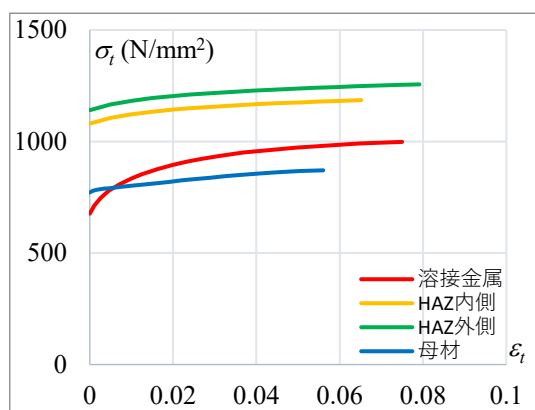


(c) FW3

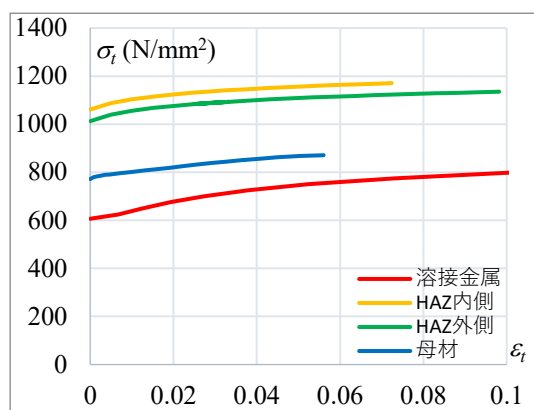


(d) FW4

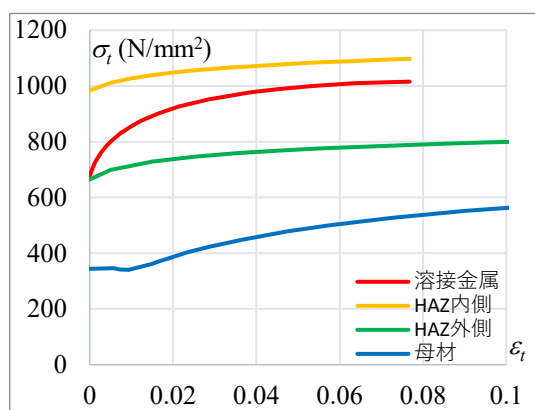
図 3.2.12 溶接部形状とビッカース硬さ試験結果



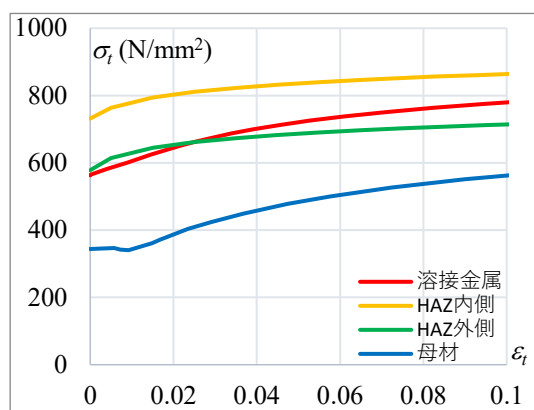
(a)FW1



(b)FW2



(c)FW3



(d)FW4

図 3.2.14 真応力-真歪関係 (HAZ・母材・溶接金属)

モデル②より得られた  $FEAP_u$  を図 3.2.15 に併せて示す．なお， $FEAP_u$  は，図 3.2.9(b)に示す要素についてモデル①の場合と同様の手順で取得した．

FW1 および FW2 については，モデル①による  $FEAP_u$  とモデル②による  $FEAP_u$  に差は無い．一方，FW3 および FW4 については，溶接部を詳細に再現すると  $FEAP_u$  が大きくなり，実験値との差が小さくなる．これは，図 3.2.12 に示したビッカース硬さの分布をみると，FW1 および FW2 では，母材強度  $\approx$  溶接金属強度  $<$  HAZ 強度となっているのに対して，FW3 および FW4 では，母材強度  $<$  HAZ 強度  $\approx$  溶接金属強度となっているためと考えられる．すなわち，FW1 および FW2 では，HAZ の内側の溶接金属側が塑性化するため，モデル②とモデル③による差は無く，FW3 および FW4 では，HAZ 外周に沿って母材側が塑性化し，降伏面の面積が大きくなることで強度が上昇していると考えられる．

- $FEAP_u$ (モデル①)
- $FEAP_u$ (モデル②)
- ※白抜きは劉らの手法
- 実験  $P_{max}$

凡例

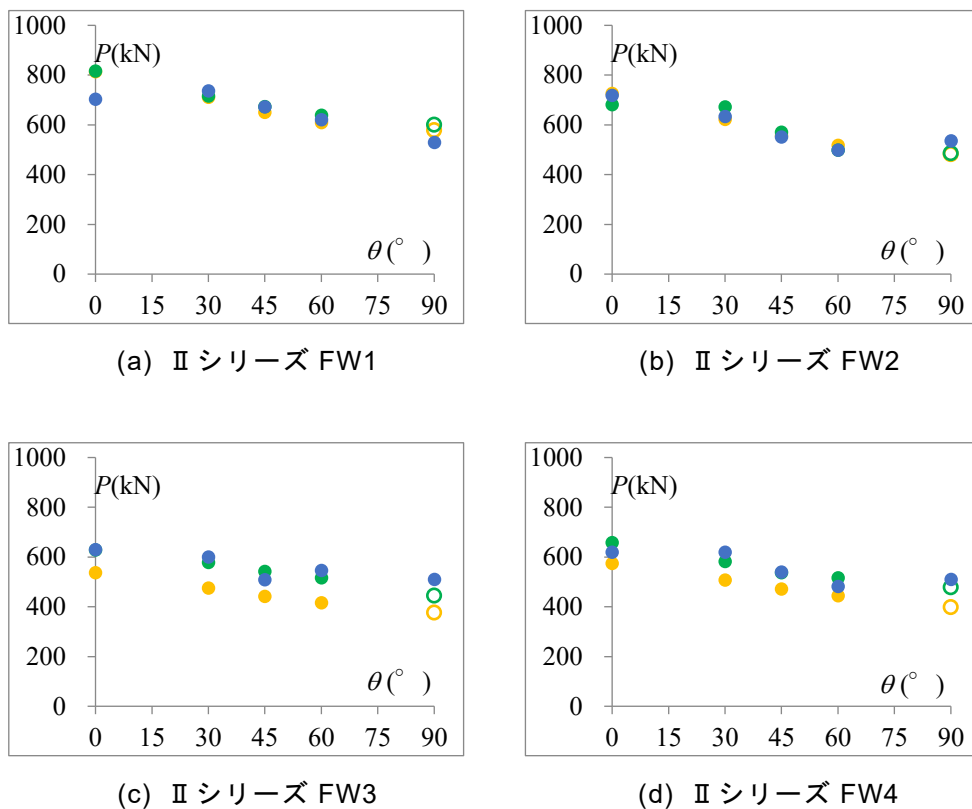


図 3.2.15  $P_{max}$  と  $FEAP_u$  (モデル①) および  $FEAP_u$  (モデル②) の比較

$P_{max}$  と  $FEAP_u$  (モデル①) および  $FEAP_u$  (モデル②) の関係を図 3.2.16 および図 3.2.17 に示す. モデル①とモデル②を比較すると, モデル②により  $\rho_u$  が大きい場合の精度が向上し, ばらつきが軽減されていることがわかる.

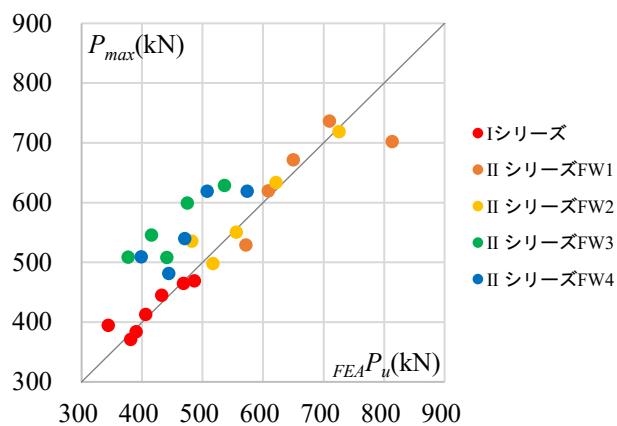


図 3.2.16 実験結果と FEA 結果の相関図 (モデル①)

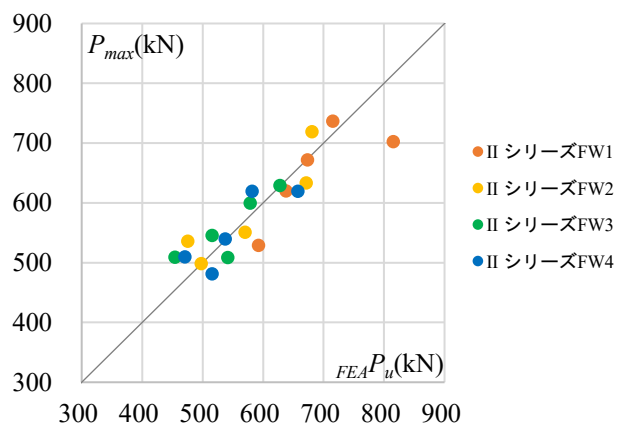


図 3.2.17 実験結果と FEA 結果の相関図 (モデル②)

### 3.3 斜方異形隅肉溶接継目

#### 3.3.1 実験計画概要

試験体形状の例を図 3.3.1 に示し、試験体一覧を表 3.3.1 に示す。試験体は、隅肉溶接継目の FW 試験体、母材に 60°の開先を設けた異形隅肉溶接継目の GW 試験体、異形隅肉溶接継目の開先角度を 50°とした 50W 試験体の 3 種類である。各試験体は斜方角度を 0°, 30°, 45°, 60°, 90°とした 5 体ずつの計 10 体とした。材料は母材 SM490A と溶接ワイヤー YGW11 の組合せである。

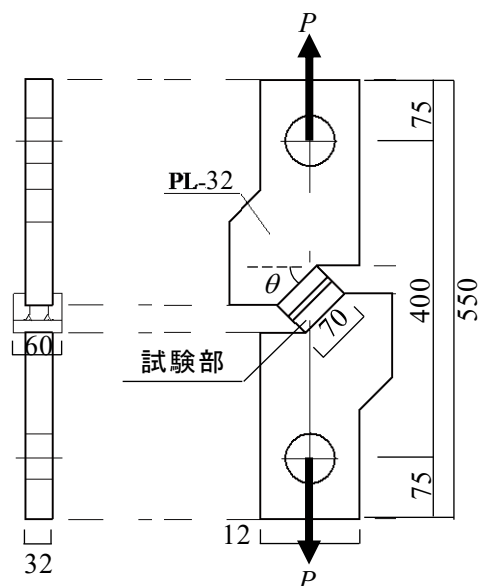


表 3.3.1 試験体一覧

|     | モデル    | 母材     | 溶接金属  | 斜方角度 $\theta$ [°] | のど厚 $a$ [mm] | 溶接長 $L$ [mm] |
|-----|--------|--------|-------|-------------------|--------------|--------------|
| GW  | GW-0   | SM490A | YGW11 | 0                 | 5.0          | 70           |
|     | GW-30  |        |       | 30                |              |              |
|     | GW-45  |        |       | 45                |              |              |
|     | GW-60  |        |       | 60                |              |              |
|     | GW-90  |        |       | 90                |              |              |
| 50W | 50W-0  | SM490A | YGW11 | 0                 | 5.1          | 70           |
|     | 50W-30 |        |       | 30                |              |              |
|     | 50W-45 |        |       | 45                |              |              |
|     | 50W-60 |        |       | 60                |              |              |
|     | 50W-90 |        |       | 90                |              |              |

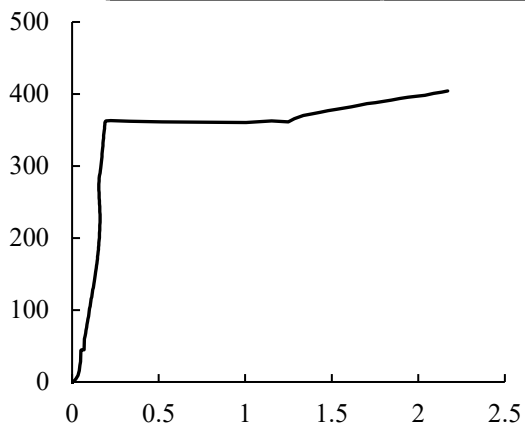
図 3.3.1 試験体形状例 ( $\theta=45^\circ$ )

### 【材料の機械的性質】

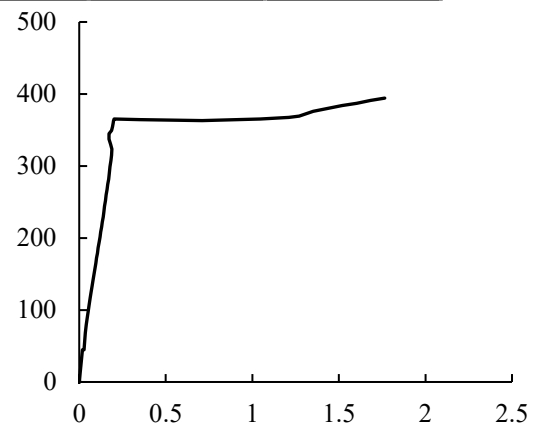
材料の機械的性質を表 3.3.2 に示し、応力歪関係を図 3.2.2 に示す．降伏点は降伏棚の有無にかかわらず，0.2%offset 値を用いた．なお，母材は 3.2 節に記載している FW 試験体より 2 本の引張試験片を採取した，その平均値を示している．溶接金属の試験体は 2 体ずつ引張試験片を採取したが，各 1 体ずつ歪の測定に失敗しているため，グラフは各 1 体のものを示し， $\sigma_y$  は測定できた試験体の値， $\sigma_u$  は平均値を示している．溶接金属の引張強さ  $\sigma_{wu}$  と母材の引張強さ  $\sigma_{bu}$  の比  $\rho_u$  は GW シリーズでは  $\rho_u=1.32$ ，50W シリーズでは  $\rho_u=1.28$  である．また，溶接金属の降伏点  $\sigma_{wy}$  と母材の降伏点  $\sigma_{by}$  の比  $\rho_y$  は GW シリーズでは  $\rho_y=1.51$ ，50W シリーズでは  $\rho_y=1.43$  である．

表 3.3.2 材料の機械的性質

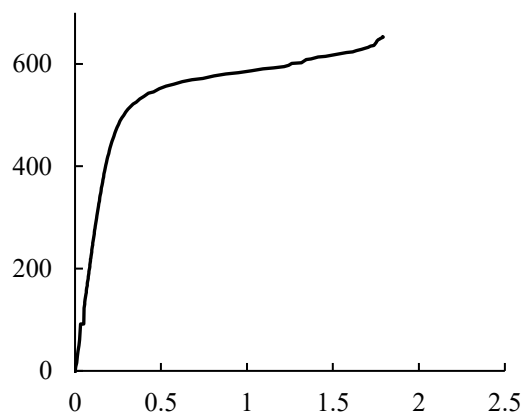
| 鋼材又は<br>溶接ワイヤ | $\sigma_y$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_u$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | YR<br>[%] | EL<br>[%] |
|---------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|
| SM490A        | 362.8                              | 515.2                              | 70.4      | 31.5      |
| YGW11(GW)     | 547.0                              | 680.0                              | 78.9      | 21.5      |
| YGW11(50W)    | 520.6                              | 660.6                              | 82.7      | 19.3      |



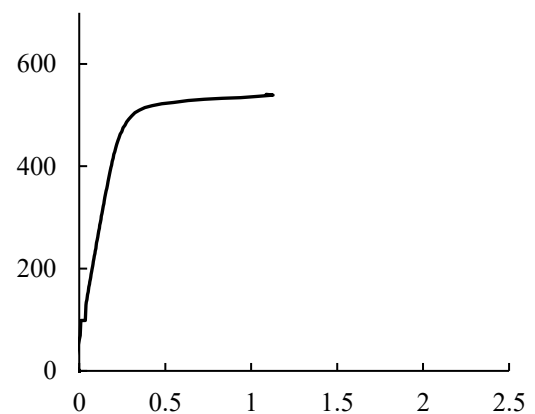
(a)PL-1



(b)PL-2



(e)GW-1

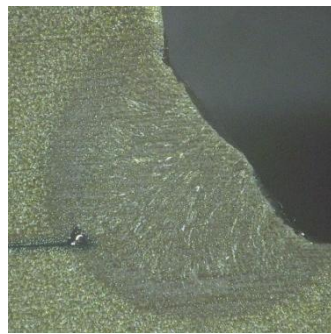


(f)50W-2

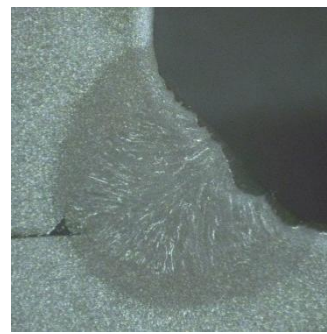
図 3.3.2 応力-歪関係

### 【マクロ試験】

写真 3.3.1 に示すマクロ試験写真から、図 3.3.3 に示す溶接部寸法を測定し、各溶接継目の角度 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、および寸法 $S$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ を平均した結果を表 3.3.3 に示す。



(a)GW



(b)50W

写真 3.2.1 マクロ試験写真

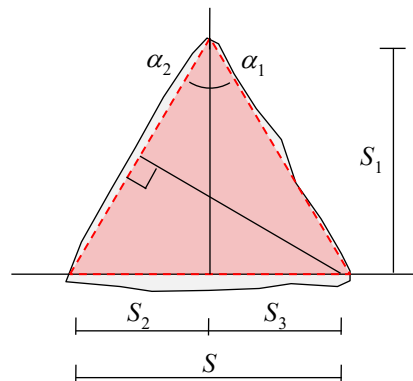


図 3.3.3 溶接部寸法詳細

表 3.3.3 溶接部寸法測定結果

| シリーズ | $S_1$<br>[mm] | $S_2$<br>[mm] | $S_3$<br>[mm] | $S$<br>[mm] | $\alpha_1$<br>[degree] | $\alpha_2$<br>[degree] |
|------|---------------|---------------|---------------|-------------|------------------------|------------------------|
| GW   | 5.61          | 5.25          | 2.11          | 7.4         | 43.1                   | 20.5                   |
| 50W  | 5.41          | 5.12          | 2.23          | 7.3         | 43.3                   | 22.5                   |

### 【実験方法】

裁荷にはアムスラー型万能試験機を用いて単調引張荷重を与えた．図 3.3.4 に治具を含む試験体全体図を示す．試験部は連続して溶接した長尺の材料を 70mm に切断することで同一の溶接条件となるようにした．その後，試験部に所定の角度の荷重が作用するように引張用プレートを溶接し，上下に取り付けたピン治具を介して試験機に固定した．

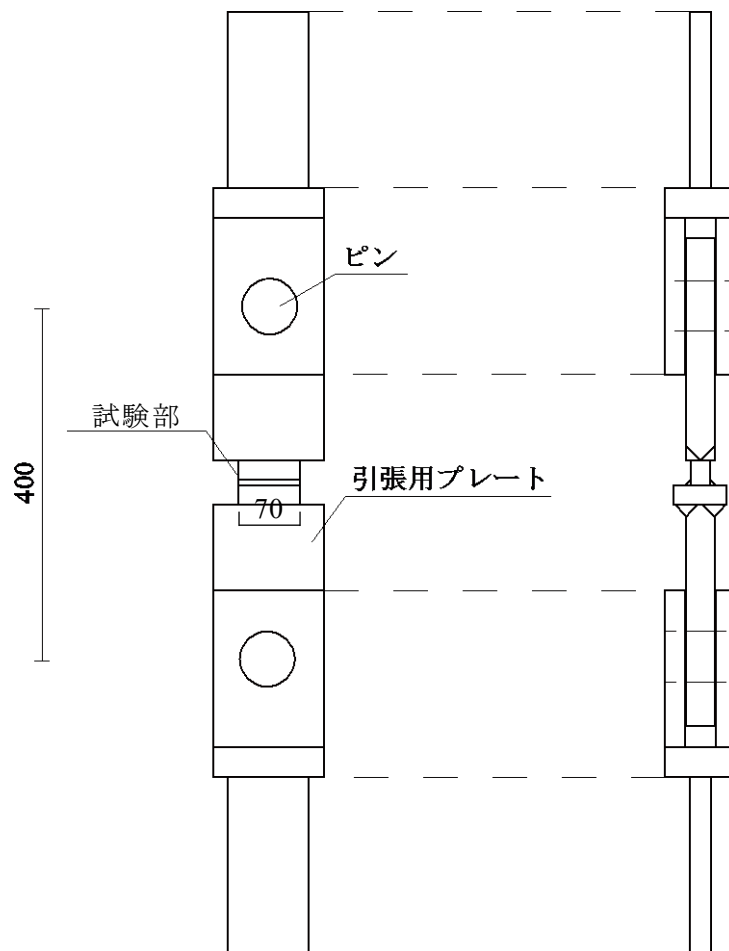


図 3.3.4 試験体全体図

### 【測定方法】

変位の測定については，図 3.3.5 に示す位置に変位計を設置し測定した．

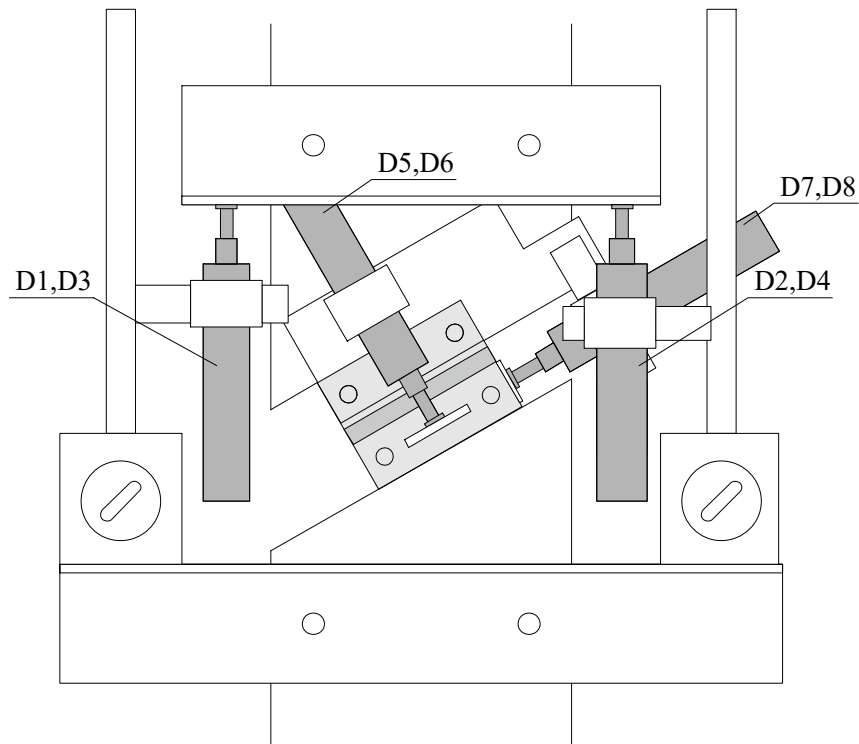


図 3.3.5 変位測定位置

D1～4：荷重方向全体変形（左右，表裏で 4 か所）

D5, D6：溶接部局部変形(溶接線直交方向)

D7, D8：溶接部局部変形(溶接線方向)

溶接部局部の荷重方向変形  $u$  および荷重直交方向変形  $v$  を次のように求めた．

$$u = \frac{1}{2}(D5 + D6) \cdot \cos \theta + \frac{1}{2}(D7 + D8) \cdot \sin \theta$$

$$v = -\frac{1}{2}(D5 + D6) \cdot \sin \theta + \frac{1}{2}(D7 + D8) \cdot \cos \theta$$

### 3.3.2 実験結果概要

表 3.3.4 に実験の最大耐力一覧を示す.

表 3.3.4 最大耐力一覧

|    | モデル   | $P_u$<br>(kN) |     | モデル    | $P_u$<br>(kN) |
|----|-------|---------------|-----|--------|---------------|
| GW | GW-0  | 364.1         | 50W | 50W-0  | 386.1         |
|    | GW-30 | 366.9         |     | 50W-30 | 351.0         |
|    | GW-45 | 334.9         |     | 50W-45 | 307.6         |
|    | GW-60 | 320.1         |     | 50W-60 | 261.9         |
|    | GW-90 | 297.6         |     | 50W-90 | 306.8         |

### 3.3.3 FEA 概要

実験を再現したモデルを作成し解析を行った。モデル（図 3.3.6 (b),(c)参照）は表 3.3.3 に示すマクロ試験結果を用いて図 3.3.3 に赤点線で示すように止端とルートを結ぶ直線により溶接部を三角形でモデル化した。

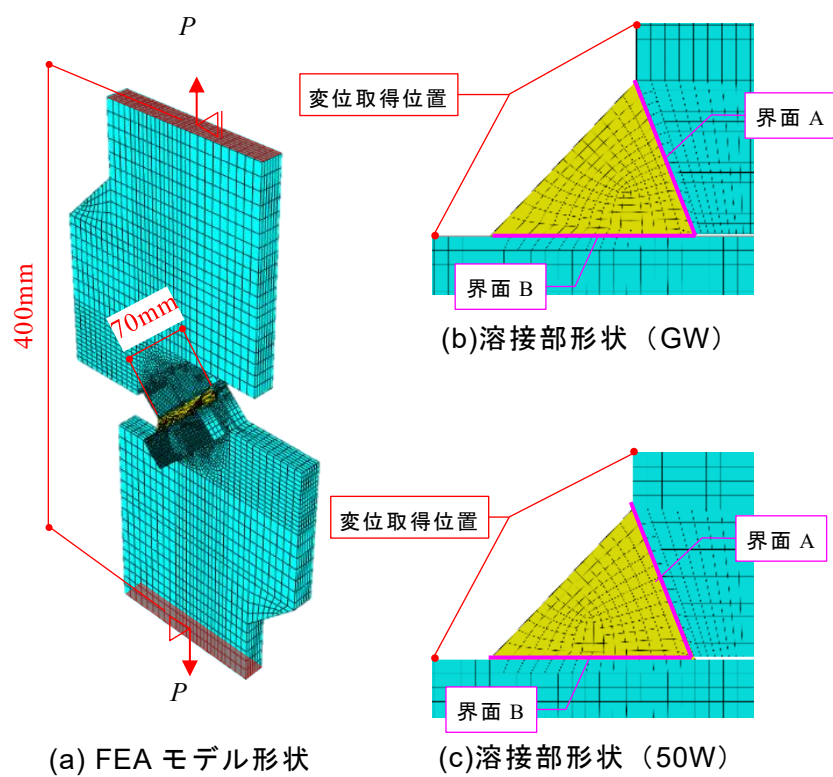


図 3.3.6 FEA モデルの例

FEA に入力した塑性域の材料特性を図 3.3.7 に示す． 入力した真応力-真ひずみ関係は引張試験から得られた公称応力  $\sigma'$  および公称ひずみ  $\varepsilon'$  を以下の式を用いて，真応力  $\sigma$  および真ひずみ  $\varepsilon$  に換算した後，多折線で近似した．なお，弾性域にはヤング係数を  $205000(\text{N/mm}^2)$ ，ポアソン比を  $0.3$  とした材料特性を入力した．

$$\sigma^t = \sigma^n (\varepsilon^n + 12) \quad (3.3.1)$$

$$\varepsilon^t = \ln(\varepsilon^t + 1) \quad (3.3.2)$$

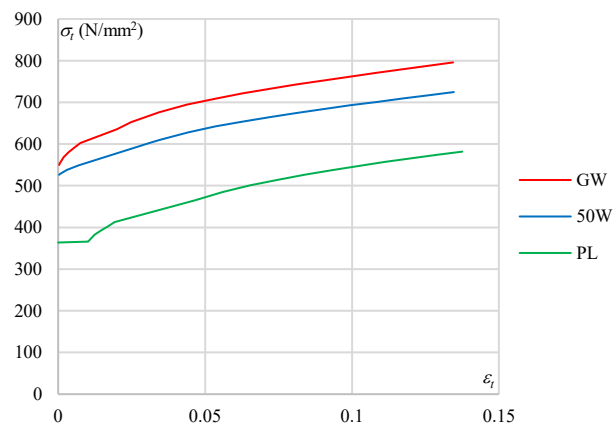


図 3.3.7 真応力-真ひずみ関係(真ひずみの塑性成分)

本稿の FEA では, 破断現象を追跡できないため最大耐力を知ることはできない. そこで, 3.2 節と同様, 桑村らによる研究<sup>18)</sup> および劉らの研究<sup>19)</sup>に基づき, 図 3.3.8(a)および(b) に示すように母材と溶接金属の界面に接する 4 個の要素について, (c)および(d)に示すように応力三軸度-相当塑性歪関係と延性き裂発生限界曲線の交点となるステップを取得し, 最も早いステップの荷重を FEA の最大耐力  $_{FEA}P_u$  と定義した. なお, 劉らの研究<sup>19)</sup>については実験から得られる係数を用いているが, 本実験においても適用可能と仮定して最大耐力を取得した. 図 3.3.9 に GW の FEA より得られた荷重変形関係の例を示すとともに,  $_{FEA}P_u$  を●印で示す. 良く知られているように, 斜方角度  $\theta$  の減少に伴い, 最大耐力  $_{FEA}P_u$  に到達する時の変形量は小さくなっている.

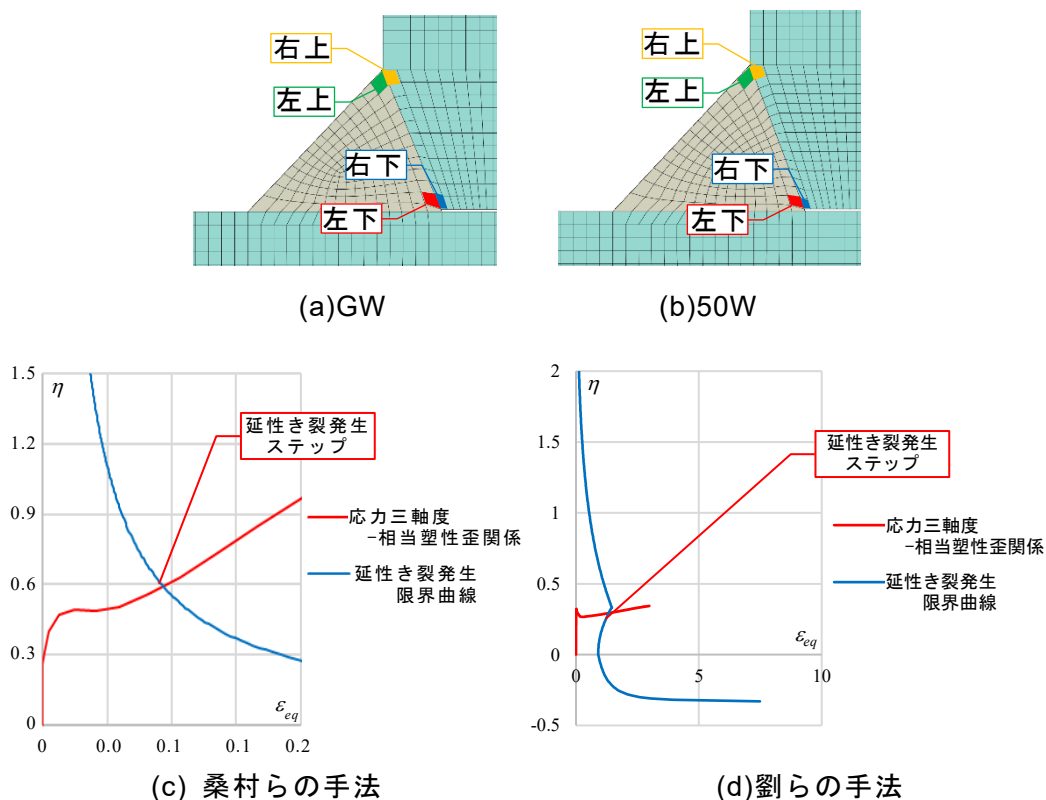


図 3.3.8 延性き裂発生ステップの取得方法

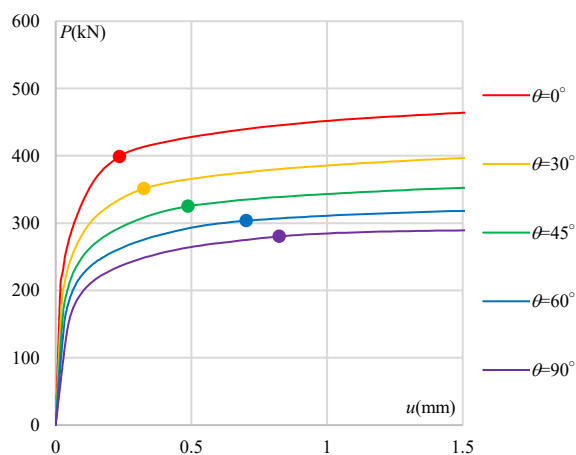


図 3.3.9  $P$ - $u$  関係(GW)

### 3.3.4 実験と FEA の比較

文献 16) の実験の最大荷重  $P_{max}$  と FEA の最大耐力  $FEAP_u$  の比較を図 3. 3. 10, 両者の相関図を図 3.3.11 に示す.

GW シリーズについては,  $P_{max}$  と  $FEAP_u$  の比は  $P_{max}/FEAP_u=0.914\sim1.6$ (平均値 1.02) であり, 良い対応を示している. GW-0 は実験では耐力が低下し始める前に破断に至っているため, FEA が実験を過大評価していると考えられる.

50W シリーズについては,  $P_{max}$  と  $FEAP_u$  の比は  $P_{max}/FEAP_u=0.890\sim1.14$ (平均値 1.0) であり, 良い対応を示している. 50W-90 は応力三軸度が小さいため, 他の角度に比べて最大耐力  $FEAP_u$  に達するまでの変形量が大きく, 溶接線全線にわたって十分に塑性化するので, 幾何学的非線形性の影響で耐力が上昇していると考えられる.

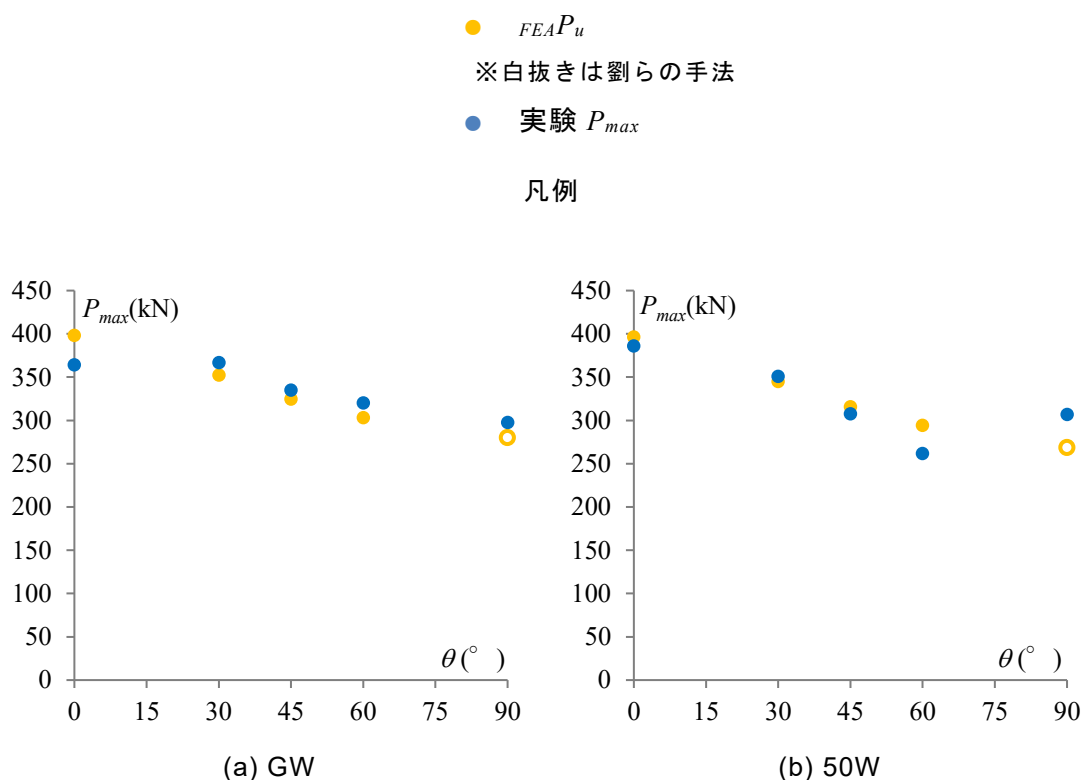


図 3.3.10  $P_{max}$  と  $FEAP_u$  の比較

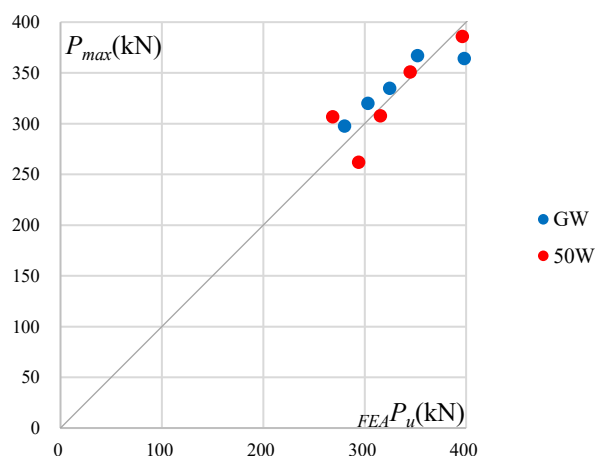


図 3.3.1 実験結果と FEA 結果の相関図

### 3.4 まとめ

本章では，溶接継目の形状，母材と溶接金属の強度比および斜方角度を因子とした実験について，有限要素数値解析により詳細に検討するとともに実験の最大耐力を FEA により評価した．以下に，本章で得られた知見をまとめる．

- 1) 実験の溶接部の溶け込みを三角形で再現したモデルを作成し解析を行い，桑村らによる研究に基づき延性き裂発生ステップを取得し，そのステップの荷重で最大耐力を評価できることを示した．
- 2) FW3 および FW4 で  $_{FEA}P_u$  は  $P_{max}$  を過小評価していたが，溶け込み形状および熱影響部を詳細にモデル化し同様の手順で最大耐力を評価することで誤差が小さくなった．母材と溶接金属および熱影響部の強度の関係により，降伏面の位置が変化し，耐力が上昇していることが分かった．
- 3) 異形隅肉溶接も等脚隅肉溶接と同様の手順で最大耐力を評価できることを示した．

## 第4章 最大耐力の推定

### 4.1 はじめに

本章では，2章に示した崩壊荷重と3章に示した実験およびFEAに基づき，最大耐力  $P_u$  を推定する．

さらに，極限解析により得られる最大耐力を陽な表現で表すため，近似式を誘導し溶接継目の最大耐力の耐力評価式を提示する．

### 4.2 斜方等脚隅肉溶接継目

#### 4.2.1 界面のせん断応力

最大耐力の推定にあたり，実験の溶接金属の溶け込みを三角形で再現したモデル②の有限要素数値解析の結果から，最大耐力  $_{FEA}P_u$  としたステップにおいて，図3.2.7(b)に示す界面Aおよび界面Bのせん断応力を溶接線中央断面で取得した．界面のせん断応力の平均値を $\sqrt{3}$ 倍した値と母材および溶接金属の引張強さと降伏点を図4.2.1に示す．

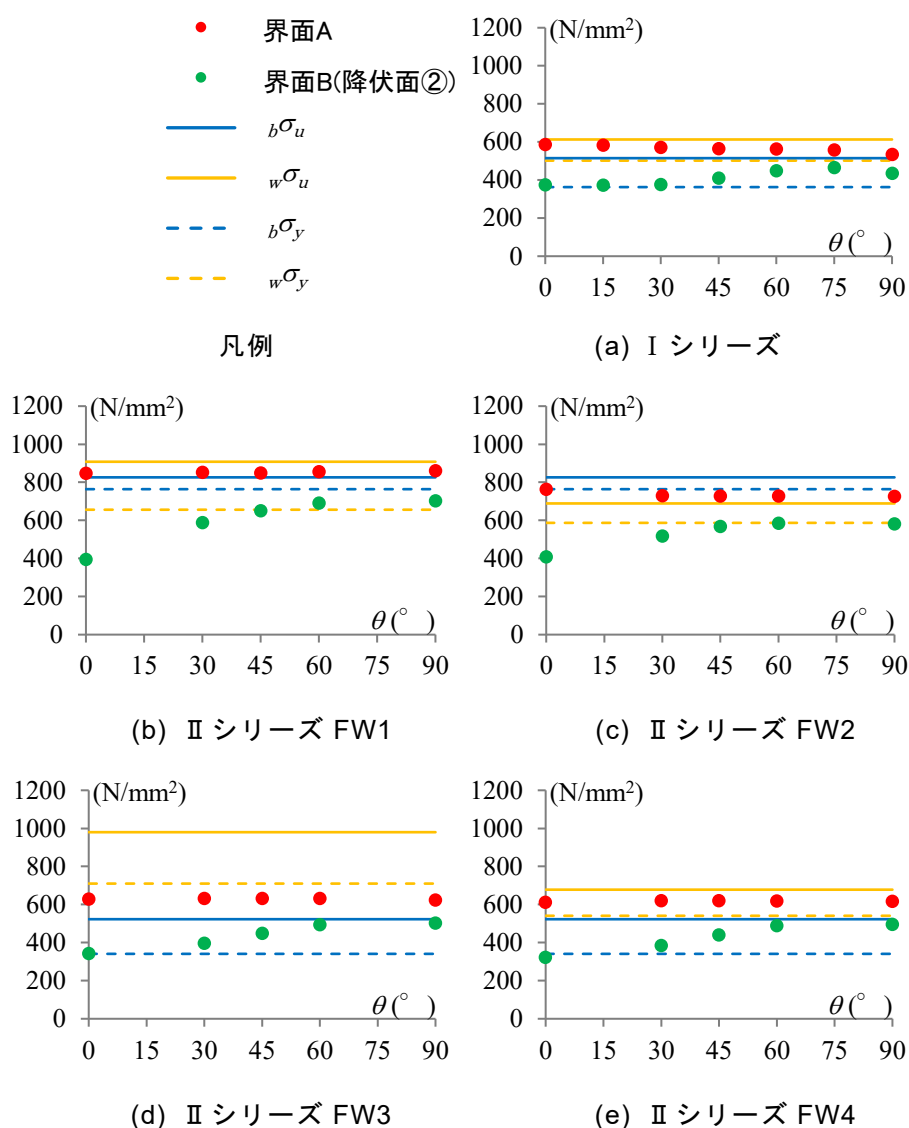


図 4.2.1 界面のせん断応力

#### 4.2.2 推定方法

##### 【機構 W】

図 4.2.2(a)に示す崩壊機構において、式(2.3.10)の溶接金属内に形成される降伏面①の内力仕事を算定する際の溶接金属の降伏点  $\sigma_{wy}$  を引張強さ  $\sigma_{wu}$  に置き換える．次に界面 B に形成される降伏面②に用いる強度を検討する．図 4.2.1 において、降伏面②におけるせん断応力の平均値の  $\sqrt{3}$ 倍は、母材の降伏点  $\sigma_{by}$  と溶接金属の降伏点  $\sigma_{wy}$  の中間値あるいはそれよりも低い値となっている．降伏面②の塑性化は大きく進展していないので、降伏点  $\sigma_{sy}$  を  $\sigma_{by}$  と  $\sigma_{wy}$  の平均値  $\sigma_{my}$  に置き換える．溶接線単位長さ当りの最大耐力  $wq_u$  は以下のように表される．

$$wq_u = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{wu} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{my} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (4.2.1)$$

##### 【機構 S】

図 4.2.2(b)に示す崩壊機構において、式(2.3.18)の界面 A に形成される降伏面①に用いる強度を検討する．2 章に示した極限解析では、降伏面①の降伏点は、母材と溶接金属の小さい方の値  $\sigma_{sy}$  を採用し、材料特性を完全弾塑性型とした FEA の塑性耐力を評価できることを示した．一方、3 章に示した材料に歪硬化型の応力－ひずみ曲線を入力した場合、ひずみの進展に伴う塑性拘束の影響が現れ、界面 A におけるせん断応力の  $\sqrt{3}$ 倍は、 $\sigma_{bu}$  と  $\sigma_{wu}$  の中間値となっている．従って、式(2.3.18)の降伏面①の内力仕事を算定する際の降伏点  $\sigma_{sy}$  を  $\sigma_{bu}$  と  $\sigma_{wu}$  の平均値  $\sigma_{mu}$  に置き換える．降伏面②については、崩壊機構 W と同様、降伏点  $\sigma_{sy}$  を  $\sigma_{by}$  と  $\sigma_{wy}$  の平均値  $\sigma_{my}$  に置き換える．溶接線単位長さ当りの最大耐力  $sq_u$  は以下のように表される．

$$sq_u = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{mu} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \alpha_1 \cdot \sigma_{my} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (4.2.2)$$

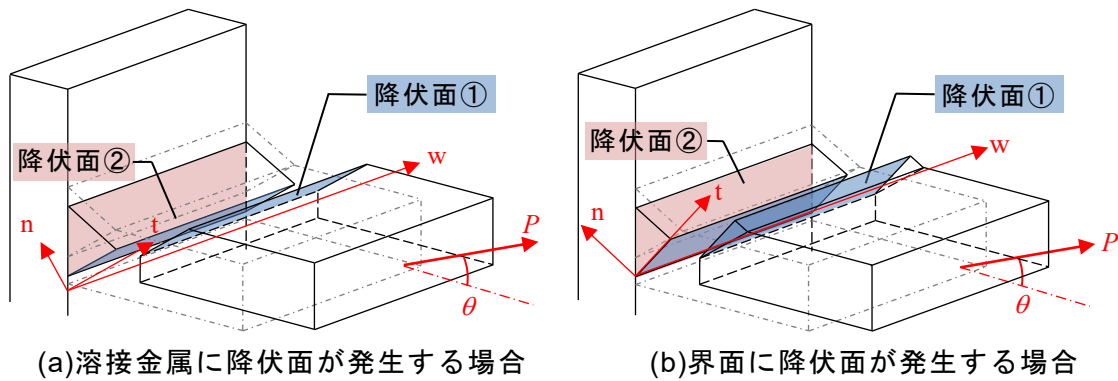


図 4.2.2 崩壊機構の概念図

### 4.2.3 推定結果

4.2.2 節に示した耐力式に基づき  ${}_wq_u$  および  ${}_sq_u$  を算定し、小さい方の値を  $q_u$  として最大耐力の推定値  $P_u$  を求めた。図 4.2.3 に  ${}_{FEA}P_u$  と  $P_{max}$  と併せて実線で  $P_u$  を示す。

I シリーズについては、 $P_{max}$  と  $P_u$  の比  $P_{max}/P_u=1.01\sim1.20$ (平均値 1.08)であり、良い対応を示している。II シリーズについては、FW1 では、試験体 FW1-0 を除き、 $P_{max}/P_u=0.902\sim0.961$ (平均値 0.930)であり、FW2 では、 $P_{max}/P_u=0.905\sim1.24$ (平均値 0.999)である。試験体 FW1-0 では、 $P_{max}/P_u=0.782$  であるが、原因は 3 章に述べた通りである。FW1 および FW2 では実験値を若干過大評価するが、 $\theta$  の増加に伴う最大耐力の減少傾向は一致している。FW3 では、 $P_{max}/P_u=0.943\sim1.27$  (平均 1.08), FW4 では、 $P_{max}/P_u=1.03\sim1.31$  (平均 1.12)である。FW3 および FW4 については実験結果を若干過小評価するが、FW1 および FW2 に比べ、 $\theta$  の増加に伴う最大荷重の減少が小さいという傾向をよく捉えている。過小評価する原因は 3.2.4 節に述べたように、熱影響部が硬化し、強度が上昇することによって、継目としての最大耐力が増加したためと考えられる。この影響は極限解析上では考慮することはできないが、継目の耐力上昇は安全側に働く。

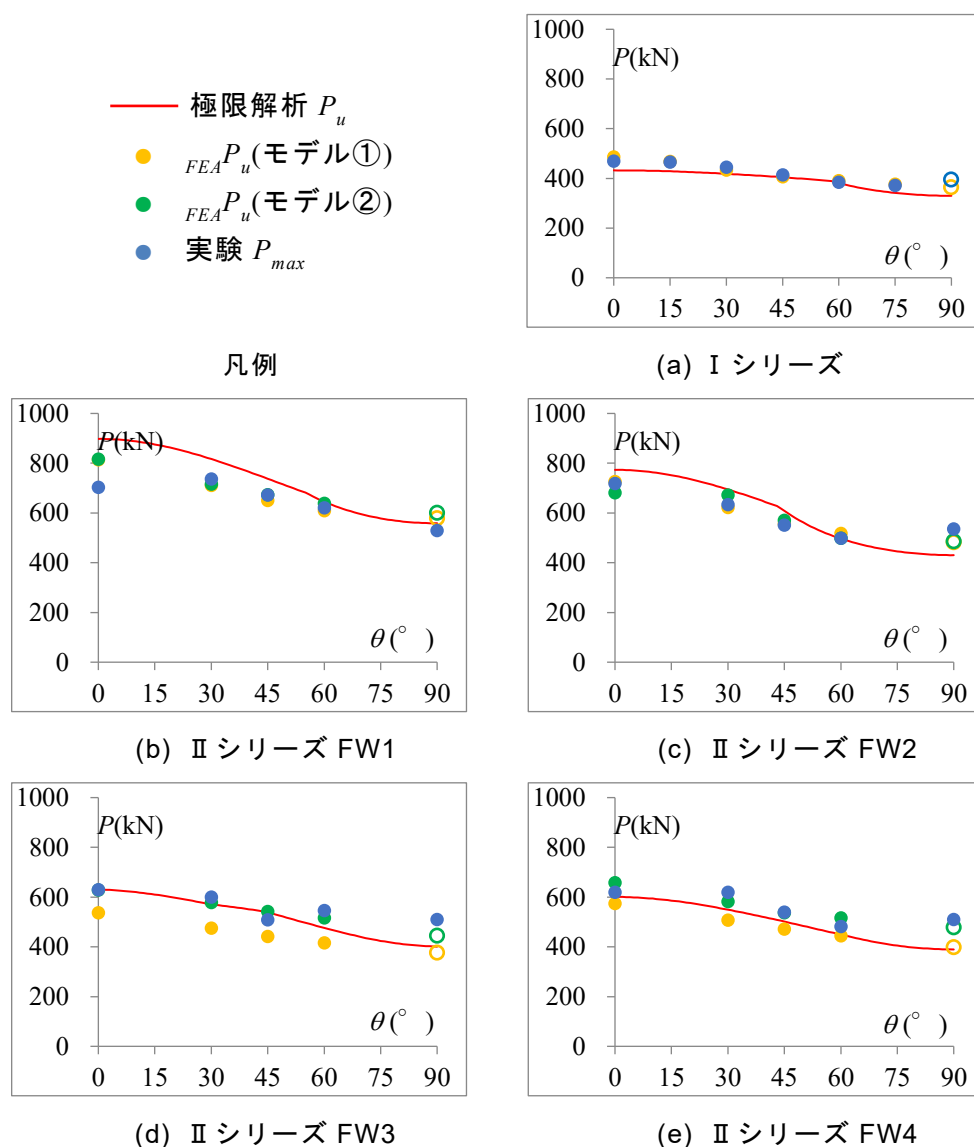


図 4.2.3  $P_u$  と  $P_{max}$  および  ${}_{FEA}P_u$  の比較

### 4.3 斜方異形隅肉溶接継目

#### 4.3.1 界面のせん断応力

2章に示した崩壊荷重と3章に示したFEAに基づき，等脚隅肉溶接継目の最大耐力  $P_u$  を推定する．最大耐力の推定にあたり，実験の溶接金属の溶け込みを三角形で再現したモデルの有限要素数値解析の結果から，最大耐力  $_{FEA}P_u$  としたステップにおいて，図 3.3.6(b)(c)に示す界面 A および界面 B のせん断応力を溶接線中央断面で取得した．界面のせん断応力の平均値を $\sqrt{3}$ 倍した値と母材および溶接金属の引張強さと降伏点を図 4.3.1 に示す．

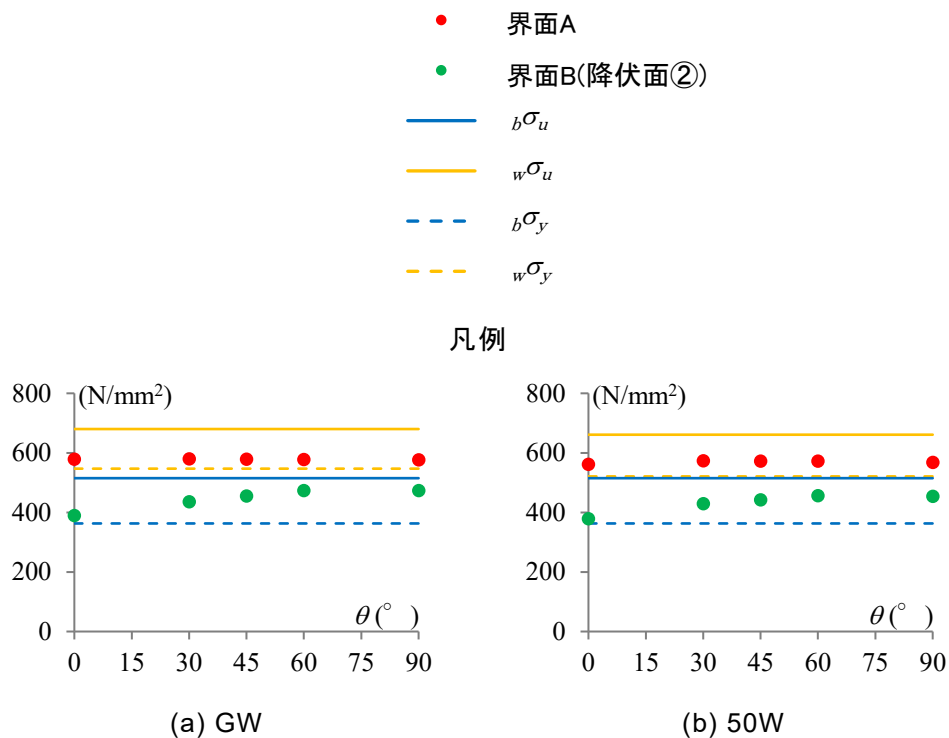


図 4.3.1 界面のせん断応力

#### 4.3.2 推定方法

##### 【機構 W】

図 4.3.2(a)に示す崩壊機構において、式(2.4.10)の溶接金属内に形成される降伏面①の内力仕事を算定する際の溶接金属の降伏点  $\sigma_{wy}$  を引張強さ  $\sigma_{wu}$  に置き換える．次に界面 B に形成される降伏面②に用いる強度を検討する．図 4.2.1 において、降伏面②におけるせん断応力の平均値の  $\sqrt{3}$ 倍は、母材の降伏点  $\sigma_{by}$  と溶接金属の降伏点  $\sigma_{wy}$  の中間値あるいはそれよりも低い値となっている．降伏面②の塑性化は大きく進展していないので、降伏点  $\sigma_{sy}$  を  $\sigma_{by}$  と  $\sigma_{wy}$  の平均値  $\sigma_{my}$  に置き換える．溶接線単位長さ当りの最大耐力  $wq_u$  は以下のように表される．

$$wq_u = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{\cos \beta (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{wu} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{my} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (4.3.1)$$

##### 【機構 S】

図 4.3.2(b)に示す崩壊機構において、式(2.4.18)の界面 A に形成される降伏面①に用いる強度を検討する．2 章に示した極限解析では、降伏面①の降伏点は、母材と溶接金属の小さい方の値  $\sigma_{sy}$  を採用し、材料特性を完全弾塑性型とした FEA の塑性耐力を評価できることを示した．一方、3 章に示した材料に歪硬化型の応力－ひずみ曲線を入力した場合、ひずみの進展に伴う塑性拘束の影響が現れ、界面 A におけるせん断応力の  $\sqrt{3}$ 倍は、 $\sigma_{bu}$  と  $\sigma_{wu}$  の中間値となっている．従って、式(2.3.18)の降伏面①の内力仕事を算定する際の降伏点  $\sigma_{sy}$  を  $\sigma_{bu}$  と  $\sigma_{wu}$  の平均値  $\sigma_{mu}$  に置き換える．降伏面②については、崩壊機構 W と同様、降伏点  $\sigma_{sy}$  を  $\sigma_{by}$  と  $\sigma_{wy}$  の平均値  $\sigma_{my}$  に置き換える．溶接線単位長さ当りの最大耐力  $sq_u$  は以下のように表される．

$$sq_u = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \alpha_1}}{\cos \alpha_1 (\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2)} \sigma_{mu} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \alpha_1 \cdot \sigma_{my} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (4.3.2)$$

##### 【機構 B】

図 4.3.2(c)に示す崩壊機構において、式(2.4.26)の母材に形成される降伏面①の内力仕事を算定する際の母材の降伏点  $\sigma_{by}$  を引張強さ  $\sigma_{bu}$  に置き換え、降伏面②については、崩壊機構 W と同様、降伏点  $\sigma_{sy}$  を  $\sigma_{by}$  と  $\sigma_{wy}$  の平均値  $\sigma_{my}$  に置き換える．溶接線単位長さ当りの最大耐力  $bq_u$  は以下のように表される．

$$bq_u = \left\{ \frac{\sqrt{(\cos \theta - X \sin \theta)^2 + (\sin \theta + X \cos \theta)^2 \cos^2 \beta}}{(1 + \tan \alpha_2 / \tan \alpha_1) \sin \beta \cdot \cos \beta} \sigma_{bu} + |\cos \theta - X \sin \theta| \cdot \tan \beta \cdot \sigma_{my} \right\} \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (4.3.3)$$

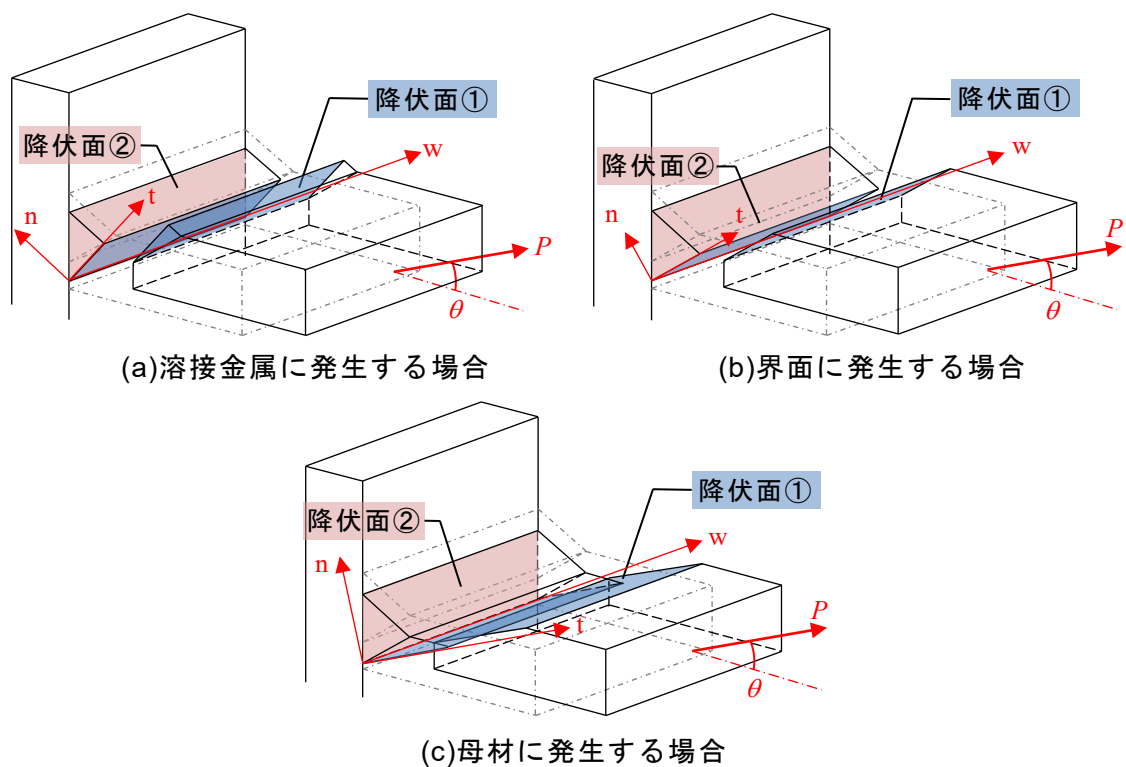


図 4.3.2 崩壊機構の概念図

#### 4.3.3 推定結果

4.3.2 節に示した耐力式に基づき  $wq_u$ ,  $s q_u$  および  $b q_u$  を算定し、最小の値を  $q_u$  として最大耐力の推定値  $P_u$  を求めた。図 4.3.3 に実線で  $P_u$  を示す。

GW シリーズについては、 $P_{max}$  と  $P_u$  の比は  $P_{max} / P_u = 0.982 \sim 1.15$  (平均値 1.09) であり、良い対応を示している。

50W シリーズについては、 $P_{max}$  と  $P_u$  の比  $P_{max} / P_u = 0.922 \sim 1.23$  (平均値 1.04) であり、良い対応を示している。 $\theta = 90^\circ$  の場合、に過小評価となる理由は 3.3.4 節で述べた通りである。

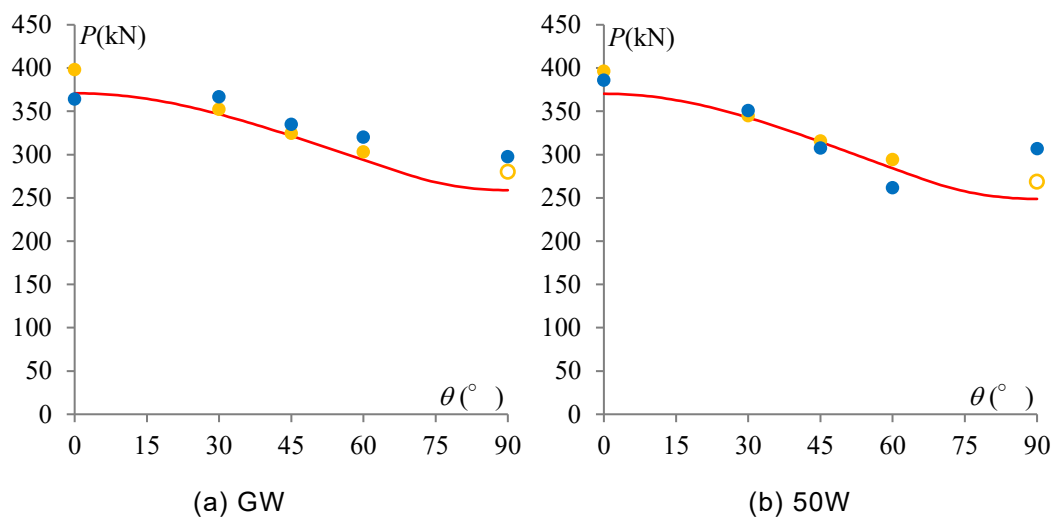


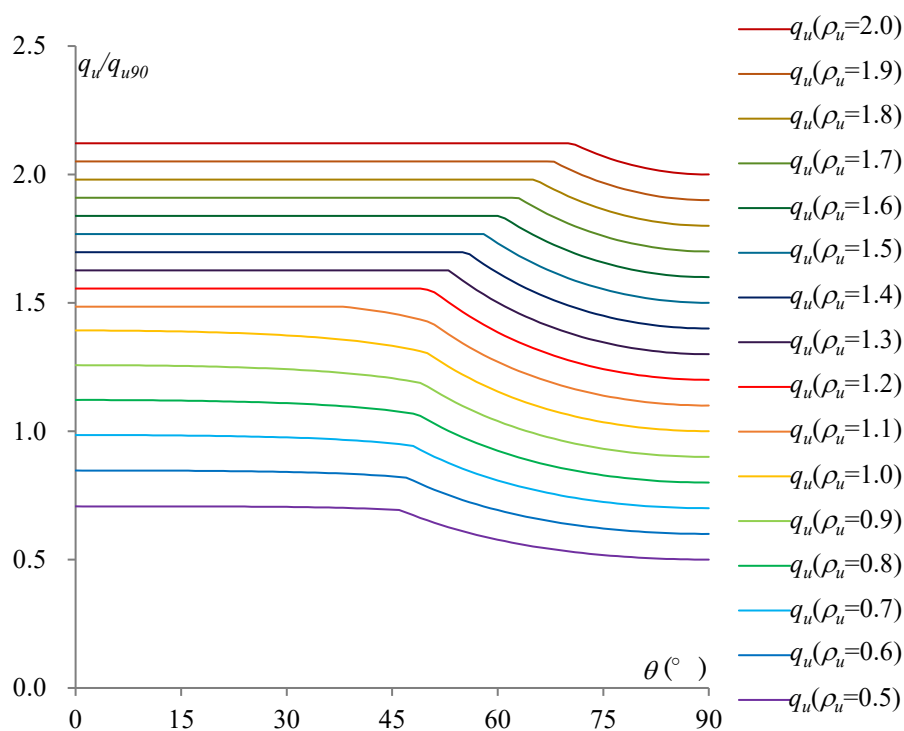
図 4.3.3  $P_u$  と  $P_{max}$  および  $_{FEA}P_u$  の比較

#### 4.4 耐力評価式

4.2 節と 4.3 節では耐力式が最大耐力を十分評価できることを示した．極限解析により最大荷重を求める場合，数値計算を行う必要がある．そこで，本節では極限解析により得られる最大耐力を陽な表現で表すため，近似式を誘導し溶接継目の最大耐力の耐力評価式を提示する．なお，本節で誘導する近似式は，溶込みを 0 とし，強度比の影響を考慮したものである．

##### 4.4.1 極限解析結果

各溶接継目形状について，母材の強度を  $\sigma_{bu} = 490(\text{N/mm}^2)$  および  $\sigma_{by} = 325(\text{N/mm}^2)$  とし，強度比  $\rho_u = 0.5 \sim 2.0$  となるように溶接金属の強度を  $\sigma_{wu} = 245(\text{N/mm}^2)$  および  $\sigma_{wy} = 162.5(\text{N/mm}^2)$  から  $\sigma_{wu} = 980(\text{N/mm}^2)$  および  $\sigma_{wy} = 650(\text{N/mm}^2)$  までの範囲で極限解析を行った．その結果を  $\rho_u = 1.0$  の側面溶接の耐力で無次元化して図 4.4.1 に示す．



(a)等脚隅肉溶接

図 4.4.1 極限解析結果

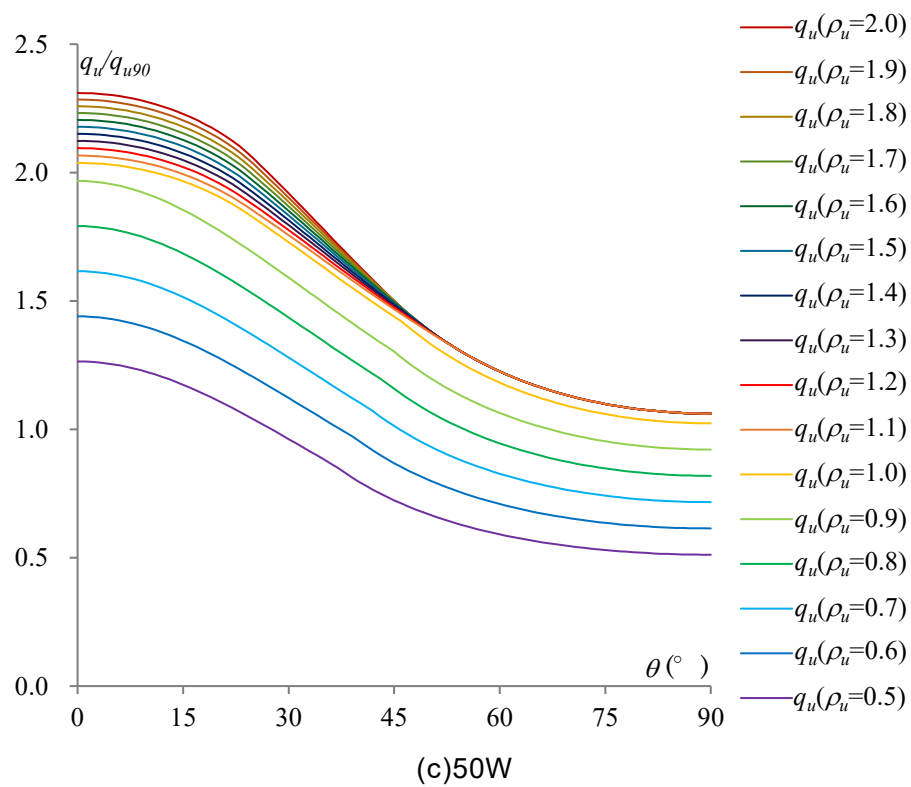
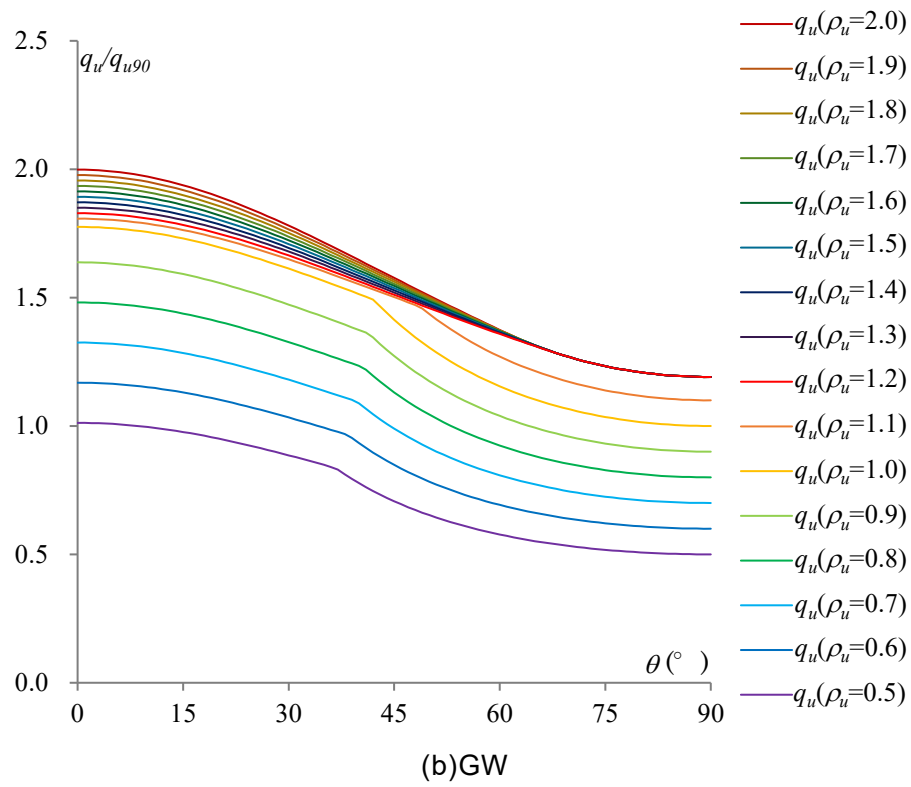


圖 4.4.1 極限解析結果

#### 4.4.2 崩壊機構の範囲分け

##### 【等脚隅肉溶接】

図 4.4.2 において、縦軸に強度比 $\rho_u$ 、横軸に斜方角度 $\theta$ をとり、各強度比の極限解析から得られる崩壊機構を範囲分けして示す。各範囲で発生する崩壊機構は以下の通りである。

- ・ (A)の範囲：崩壊機構 S ( $\beta=0^\circ$ )  
溶接線方向の変形 V と  
溶接線直交方向の変形 U が発生
- ・ (B)の範囲：崩壊機構 W ( $\beta=45^\circ$ )  
溶接線方向の変形 V のみ発生(U=0)
- ・ (C)の範囲：崩壊機構 W ( $1^\circ \leq \beta \leq 26^\circ$ )  
溶接線方向の変形 V と  
溶接線直交方向の変形 U が発生

赤丸は極限解析から得られた崩壊機構の切り替わり角度である。

崩壊機構が(C)から(B)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_1$ とすると、 $\varphi_1$ は強度比 $\rho_u$ を変数として、以下のように近似する。

$$\varphi_1 = 12\rho_u^2 - 15\rho_u + 51.8 \quad (4.4.1)$$

崩壊機構が(C)および(E)から(A)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_2$ とすると、 $\varphi_2$ は強度比 $\rho_u$ を変数として、以下のように近似する。

$$\varphi_2 = -12.5 + 65.1\sqrt{1 - \{(\rho_u - 1.28)/0.25\}^2} \quad (4.4.2)$$

また、 $\varphi_1$ が $\varphi_2$ と交わる強度比は $\rho_u=1.236$ 、 $\varphi_2$ が $q=0^\circ$ と交わる強度比は $\rho_u=1.034$ となり、その間の強度比においては、(A)の範囲の崩壊機構から(C)を経由して(B)の範囲の崩壊機構に切り替わる。この範囲を(D)とする。

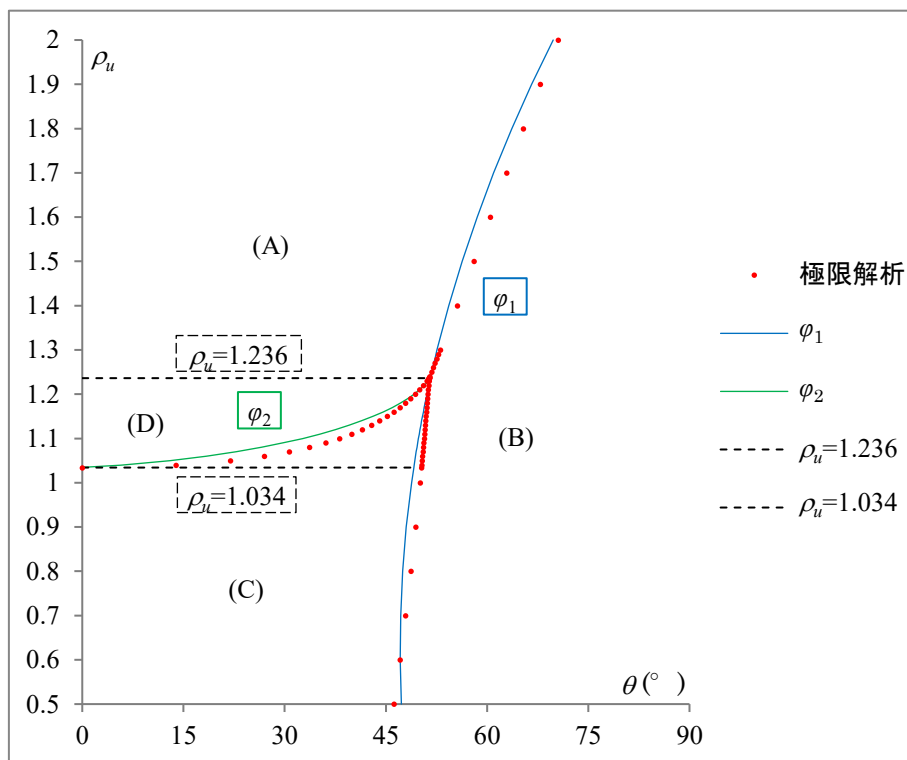


図 4.4.2 強度比による崩壊機構の分類(等脚隅肉溶接)

【GW】

図 4.4.3 において，縦軸に強度比 $\rho_u$ ，横軸に斜方角度 $\theta$ をとり，各強度比の極限解析から得られる崩壊機構を範囲分けして示す．各範囲で発生する崩壊機構は以下の通りである．

- ・ (A)の範囲：崩壊機構 W ( $\beta=60^\circ$ )  
溶接線方向の変形 V のみ発生( $U=0$ )
- ・ (B)の範囲：崩壊機構 B ( $\beta=29^\circ$ )  
溶接線方向の変形 V のみ発生( $U=0$ )
- ・ (C)の範囲：崩壊機構 B ( $\beta=29^\circ$ )  
溶接線方向の変形 V と  
溶接線直交方向の変形 U が発生
- ・ (D)の範囲：崩壊機構 W ( $\beta=31^\circ$ )  
溶接線方向の変形 V と  
溶接線直交方向の変形 U が発生
- ・ (E)の範囲：崩壊機構 S ( $\beta=30^\circ$ )  
溶接線方向の変形 V と  
溶接線直交方向の変形 U が発生

赤丸は極限解析から得られた崩壊機構の切り替わり角度である．

崩壊機構が(C)から(B)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_1$ とすると， $\varphi_1$ は強度比 $\rho_u$ を変数として，以下のように近似する．

$$\varphi_1 = -8.35\rho_u + 78.56 \quad (4.4.3)$$

崩壊機構が(C)および(E)から(A)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_2$ とすると， $\varphi_2$ は強度比 $\rho_u$ を変数として，以下のように近似する．

$$\varphi_2 = 83.5 - 41.3\sqrt{1 - \{(\rho_u - 1)/0.205\}^2} \quad (4.4.4)$$

崩壊機構が(C)から(E)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_3$ とすると， $\varphi_3$ は強度比 $\rho_u$ を変数として，以下のように近似する．

$$\varphi_3 = 1480\rho_u - 1506 \quad (4.4.5)$$

崩壊機構が(E)から(D)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_4$ とすると， $\varphi_4$ は強度比 $\rho_u$ を変数として，以下のように近似する．

$$\varphi_4 = 1380\rho_u - 1342 \quad (4.4.6)$$

崩壊機構が(D)から(A)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_5$ とすると， $\varphi_5$ は強度比 $\rho_u$ を変数として，以下のように近似する．

$$\varphi_5 = 10.7\rho_u + 31.45 \quad (4.4.7)$$

崩壊機構(B)から(A)への切り替わりは $\rho_u=1.19$ である．

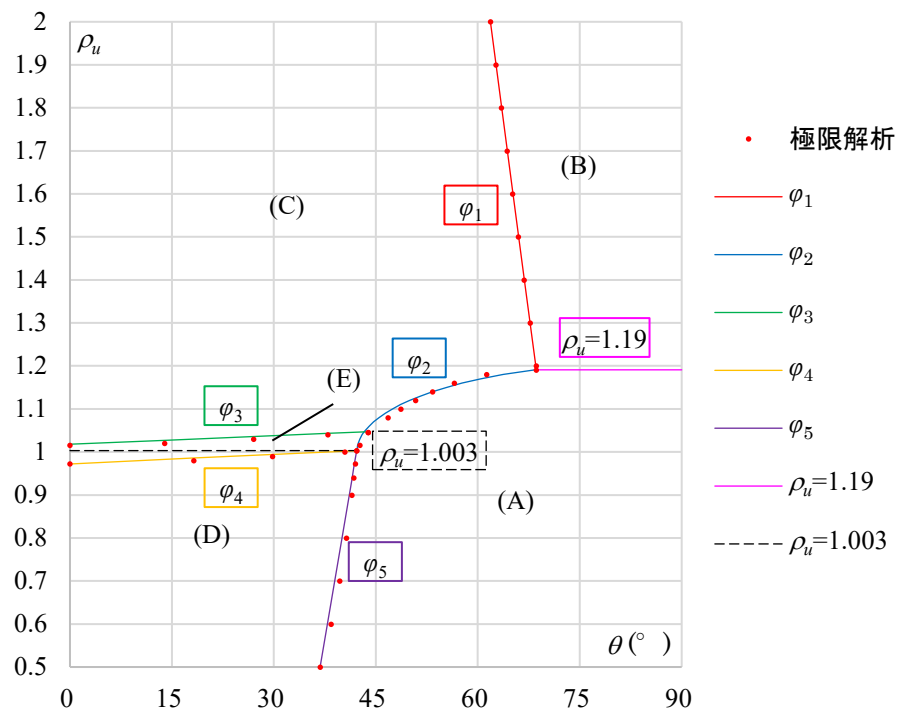


図 4.4.3 強度比による崩壊機構の分類(GW)

【50W】

図 4.4.4 において，縦軸に強度比 $\rho_u$ ，横軸に斜方角度 $\theta$ をとり，各強度比の極限解析から得られる崩壊機構を範囲分けして示す．各範囲で発生する崩壊機構は以下の通りである．

- ・ (A)の範囲：崩壊機構 W ( $\beta=50^\circ$ )  
溶接線方向の変形  $V$  のみ発生( $U=0$ )
- ・ (B)の範囲：崩壊機構 B ( $\beta=39^\circ$ )  
溶接線方向の変形  $V$  のみ発生( $U=0$ )
- ・ (C)の範囲：崩壊機構 B ( $30^\circ \leq \beta \leq 39^\circ$ )  
溶接線方向の変形  $V$  と  
溶接線直交方向の変形  $U$  が発生
- ・ (D)の範囲：崩壊機構 W ( $\beta=41^\circ$ )  
溶接線方向の変形  $V$  と  
溶接線直交方向の変形  $U$  が発生
- ・ (E)の範囲：崩壊機構 S ( $\beta=40^\circ$ )  
溶接線方向の変形  $V$  と  
溶接線直交方向の変形  $U$  が発生
- ・ (F)の範囲：崩壊機構 S ( $\beta=40^\circ$ )  
溶接線方向の変形  $V$  のみ発生( $U=0$ )

赤丸は極限解析から得られた崩壊機構の切り替わり角度である．

崩壊機構が(C)から(B)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_1$ とすると， $\varphi_1$ は強度比 $\rho_u$ を変数として，以下のように近似する．

$$\varphi_1 = -11.25\rho_u + 67.1 \quad (4.4.8)$$

崩壊機構が(C)から(E)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_2$ とすると， $\varphi_2$ は強度比 $\rho_u$ を変数として，以下のように近似する．

$$\varphi_2 = 66.7 - 59.4\sqrt{1 - \{(\rho - 0.896)/0.15\}^2} \quad (4.4.9)$$

崩壊機構が(C)および(E)から(D)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_3$ とすると， $\varphi_3$ は強度比 $\rho_u$ を変数として，以下のように近似する．

$$\varphi_3 = 655.5\rho_u - 608.4 \quad (4.4.10)$$

崩壊機構が(E)から(A)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_4$ とすると， $\varphi_4$ は強度比 $\rho_u$ を変数として，以下のように近似する．

$$\varphi_4 = 253.6\rho_u - 207.2 \quad (4.4.11)$$

崩壊機構が(D)から(A)に切り替わる角度 $\theta$ を $\varphi_5$ とすると， $\varphi_5$ は強度比 $\rho_u$ を変数として，以下のように近似する．

$$\varphi_5 = 18.72\rho_u + 27.4 \quad (4.4.12)$$

崩壊機構(B)から(F)への切り替わりは $\rho_u=1.042$ であり，崩壊機構(F)から(A)への切り替わりは $\rho_u=1.031$ である．

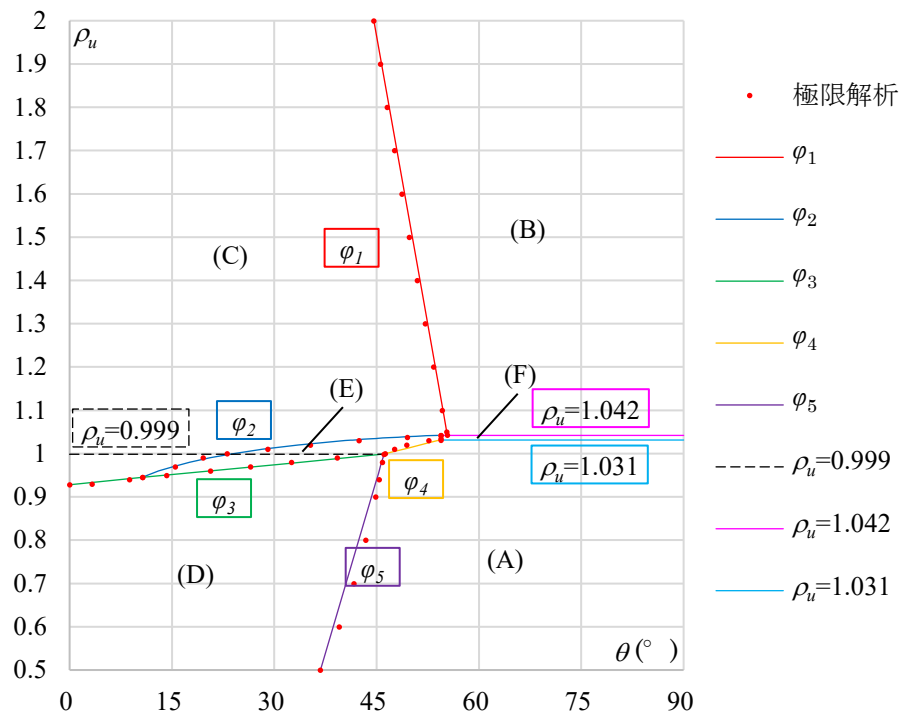


図 4.4.4 強度比による崩壊機構の分類(50W)

#### 4.4.3 各範囲の耐力評価式

##### 【等脚隅肉溶接】

##### (A)の範囲

この範囲では極限解析より、

$$\beta = \alpha_1 = 0^\circ \quad (4.4.13)$$

$$X = 0 \quad (4.4.14)$$

となる。式(4.4.13)および式(4.4.14)を式(4.2.2)に代入して、以下の耐力評価式が得られる。

$${}_c q_u = \frac{\sigma_{mu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.15)$$

##### (B)の範囲

この範囲では極限解析より、

$$\beta = 45^\circ \quad (4.4.16)$$

$$U = u \cos \theta - v \sin \theta = 0 \quad (4.4.17)$$

となる。よって、下式が得られる。

$$X = \frac{1}{\tan \theta} \quad (4.4.18)$$

式(4.4.16)および式(4.4.17)を式(4.2.1)に代入して、以下の耐力評価式が得られる。

$${}_c q_u = \frac{1}{\sqrt{2} \sin \theta} \cdot \frac{\sigma_{wu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.19)$$

##### (C)の範囲

この範囲は、極限解析結果を近似することにより、耐力評価式を導出する。 $\theta = 0^\circ$  の時の  $q_{u0}$  を以下のように近似する。

$$q_{u0} = \frac{\sigma_{wu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.20)$$

最大耐力  ${}_c q_u$  は係数  $\gamma$  を用いて以下のように近似する。

$${}_c q_u = q_{u0} + \gamma \cdot (\cos \theta - 1) \cdot \frac{\sigma_{wu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.21)$$

ここで崩壊機構が(c)から(b)に切り替わる角度  $\varphi$  において式(4.4.19)と式(4.4.21)を等値することにより、以下の  $\gamma$  を得る。

$$\gamma = \left( \frac{1}{\sqrt{2} \sin \varphi} - 1 \right) \frac{1}{(\cos \varphi - 1)} \quad (4.4.22)$$

##### (D)の範囲

この範囲は、解析結果を近似することにより、耐力評価式を導出する。 $\theta = 0^\circ$  の時の  $q_{u0}$  を以下のように近似する。

$$q_{u0} = \frac{\sigma_{mu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.23)$$

最大耐力  ${}_c q_u$  は係数  $\gamma$  を用いて以下のように近似する。

$${}_c q_u = q_{u0} + \gamma \cdot (\cos \theta - 1) \cdot \frac{\sigma_{wu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.24)$$

ここで崩壊機構が(d)から(b)に切り替わる角度 $\varphi$ において式(4.4.19)と式(4.4.24)を等値することにより，以下の $\gamma$ を得る．

$$\gamma = \left( \frac{\sigma_{wu}}{\sqrt{2} \sin \varphi} - \sigma_{mu} \right) \frac{1}{(\cos \varphi - 1) \sigma_{wu}} \quad (4.4.25)$$

強度比 $\rho_u=1.3$ 以上の場合は上記の耐力評価式で極限解析と同一の値が得られるため，ここでは強度比 $\rho_u=0.5 \sim 1.2$ について， $cq_u$ と極限解析より得られた精算値の比較を図 4.4.5 に示す．なお， $\rho_u=1.0$ の側面異形隅肉溶接の耐力で無次元化しており，実線で $cq_u$ ，破線で精算値を示している．強度比 $\rho_u$ が $1.0 \sim 1.2$ の範囲では理論値に対して近似値が若干小さい値を取る．強度比 $\rho_u=1.1$ で斜方角度 $\theta=38^\circ$ の時，最も誤差が大きくなるが， $cq_u$ が精算値の $0.979$ 倍とその誤差は小さい．また，強度比 $\rho_u$ が $1.0$ 未満の範囲では精算値に対して $cq_u$ が若干大きい値を取る．強度比 $\rho_u=0.8$ で斜方角度 $\theta = 48^\circ$ の時，最も誤差が大きくなるが， $cq_u$ が精算値の $1.02$ 倍とその誤差は小さい．

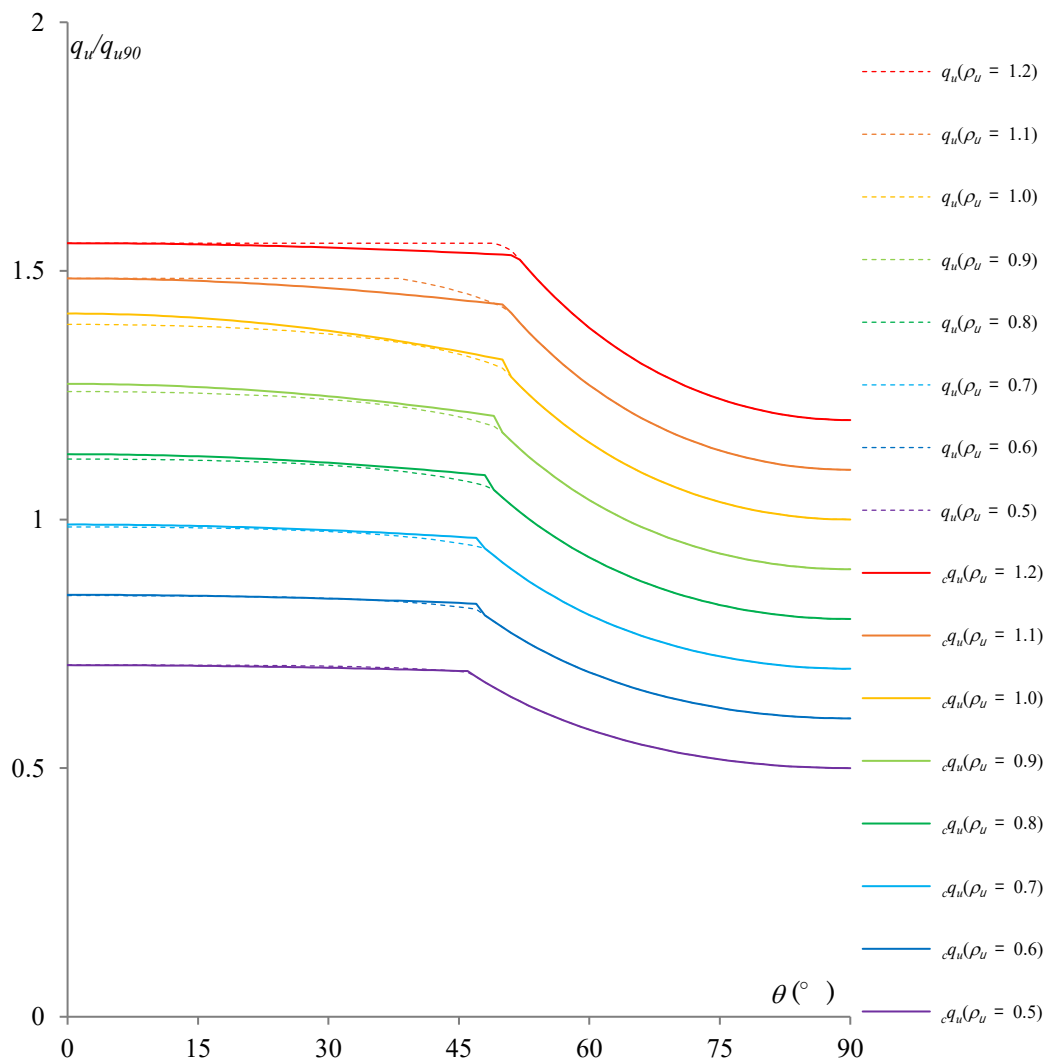


図 4.4.5  $cq_u$  と精算値の比較（等脚隅肉溶接）

【GW】

図 4.4.3 において、(A)および(B)の範囲については、溶接線方向の変形  $V$  のみ発生するため、極限解析を整理することで値がある斜方角度に対して一意に定まる。

(A)の範囲  $0.5 \leq \rho_u < 1.19$

この範囲では極限解析より、

$$\beta = 60^\circ \quad (4.4.26)$$

$$U = u \cos \theta - v \sin \theta = 0 \quad (4.4.27)$$

となる。よって、下式が得られる。

$$X = \frac{1}{\tan \theta} \quad (4.4.28)$$

式(4.4.26)および式(4.4.27)を式(4.3.1)に代入して、以下の耐力評価式が得られる。

$$c q_u = \frac{\sigma_{wu}}{2 \sin \theta} \cdot S \quad (4.4.29)$$

(B)の範囲  $1.19 \leq \rho_u \leq 2.0$

この範囲では極限解析より、

$$\beta = 29^\circ \quad (4.4.30)$$

$$U = u \cos \theta - v \sin \theta = 0 \quad (4.4.31)$$

となる。よって、下式が得られる。

$$X = \frac{1}{\tan \theta} \quad (4.4.32)$$

式(4.4.30)および式(4.4.32)を式(4.3.3)に代入して、以下の耐力評価式が得られる。

$$c q_u = \frac{1}{2 \sin 29^\circ \sin \theta} \cdot \frac{\sigma_{bu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.33)$$

(C)、(D)および(E)の範囲については極限解析結果を近似することにより、耐力評価式を導出する。なお(E)の範囲については  $\rho_u \geq 1.003$  の範囲を(C)と合わせて近似し、 $\rho_u < 1.003$  の範囲を(D)と合わせて近似する。

(C)の範囲  $1.003 \leq \rho_u \leq 2.0$

$\theta = 0^\circ$  の時の  $q_{u0}$  を以下のように近似する。

$$\begin{aligned} q_{u0} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (2\sigma_{bu} + \sigma_{my}) \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{1}{3} \cdot (2\sigma_{bu} + \sigma_{my}) \cdot S \end{aligned} \quad (4.4.34)$$

最大耐力  $c q_u$  は係数  $\gamma$  を用いて以下のように近似する。

$$c q_u = q_{u0} + \gamma \cdot (\cos 2\theta - 1) \cdot \frac{\sigma_{bu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.35)$$

なお、 $\gamma$  には以下で算出する  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  を代入する。

$1.19 \leq \rho_u \leq 2.0$  の場合、崩壊機構が(C)から(B)に切り替わる角度  $\varphi_1$  において式(4.4.33)と式(4.4.35)を等値することにより、以下の  $\gamma_1$  を得る。

$$\gamma_1 = \left( \frac{\sigma_{my}}{\sigma_{bu}} + 2 - \frac{\sqrt{3}}{2 \sin 29^\circ \sin \varphi_1} \right) \cdot \frac{1}{2\sqrt{3} \sin^2 \varphi_1} \quad (4.4.36)$$

また、 $\rho_u < 1.19$  の場合、崩壊機構が(C)から(A)に切り替わる角度 $\varphi_2$ において式(4.4.29)と式(4.4.35)を等値することにより、以下の $\gamma_2$ を得る。

$$\gamma_2 = \left( \frac{\sigma_{my}}{\sigma_{bu}} + 2 - \frac{3}{2 \sin \varphi_2} \cdot \frac{\sigma_{wu}}{\sigma_{bu}} \right) \cdot \frac{1}{2\sqrt{3} \sin^2 \varphi_2} \quad (4.4.37)$$

なお、強度比が $\rho_u \geq 1.003$  の(E)の範囲(崩壊機構が(C)から(E)を経由して(A)に切り替わる)についても上記の $\gamma_2$ を用いて近似することとする。

#### (D)の範囲 $0.5 \leq \rho_u < 1.003$

$\theta = 0^\circ$  の時の  $q_{u0}$  を以下のように近似する。

$$\begin{aligned} q_{u0} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (2\sigma_{wu} + \sigma_{my}) \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{1}{3} \cdot (2\sigma_{wu} + \sigma_{my}) \cdot S \end{aligned} \quad (4.4.38)$$

最大耐力  $cq_u$  は係数 $\gamma$ を用いて以下のように近似する。

$$cq_u = q_{u0} + \gamma \cdot (\cos 2\theta - 1) \cdot \frac{\sigma_{wu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.39)$$

ここで崩壊機構が(D)から(A)に切り替わる角度 $\varphi_5$ において式(4.4.29)と式(4.4.39)を等値することにより、以下の $\gamma$ を得る。

$$\gamma = \left( \frac{\sigma_{my}}{\sigma_{wu}} + 2 - \frac{3}{2 \sin \varphi_5} \right) \cdot \frac{1}{2\sqrt{3} \sin^2 \varphi_5} \quad (4.4.40)$$

なお、強度比が $\rho_u < 1.003$  の(E)の範囲(崩壊機構が(E)から(D)を経由して(A)に切り替わる)についても上記の $\gamma$ を用いて近似することとする。

強度比 $\rho_u = 0.5 \sim 2.0$  について、 $cq_u$  と極限解析より得られた精算値の比較を図 4.4.6 に示す。なお、 $\rho_u = 1.0$  の側面異形隅肉溶接の耐力で無次元化しており、実線で  $cq_u$ 、破線で精算値を示している。強度比 $\rho_u$  が  $0.5 \sim 0.9$  の範囲では斜方角度 $\theta = 0^\circ$  の時、精算値に対して近似値が若干小さい値を取る。これは精算値が $\beta = 31^\circ$  において崩壊機構 W で算出されたものであるのに対し、近似値が $\beta = 30^\circ$  として降伏面①の強度を溶接金属強度 $\sigma_{wu}$  で算出されたためである。一方、強度比 $\rho_u$  が  $1.1 \sim 2.0$  の範囲では斜方角度 $\theta = 0^\circ$  の時、精算値に対して近似値が若干小さい値を取る。これは精算値が $\beta = 29^\circ$  において崩壊機構 B で算出されたものであるのに対し、近似値が $\beta = 30^\circ$  として降伏面①の強度を溶接金属強度 $\sigma_{bu}$  で算出されたためである。 $cq_u$  と精算値の誤差は最大で 1%程度であり、十分な精度で近似できている。

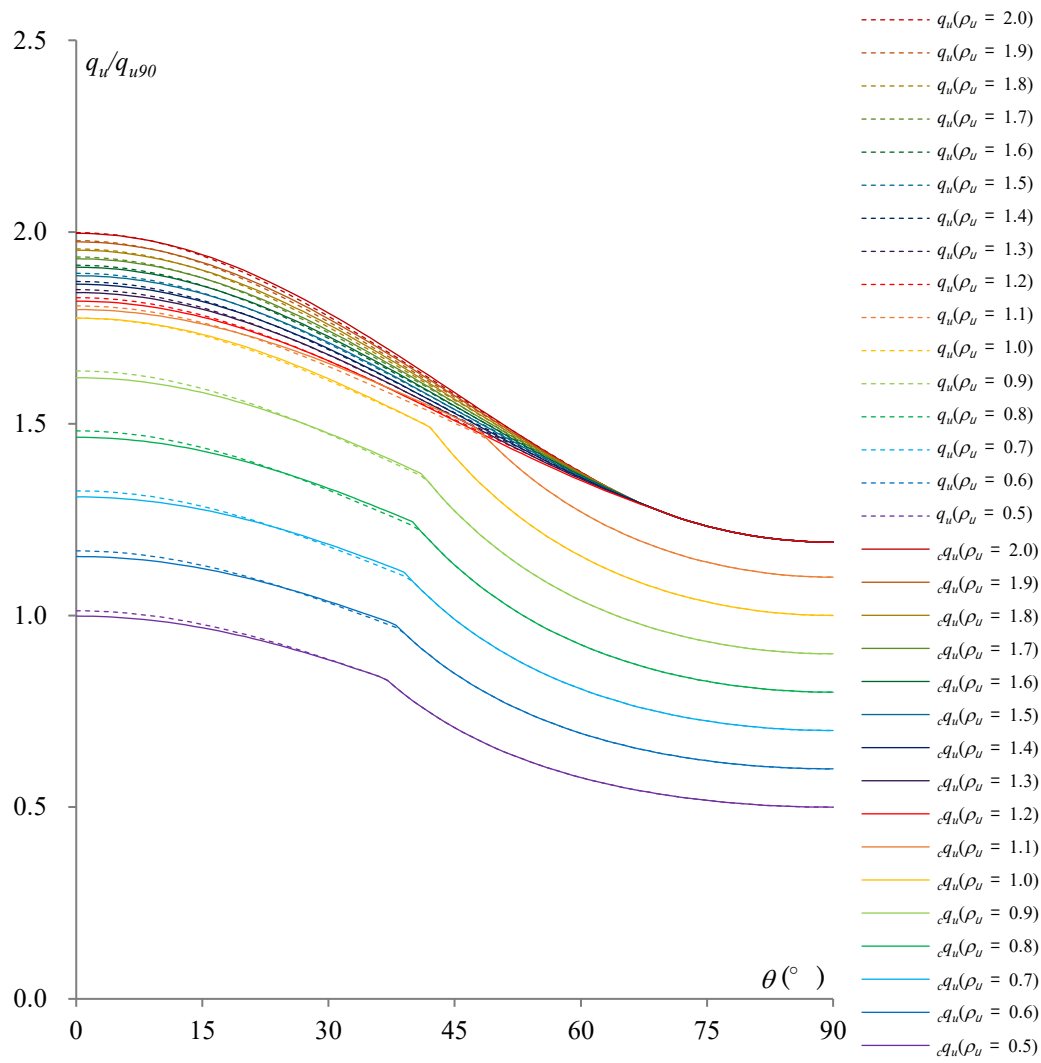


図 4.4.6  $cq_u$  と精算値の比較 (GW)

### 【50W】

図 4.4.4 において, (A)および(B)の範囲については, 溶接線方向の変形  $V$  のみ発生するため, 極限解析を整理することで値がある斜方角度に対して一意に定まる. なお, (F)の範囲は(B)の範囲と合わせて評価する.

(A)の範囲 :  $0.5 \leq \rho_u < 1.031$

この範囲では極限解析より,

$$\beta = 50^\circ \quad (4.4.41)$$

$$U = u \cos \theta - v \sin \theta = 0 \quad (4.4.42)$$

となる. よって, 下式が得られる.

$$X = \frac{1}{\tan \theta} \quad (4.4.43)$$

式(4.4.41)および式(4.4.43)を式(4.3.1)に代入して, 以下の耐力評価式が得られる.

$$c q_u = \frac{\sin 50^\circ}{\sin \theta} \frac{\sigma_{wu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.44)$$

(B)の範囲 :  $1.031 \leq \rho_u \leq 2$

この範囲では極限解析より,

$$\beta = 39^\circ \quad (4.4.45)$$

$$U = u \cos \theta - v \sin \theta = 0 \quad (4.4.46)$$

となる. よって, 下式が得られる.

$$X = \frac{1}{\tan \theta} \quad (4.4.47)$$

式(4.4.45)および式(4.4.47)を式(4.3.3)に代入して, 以下の耐力評価式が得られる.

$$c q_u = \frac{1}{2 \sin 39^\circ \sin \theta} \cdot \frac{\sigma_{bu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.48)$$

(C), (D)および(E)の範囲については極限解析結果を近似することにより, 耐力評価式を導出する. なお(E)の範囲については $\rho_u > 0.999$ の範囲を(C)と合わせて近似し,  $\rho_u \leq 0.999$ の範囲を(D)と合わせて近似する.

(C)のうち  $0.999 < \rho_u \leq 2$  の範囲および(E)のうち  $\rho_u > 0.999$  の範囲

$\theta = 0^\circ$  の時の  $q_{u0}$  を以下のように近似する.

$$\begin{aligned} q_{u0} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (2\sigma_{bu} + \sigma_{my}) \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{1}{3} \cdot (2\sigma_{bu} + \sigma_{my}) \cdot S \end{aligned} \quad (4.4.49)$$

最大耐力  $c q_u$  は係数  $\gamma$  を用いて以下のように近似する.

$$c q_u = q_{u0} + \gamma \cdot (\cos 2\theta - 1) \cdot \frac{\sigma_{bu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.50)$$

なお,  $\gamma$  には以下で算出する  $\gamma_1, \gamma_2$  を代入する.

$1.031 \leq \rho_u \leq 2.0$  の場合, 崩壊機構が(C)から(B)および(C)から(E)を経由して(F)に切り替わる角度  $\varphi_1$  において式(46)と式(48)を等値することにより, 以下の  $\gamma_1$  を得る.

$$\gamma_1 = \left( \frac{\sigma_{my}}{\sigma_{bu}} + 2 - \frac{\sqrt{3}}{2 \sin 39^\circ \sin \varphi_1} \right) \cdot \frac{1}{2\sqrt{3} \sin^2 \varphi_1} \quad (4.4.51)$$

また，強度比が  $0.999 < \rho_u \leq 1.031$  の範囲について，崩壊機構が(C)から(E)を経由して(A)に切り替わる角度  $\varphi_4$  おいて，式(4.4.44)と式(4.4.50)を等値することにより，以下の  $\gamma_2$  を得る．

$$\gamma_2 = \left( \frac{\sigma_{my}}{\sigma_{bu}} + 2 - \frac{\sqrt{3} \sin 50^\circ}{\sin \varphi_4} \cdot \frac{\sigma_{wu}}{\sigma_{bu}} \right) \cdot \frac{1}{2\sqrt{3} \sin^2 \varphi_4} \quad (4.4.52)$$

(D)の範囲， (C)および(E)のうち  $\rho_u \leq 0.999$  の範囲

$\theta = 0^\circ$  の時の  $q_{u0}$  を以下のように近似する．

$$q_{u0} = \left( \frac{\sigma_{wu}}{2 \sin 40^\circ \cos 40^\circ} + \sigma_{my} \cdot \tan 40^\circ \right) \cdot \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (4.4.53)$$

最大耐力  $cq_u$  は係数  $\gamma$  を用いて以下のように近似する．

$$cq_u = q_{u0} + \gamma \cdot (\cos 2\theta - 1) \cdot \frac{\sigma_{wu}}{\sqrt{3}} \cdot S \quad (4.4.54)$$

ここで崩壊機構が(D)から(A)に切り替わる角度  $\varphi_5$  において式(4.4.44)と式 (4.4.54)を等値することにより，以下の  $\gamma$  を得る．

$$\gamma = \left( \tan 40^\circ \cdot \frac{\sigma_{my}}{\sigma_{wu}} + \frac{1}{2 \sin 40^\circ \cos 40^\circ} - \frac{\cos 40^\circ}{\sin \varphi_5} \right) \cdot \frac{1}{2 \sin^2 \varphi_5} \quad (4.4.55)$$

強度比  $\rho_u = 0.5 \sim 2.0$  について， $cq_u$  と極限解析より得られた精算値の比較を図 4.4.7 に示す．なお， $\rho_u = 1.0$  の側面異形隅肉溶接の耐力で無次元化しており，実線で  $cq_u$ ，破線で精算値を示している．強度比  $\rho_u$  が  $0.5 \sim 0.9$  の範囲では斜方角度  $\theta = 0^\circ$  の時，精算値に対して近似値が若干小さい値を取る．これは精算値が  $\beta = 41^\circ$  において崩壊機構 W で算出されたものであるのに対し，近似値が  $\beta = 40^\circ$  として降伏面①の強度を溶接金属強度  $\sigma_{wu}$  で算出されたためである．一方，強度比  $\rho_u$  が  $1.0 \sim 1.8$  の範囲では斜方角度  $\theta = 0^\circ$  の時，精算値に対して近似値が若干大きい値を取る．これは精算値が  $\beta = 31 \sim 33^\circ$  において崩壊機構 B で算出されたものであるのに対し，近似値が  $\beta = 30^\circ$  として降伏面①の強度を母材強度  $\sigma_{bu}$  で算出されたためである． $cq_u$  と精算値の誤差は最大で 2%程度であり，十分な精度で近似できている．

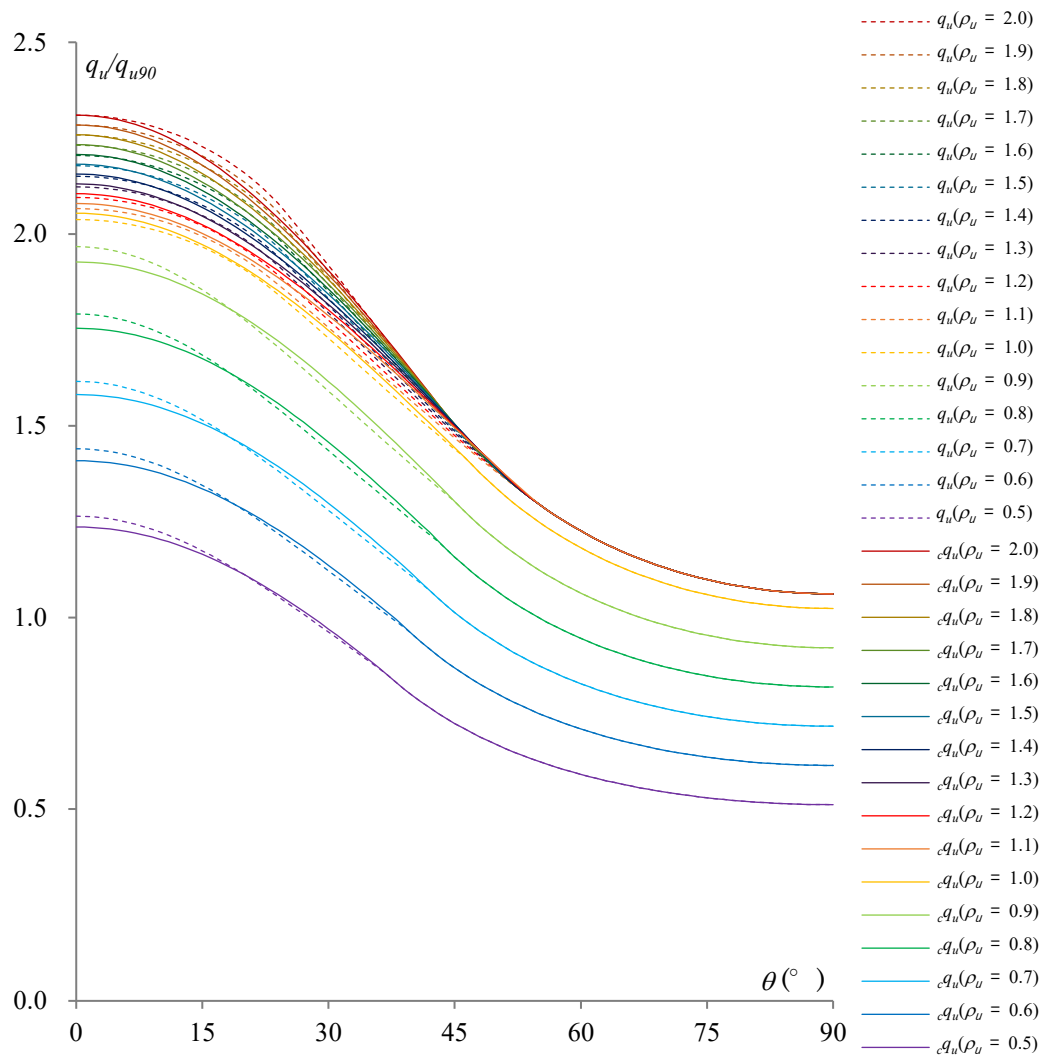


図 4.4.7  $cq_u$  と精算値の比較 (50W)

#### 4.5 まとめ

本章では, 2 章に示した崩壊荷重と 3 章に示した FEA に基づき, 最大耐力  $P_u$  を推定した. さらに, 極限解析により得られた最大耐力を陽な表現で表すため, 近似式を誘導し溶接継目の最大耐力の耐力評価式を提示した.

- 1) 有限要素数値解析の結果より, 界面の応力状態を検証し, 界面 A は引張強さの中間値, 界面 B は降伏点の中間値あるいはそれよりも低い値となっていることから, 界面の耐力の計算に用いる強度を決定した.
- 2) 崩壊荷重から最大耐力を推定する方法を提示した. 計算値は, 実験値と概ね良い対応を示し, 斜方角度の変化に伴い最大耐力の変化の傾向と一致した.
- 3) 数値計算が必要となる最大耐力の推定方法に対して, 陽な表現の耐力評価式を提示した. 耐力評価式は精算解に対して良い近似を与えた.

## 第 5 章 曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目

### 5.1 はじめに

本章では，図 5.1.1 に示す柱梁接合部の梁ウェブ接合部のように曲げとせん断荷重を受ける隅肉溶接継目について，2 章から 4 章に示した斜方隅肉溶接継目の崩壊荷重および最大耐力を用いて極限解析を行い，耐力を推定する．さらに，極限解析により得られる最大耐力を陽な表現で表すため，近似式を誘導し溶接継目の最大耐力の耐力評価式を提示する．

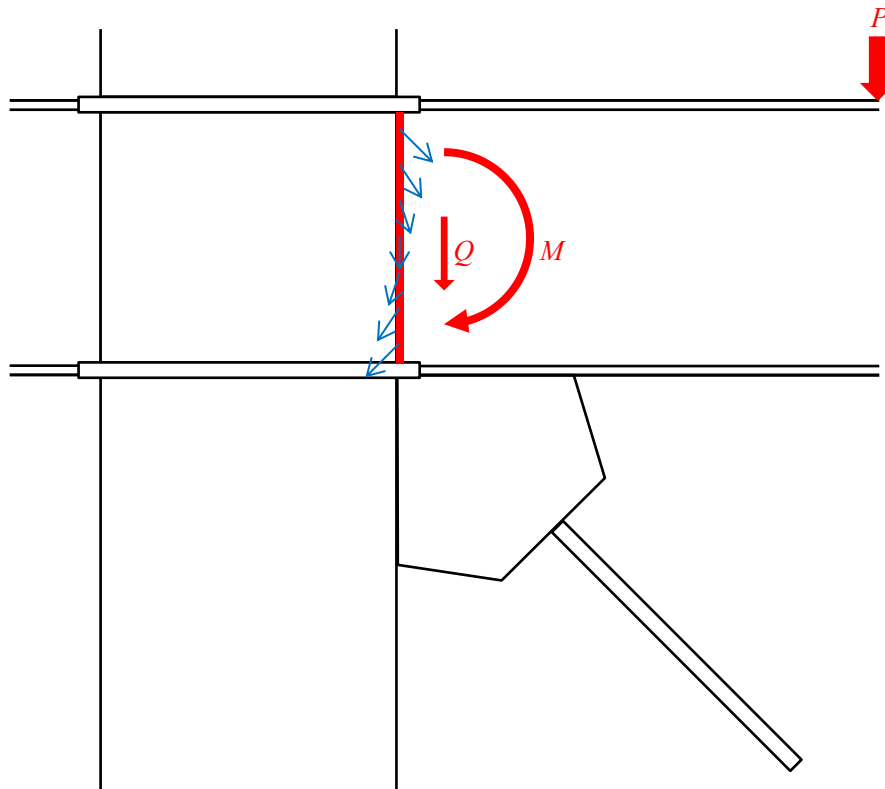


図 5.1.1 該当箇所の例

## 5.2 極限解析

本節では、せん断スパン比を変動因子とした実験モデルについて、 $q$ - $\theta$ 関係および  $X$ - $\theta$ 関係を応用し、分割された各要素に斜方隅肉溶接継目の崩壊荷重を適用することで溶接線全体の崩壊荷重を推定する。本解析では与えられた溶接部変形からせん断スパン比および対応する耐力を求める逆問題解析である。

### 5.2.1 崩壊荷重

#### 【変形状態の仮定】

図 5.2.1 に示すように、せん断スパン比  $L/d$  の位置に垂直荷重  $P$  を受ける溶接継目について、溶接線方向の変形を  $V_0$ 、回転角を  $\varphi_0$  とした変形状態を仮定する。

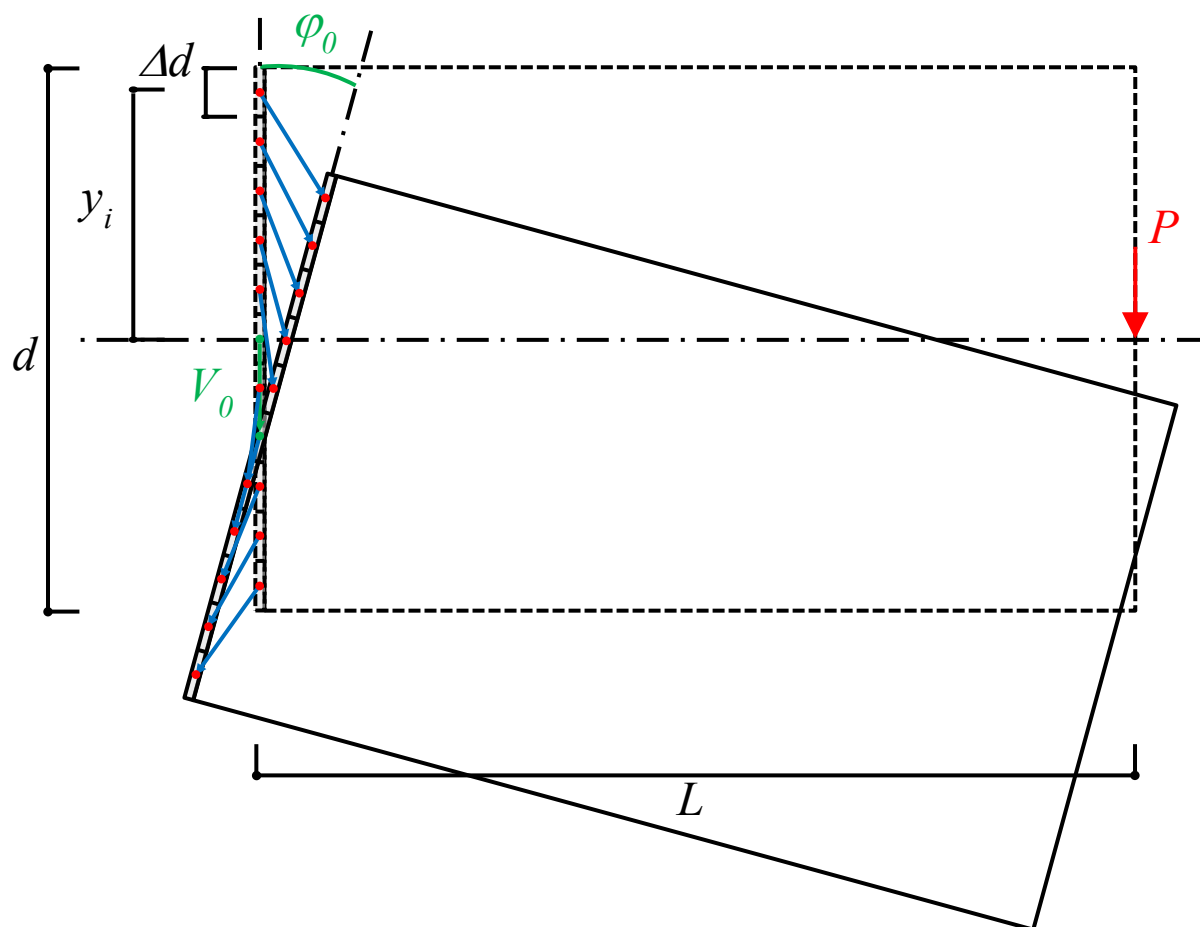


図 5.2.1 変形状態の仮定

### 【要素 $i$ の塑性変形増分】

図 5.2.3 に示すように，溶接継目を溶接線方向に  $n$  分割し，溶接線中央から  $i$  番目の各要素までの距離を  $y_i$  とする．微小長さ  $\Delta d$  の溶接継目に斜方角度  $\theta_i$  の荷重  $q_i$  が作用すると仮定すると，溶接線中央位置から  $y_i$  の位置の  $i$  番目の微小要素の溶接線方向および溶接線直交方向の塑性変形増分  $V_i$  および  $U_i$  は幾何学的関係より，以下の式で表される．

$$\begin{aligned} U_i &= |\varphi_0 \cdot y_i| \\ V_i &= V_0 \end{aligned} \quad (5.2.1)$$

また，微小要素における荷重  $q_i$  の作用方向の塑性変形増分  $u_i$  および直交方向の塑性変形増分  $v_i$  は以下の式で表される．

$$\begin{aligned} u_i &= U_i \cos \theta_i + V_i \sin \theta_i \\ v_i &= -U_i \sin \theta_i + V_i \cos \theta_i \end{aligned} \quad (5.2.2)$$

よって，各要素の塑性変形増分の比  $X_i$  は

$$X_i = \frac{v_i}{u_i} = \frac{-U_i \sin \theta_i + V_i \cos \theta_i}{U_i \cos \theta_i + V_i \sin \theta_i} \quad (5.2.3)$$

となり， $\theta_i$  の関数として表される．

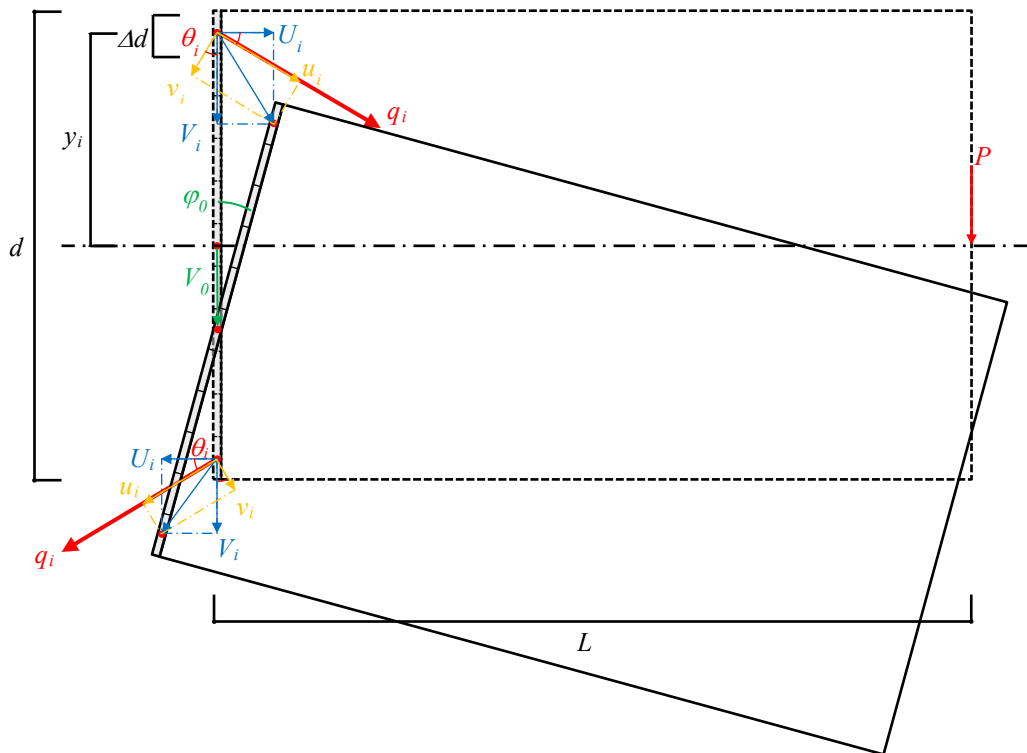


図 5.2.2 要素  $i$  の塑性変形増分および荷重の作用方向

### 【崩壊機構の場合分け】

崩壊機構は2～4章で検討した結果から, 回転角 $\varphi_0$ と要素iまでの距離 $y_i$ により, 図5.2.2に示す2種類に分けられる.

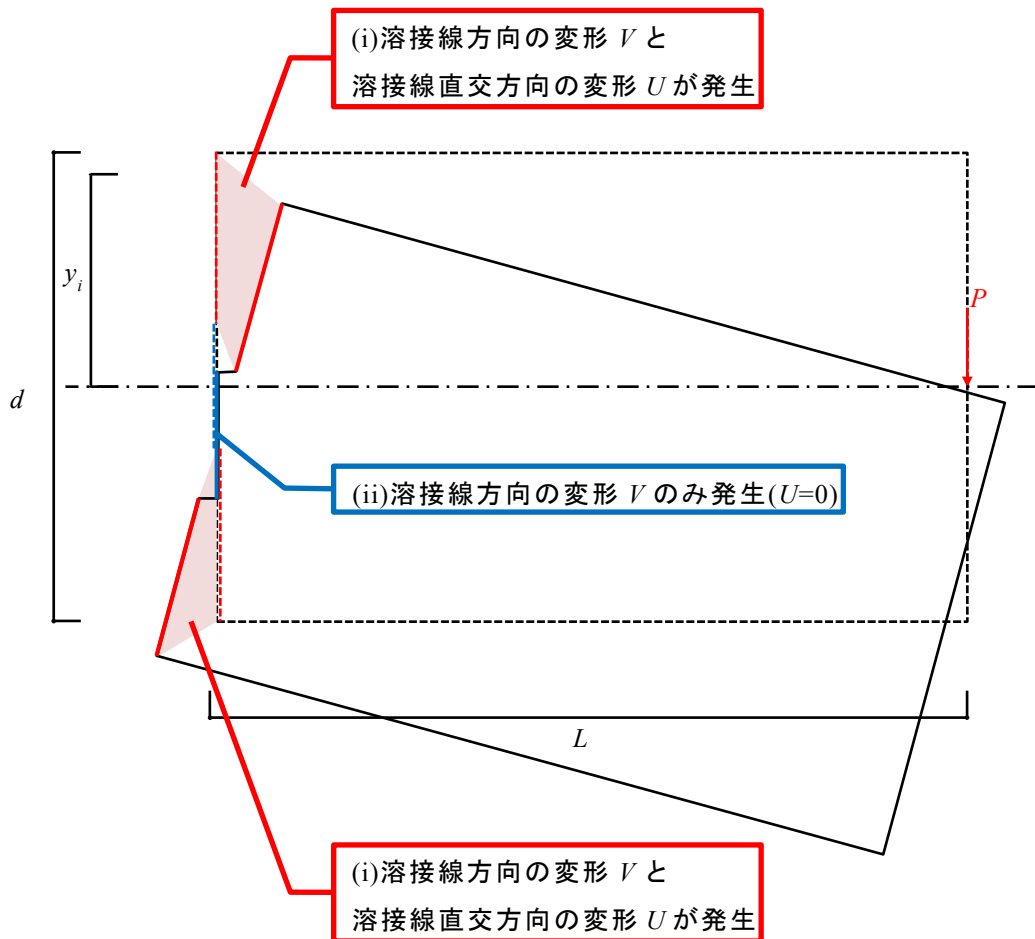


図 5.2.3 崩壊機構の場合分け

### 【要素 $i$ の崩壊荷重の取得】

図 5.2.4 に等脚隅肉溶接を例として、2.3.3 節において極限解析より得られた  $X-\theta$  関係と式(5.2.3)で表される関数  $X_i(\theta_i)$  から得られる曲線を示す。2.3.3 節で述べたように、 $X-\theta$  関係は  $46.1813^\circ$  から  $46.1814^\circ$  の間で崩壊機構がせん断変形のみになり切り替わるため、 $X$  の値が急激に増加する。切り替わる時の応力の角度を  $\theta_i$  とし、 $\theta_i$  のときの  $X$  を  $X_{ti}$  とする。また、 $V_i$  は一定値なので、 $X_i(\theta_i)$  は  $U_i$  が減少するに伴い、曲線が右に移動する。 $X_i(\theta_i)$  が  $\theta_i$  での  $X$  を  $X_{ti}$  とすると、 $X_i(\theta_i)$  と  $X-\theta$  関係が交点を取る場合は以下の式が成り立つ。

$$X_{ti} < X_{t1} \quad (5.2.4)$$

この場合は図 5.2.3 に示す(i)の範囲に該当する。

また、交点を取らない場合は以下の式が成り立つ。

$$X_{ti} > X_{t1} \quad (5.2.5)$$

この場合は図 5.2.3 に示す(ii)の範囲に該当する。

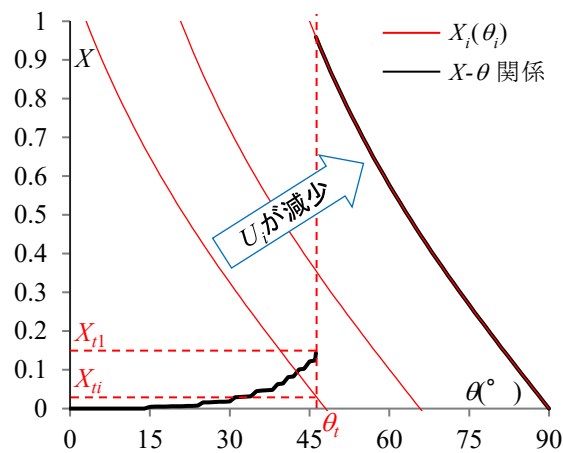


図 5.2.4 要素  $i$  の崩壊荷重の取得方法

(i)  $X_i(\theta_i)$ と  $X-\theta$  関係が交点を取る場合

図 5.2.5 に示すように、式(5.2.3)で表される関数  $X_i(\theta_i)$ と 2.3.3 項において極限解析より得られた  $X-\theta$  関係のグラフとの交点を求めることにより、各要素に作用する荷重の作用方向  $\theta_i$ を得る。

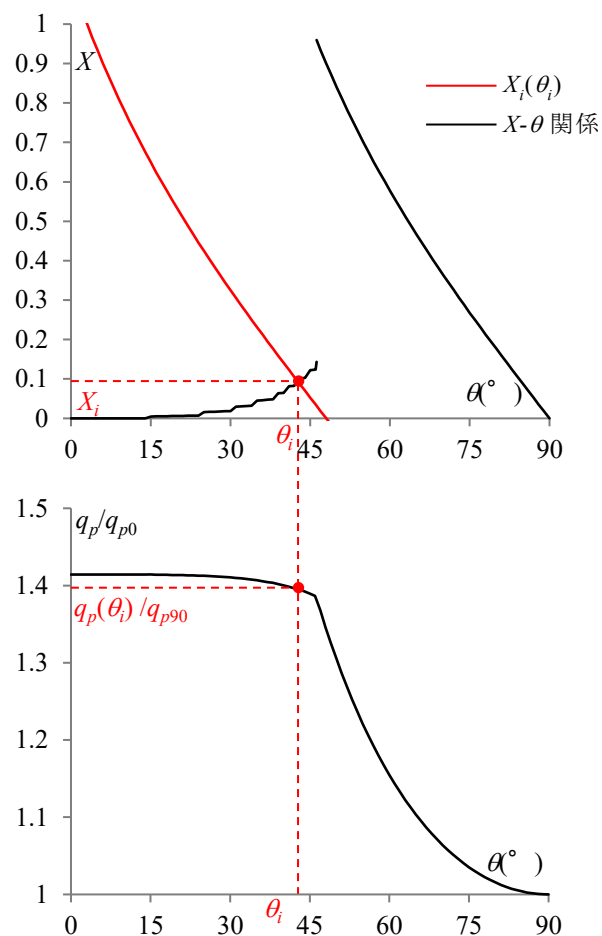


図 5.2.5 要素  $i$  の崩壊荷重の取得方法（交点を取る場合）

2 章で得られた斜方角度  $\theta$ と単位溶接長さあたりの崩壊荷重  $q_p$  の関係において、 $\theta_i$  のときの  $q_p$  を取得することで、その要素の崩壊荷重  $q_{pi}$  は、以下の式で求まる。

$$q_{pi} = q_p(\theta_i) \cdot \Delta d \quad (5.2.6)$$

(ii)  $X_i(\theta_i)$  と  $X-\theta$  関係が交点を取らない場合

この範囲は図 5.2.6 に示す，以下のような仮定を設けて  $q_{pi}$  を取得する．

- (1) 赤線で示す(i)の範囲から青線で示す(ii)の範囲に切り替わる位置で  $\theta_i$  の角度の応力が発生している
- (2) 赤点で示す溶接線中央断面では  $\theta_i=90^\circ$  の応力が発生している
- (3) 青線で示す範囲は溶接線方向の変形  $V$  のみ発生( $U=0$ )する
- (4)  $q_{pi}$  の溶接線直交方向成分  $q_{xi}$  は  $\theta_i$  時の  $q_{xi}(\theta_i)$  から中央断面まで，線形的に減少している

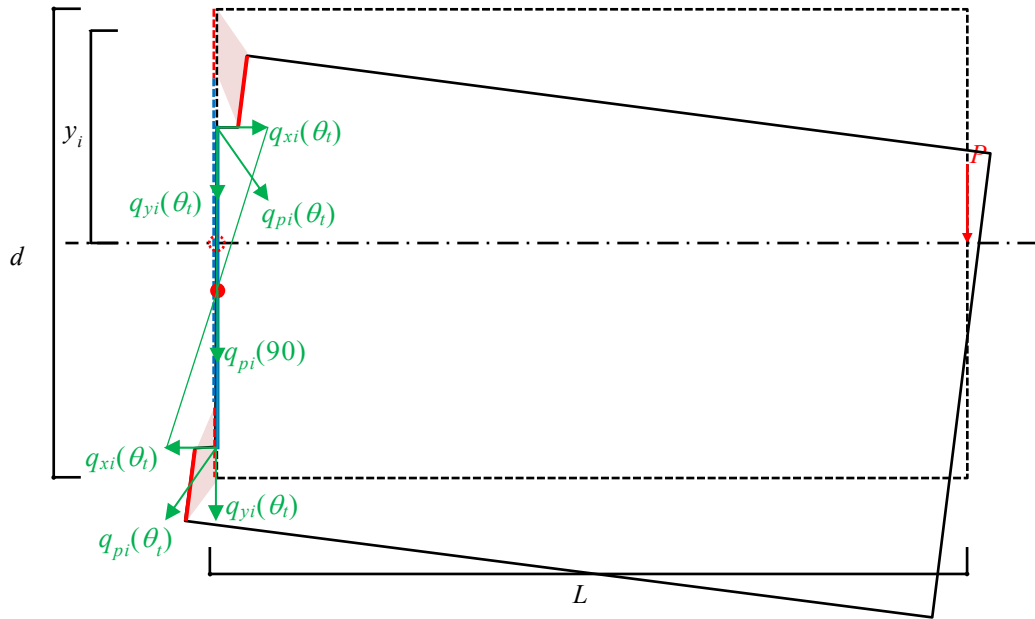


図 5.2.6 応力状態の仮定

### 【溶接線の耐力】

各要素の  $q_{pi}$  の溶接線方向成分と溶接線直交方向成分のそれぞれの合計により、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目のせん断耐力  $Q$ 、引張耐力  $T$  および曲げ耐力  $M$  は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{i=1}^n q_{pi} \sin \theta_i \\ T &= \sum_{i=1}^n q_{pi} \cos \theta_i \\ M &= \sum_{i=1}^n |q_{pi} \cos \theta_i \cdot y_i| \end{aligned} \tag{5.2.7}$$

したがって、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の崩壊荷重  $P_p$  およびせん断スパン  $L$  は以下の式で算出できる。

$$\begin{aligned} P_p &= \sqrt{Q^2 + T^2} \\ L &= \frac{M}{P_p} \end{aligned} \tag{5.2.8}$$

よって、せん断スパン比  $L/d$  は以下によって表される。

$$L/d = \frac{M}{P_p d} \tag{5.2.9}$$

## 5.2.2 解析結果

図 5.2.1 に示すモデルについて、溶接線方向の変形  $V_0=1$  とし、回転角  $\varphi_0$  および強度比  $\rho_y (=0.6 \sim 1.6)$  を変化させ、崩壊荷重  $P_u$  とせん断スパン比  $L/d$  を数値計算により求めた。溶接継目は図 5.2.7 に示す形状とした。なお、等脚隅肉溶接継目の試験体を FMS、異形隅肉溶接継目の試験体を GFMS とする。

溶接部と母材の強度比  $\rho_y$  を 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 に変化させたときの崩壊荷重  $P_p$  とせん断スパン比の関係を図 5.2.8 に示す。FMS と GFMS どちらも強度比およびせん断スパン比が一定以上に大きくなると耐力が上昇しなくなる。また、せん断スパン比が 0 の時は 2 章で示した斜方隅肉溶接継目のせん断耐力に一致する。

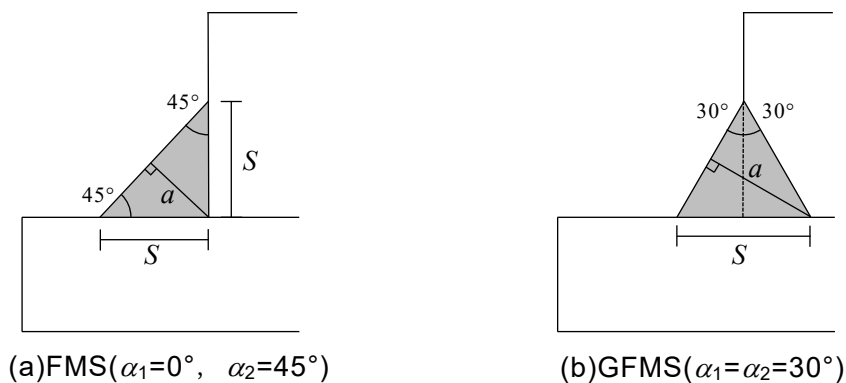
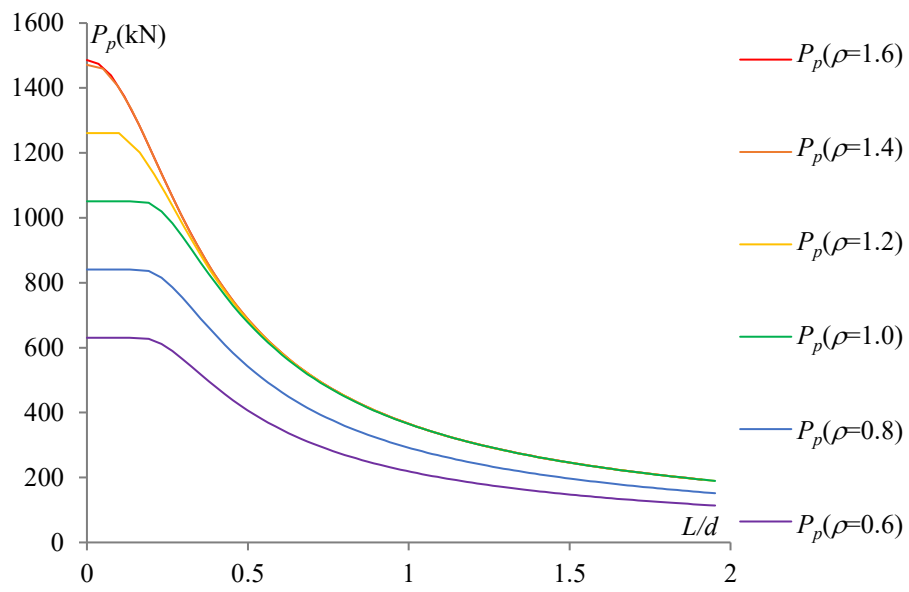


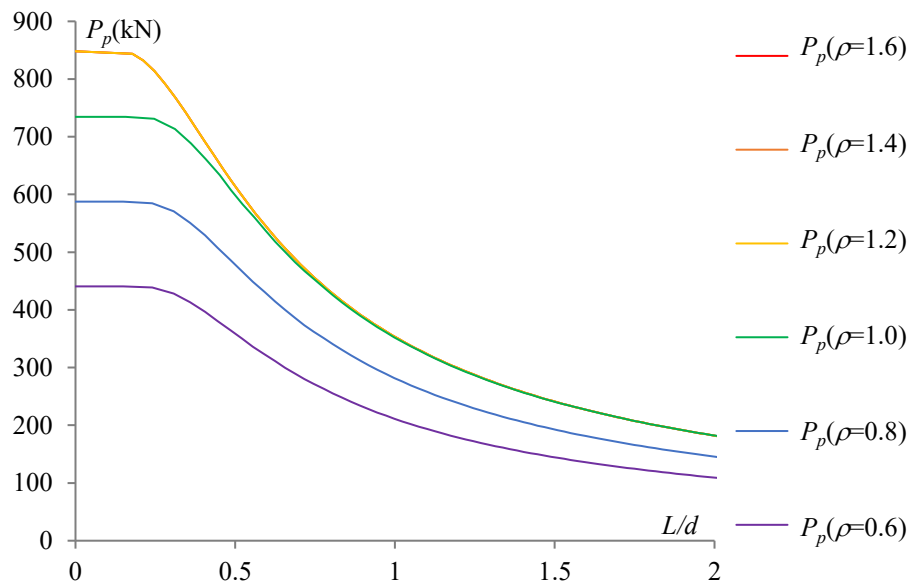
図 5.2.7 溶接継目形状

表 5.2.1 解析モデル一覧

| モデル      | 強度比 | 降伏点                  |                      | 溶接長                | 溶接サイズ              |
|----------|-----|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
|          |     | 溶接金属 $\sigma_{wy}$   | 母材 $\sigma_{by}$     | $d$                | $S$                |
|          |     | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [mm <sup>2</sup> ] | [mm <sup>2</sup> ] |
| FMS-1.6  | 1.6 | 520                  | 325                  | 200                | 9.9                |
| FMS-1.4  | 1.4 | 455                  |                      |                    |                    |
| FMS-1.2  | 1.2 | 390                  |                      |                    |                    |
| FMS-1.0  | 1.0 | 325                  |                      |                    |                    |
| FMS-0.8  | 0.8 | 260                  |                      |                    |                    |
| FMS-0.6  | 0.6 | 195                  |                      |                    |                    |
| GFMS-1.6 | 1.6 | 520                  |                      |                    | 5.65               |
| GFMS-1.4 | 1.4 | 455                  |                      |                    |                    |
| GFMS-1.2 | 1.2 | 390                  |                      |                    |                    |
| GFMS-1.0 | 1.0 | 325                  |                      |                    |                    |
| GFMS-0.8 | 0.8 | 260                  |                      |                    |                    |
| GFMS-0.6 | 0.6 | 195                  |                      |                    |                    |



(a)FMS



(b)GFMS

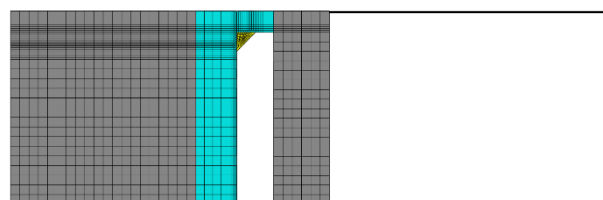
圖 5.2.8 極限解析結果

### 5.2.3 FEA との比較

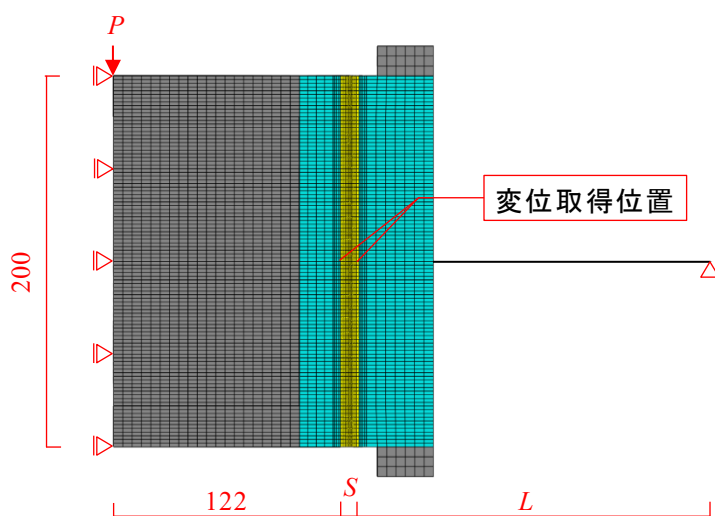
#### 【解析計画】

5.2.2 節で得られた理論解の妥当性を検証するため、有限要素数値解析による塑性耐力との比較を行った。解析には汎用有限要素法解析プログラム ABAQUS2019 を用いた。载荷方法は一方向単調载荷とし、塑性域における構成方程式は von Mises の降伏条件および連合流れ則に従うものとした。

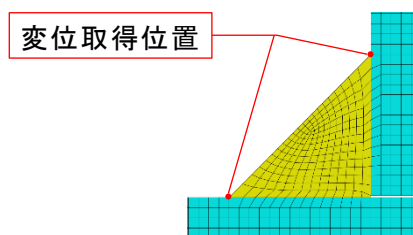
過去の実験に供した試験体に基づき作成した FEA モデルを図 5.2.9 に示す。解析モデルは図 5.2.9 (a)および(b)に示すように試験体に治具を溶接した形状とし、母材および溶接部はいずれも 8 節点ソリッド要素(C3D8R)を用いて、FMS-0.50 を基準として FMS-0.50 の母材部分を超える部分は 2 節点ビーム要素(B31)を用いて作成した 1/4 モデルである。溶接部形状は FW の脚長を 10mm および GW の脚長を 5.65mm とした溶け込みの無い設計寸法(図 5.2.9 (c)および(d)参照)でモデル化した。材料特性には溶接部と母材の強度比 $\rho_y$ を 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 および 1.6 とした完全弾塑性型の応力-ひずみ関係を入力した。せん断スパン比は 0.00~1.95 までを適当な間隔に設定した各 15 体の 180 体である。



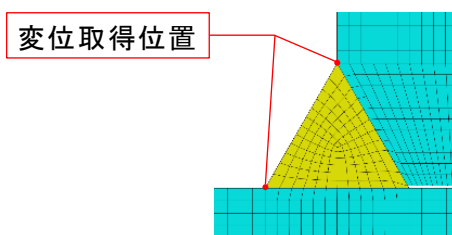
(a) FEA モデル平面図



(b) FEA モデル立面図(mm)



(c) 溶接部詳細 FMS



(d) 溶接部詳細 GFMS

図 5.2.9 解析モデル図

【解析結果】

図 5.2.10 において、FEA から取得する塑性耐力  $FEAP_p$  を強度比  $\rho_y=1.0$  を例として、荷重  $P$  と荷重方向変形  $u$  の関係において●印で示す。塑性耐力は接線剛性が初期剛性の  $1/100$  に低下した時の荷重と定義した。せん断スパン比  $L/d=0$  を例として示す。ここで、荷重方向変形  $u$  は図 5.2.9 に赤点で示す節点の変位を取得し、それら 2 点の相対変位とした。

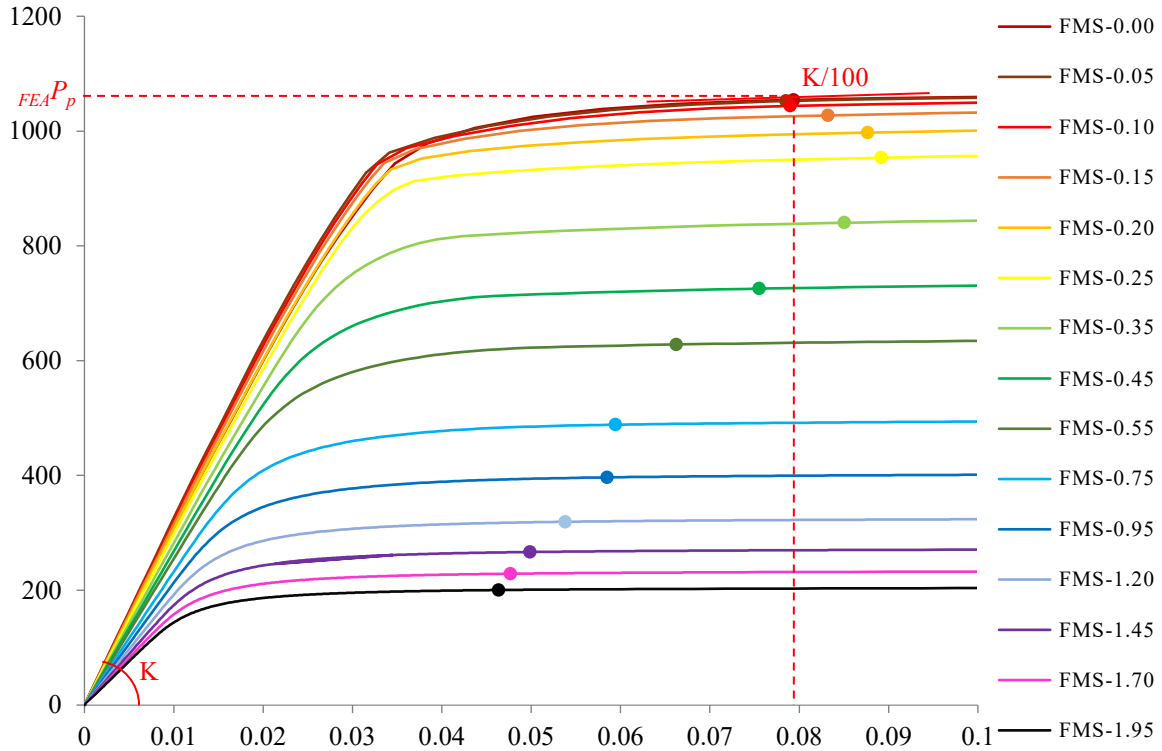


図 5.2.10  $P-u$  関係 (強度比  $\rho_y=1.0$ )

FMS の崩壊荷重の理論値  $P_p$  と FEA から取得した塑性耐力  $FEAP_p$  の比較を図 5.2.11, 表 5.2.2 に示す. イーズンマッチとなる強度比を 1.0 とした場合では,  $FEAP_p$  と  $P_p$  の比率が  $FEAP_p/P_p=0.95\sim1.06$ . オーバーマッチとなる強度比を 1.2 とした場合では 0.98~1.13, 強度比を 1.4 とした場合では 0.98~1.16, 強度比を 1.6 とした場合では 1.01~1.18 となった. アンダーマッチとなる強度比を 0.8 とした場合では 0.97~1.16, 強度比 0.6 とした場合では 0.97~1.27. 強度比が  $\rho_y=1.0$  から離れると, せん断スパン比 0.2~0.3 より大きい範囲で  $P_p$  は  $FEAP_p$  を過小評価する傾向にある. せん断スパン比が一定の値より大きくなると過小評価する傾向は 2 章の斜方隅肉溶接継目と同様の傾向であり, せん断スパン比の小さい範囲でせん断変形に近い状態では精度よく評価でき, せん断スパン比が大きくなり曲げの影響が大きくなると, FEA では塑性拘束の影響が表れるため, イーズンマッチ以外で  $P_p$  は  $FEAP_p$  を過小評価すると考えられる. しかし, せん断スパン比  $L/d$  および  $\rho_y$  の変化に伴う塑性耐力の変化の傾向を概ね良く捉えており, 崩壊荷重  $P_p$  は耐力評価法として有効である.

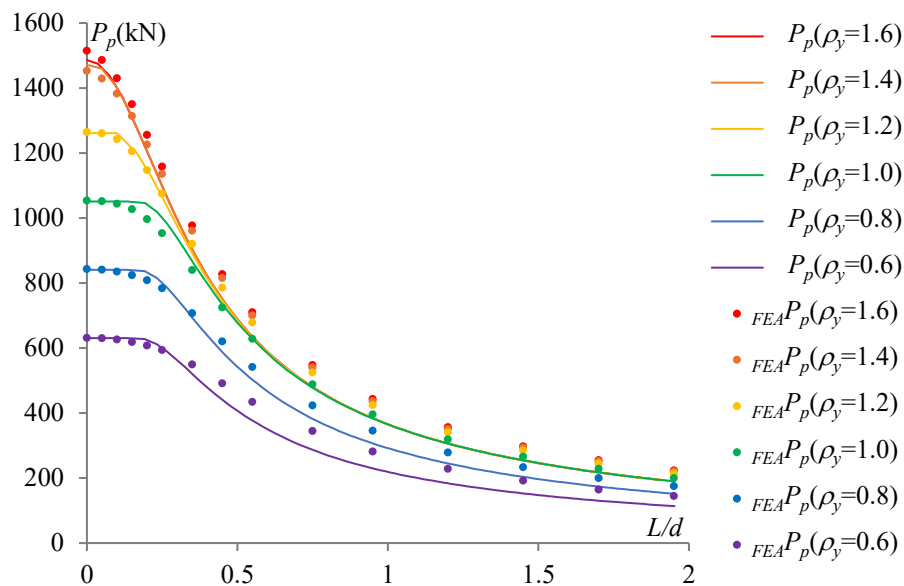


図 5.2.11 極限解析結果(FMS)

表 5.2.2 極限解析結果(FMS)

| $L/d$ | FMS-0.6   |            |            |               | FMS-0.8   |            |            |               |
|-------|-----------|------------|------------|---------------|-----------|------------|------------|---------------|
|       | $FEA P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $FEA P_p/P_p$ | $FEA P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $FEA P_p/P_p$ |
|       |           | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |               |           | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |               |
| 0     | 631.9     | 0.000      | 630.5      | 1.00          | 843.0     | 0.000      | 840.7      | 1.00          |
| 0.05  | 630.7     | 0.053      | 630.5      | 1.00          | 841.6     | 0.053      | 840.7      | 1.00          |
| 0.1   | 626.5     | 0.105      | 630.5      | 0.99          | 835.7     | 0.105      | 840.7      | 0.99          |
| 0.15  | 618.9     | 0.152      | 630.5      | 0.98          | 825.0     | 0.152      | 840.7      | 0.98          |
| 0.2   | 607.8     | 0.198      | 625.0      | 0.97          | 808.7     | 0.198      | 833.4      | 0.97          |
| 0.25  | 593.7     | 0.251      | 599.3      | 0.99          | 783.9     | 0.251      | 799.1      | 0.98          |
| 0.35  | 549.6     | 0.352      | 517.3      | 1.06          | 707.8     | 0.352      | 689.7      | 1.03          |
| 0.45  | 491.8     | 0.453      | 438.1      | 1.12          | 621.1     | 0.453      | 584.1      | 1.06          |
| 0.55  | 434.6     | 0.556      | 373.6      | 1.16          | 541.8     | 0.556      | 498.1      | 1.09          |
| 0.75  | 344.9     | 0.752      | 285.6      | 1.21          | 424.2     | 0.752      | 380.9      | 1.11          |
| 0.95  | 282.2     | 0.951      | 229.5      | 1.23          | 345.6     | 0.951      | 306.0      | 1.13          |
| 1.2   | 229.0     | 1.206      | 182.7      | 1.25          | 279.2     | 1.206      | 243.6      | 1.15          |
| 1.45  | 192.2     | 1.451      | 152.5      | 1.26          | 233.4     | 1.451      | 203.3      | 1.15          |
| 1.7   | 165.1     | 1.696      | 130.7      | 1.26          | 200.4     | 1.696      | 174.3      | 1.15          |
| 1.95  | 144.8     | 1.952      | 113.7      | 1.27          | 175.5     | 1.952      | 151.6      | 1.16          |

| $L/d$ | FMS-1.0   |            |            |               | FMS-1.2   |            |            |               |
|-------|-----------|------------|------------|---------------|-----------|------------|------------|---------------|
|       | $FEA P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $FEA P_p/P_p$ | $FEA P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $FEA P_p/P_p$ |
|       |           | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |               |           | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |               |
| 0     | 1054.1    | 0.000      | 1050.8     | 1.00          | 1264.4    | 0.000      | 1261.0     | 1.00          |
| 0.05  | 1052.4    | 0.051      | 1050.8     | 1.00          | 1261.1    | 0.050      | 1261.0     | 1.00          |
| 0.1   | 1043.9    | 0.101      | 1050.8     | 0.99          | 1242.9    | 0.100      | 1261.0     | 0.99          |
| 0.15  | 1027.2    | 0.152      | 1050.8     | 0.98          | 1205.5    | 0.147      | 1223.3     | 0.99          |
| 0.2   | 997.2     | 0.198      | 1041.7     | 0.96          | 1147.5    | 0.190      | 1165.5     | 0.98          |
| 0.25  | 953.5     | 0.251      | 998.8      | 0.95          | 1074.7    | 0.254      | 1057.6     | 1.02          |
| 0.35  | 840.3     | 0.352      | 862.1      | 0.97          | 920.6     | 0.351      | 887.7      | 1.04          |
| 0.45  | 725.4     | 0.453      | 730.1      | 0.99          | 786.5     | 0.448      | 747.3      | 1.05          |
| 0.55  | 628.1     | 0.559      | 619.8      | 1.01          | 678.7     | 0.550      | 631.9      | 1.07          |
| 0.75  | 488.4     | 0.752      | 476.1      | 1.03          | 525.6     | 0.746      | 481.4      | 1.09          |
| 0.95  | 396.6     | 0.951      | 382.5      | 1.04          | 425.2     | 0.949      | 384.4      | 1.11          |
| 1.2   | 319.3     | 1.206      | 304.5      | 1.05          | 341.9     | 1.202      | 305.8      | 1.12          |
| 1.45  | 266.6     | 1.451      | 254.1      | 1.05          | 285.6     | 1.454      | 253.7      | 1.13          |
| 1.7   | 228.8     | 1.696      | 217.8      | 1.05          | 245.0     | 1.708      | 216.4      | 1.13          |
| 1.95  | 200.4     | 1.952      | 189.5      | 1.06          | 214.6     | 1.949      | 189.8      | 1.13          |

| $L/d$ | FMS-1.4   |            |            |               | FMS-1.6   |            |            |               |
|-------|-----------|------------|------------|---------------|-----------|------------|------------|---------------|
|       | $FEA P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $FEA P_p/P_p$ | $FEA P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $FEA P_p/P_p$ |
|       |           | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |               |           | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |               |
| 0     | 1452.7    | 0.000      | 1471.2     | 0.99          | 1515.4    | 0.000      | 1486.1     | 1.02          |
| 0.05  | 1429.2    | 0.049      | 1460.0     | 0.98          | 1486.0    | 0.049      | 1465.1     | 1.01          |
| 0.1   | 1383.1    | 0.099      | 1402.2     | 0.99          | 1430.6    | 0.102      | 1399.0     | 1.02          |
| 0.15  | 1313.8    | 0.154      | 1303.4     | 1.01          | 1350.2    | 0.153      | 1304.4     | 1.04          |
| 0.2   | 1226.8    | 0.195      | 1216.9     | 1.01          | 1255.5    | 0.201      | 1202.1     | 1.04          |
| 0.25  | 1135.8    | 0.254      | 1088.7     | 1.04          | 1158.4    | 0.248      | 1101.6     | 1.05          |
| 0.35  | 961.3     | 0.351      | 900.8      | 1.07          | 976.7     | 0.354      | 895.9      | 1.09          |
| 0.45  | 816.0     | 0.455      | 743.6      | 1.10          | 827.2     | 0.444      | 757.6      | 1.09          |
| 0.55  | 700.9     | 0.555      | 630.0      | 1.11          | 710.1     | 0.552      | 632.6      | 1.12          |
| 0.75  | 540.8     | 0.754      | 478.0      | 1.13          | 548.0     | 0.746      | 482.8      | 1.14          |
| 0.95  | 436.9     | 0.953      | 382.7      | 1.14          | 443.4     | 0.952      | 383.3      | 1.16          |
| 1.2   | 351.3     | 1.208      | 304.2      | 1.15          | 356.7     | 1.206      | 304.6      | 1.17          |
| 1.45  | 293.6     | 1.444      | 255.4      | 1.15          | 297.9     | 1.449      | 254.4      | 1.17          |
| 1.7   | 252.0     | 1.697      | 217.8      | 1.16          | 255.8     | 1.709      | 216.3      | 1.18          |
| 1.95  | 220.5     | 1.951      | 189.7      | 1.16          | 224.1     | 1.944      | 190.3      | 1.18          |

GFMS の崩壊荷重の理論値  $P_p$  と FEA から取得した塑性耐力  $FEAP_p$  の比較を図 5.2.12, 表 5.2.3 に示す. イーブンマッチとなる強度比を 1.0 とした場合では,  $FEAP_p$  と  $P_p$  の比率が  $FEAP_p / P_p = 0.91 \sim 1.02$  となっており, せん断スパン比 0.3 付近で  $P_p$  は  $FEAP_p$  を過大評価する. オーバーマッチとなる強度比を 1.2 とした場合では 0.92~1.05, 強度比を 1.4 とした場合では 0.93~1.07, 強度比を 1.6 とした場合では 0.95~1.12 となった. オーバーマッチの場合は強度比が変化しても  $P_p$  は上昇せず,  $\rho_y=1.2, 1.4, 1.6$  の線は重なっており, せん断スパン比 0.2 付近で  $P_p$  は  $FEAP_p$  を過大評価し, せん断スパン比 0.7 を超えると過小評価する傾向がある. アンダーマッチとなる強度比を 0.8 とした場合では 0.95~1.13, 強度比 0.6 とした場合では 0.97~1.20 となっており, せん断スパン比 0.3 付近で  $P_p$  は  $FEAP_p$  を過大評価し, せん断スパン比 0.5 を超えると過小評価する傾向がある. せん断スパン比が一定の値より大きくなると過小評価する傾向は 2 章の斜方異形隅肉溶接継目と同様の傾向であり, せん断スパン比の小さい範囲でせん断変形に近い状態では精度よく評価でき, せん断スパン比が大きくなり曲げの影響が大きくなると, FEA では塑性拘束の影響が表れるため, イーブンマッチ以外で  $P_p$  は  $FEAP_p$  を過小評価すると考えられる. しかし, せん断スパン比  $L/d$  および  $\rho_y$  の変化に伴う塑性耐力の変化の傾向を概ね良く捉えており, 崩壊荷重  $P_p$  は耐力評価法として有効である.

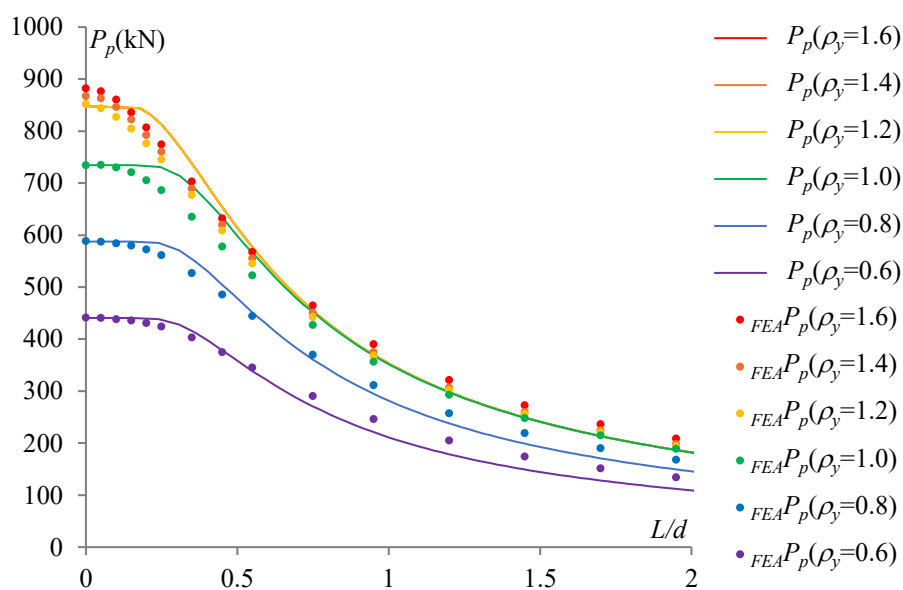


図 5.2.12 極限解析結果(GFMS)

表 5.2.3 極限解析結果(GFMS)

| $L/d$ | GFMS-0.6    |            |            |                 |             | GFMS-0.8   |            |                 |  |  |
|-------|-------------|------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|-----------------|--|--|
|       | $_{FEA}P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $_{FEA}P_p/P_p$ | $_{FEA}P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $_{FEA}P_p/P_p$ |  |  |
|       |             | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |                 |             | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |                 |  |  |
| 0     | 441.3       | 0.000      | 440.7      | 1.00            | 588.8       | 0.000      | 587.6      | 1.00            |  |  |
| 0.05  | 440.7       | 0.052      | 440.7      | 1.00            | 587.7       | 0.052      | 587.6      | 1.00            |  |  |
| 0.1   | 438.6       | 0.105      | 440.7      | 1.00            | 584.2       | 0.105      | 587.6      | 0.99            |  |  |
| 0.15  | 435.8       | 0.147      | 440.7      | 0.99            | 580.3       | 0.157      | 587.6      | 0.99            |  |  |
| 0.2   | 431.0       | 0.208      | 440.0      | 0.98            | 572.8       | 0.233      | 584.8      | 0.98            |  |  |
| 0.25  | 424.5       | 0.246      | 436.9      | 0.97            | 561.4       | 0.246      | 582.5      | 0.96            |  |  |
| 0.35  | 403.1       | 0.347      | 416.3      | 0.97            | 527.3       | 0.351      | 552.9      | 0.95            |  |  |
| 0.45  | 375.0       | 0.442      | 380.6      | 0.99            | 486.1       | 0.442      | 507.5      | 0.96            |  |  |
| 0.55  | 345.3       | 0.554      | 336.4      | 1.03            | 444.4       | 0.547      | 452.0      | 0.98            |  |  |
| 0.75  | 290.7       | 0.759      | 267.5      | 1.09            | 369.9       | 0.747      | 361.0      | 1.02            |  |  |
| 0.95  | 246.6       | 0.951      | 220.8      | 1.12            | 311.5       | 0.947      | 295.5      | 1.05            |  |  |
| 1.2   | 205.0       | 1.198      | 178.7      | 1.15            | 257.7       | 1.196      | 238.7      | 1.08            |  |  |
| 1.45  | 174.6       | 1.451      | 149.1      | 1.17            | 219.2       | 1.448      | 199.2      | 1.10            |  |  |
| 1.7   | 151.9       | 1.694      | 128.5      | 1.18            | 190.4       | 1.705      | 170.3      | 1.12            |  |  |
| 1.95  | 134.3       | 1.950      | 112.0      | 1.20            | 168.0       | 1.950      | 149.3      | 1.13            |  |  |

| $L/d$ | GFMS-1.0    |            |            |                 |             | GFMS-1.2   |            |                 |  |  |
|-------|-------------|------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|-----------------|--|--|
|       | $_{FEA}P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $_{FEA}P_p/P_p$ | $_{FEA}P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $_{FEA}P_p/P_p$ |  |  |
|       |             | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |                 |             | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |                 |  |  |
| 0     | 734.6       | 0.000      | 734.5      | 1.00            | 852.0       | 0.000      | 848.1      | 1.00            |  |  |
| 0.05  | 734.9       | 0.052      | 734.5      | 1.00            | 843.9       |            |            |                 |  |  |
| 0.1   | 730.0       | 0.103      | 734.5      | 0.99            | 827.7       |            |            |                 |  |  |
| 0.15  | 721.0       | 0.144      | 734.5      | 0.98            | 804.7       | 0.149      | 848.1      | 0.95            |  |  |
| 0.2   | 705.9       | 0.204      | 733.6      | 0.96            | 776.7       | 0.203      | 835.9      | 0.93            |  |  |
| 0.25  | 686.4       | 0.245      | 729.8      | 0.94            | 745.6       | 0.249      | 812.7      | 0.92            |  |  |
| 0.35  | 635.4       | 0.349      | 693.8      | 0.92            | 677.6       | 0.353      | 735.0      | 0.92            |  |  |
| 0.45  | 578.2       | 0.444      | 638.0      | 0.91            | 609.0       | 0.450      | 654.0      | 0.93            |  |  |
| 0.55  | 522.5       | 0.547      | 568.5      | 0.92            | 545.9       | 0.548      | 578.2      | 0.94            |  |  |
| 0.75  | 427.6       | 0.756      | 448.9      | 0.95            | 442.7       | 0.748      | 455.9      | 0.97            |  |  |
| 0.95  | 356.4       | 0.956      | 366.5      | 0.97            | 368.2       | 0.952      | 369.4      | 1.00            |  |  |
| 1.2   | 293.4       | 1.198      | 297.9      | 0.99            | 302.5       | 1.202      | 297.9      | 1.02            |  |  |
| 1.45  | 248.4       | 1.455      | 247.9      | 1.00            | 255.9       | 1.447      | 249.5      | 1.03            |  |  |
| 1.7   | 215.0       | 1.701      | 213.4      | 1.01            | 221.4       | 1.694      | 214.2      | 1.03            |  |  |
| 1.95  | 189.0       | 1.957      | 186.1      | 1.02            | 194.9       | 1.957      | 186.1      | 1.05            |  |  |

| $L/d$ | GFMS-1.4    |            |            |                 |             | GFMS-1.6   |            |                 |  |  |
|-------|-------------|------------|------------|-----------------|-------------|------------|------------|-----------------|--|--|
|       | $_{FEA}P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $_{FEA}P_p/P_p$ | $_{FEA}P_p$ | 採用した極限解析結果 |            | $_{FEA}P_p/P_p$ |  |  |
|       |             | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |                 |             | $L/d$      | 崩壊荷重 $P_p$ |                 |  |  |
| 0     | 867.6       | 0.000      | 848.1      | 1.02            | 882.2       | 0.000      | 848.1      | 1.04            |  |  |
| 0.05  | 863.0       |            |            |                 | 877.0       |            |            |                 |  |  |
| 0.1   | 846.3       |            |            |                 | 860.5       |            |            |                 |  |  |
| 0.15  | 822.3       | 0.149      | 848.1      | 0.97            | 835.9       | 0.149      | 848.1      | 0.99            |  |  |
| 0.2   | 792.5       | 0.203      | 835.9      | 0.95            | 807.3       | 0.203      | 835.9      | 0.97            |  |  |
| 0.25  | 760.3       | 0.249      | 812.7      | 0.94            | 774.6       | 0.249      | 812.7      | 0.95            |  |  |
| 0.35  | 689.9       | 0.349      | 738.4      | 0.93            | 703.5       | 0.349      | 738.4      | 0.95            |  |  |
| 0.45  | 619.8       | 0.450      | 654.0      | 0.95            | 632.4       | 0.450      | 654.0      | 0.97            |  |  |
| 0.55  | 555.5       | 0.548      | 578.2      | 0.96            | 567.7       | 0.548      | 578.2      | 0.98            |  |  |
| 0.75  | 450.8       | 0.748      | 455.9      | 0.99            | 464.9       | 0.748      | 455.9      | 1.02            |  |  |
| 0.95  | 374.9       | 0.952      | 369.4      | 1.01            | 390.2       | 0.952      | 369.4      | 1.06            |  |  |
| 1.2   | 307.0       | 1.202      | 297.9      | 1.03            | 321.5       | 1.202      | 297.9      | 1.08            |  |  |
| 1.45  | 259.9       | 1.447      | 249.5      | 1.04            | 272.8       | 1.447      | 249.5      | 1.09            |  |  |
| 1.7   | 225.0       | 1.694      | 214.2      | 1.05            | 236.8       | 1.694      | 214.2      | 1.11            |  |  |
| 1.95  | 198.2       | 1.957      | 186.1      | 1.07            | 209.1       | 1.957      | 186.1      | 1.12            |  |  |

### 5.3 最大耐力

#### 5.3.1 実験計画概要

##### 【試験体形状および寸法】

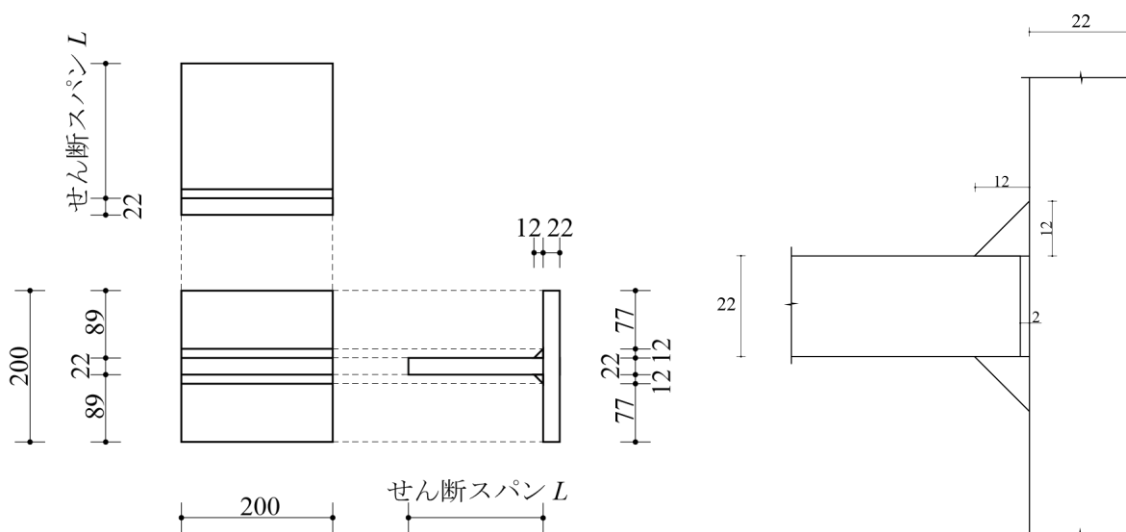
試験体一覧を表 5.3.1 に示す．試験体は溶接継目形状が FMS および GFMS，せん断スパン比を 0.25，0.50，1.00，2.00 とした計 8 体とした．材料は母材 SN490B と溶接ワイヤー YGW11 の組合せである．

表 5.3.1 試験体一覧

| モデル       | せん断スパン比<br>$L/d$ | 溶接長  | 設計のど厚 |
|-----------|------------------|------|-------|
|           |                  | $d$  | $a$   |
|           |                  | [mm] | [mm]  |
| FMS-0.25  | 0.25             | 200  | 7.0   |
| FMS-0.50  | 0.50             |      |       |
| FMS-1.00  | 1.00             |      |       |
| FMS-2.00  | 2.00             |      |       |
| GFMS-0.25 | 0.25             |      | 4.3   |
| GFMS-0.50 | 0.50             |      |       |
| GFMS-1.00 | 1.00             |      |       |
| GFMS-2.00 | 2.00             |      |       |

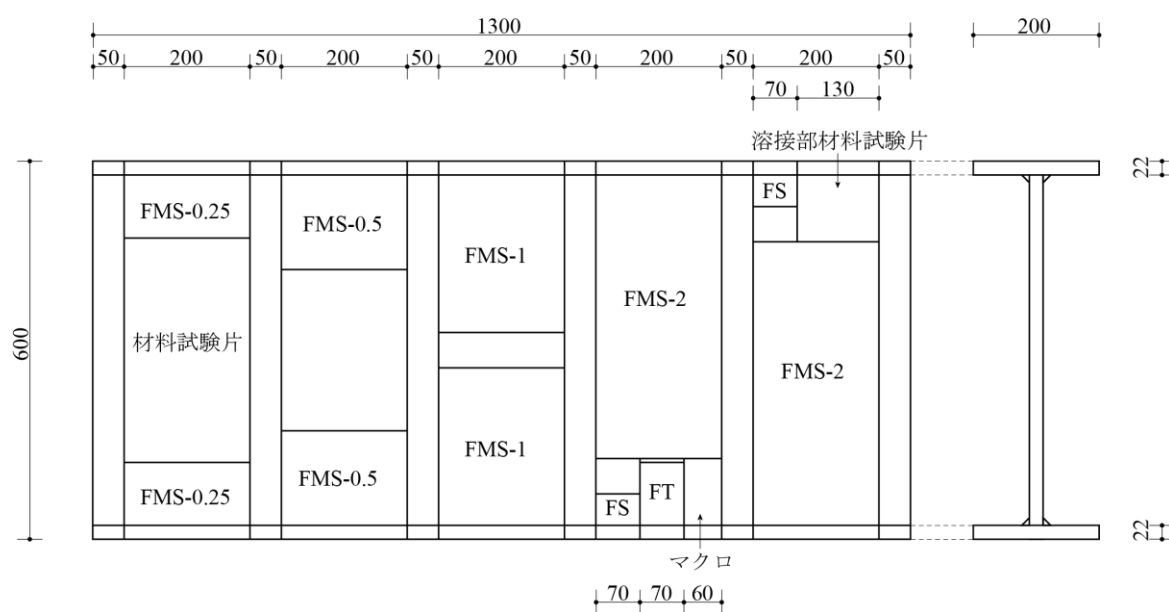
(i)試験体 FMS

試験体形状を図 5.3.1 に示し、試験体全体図を図 5.3.2 に示す。厚さ 22mm、全長 1300mm の鋼板を H 形に隅肉溶接し、その後溶接長が 200mm となるように切断し製作した。設計のど厚は 7.1mm の等脚隅肉とした。また、今実験では摩擦による応力の伝達を避け、耐力を正確に測るため、T 継手部分に隙間を 2mm 確保した。



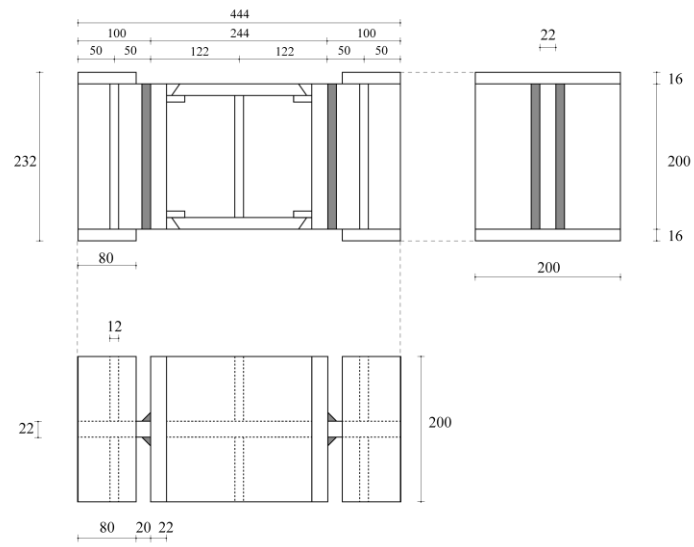
### (a) 試験体詳細

(b) T 継手部分詳細

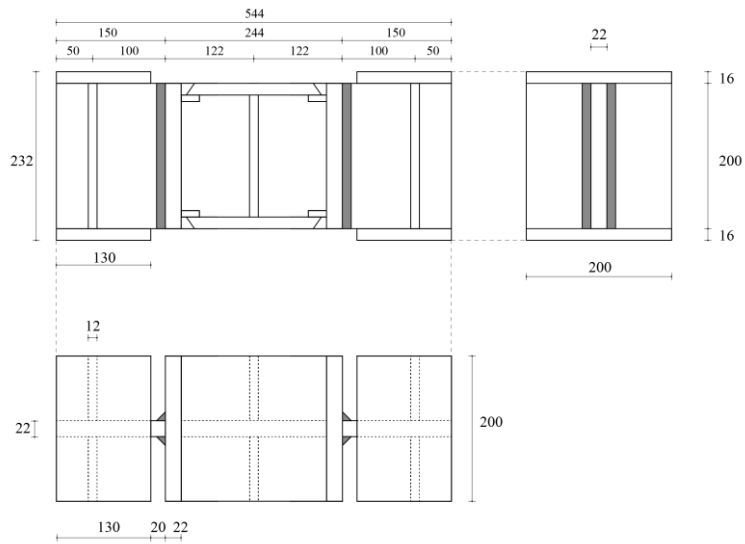


(c) 試験体採取位置

図 5.3.1 試験体 FMS

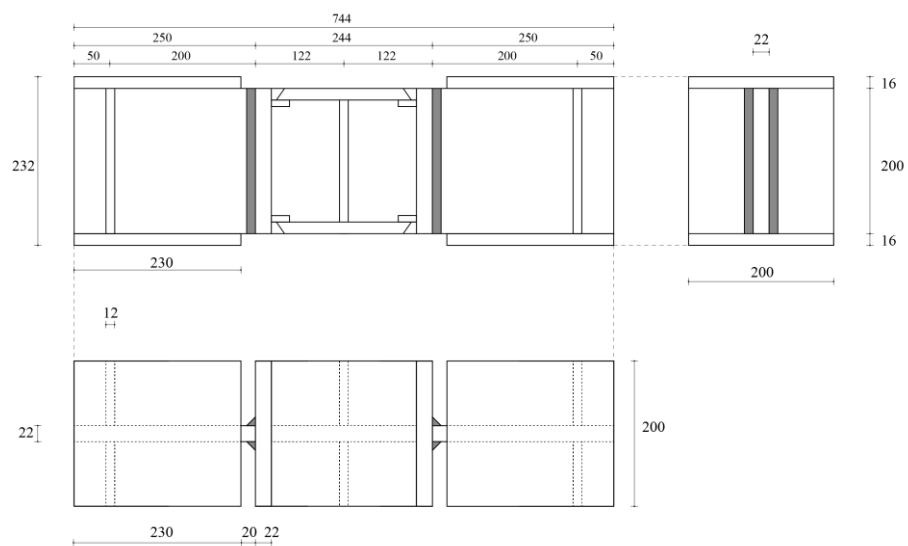


(a) 試験体 FMS-0.25

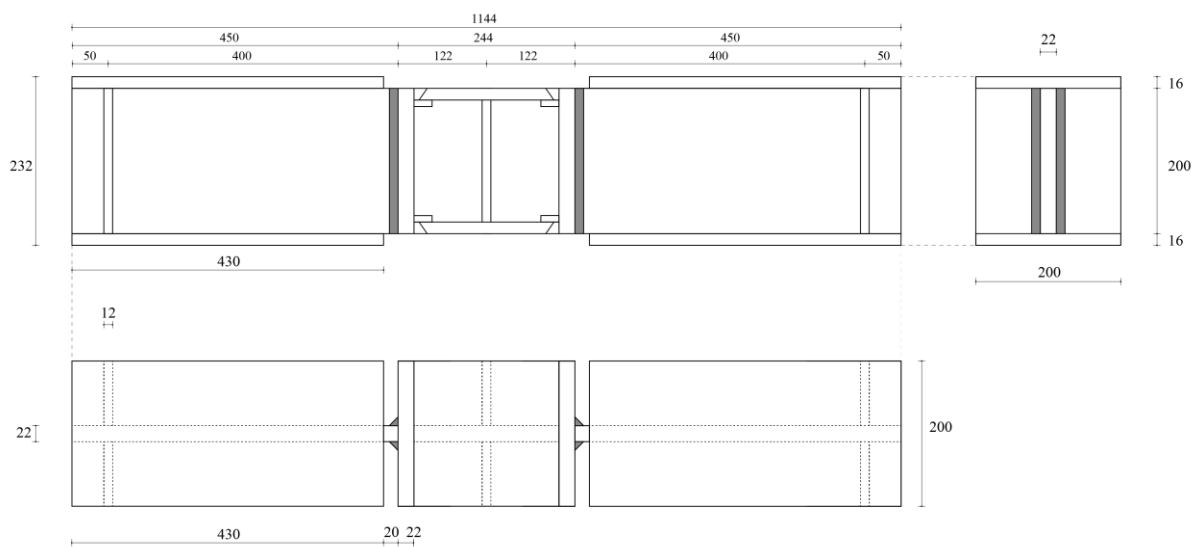


(b) 試験体 FMS-0.50

図 5.3.2 試験体全体図



(c) 試験体 FMS-1.00

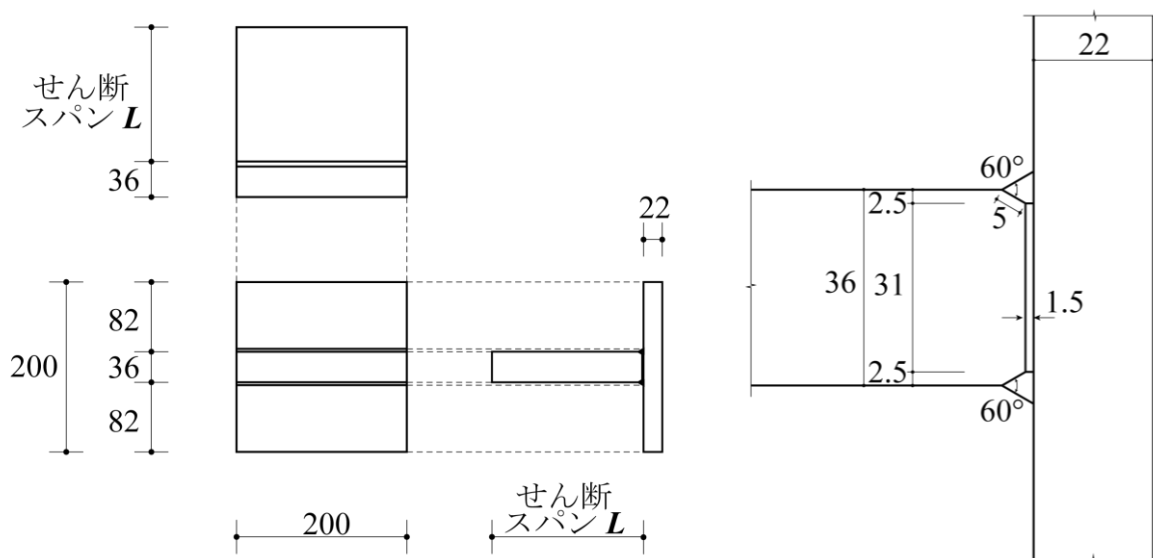


(d) 試験体 FMS-2.00

図 5.3.2 試験体全体図

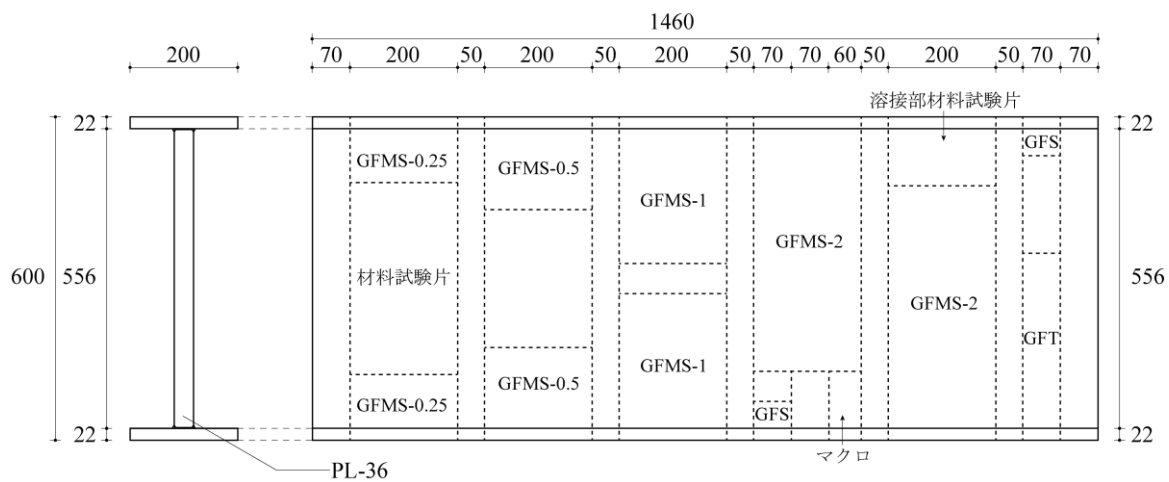
## (ii)試験体 GFMS

試験体形状を図 5.3.3 に示し、試験体全体図を図 5.3.4 に示す。厚さ 36mm、全長 1460mm の鋼板に図 5.3.3(b)に示す開先加工を施し、異形隅肉溶接によって H 形に溶接施工し、その後溶接長が 200mm となるように切断し製作した。設計のど厚は 4.3mm の異形隅肉とした。また、今実験では摩擦による応力の伝達を避け、耐力を正確に測るため、T 継手部分に隙間を 1.5mm 確保した。



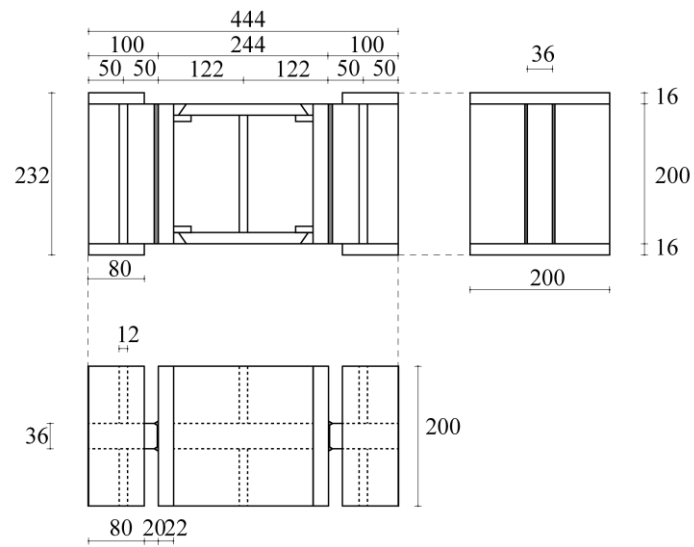
(a) 試験体詳細

### (b) T 継手部分詳細

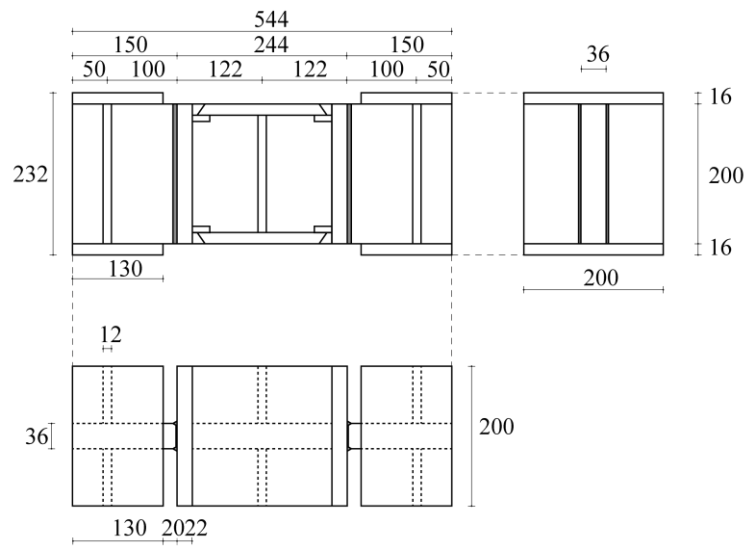


(c) 試験体採取位置

図 5.3.3 試験体 GFMS

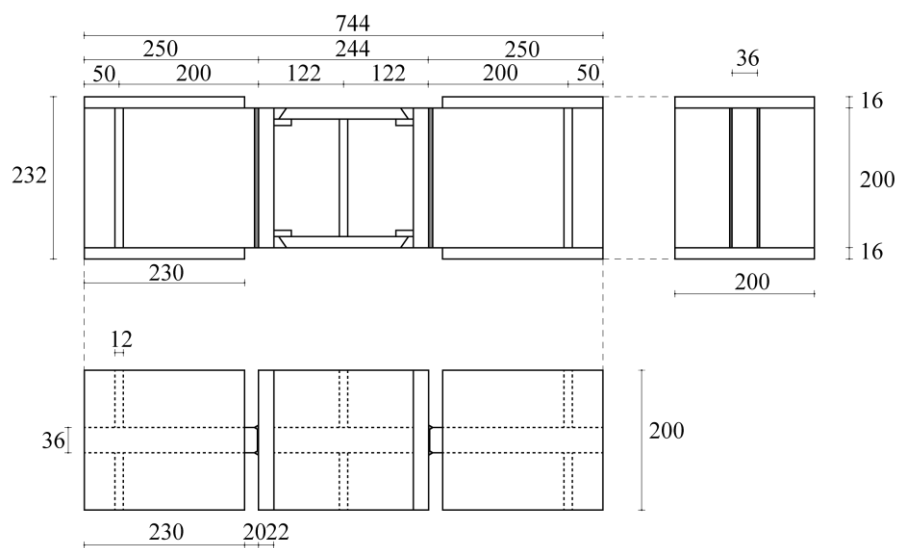


(a) 試験体 GFMS-0.25

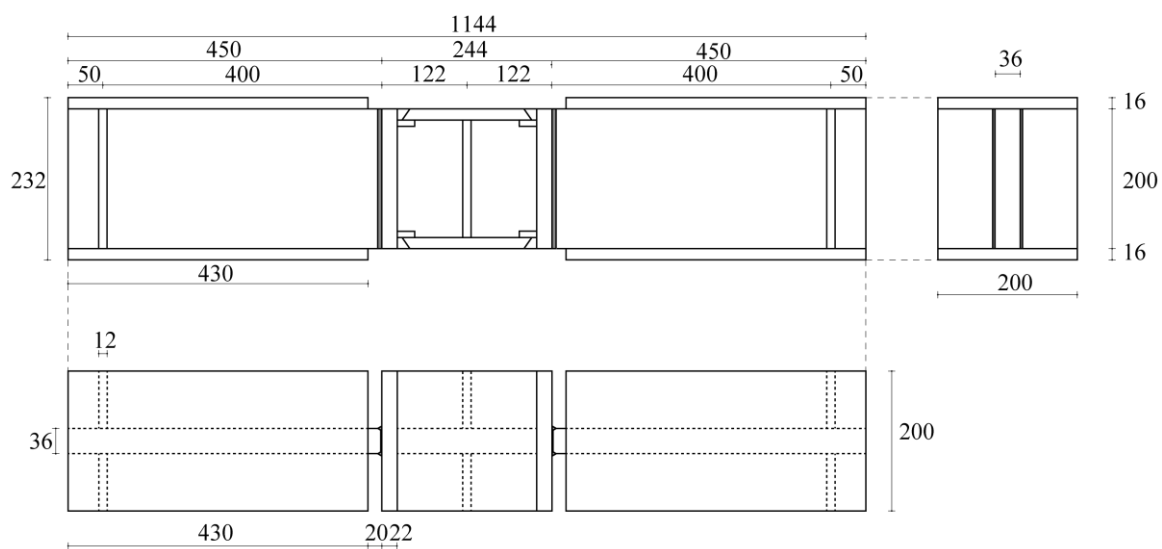


(b) 試験体 GFMS-0.50

図 5.3.4 試験体全体図



(c) 試験体 GFMS-1.00



(d) 試験体 GFMS-2.00

図 5.3.4 試験体全体図

【使用鋼材の機械的性質】

(i)試験体 FMS

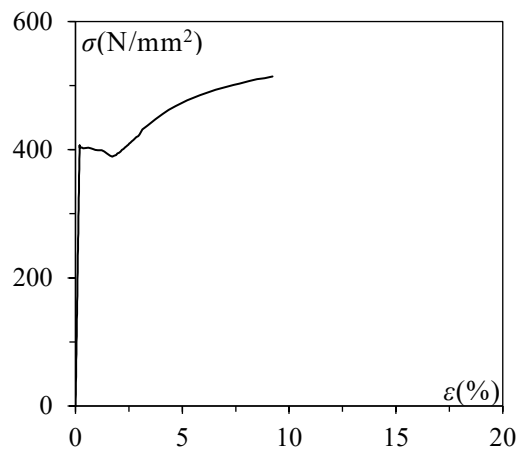
表 5.3.2 および表 5.3.3 に試験体に用いた材料の機械的性質を示す．降伏応力は降伏棚の有無に関わらず 0.2%offset 値を用いた．また，各試験片における応力-歪関係を図 5.3.5 に示す．

表 5.3.2 鋼材の機械的性質

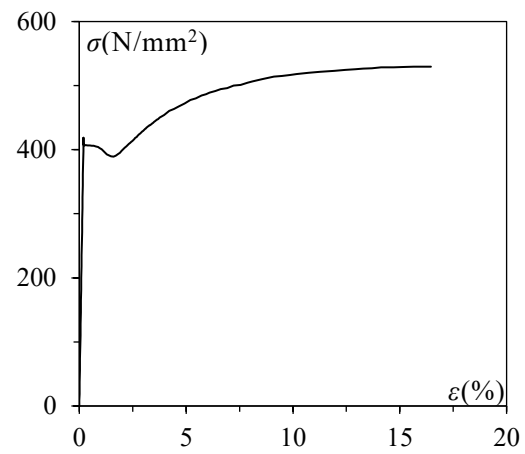
| 試験体片名称 | $\sigma_y$           | $\sigma_u$           | YR   | EL   |
|--------|----------------------|----------------------|------|------|
|        | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [%]  | [%]  |
| PL-1   | 400                  | 534                  | 74.8 | 46.7 |
| PL-2   | 400                  | 534                  | 74.9 | 47.5 |
| PL-3   | 408                  | 537                  | 75.9 | 46.1 |
| FW-1   | 483                  | 590                  | 81.9 | 25.8 |
| FW-2   | 500                  | 604                  | 82.7 | 25   |

表 5.3.3 鋼材の機械的性質 平均値

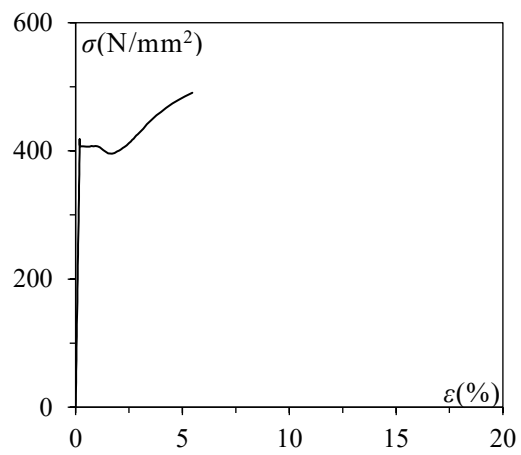
| 試験体名称 | $\sigma_y$           | $\sigma_u$           | YR   | EL   |
|-------|----------------------|----------------------|------|------|
|       | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [%]  | [%]  |
| PL    | 403                  | 535                  | 75.2 | 46.8 |
| FW    | 491                  | 597                  | 82.3 | 25.4 |



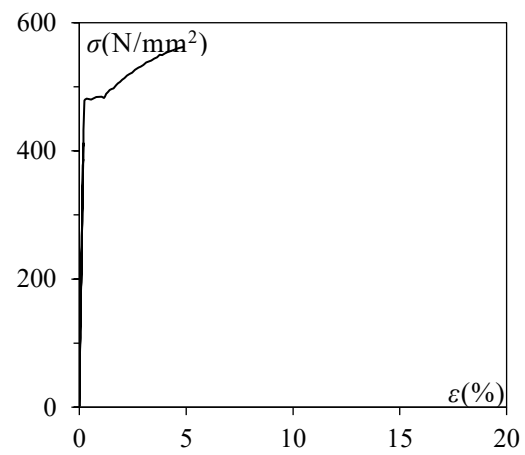
(a) PL-1



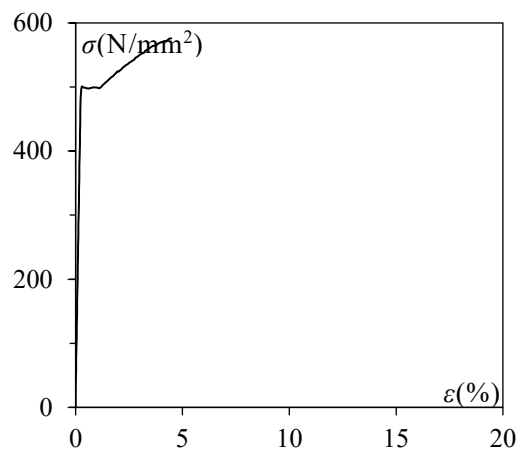
(b) PL-2



(c) PL-3



(d) FW-1



(e) FW-2

図 5.3.5 材料試験結果 応力-歪関係

(ii)試験体 GFMS

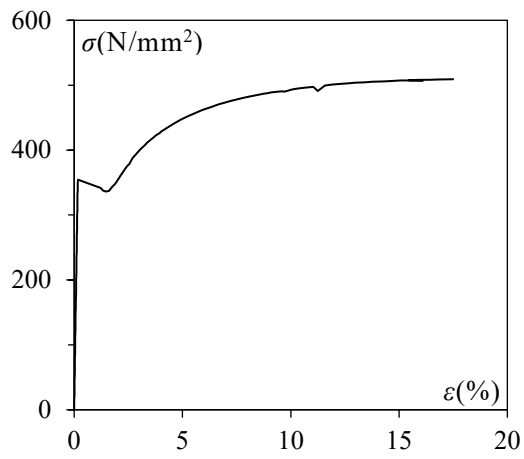
表 5.3.4 および表 5.3.5 に試験体に用いた材料の機械的性質を示す．降伏応力は降伏棚の有無に関わらず 0.2%offset 値を用いた．また，各試験片における応力-歪関係を図 5.3.6 に示す．

表 5.3.4 鋼材の機械的性質

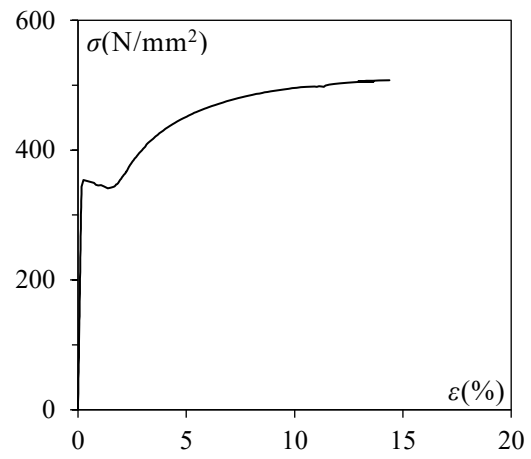
| 試験体片名称 | $\sigma_y$           | $\sigma_u$           | YR   | EL   |
|--------|----------------------|----------------------|------|------|
|        | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [%]  | [%]  |
| PL-1   | 343                  | 510                  | 67.2 | 51.1 |
| PL-2   | 348                  | 512                  | 68   | 50.5 |
| PL-3   | 344                  | 513                  | 67   | 50   |
| GW-1   | 628                  | 765                  | 82   | 23.5 |
| GW-2   | 596                  | 733                  | 81.4 | 24.1 |

表 5.3.5 鋼材の機械的性質 平均値

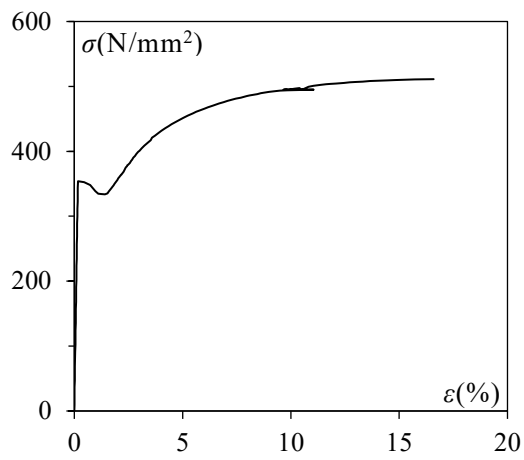
| 試験体名称 | $\sigma_y$           | $\sigma_u$           | YR   | EL   |
|-------|----------------------|----------------------|------|------|
|       | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [%]  | [%]  |
| PL    | 345                  | 512                  | 67.4 | 50.5 |
| GW    | 612                  | 733                  | 81.7 | 23.8 |



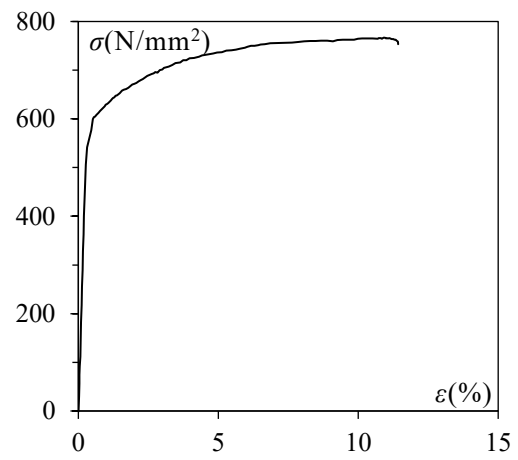
(a) PL-1



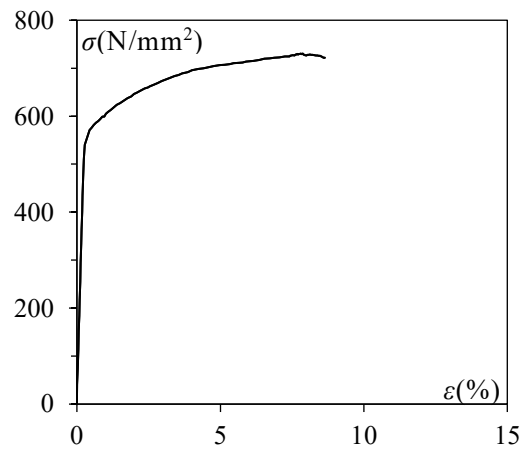
(b) PL-2



(c) PL-3



(d) GW-1



(e) GW-2

図 5.3.6 材料試験結果 応力-歪関係

## 【マクロ試験】

### (i)試験体 FMS

写真 5.3.1 に示すマクロ試験写真から、図 5.3.7 に示す溶接部寸法を測定し、各溶接継目の角度 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、および寸法 $S$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ を平均した結果を表 5.3.6 に示す。

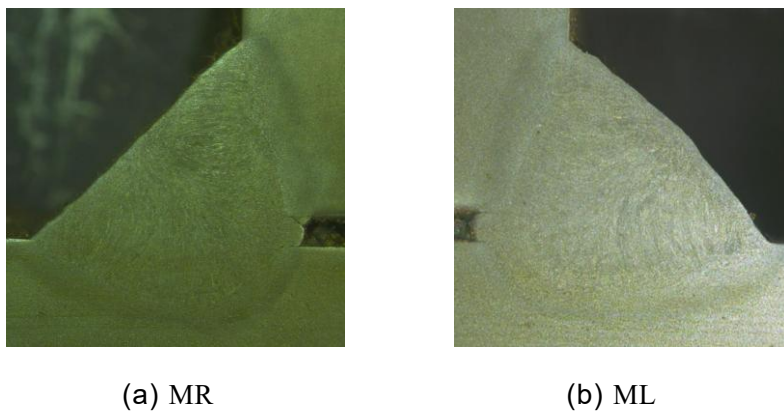


写真 5.3.1 マクロ組織観察結果

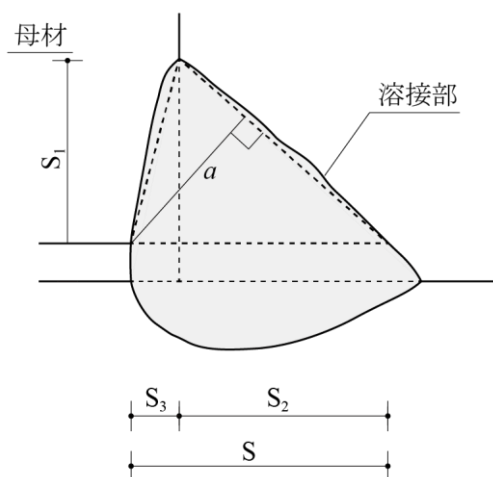


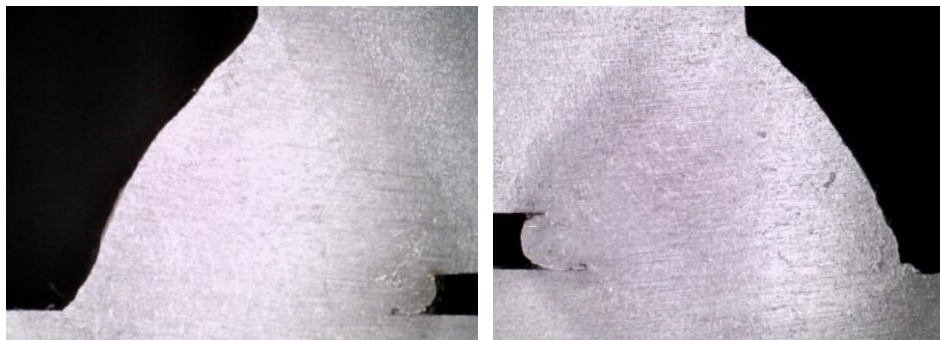
図 5.3.7 マクロ試験 各部寸法

表 5.3.6 マクロ試験 計測結果一覧

|       | 設計     | MR    | ML    | 平均    |
|-------|--------|-------|-------|-------|
|       | [mm]   | [mm]  | [mm]  | [mm]  |
| $S_1$ | 10mm   | 10.83 | 10.28 | 10.56 |
| $S_2$ | 10mm   | 11    | 10.89 | 10.95 |
| $S_3$ | 0mm    | 3.05  | 3.83  | 3.44  |
| $S$   | 10mm   | 14.05 | 14.72 | 14.39 |
| $a$   | 7.07mm | 9.87  | 10.11 | 9.99  |

(ii)試験体 GFMS

写真 5.3.2 に示すマクロ試験写真から、図 5.3.8 に示す溶接部寸法を測定し、各溶接継目の角度 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、および寸法 $S$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ を平均した結果を表 5.3.7 に示す。



(a) MR

(b) ML

写真 5.3.2 マクロ組織観察結果

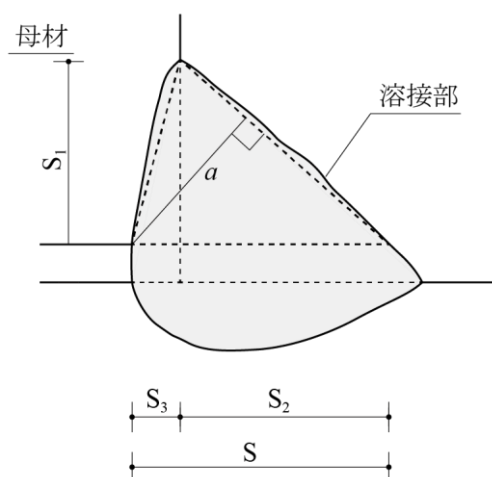


図 5.3.8 マクロ試験 各部寸法

表 5.3.7 マクロ試験 計測結果一覧

|       | 設計   | MR   | ML    | 平均    |
|-------|------|------|-------|-------|
|       | [mm] | [mm] | [mm]  | [mm]  |
| $S_1$ | 4.3  | 7.85 | 5.51  | 6.68  |
| $S_2$ | 2.5  | 4.98 | 4.18  | 4.58  |
| $S_3$ | 2.5  | 5.42 | 6.13  | 5.77  |
| $S$   | 5    | 10.4 | 10.31 | 10.35 |
| $a$   | 4.3  | 8.76 | 8.23  | 8.5   |

### 【実験方法】

裁荷には 200t 万能試験機を用いて単調荷重を与えた。試験体部に所定のせん断スパン比となるようにプレートを溶接し試験機に取り付けた。載荷方法を図 5.3.9 に示す。

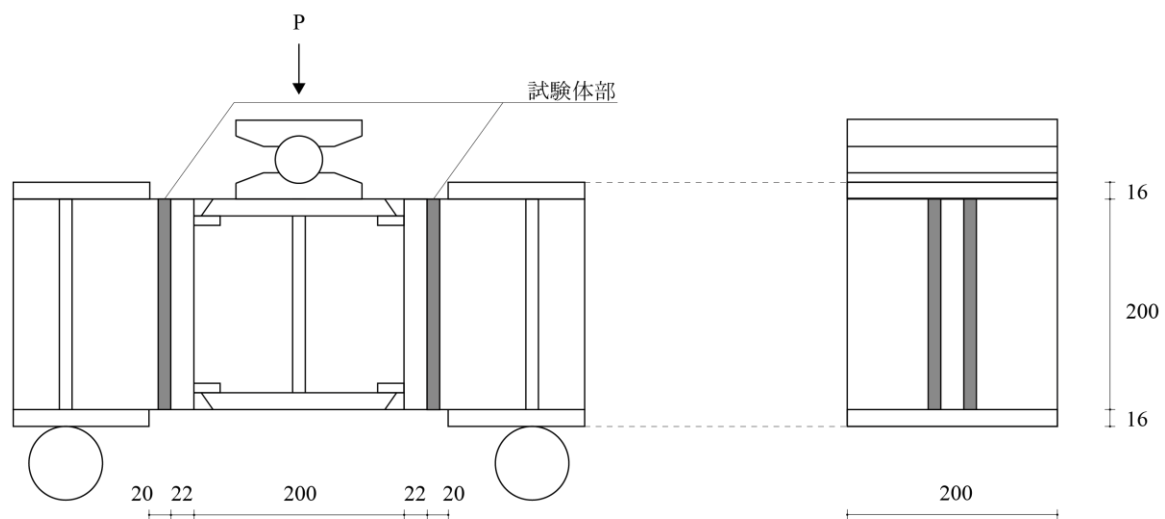


図 5.3.9 載荷方法

### 【測定方法】

本実験では、図 5.3.10 に示す位置に裏表に変位計を設置して変形を測定した。なお、変位計番号 D～は、括弧無しは東側、括弧有りは西側に設置したものである。

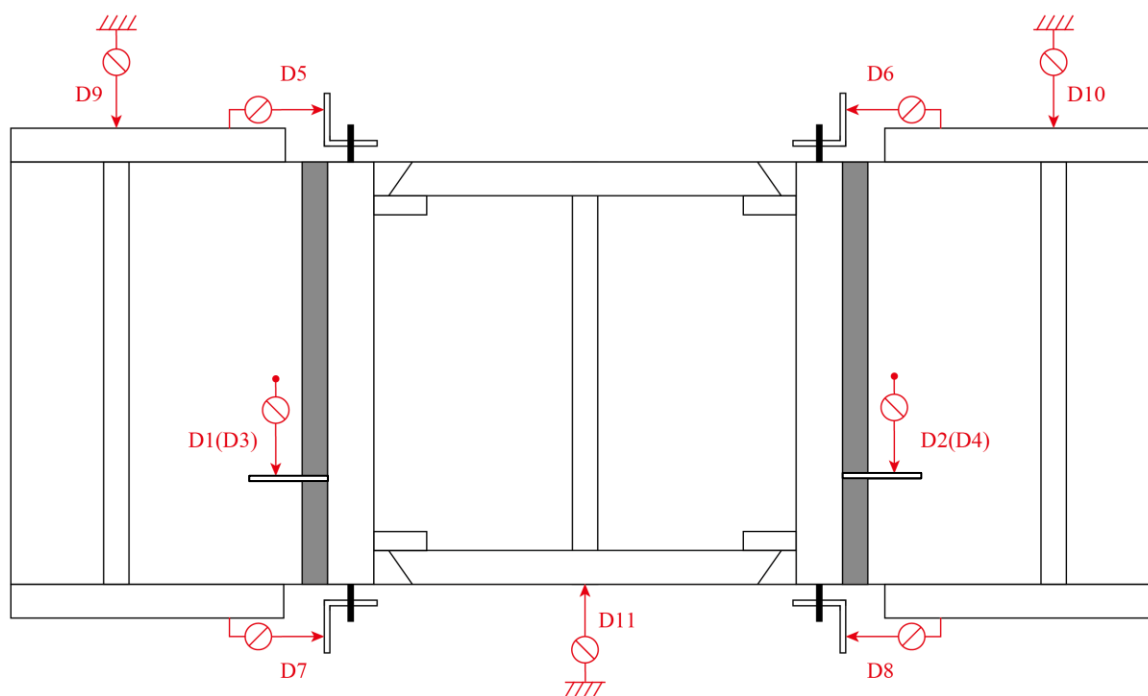


図 5.3.10 変位計測定位置

D1～4：隅肉溶接のせん断変形

D5～8：隅肉溶接の水平変形

D9, D10：荷重方向支持点の変位

D11：全体変形

全体変形  $\delta$  および溶接部の回転角  $\theta'$  を次のように求めた。

$$\delta = D11 - \frac{1}{2}(D9 + D10)$$

$$\theta' = \frac{\frac{1}{2}\{(D7 - D5) - (D8 - D6)\}}{200}$$

### 5.3.2 実験結果概要

表 5.3.8 に実験の最大耐力一覧を示す.

表 5.3.8 最大耐力一覧

|     | モデル      | $P_u$ |      | モデル       | $P_u$ |
|-----|----------|-------|------|-----------|-------|
|     |          | [kN]  |      |           | [kN]  |
| FMS | FMS-0.25 | 3322  | GFMS | GFMS-0.25 | 2877  |
|     | FMS-0.50 | 2456  |      | GFMS-0.50 | 2292  |
|     | FMS-1.00 | 1241  |      | GFMS-1.00 | 1314  |
|     | FMS-2.00 | 633   |      | GFMS-2.00 | 652   |

### 5.3.3 FEA 概要

本項では、5.2 節に示した崩壊荷重を準用し、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の最大耐力を評価するために、既報の実験結果<sup>14)・15)</sup>と試験体の隅肉形状および機械的性質をモデル化した FEA 結果を比較する。

過去の実験に供した試験体に基づき作成した FEA モデルを図 5.3.13 に示す。解析モデルは図 5.3.13 (a)および(b)に示すように試験体に治具を溶接した形状とし、母材および溶接部はいずれも 8 節点ソリッド要素(C3D8R)を用いて、FMS-0.50 を基準として FMS-0.50 の母材部分を超える部分は 2 節点ビーム要素(B31)を用いて作成した 1/4 モデルである。溶接部形状は表 5.3.6 および表 5.3.7 で示したマクロ試験結果に基づき、溶け込みを考慮した寸法(図 5.3.13 (c)および(d)参照)でモデル化した。FMS の FEA に入力した真応力-真ひずみ関係を図 5.3.11 に示し、GMS の FEA に入力した真応力-真ひずみ関係を図 5.3.12 に示す。入力した真応力-真ひずみ関係は引張試験から得られた公称応力 $\sigma'$  および公称ひずみ $\varepsilon'$  を以下の式を用いて、真応力 $\sigma$  および真ひずみ $\varepsilon$  に換算した後、多折線で近似した。

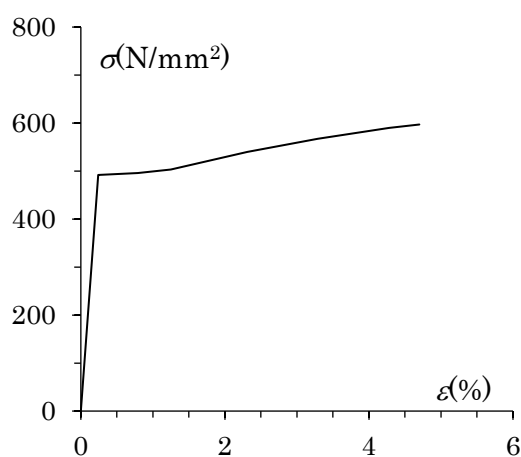
せん断スパン比は 0.25, 0.50, 1.00, 2.00 に設定した各 4 体の計 8 体である。

$$\sigma^t = \sigma^n(\varepsilon^n + 12) \quad (3.2.1)$$

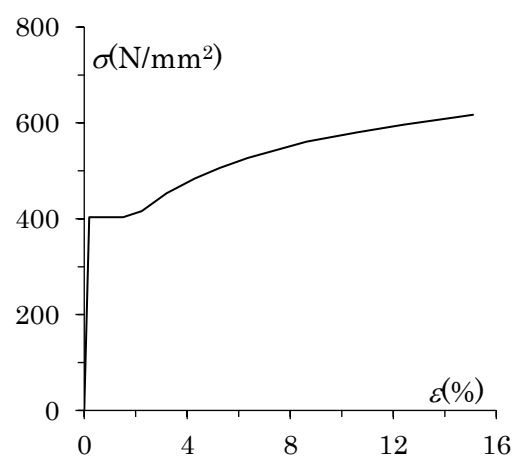
$$\varepsilon^t = \ln(\varepsilon^n + 1) \quad (3.2.2)$$

表 5.3.9 FEA モデル一覧

| モデル       | せん断スパン比<br>$L/d$ | 溶接長  | 実測のど厚 |
|-----------|------------------|------|-------|
|           |                  | $d$  | $a$   |
|           |                  | [mm] | [mm]  |
| FMS-0.25  | 0.25             | 200  | 10.0  |
| FMS-0.50  | 0.50             |      |       |
| FMS-1.00  | 1.00             |      |       |
| FMS-2.00  | 2.00             |      |       |
| GFMS-0.25 | 0.25             |      | 8.5   |
| GFMS-0.50 | 0.50             |      |       |
| GFMS-1.00 | 1.00             |      |       |
| GFMS-2.00 | 2.00             |      |       |



(a)溶接金属



(b)母材

図 5.3.11 真応力-真歪関係 (FMS)

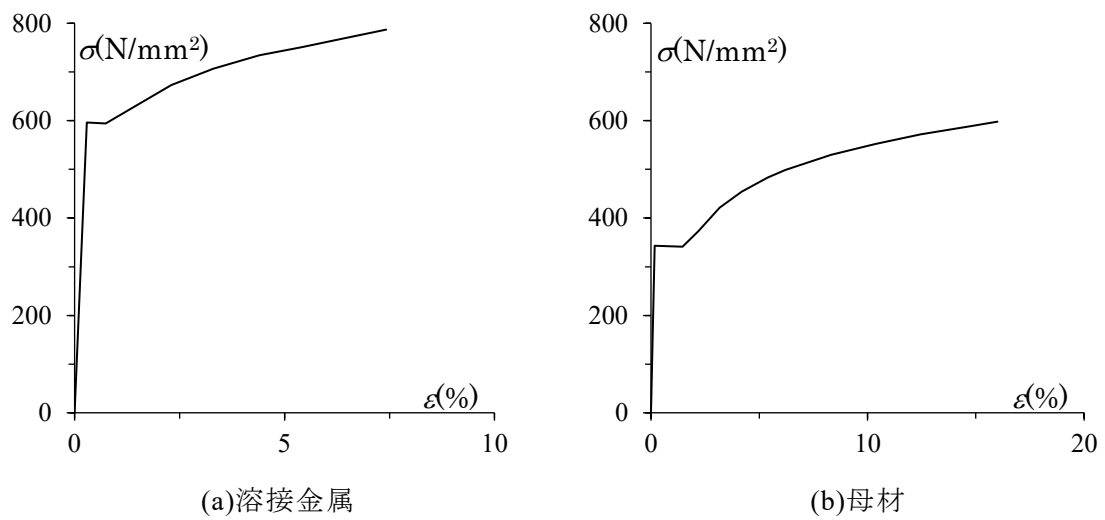
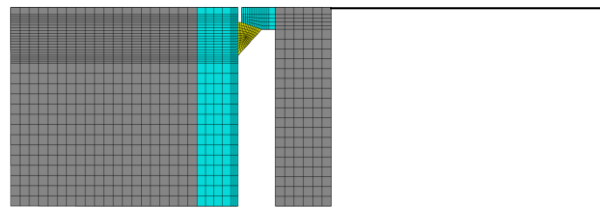
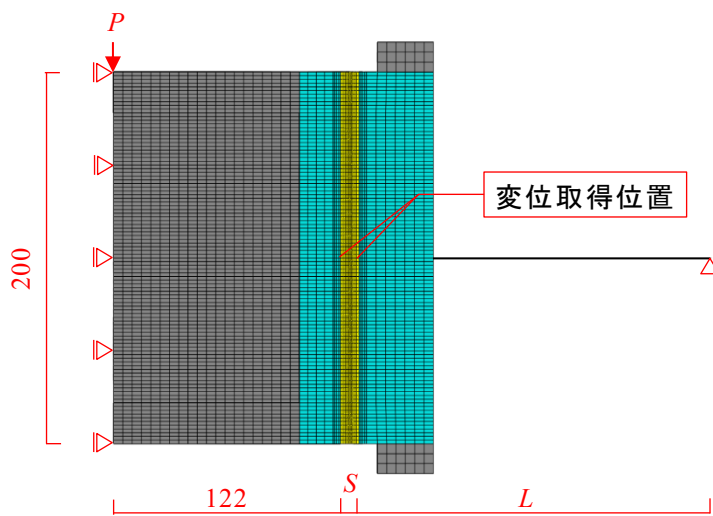


図 5.3.12 真応力-真歪関係 (GMS)



(a)FEA モデル平面図



(b) FEA モデル立面図

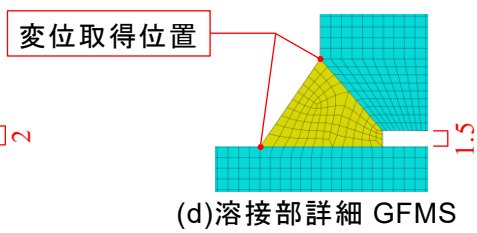
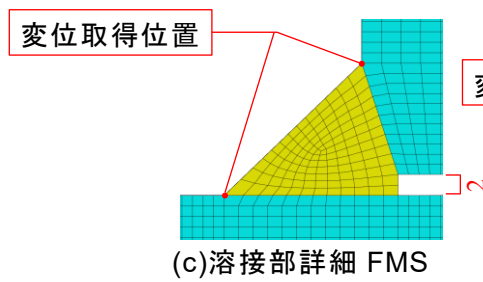


図 5.3.13 解析モデル図(mm)

本稿の FEA では, 破断現象を追跡できないため最大耐力を知ることはできない. そこで, 3.2 節と同様, 桑村らによる研究<sup>19)</sup>に基づき, 図 5.3.14(a)に示す 5 つの位置で(b)および(c)に示す 4 個の要素すなわち 20 個の要素について, 応力三軸度-相当塑性歪関係と延性き裂発生限界曲線の交点となるステップを取得し, 最も早いステップの荷重を FEA の最大耐力  $FEAP_u$  と定義した. 図 5.3.14(e)に FMS の FEA より得られた荷重変形関係の例を示すとともに,  $FEAP_u$  を●印で示す. せん断スパン比が大きくなるにつれ, 最大耐力  $FEAP_u$  に到達する時の変形量は小さくなっている. この傾向は斜方隅肉溶接において, 斜方角度  $\theta$  の減少に伴い, 最大耐力  $FEAP_u$  に到達する時の変形量が小さくなる傾向と対応する.

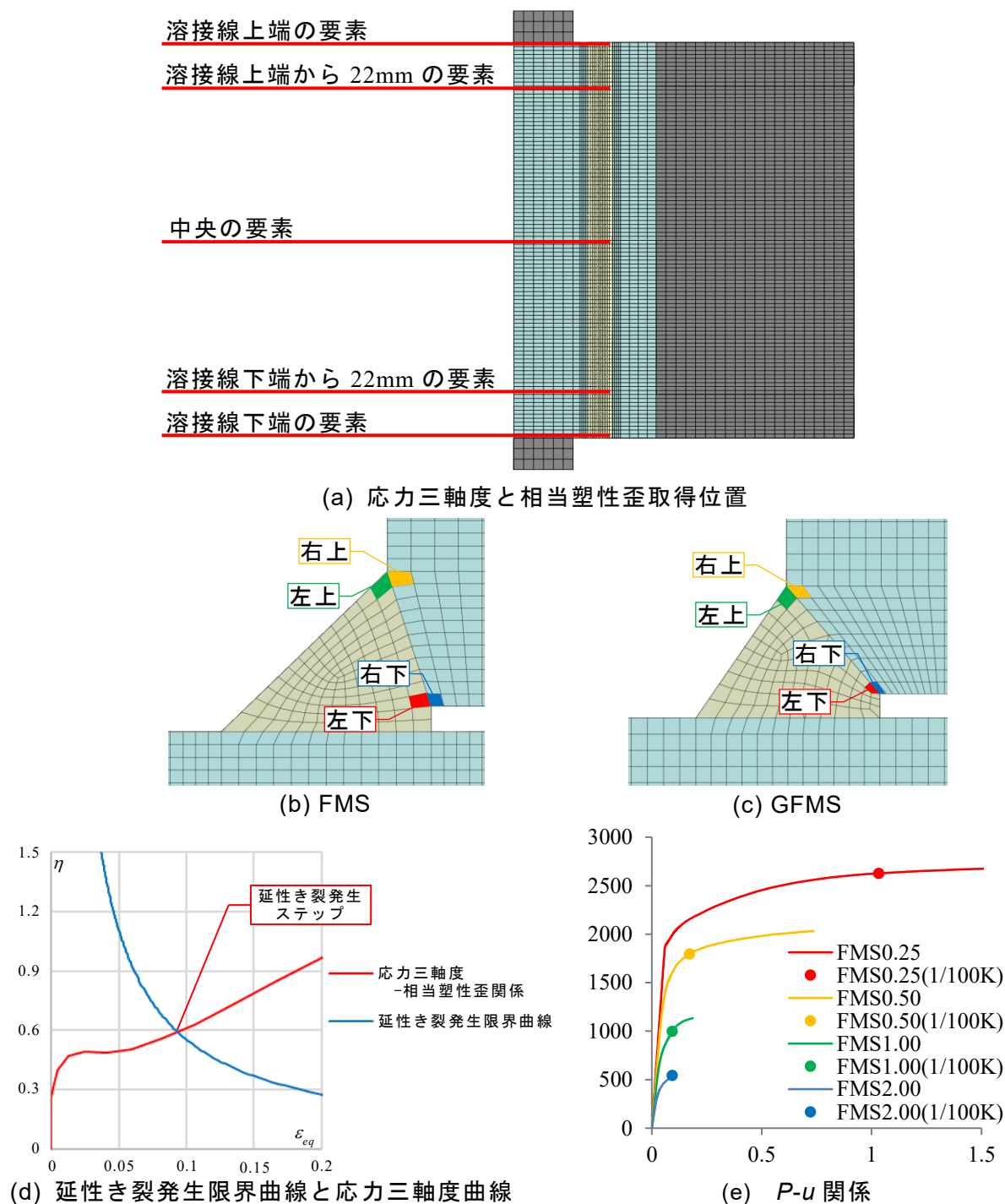
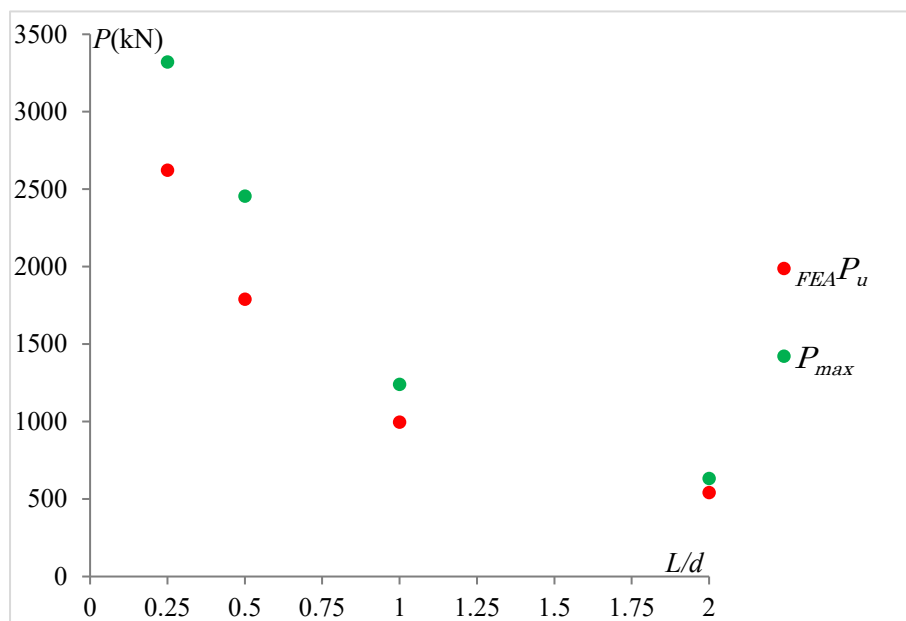


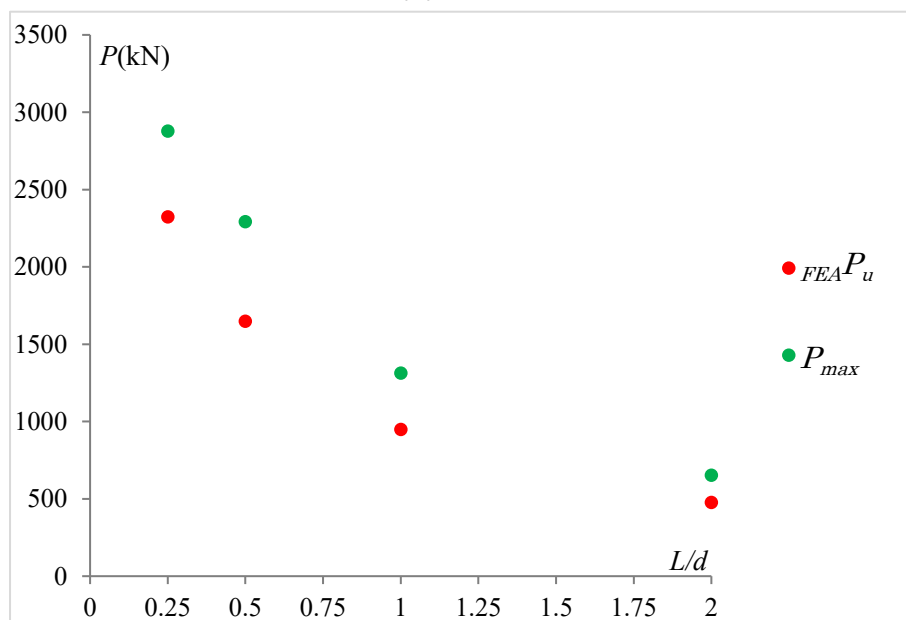
図 5.3.14 延性き裂発生ステップの取得方法

### 5.3.4 実験と FEA の比較

過去に行った実験の最大荷重  $P_{max}$  と FEA の最大耐力  $FEAP_u$  の比較を図 5.3.15 に示す. FMS については,  $P_{max}$  と  $FEAP_u$  の比  $P_{max}/FEAP_u = 1.17 \sim 1.27$  (平均値 1.26) であり, GFMS については,  $P_{max}$  と  $FEAP_u$  の比  $P_{max}/FEAP_u = 1.24 \sim 1.39$  (平均値 1.34) である. せん断スパン比が小さくなるにつれて, FEA は実験結果を過小評価する傾向がある. これは FEA では延性き裂の発生タイミングで耐力を取得しているのに対し, 実験の場合は溶接線の一部にき裂が発生した後も塑性硬化が発生し, 耐力が上昇しているためだと考えられる. 特にせん断スパン比が小さい場合は溶接線全体が大きく塑性変形するため, 誤差が大きくなっていると考えられる.



(a)FMS



(b)GFMS

図 5.3.15  $P_{max}$  と  $FEAP_u$  の比較

## 5.4 最大耐力の推定

### 5.4.1 推定方法

5.2.1 項で得られた曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の崩壊荷重は、2.3.3 項で極限解析により得られた斜方隅肉溶接継目の崩壊荷重の結果を用いて算出した。本項で最大耐力を求めるにあたっては、4.2.2 項および 4.3.2 項で極限解析より得られた斜方隅肉溶接継目の最大耐力の結果を用いて、同様の手順で  $q_u$  を取得し算出する。

#### 【最大耐力】

各要素の  $q_{ui}$  の溶接線方向成分と溶接線直交方向成分の各合計により、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目のせん断耐力  $Q$ 、引張耐力  $T$  および曲げ耐力  $M$  は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{i=1}^n q_{ui} \sin \theta_i \\ T &= \sum_{i=1}^n q_{ui} \cos \theta_i \\ M &= \sum_{i=1}^n |q_{ui} \cos \theta_i \cdot y_i| \end{aligned} \tag{5.4.1}$$

したがって、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の最大耐力  $P_u$  とその作用方向  $\theta$  およびせん断スパン  $L$  は以下の式で算出できる。

$$\begin{aligned} P_u &= \sqrt{Q^2 + T^2} \\ \theta &= \tan^{-1} \left( \frac{T}{Q} \right) \\ L &= \frac{M}{P_u} \end{aligned} \tag{5.4.2}$$

よって、せん断スパン比  $L/d$  は以下によって表される。

$$L/d = \frac{M}{P_u d} \tag{5.4.3}$$

## 5.4.2 推定結果

### 【AISC との比較】

5.4.1 項に示した耐力式に基づき，等脚隅肉溶接の強度比 $\rho_u=1.0$ の時の $P_u$ を算定した．  
図 5.4.1 に赤線で $P_u$ を示し，青線で AISC に記載されている以下の式より得られる耐力を無次元化して示す．

$$P_{AISC} = CC_1 Sd \quad (5.4.4)$$

$P_{AISC}$  と  $P_u$  の比は  $P_{AISC} / P_u = 0.95 \sim 1.02$  (平均値 1.00) であり，両者の耐力式は同様の傾向を示している．

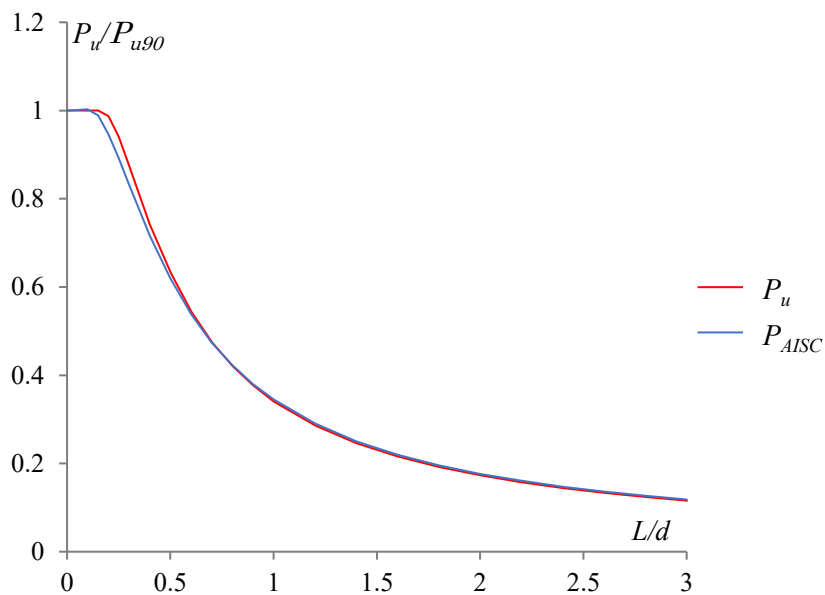
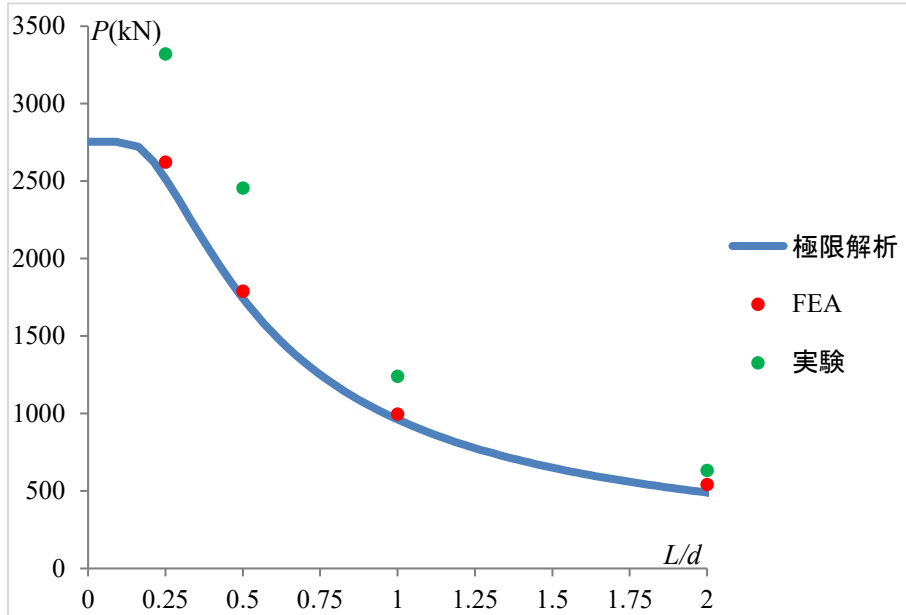


図 5.4.1  $P_u$  と  $P_{AISC}$  の比較

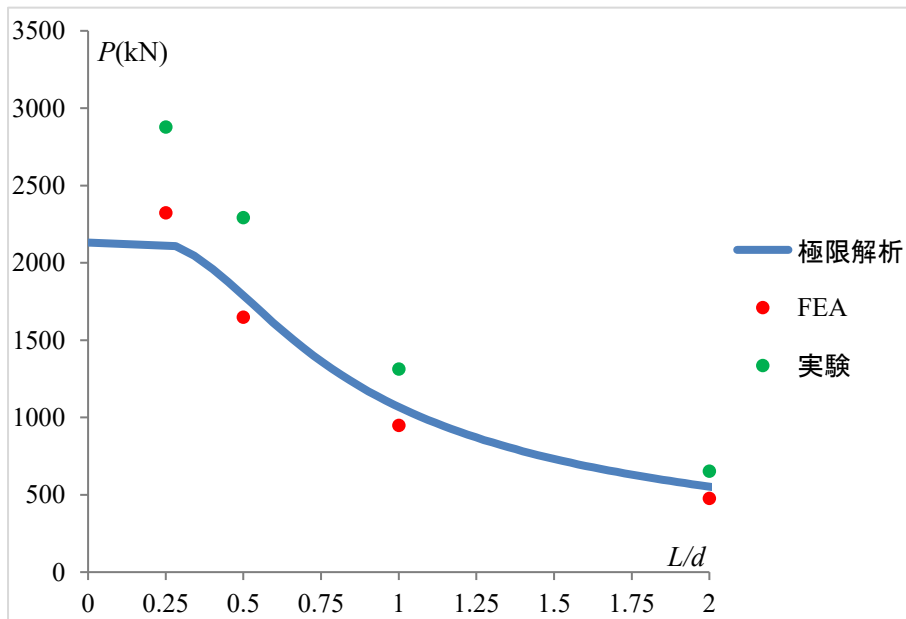
### 【実験との比較】

5.4.1 項に示した耐力式に基づき  $P_u$  を算定した．図 5.4.2 に実線で  $P_u$  を示す．

FMS シリーズについては， $P_{max}$  と  $P_u$  の比は  $P_{max} / P_u = 1.29 \sim 1.39$  (平均値 1.33) であり，GFMS シリーズについては， $P_{max}$  と  $P_u$  の比  $P_{max} / P_u = 1.18 \sim 1.35$  (平均値 1.26) である．FEA との比較と同様，極限解析は実験を過小評価する傾向があるが，原因は 5.3.4 項で述べた内容と同様であると考えられる．



(a)FMS



(b)GFMS

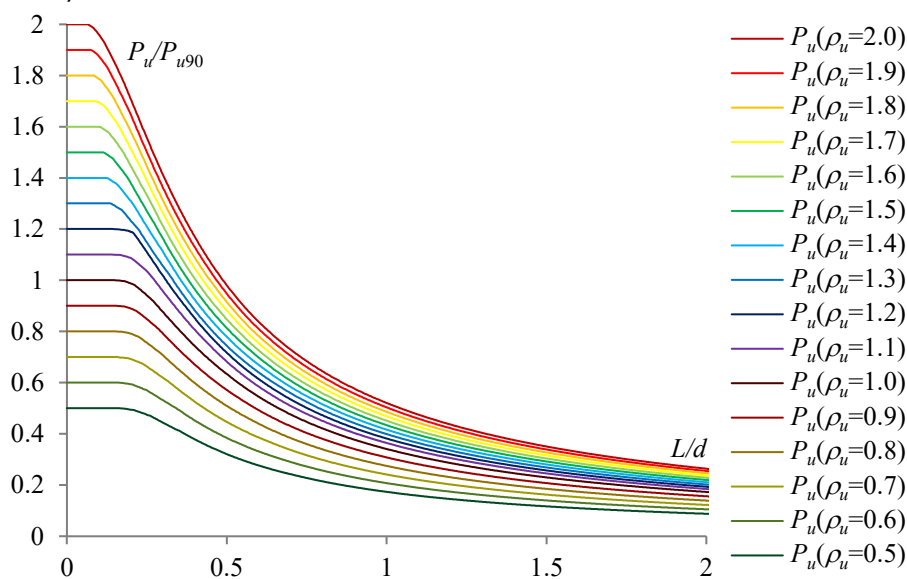
図 5.4.2  $P_u$  と  $P_{max}$  および  $FEA P_u$  の比較

## 5.5 耐力評価式

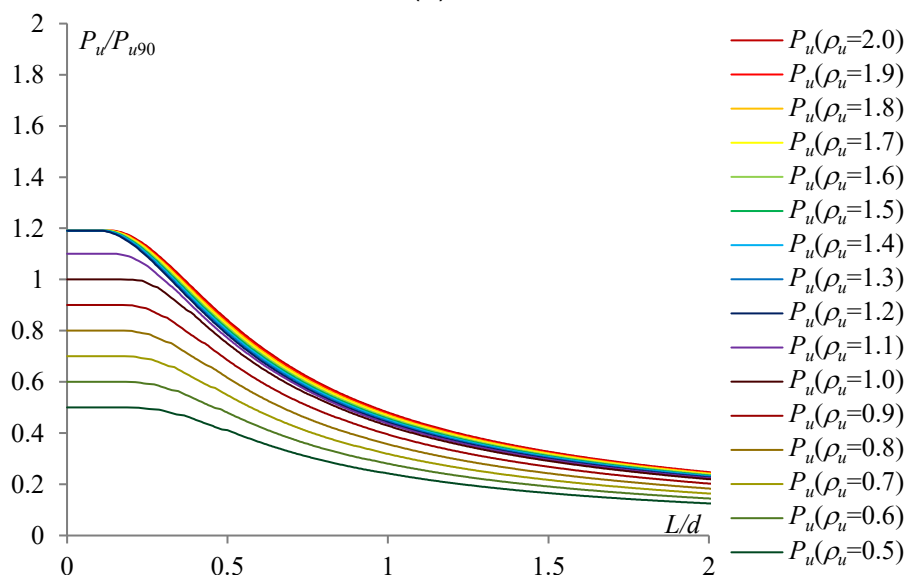
5.4 節では過小評価する傾向はあるが耐力式が最大耐力を推定できることを示した．極限解析により最大荷重を求める場合，数値計算を行う必要がある．そこで，本節では極限解析により得られる崩壊荷重を陽な表現で表すため，近似式を誘導し溶接継目の最大耐力の耐力評価式を提示する．なお，本節で誘導する近似式は，溶込みを 0 とし，強度比の影響を考慮したものである．

### 5.5.1 極限解析結果

各溶接継目形状について，母材の強度を  $\sigma_{bu} = 490(\text{N/mm}^2)$  および  $\sigma_{by} = 325(\text{N/mm}^2)$  とし，強度比  $\rho_u = 0.5 \sim 2.0$  となるように溶接金属の強度を  $\sigma_{wu} = 245(\text{N/mm}^2)$  および  $\sigma_{wy} = 162.5(\text{N/mm}^2)$  から  $\sigma_{wu} = 980(\text{N/mm}^2)$  および  $\sigma_{wy} = 650(\text{N/mm}^2)$  までの範囲で極限解析を行った．その結果を  $\rho_u = 1.0$  の側面溶接の耐力で無次元化して図 5.5.1 に示す．



(a)FMS



(b)GFMS

図 5.5.1 極限解析結果

## 5.5.2 耐力評価式

### 【FMS】

せん断スパン比が小さい範囲ではすべての要素の応力の方向が溶接線方向( $\theta_i=90^\circ$ )となるせん断変形となり、溶接線の耐力は一意に定まる。極限解析より得られた崩壊機構が切り替わるせん断スパン比を図 5.5.2 に赤丸で示す。切り替わりのせん断スパン比は強度比  $\rho_u$  を変数として近似すると以下の式で表される。

$0.5 \leq \rho_u \leq 1.2$  の場合

$$L/d_1 = -0.028\rho_u + 0.179 \quad (5.5.1)$$

$1.2 \leq \rho_u \leq 2.0$  の場合

$$L/d_2 = -0.102\rho_u + 0.267 \quad (5.5.2)$$

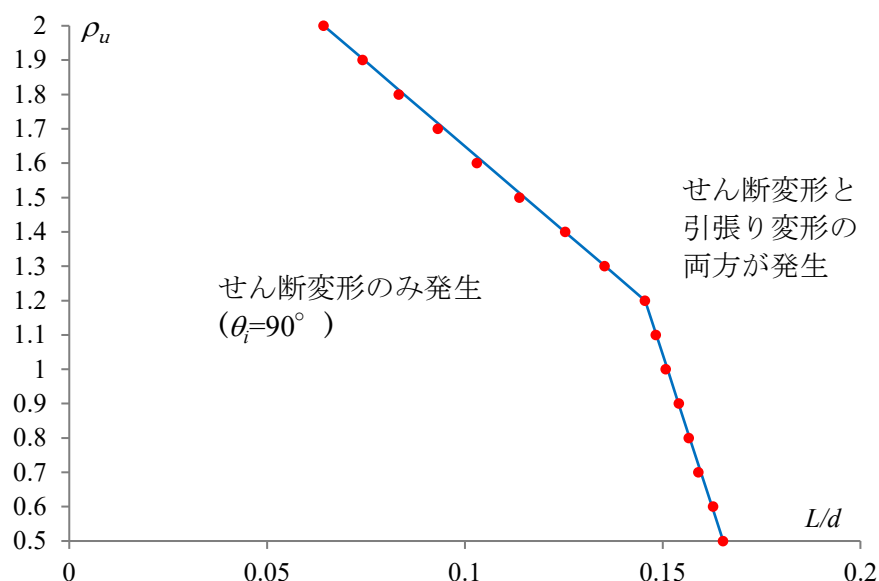


図 5.5.2 崩壊機構の切り替わり

せん断変形のみの場合には以下の式で極限解析結果を表すことができる。

$${}_cP_u/P_{u90} = \rho_u \quad (5.5.3)$$

せん断変形と引張り変形の両方が発生する場合は解析結果を近似することにより、耐力評価式を導出する。崩壊機構の切り替わりのせん断スパン比からせん断スパン比 0.5 までを直線的に近似し、それ以降を以下の累乗関数で近似する。

$${}_cP_u/P_{u90} = a \cdot (L/d)^b \quad (5.5.4)$$

ここで、極限解析結果のせん断スパン比 0.5～2.0 の範囲に対して最小二乗法を用いて近似式を得た。図 5.5.3 に赤丸で示す係数  $a$  が得られた。得られた値を  $\rho_u$  を変数として近似すると以下の式で表される。

$0.5 \leq \rho_u \leq 1.0$  の場合

$$a_1 = 0.332\rho_u + 0.006 \quad (5.5.5)$$

$1.0 \leq \rho_u \leq 2.0$  の場合

$$a_2 = 0.179\rho_u + 0.159 \quad (5.5.6)$$

近似結果を図 5.5.3 に青線で示している。

指数  $b$  についても最小二乗法から得られた値を図 5.5.4 に示す．こちらは平均値を取り，以下の値が得られた．

$$b = -0.956 \quad (5.5.7)$$

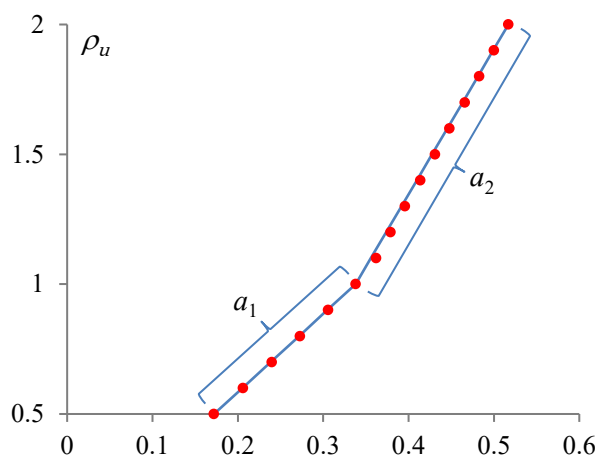


図 5.5.3 強度比毎の係数  $a$

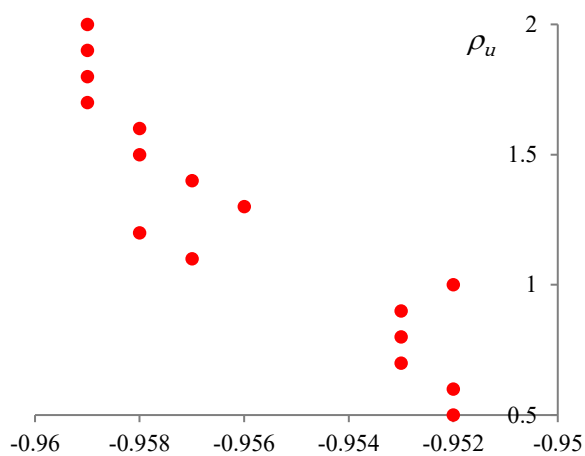


図 5.5.4 強度比毎の指数  $b$

式(5.5.1)または式(5.5.2)，および式(5.5.3)より，各強度比において崩壊機構の切り替わりのせん断スパン比での耐力が得られる．また，式(5.5.4)から式(5.5.7)を用いて，せん断スパン比 0.5 の時の耐力が得られる．この 2 点を直線で結ぶと図 5.5.5 のように近似できる．

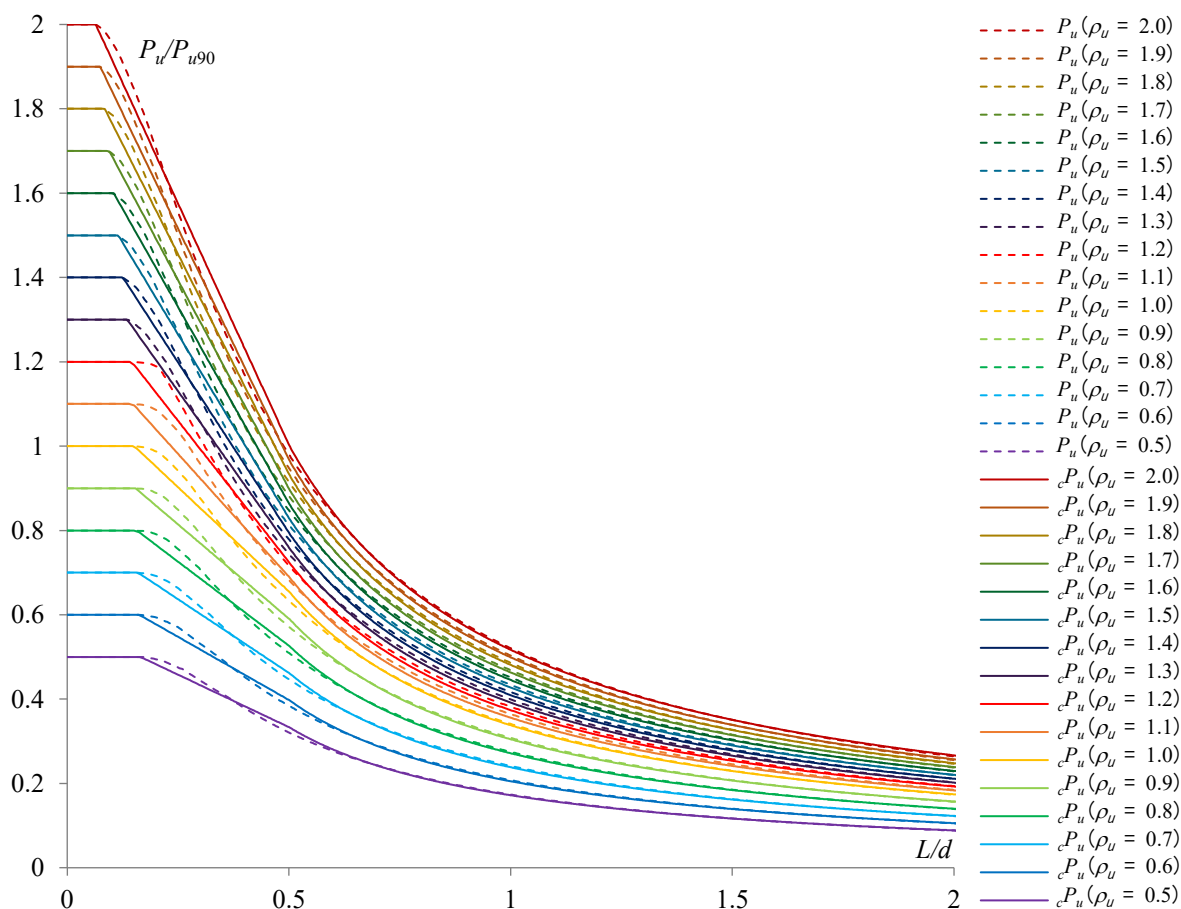


図 5.5.5  $cP_u$  と精算値の比較

### 【GFMS】

せん断スパン比が小さい範囲ではすべての要素の応力の方向が溶接線方向( $\theta_i=90^\circ$ )となるせん断変形となり，斜方隅肉溶接における側面溶接に一致する．極限解析より得られた崩壊機構が切り替わるせん断スパン比を図 5.5.2 に赤丸で示す．切り替わりのせん断スパン比は強度比 $\rho_u$ を変数として近似すると以下の式で表される．

$0.5 \leq \rho_u \leq 1.0$  の場合

$$L/d_1 = -0.0652\rho_u + 0.256 \quad (5.5.8)$$

$1.0 \leq \rho_u \leq 1.2$  の場合

$$L/d_2 = -0.432\rho_u + 0.623 \quad (5.5.9)$$

$1.2 \leq \rho_u \leq 2.0$  の場合

$$L/d_3 = 0.0446\rho_u + 0.051 \quad (5.5.10)$$

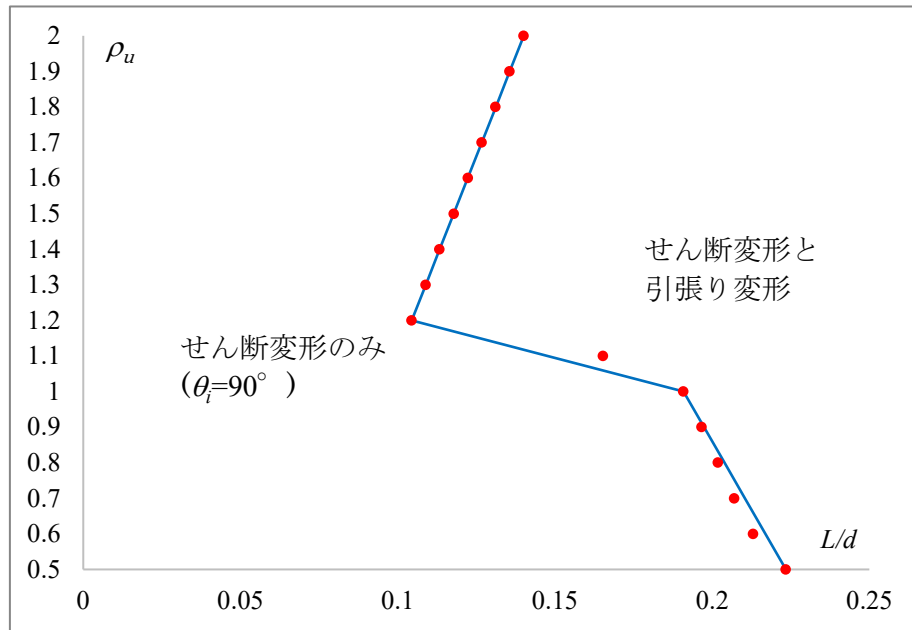


図 5.5.6 崩壊機構の切り替わり

せん断変形のみの場合には以下の式で極限解析結果を表すことができる．

$0.5 \leq \rho_u \leq 1.1$  の場合

$${}_cP_u/P_{u90} = \rho_u \quad (5.5.11)$$

$1.2 \leq \rho_u \leq 2.0$  の場合

$${}_cP_u/P_{u90} = 1.19 \quad (5.5.12)$$

せん断変形と引張り変形の両方が発生する場合は解析結果を近似することにより，耐力評価式を導出する．崩壊機構の切り替わりのせん断スパン比からせん断スパン比 0.7 までを直線的に近似し，それ以降を以下の累乗関数で近似する．

$${}_cP_u/P_{u90} = a \cdot (L/d)^b \quad (5.5.13)$$

ここで，極限解析結果のせん断スパン比 0.7～2.0 の範囲に対して最小二乗法を用いて近似式を得た．より図 5.5.7 に赤丸で示す係数  $a$  が得られた．得られた値を $\rho_u$ を変数として近似すると以下の式で表される．

$0.5 \leq \rho_u \leq 1.0$  の場合

$$a_1 = 0.374 + 0.053 \quad (5.5.14)$$

$1.0 \leq \rho_u \leq 2.0$  の場合

$$a_2 = 0.052\rho_u + 0.375 \quad (5.5.15)$$

近似結果を図 5.5.7 に青線で示している.

指数  $b$  についても最小二乗法から得られた値を図 5.5.8 に示す. こちらは平均値を取り, 以下の値が得られた.

$$b = -0.941 \quad (5.5.16)$$

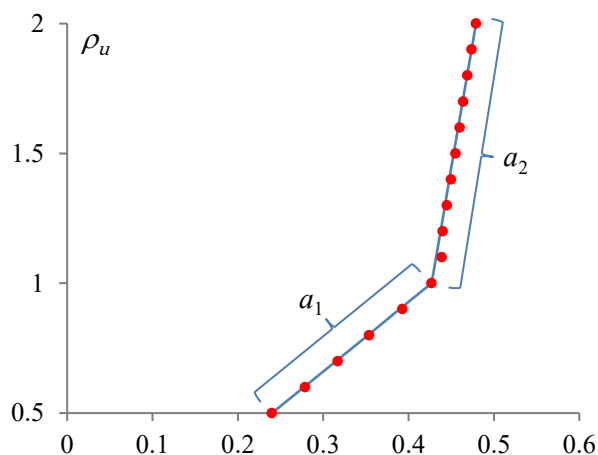


図 5.5.7 強度比毎の係数  $a$

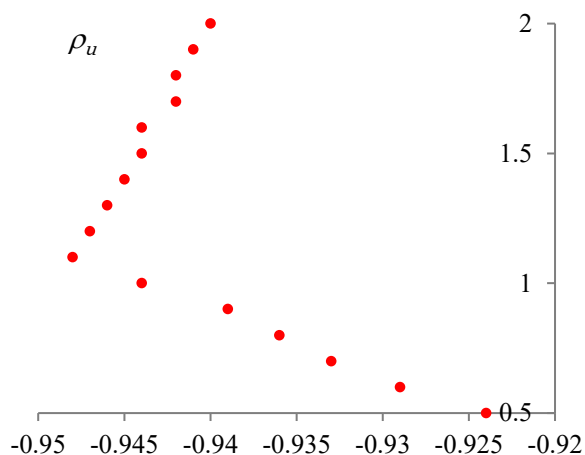


図 5.5.8 強度比毎の指数  $b$

式(5.5.8)から式(5.5.10), および式(5.5.11), 式(5.5.12)より, 各強度比において崩壊機構の切り替わりのせん断スパン比での耐力が得られる. また, 式(5.5.13)から式(5.5.16)を用いて, せん断スパン比 0.7 の時の耐力が得られる. この 2 点を直線で結ぶと図 5.5.9 のように近似できる.

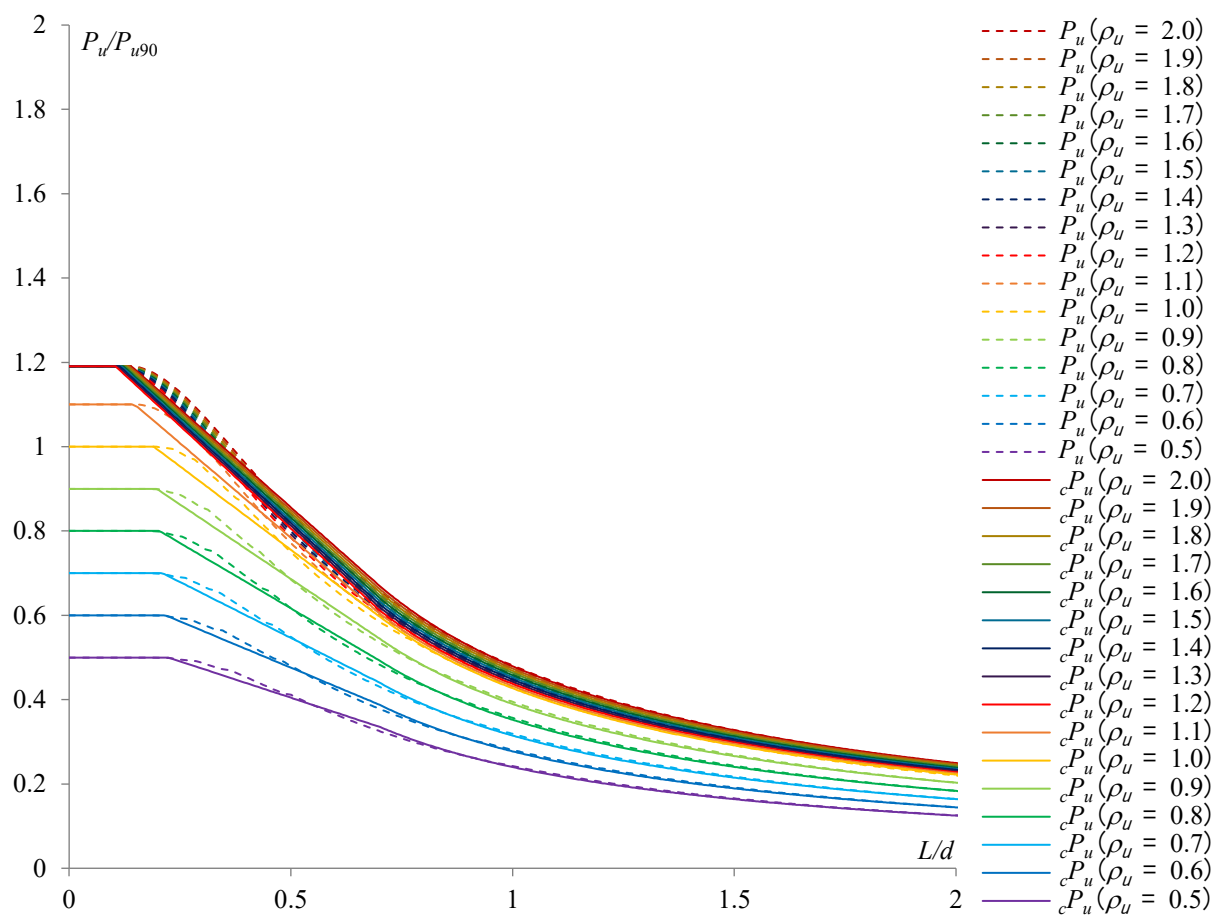


図 5.5.9  $cP_u$  と精算値の比較

図 5.5.5 および図 5.5.9 に示す耐力は $\rho_u=1.0$  の側面溶接の耐力で無次元化しており，実線で  $cP_u$ ，破線で精算値を示している． $cP_u$  と精算値の誤差は最大で 5%程度であり，十分な精度で近似できている．

## 5.6 まとめ

本章では、2章から4章に示した斜方隅肉溶接継目の崩壊荷重および最大耐力を用いて、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の耐力評価を行った。さらに近似式を誘導し溶接継目の最大耐力の耐力評価式を提示した。

- 1) 曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の溶接線を分割し、分割された各要素に斜方隅肉溶接継目の崩壊荷重を適用し、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の崩壊荷重を推定した。
- 2) 推定された崩壊荷重は完全弾塑性の FEA から得られる耐力と良い対応を示し、推定した崩壊荷重は耐力評価法として有効であることを示した。
- 3) 実験を再現した FEA を行い、斜方隅肉溶接継目の場合と同様、延性き裂発生ステップの耐力を取得することで既報の実験の最大耐力の評価を行った。FEA は実験を過小評価する傾向があったが、実験の場合に発生する塑性硬化が原因と考えられる。
- 4) 曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の崩壊荷重を求める際に使用した斜方隅肉溶接継目の崩壊荷重を最大耐力に置き替えることで、曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の最大耐力の評価を行った。AISC に記載されている耐力式とは同様の傾向を示した。また、FEA と同様、実験を過小評価する傾向があるが、FEA とは良い対応を示した。
- 5) 極限解析より得られた最大耐力を近似することで、曲げとせん断を受ける溶接継目の最大耐力の耐力評価式を提示した。耐力評価式は精算解に対して、良い近似を与えた。

## 第6章 結論

本研究では、母材と溶接金属の強度比を考慮した隅肉溶接継目が様々な荷重を受けるときの最大耐力の耐力評価式を得ることを目的とした。まず、母材と溶接金属の強度が異なる隅肉溶接継目が斜方から荷重を受ける場合の崩壊機構を仮定し、極限解析によって崩壊荷重の理論解を導出した。そして、有限要素数値解析を行い、得られた塑性耐力との比較により、理論解の妥当性を検証した。さらに崩壊荷重を準用し、最大耐力の理論解を導出し、FEA および実験と比較、検証を行い、最終的に最大耐力の耐力評価式を提案した。

次に曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目について、溶接線を分割した各溶接部に対し、仮定した変形状態から斜方隅肉溶接継目の耐力を適用する方法を提案し、崩壊荷重を導出した。そして、入力する材料特性を完全弾塑性型の応力歪関係とし、せん断スパン比を変動因子とした有限要素数値解析を行い、得られた塑性耐力との比較により、理論解の妥当性を検証した。さらに極限解析に使用する斜方隅肉溶接継目の崩壊荷重を最大耐力に置き換え、曲げとせん断を受ける最大耐力の理論解を導出した。また、既報の実験結果および実験を再現した有限要素数値解析と比較、検証を行い、最大耐力の理論解の妥当性を検証した。得られた最大耐力の理論解について近似により耐力評価式を提案した。以下に本研究で得られた知見を列挙し、本論の結論とする。

- 1) 母材と溶接金属の強度比を考慮した、任意の断面形状を有する隅肉溶接継目についての斜方から荷重を受ける場合の崩壊機構を仮定し、崩壊荷重の理論解を導出した。
- 2) 斜方から荷重を受ける隅肉溶接継目について得られた崩壊荷重の理論解は、入力する材料特性を完全弾塑性型の応力歪関係とした有限要素数値解析値から得られる塑性耐力と良い対応を示した。
- 3) 強度比と斜方角度を変動因子とした斜方隅肉溶接継目および斜方異形隅肉溶接継目の実験を行い、隅肉溶接および異形隅肉溶接のそれぞれの最大耐力を得た。さらに、実験を再現した有限要素数値解析について、延性き裂発生ステップの耐力を最大耐力として耐力を比較したところ、使用鋼材の熱影響部の性質により耐力の誤差が発生するが、それを考慮したところ十分な精度で検証できた。
- 4) 崩壊荷重の理論解を準用し得られた最大耐力の理論解を実験およびFEAと比較検証し、概ね評価できていることを示した。
- 5) 斜方隅肉溶接継目の最大耐力を陽な表現で表すため、強度比により崩壊機構を範囲分けし、近似式を誘導し溶接継目の最大耐力の耐力評価式を提示した。なお、近似式は溶込みを0とし、強度比の影響を考慮したものである。得られた近似式と精算値の誤差は最大で1%程度であり、十分な精度で近似できた。

- 6) 母材と溶接金属の強度比を考慮した，任意の断面形状を有する隅肉溶接継目が曲げとせん断の組み合わせ荷重を受ける場合について，変形状態を仮定し，溶接線を分割し，各要素に斜方隅肉溶接継目の崩壊荷重を適用することで理論解を導出した
- 7) 曲げとせん断の組み合わせ荷重を受ける隅肉溶接継目について得られた崩壊荷重の理論解は，入力する材料特性を完全弾塑性型の応力歪関係とした有限要素数値解析値から得られる塑性耐力と良い対応を示した．
- 8) せん断スパン比を変動因子として曲げモーメントとせん断力を受ける試験体の載荷実験を行い，隅肉溶接および異形隅肉溶接のそれぞれの最大耐力を得た．さらに，実験を再現した有限要素数値解析について，延性き裂発生ステップの耐力を最大耐力として耐力を比較したところ，FEA から得られた最大耐力は実験から得られた最大耐力を過小評価する傾向があるが，実験の場合は延性き裂が発生した後も塑性硬化が発生し耐力が上昇しているためだと考えられる．
- 9) 曲げとせん断の組み合わせ荷重を受ける隅肉溶接継目について崩壊荷重の理論解を導出するときは斜方隅肉溶接継目の崩壊荷重を使用していたが，最大耐力に置き替えることで最大耐力の理論解を算出した．
- 10) 得られた最大耐力の理論解は実験結果を過小評価する傾向があったが，これは FEA から得られた最大耐力と同様の理由であると考えられる．
- 11) 曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の最大耐力を陽な表現で表すため，近似式を誘導し溶接継目の最大耐力の耐力評価式を提示した．なお，近似式は溶込みを 0 とし，強度比の影響を考慮したものである．得られた近似式と精算値の誤差は最大で 5%程度であり，十分な精度で近似できた．

以上のように，本論文では，斜方から荷重を受ける隅肉溶接継目の塑性耐力を適切に評価することのできる理論解を提案し，この理論解を準用することで最大耐力の理論解を示した．さらにこれらの理論解を応用し，曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目の耐力を評価できることを示した．

#### 今後の検討事項

提案した理論解を用いて，斜方から荷重を受ける部分溶け込み溶接の耐力も評価できると考えており，FEA や実験との比較を通して，理論解の適用範囲をさらに拡大した検証を行いたい．また，曲げとせん断を受ける隅肉溶接継目から，さらに荷重の方向も変数とした理論解を作成することも可能と考えており，検証を進めることでさらに適用範囲を拡大することを今後の課題としたい．

## 参考文献

- 1) B. Kato: Study on Strength of Fillet Welded Joints, (Transactions of AIJ), No. 75, pp. 31-35, 1962.8  
(in Japanese) 加藤勉: すみ肉溶接継手の耐力に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 75 号, pp.31-35, 1962.8  
(DOI: [https://doi.org/10.3130/aijsaxx.75.0\\_31](https://doi.org/10.3130/aijsaxx.75.0_31))
- 2) T. Naka, B. Kato, K. Morita: Ultimate Strength of Fillet Welded Joints, (Transactions of AIJ), No. 146, pp. 29-35, 1968  
(in Japanese) 仲威雄, 加藤勉, 森田耕次: 溶接継手の耐力ーすみ肉溶接継手の終局耐力ー, 日本建築学会論文報告集, 第 146 号, pp.29-35, 1968  
(DOI: [https://doi.org/10.3130/aijsaxx.146.0\\_29](https://doi.org/10.3130/aijsaxx.146.0_29))
- 3) K. Sato, K. Seo, S. Sone: Mechanical Behaviour and Strength of Fillet Weld Under Tension (Part 1) , Welding Journal, Vol. 41, No. 3, pp. 260-272, 1972.3  
(in Japanese) 佐藤邦彦, 瀬尾健二, 曾根成典: 引張りを受ける十字すみ肉溶接継手の変形挙動と強度(第 1 報)ーすみ肉形状の影響ー, 溶接学会誌, 第 41 巻第 3 号, pp.260-272, 1972.3  
(DOI: <https://doi.org/10.2207/qjjws1943.41.260>)
- 4) K. Sato, K. Seo: Mechanical Behaviour and Strength of Fillet Weld Under Tension (Part 2), Welding Journal, Vol. 41, No. 4, pp. 385-393, 1972.4  
(in Japanese) 佐藤邦彦, 瀬尾健二: 引張りを受ける十字すみ肉溶接継手の変形挙動と強度(第 2 報)ー脚長およびとけこみ量の影響ー, 溶接学会誌, 第 41 巻第 4 号, pp.385-393, 1972.4  
(DOI: <https://doi.org/10.2207/qjjws1943.41.385>)
- 5) Kamtekar, A. G.: A New Analysis of the Strength of Some Simple Fillet welded Connections, J. of Constructional Steel Research, Vol.2, No.2, pp.33-45, 1982.61)  
(DOI: [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(82\)90024-4](https://doi.org/10.1016/0143-974X(82)90024-4))
- 6) K. Hashimoto, Y. Tanuma, M. Kamata: The Strength of Fillet Welded Cross Joints Undergoing The Ambient Low Temperature (Part1 Experimental Study on Strength of Inclined Fillet Welds) ,Architectural Institute of Japan(kinki) C Structures, pp.1039-1040, 1987.10  
(in Japanese) 橋本健一, 田沼吉伸, 鎌田正巳: 低温化施工による十字継手すみ肉溶接継目の強度(その 1 斜方すみ肉溶接継目強度の実験的研究), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿) C 構造, pp.1039-1040, 1987.10
- 7) K. Hashimoto, Y. Tanuma, M. Kamata: The Strength of Fillet Welded Cross Joints Undergoing The Ambient Low Temperature (Part2 Maximum Strength Formula of Inclined Fillet Welds) ,Architectural Institute of Japan(kinki) C Structures, pp.1041-1042, 1987.10

- (in Japanese) 橋本健一，田沼吉伸，鎌田正巳：低温化施工による十字継手すみ肉溶接継目の強度（その 2 斜方すみ肉溶接継目の最大強度式），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）C 構造，pp.1041-1042，1987.10
- 8) Architectural Institute of Japan: Recommendations for Limit State Design of Steel Structures, 1998  
(in Japanese) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説，1998
- 9) Architectural Institute of Japan: Recommendations for Design of Connections in Steel Structures, 2021  
(in Japanese) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2021
- 10) N. Yasui, K. Suita, K. Inoue : Fracture Mechanism and Ultimate Strength of Inclined Fillet Welds,(Transactions of AIJ), Vol. 69, No. 579, pp. 111-118, 2004  
(in Japanese) 安井信行，吹田啓一郎，井上一朗：斜方隅肉溶接継目の破壊機構と最大耐力，日本建築学会構造系論文集，第 69 巻，579 号，pp.111-118，2004  
(DOI: [https://doi.org/10.3130/aijs.69.111\\_2](https://doi.org/10.3130/aijs.69.111_2))
- 11) Miazga, G.S. and Kennedy, D.J.L. : Behavior of Fillet Welds as a Function of the Angle of Loading, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.16,pp.583-599, 1989  
(DOI: <https://doi.org/10.1139/l89-089>)
- 12) Lesik, D.F. and Kennedy, D.J.L. :Ultimate Strength of Fillet Welded Connections Loaded in Plane, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.17,pp.55-67, 1990  
(DOI: <https://doi.org/10.1139/l90-008>)
- 13) American Institute of Steel Construction : Steel Construction Manual,
- 14) S. Morikawa, H. Nanba, Y. Wakama, M. Tabuchi: Strength Evaluation of Grooved Fillet Weld Joint,Architectural Institute of Japan(tohoku) A-1 Materials and Construction, pp.679-680, 2009.07  
(in Japanese)森川翔平，難波尚，若間靖志，田渕基嗣：異形隅肉溶接継目の強度評価，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）A-1 材料施工，pp.679-680，2009.07
- 15) T. Sugiyama, H. Ito, T. Miyao, N. Nakamura, H. Ishimura, H. Okamoto: Tensile Load Experiments on Diagonally-oriented Beveled Fillet Welded Joints,Architectural Institute of Japan(kanto) C-1 StructuresⅢ, pp.767-768, 2001.09  
(in Japanese) 杉山武彦，伊藤均，宮尾俊明，中村信行，石村博，岡本晴仁：斜方開先隅肉溶接継目の引張実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）C-1 構造Ⅲ，pp.767-768，2001.09
- 16) R.Yoshizue, T. Tanaka, Y.Asada, M. Tanaka: Strength Evaluation of Inclined Fillet Welds and Partial Penetration Welds, Proceedings of Constructional Steel, Vol. 24, pp.747-754, 2016.11  
(in Japanese) 吉末理紗，田中剛，浅田勇人，田中未咲：斜方から載荷される各種溶接継目の耐力評価，鋼構造年次論文報告集，第 24 巻，pp.747-754，2016.11
- 17) S. Matsuyama, T. Tanaka, Y.Asada, R.Yoshizue: Effect of the strength ratio of weld metal to base metal on ultimate strength of fillet welds Part1:Loading Tests, Architectural Institute of Japan, pp. 667-668, 2017

- (in Japanese) 松山将太郎, 田中剛, 浅田勇人, 吉末理紗: 溶接部と母材の強度比が隅肉溶接継目の耐力に与える影響 その1 載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.667-668, 2017.7
- 18) H. Kuwamura, K. Yamamoto: Criterion for ductile crack initiation in structural steels under triaxial stress state,  
(Transactions of AIJ), Vol. 60, No. 477, pp. 129-135, 1995  
(in Japanese) 桑村仁, 山本恵市: 三軸応力状態における構造用鋼材の延性き裂発生条件, 日本建築学会構造系論文集, 第 60 巻, 477 号, pp.129-135, 1995  
(DOI: [https://doi.org/10.3130/aijs.60.129\\_4](https://doi.org/10.3130/aijs.60.129_4))
- 19) 劉巖, 葛漢彬, 康瀾: 低応力三軸度下における鋼材の延性破壊条件の提案に関する研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), 第 75 巻, 4 号, pp.I\_333- I\_344, 2019  
(DOI: [https://doi.org/10.3130/aijs.60.129\\_4](https://doi.org/10.3130/aijs.60.129_4))
- 20) H. Suzuki, K. Horikawa: On the uniform elongation of structural steels, Japan Society of Civil Engineers Journal of structural engineering, Vol.38A, pp.979-987, 1992.3  
(in Japanese) 鈴木博之, 堀川浩甫: 構造用鋼材の一樣伸びに関する二,三の考察, 土木学会 構造工学論文集, Vol.38A, pp.979-987, 1992.3
- 21) Y.Hagiwara: Evaluation on Brittle Fracture Initiation from Surface Notch at Fillet Weld Toe using COD Design Curve, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 157, pp.333-342, 1985.5  
(in Japanese) 萩原行人: 隅肉溶接トウ部の表面切り欠きからの脆性破壊発生特性評価, 日本造船学会論文集, 第 157 号, pp.333-342, 1985.5  
(DOI: <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1985.333>)

## 論文リスト

- 1) T. Tsukao, T. Tanaka: Strength Evaluation of Fillet Welds (Part1)Ultimate Strength of Inclined Fillet Welds, (Transactions of AIJ), Vol. 90, No. 828, pp.262-272, 2025.02  
(in Japanese) 塚大空哉, 田中剛: 隅肉溶接継目の最大耐力評価 (その 1) 斜方隅肉溶接継目の最大耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 90 巻, 828 号, pp.262-272, 2025.02 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.90.262>)
- 2) T. Tsukao, T. Tanaka: Strength Evaluation of Fillet Welds (Part2)Ultimate Strength of Grooved Fillet Welds Subjected to Inclined Force, (Transactions of AIJ), Vol. 90, No. 834, pp.●-●, 2025.8  
(in Japanese) 塚大空哉, 田中剛: 隅肉溶接継目の最大耐力評価 (その 2) 斜方異形隅肉溶接継目の最大耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 90 巻, 834 号, pp.●-●, 2025.8 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.●>)

## 学術論文および学会発表論文リスト

- 1) T. Noda, T. Tanaka, S. Yoshizaki, T. Tsukao, S. Azegami, K. Matoba,: Strength Evaluation of Partial Penetration Weld Part 1: Tensile Strength, Architectural Institute of Japan(hokkaido) StructuresⅢ, pp.867-868, 2022.07  
(in Japanese) 野田透子, 田中剛, 吉崎颯一郎, 塚大空哉, 畔上進, 的場耕: 部分溶込み溶接継目の耐力評価 その 1 単純引張耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 構造Ⅲ, pp.867-868, 2022.07
- 2) T. Tsukao, T. Tanaka, T. Noda, S. Yoshizaki, S. Azegami, K. Matoba,: Strength Evaluation of Partial Penetration Weld Part 2: Strength of Bending Shear, Architectural Institute of Japan(hokkaido) StructuresⅢ, pp.869-870, 2022.07  
(in Japanese) 塚大空哉, 田中剛, 野田透子, 吉崎颯一郎, 畔上進, 的場耕: 部分溶込み溶接継目の耐力評価 その 2 曲げせん断耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 構造Ⅲ, pp.869-870, 2022.07
- 3) S. Yoshizaki, T. Tanaka, T. Noda, T. Tsukao, S. Azegami, K. Matoba,: Strength Evaluation of Partial Penetration Weld Part 3: Loding Test, Architectural Institute of Japan(hokkaido) StructuresⅢ, pp.871-872, 2022.07  
(in Japanese) 吉崎颯一郎, 田中剛, 野田透子, 塚大空哉, 畔上進, 的場耕: 部分溶込み溶接継目の耐力評価 その 3 載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 構造Ⅲ, pp.871-872, 2022.07
- 4) T. Tsukao, T. Tanaka, M. Minamiguti: Ultimate Strength of Oblique Crossing Joint by Full Penetration Weld Part 1: Tests, Architectural Institute of Japan(kinki) StructuresⅢ, pp.999-1000, 2023.07  
(in Japanese) 塚大空哉, 田中剛, 南口茉央: 斜交完全溶込み溶接継目の最大耐力 その 1 載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 構造Ⅲ, pp.999-1000, 2023.07

- 5) M. Minamiguti, T. Tanaka, T. Tsukao: Ultimate Strength of Oblique Crossing Joint by Full Penetration Weld Part 2: Strength Evaluation, Architectural Institute of Japan(kinki) Structures III, pp.1001-1002, 2023.07  
(in Japanese)南口茉央, 田中剛, 塚大空哉: 斜交完全溶込み溶接継目の最大耐力 その2 耐力評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)構造III, pp.999-1000, 2023.07
- 6) R. Maeda, T. Tanaka, R. Ueta, R. Yamamoto, S. Azegami, K. Matoba, T. Tsukao: Effects of Weld Defect of Beam-to-Column Weld Connections on Crack Propagation Part 1: Tests on Effects of Height of Weld Defect on Shop-Welding Specimen, Architectural Institute of Japan Kinki Chapter, pp.357-360, 2022.06  
(in Japanese) 前田涼太, 田中剛, 上田遼, 山本涼, 畔上進, 的場耕, 塚大空哉: 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響  
(その1 工場溶接形式における欠陥高さを因子とした載荷実験), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第62号, pp.357-360, 2022.06
- 7) R. Yamamoto, T. Tanaka, R. Ueta, S. Azegami, T. Tsukao: Effects of Weld Defect of Beam-to-Column Weld Connections on Crack Propagation Part 2: Tests on Effects of Height of Weld Defect on Field-Welding Specimen, Architectural Institute of Japan Kinki Chapter, pp.145-148, 2023.06  
(in Japanese) 山本涼, 田中剛, 上田遼, 畔上進, 塚大空哉: 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響  
(その2 現場溶接形式における欠陥高さを因子とした載荷実験), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.145-148, 2023.06
- 8) Y. Tahara, K. Takatsuka, T. Tanaka, R. Ueta, S. Azegami, T. Tsukao: Effects of Weld Defect of Beam-to-Column Weld Connections on Crack Propagation Part 3: Tests on Effects of Height of Weld Defect and Beam Section Size on Shop-Welding Specimen, Architectural Institute of Japan Kinki Chapter, pp.149-152, 2023.06  
(in Japanese)田原侑季, 高塚康平, 田中剛, 上田遼, 畔上進, 塚大空哉: 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響  
(その3 大型断面・工場溶接形式における欠陥高さを因子とした載荷実験), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.149-152, 2023.06
- 9) Y. Tahara, K. Takatsuka, T. Tanaka, R. Ueta, J. Nishizawa, T. Tsukao: Effects of Weld Defect of Beam-to-Column Weld Connections on Crack Propagation Part 4: Tests on Effects of Height of Weld Defect and Beam Section Size on Field-Welding Specimen, Architectural Institute of Japan Kinki Chapter, pp.321-324, 2024.06  
(in Japanese)田原侑季, 高塚康平, 田中剛, 上田遼, 西澤淳, 塚大空哉: 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響  
(その4 大型断面・現場溶接形式における欠陥高さを因子とした載荷実験), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.321-324, 2024.06
- 10) Y. Matsumoto, T. Tanaka, R. Ueta, R. Yamamoto, J. Nishizawa, T. Tsukao: Effects of Weld Defect of Beam-to-Column Weld Connections on Crack Propagation Part 5: Finite Element

Analysis for Medium-sized Specimen, Architectural Institute of Japan Kinki Chapter,  
pp.325-328, 2024.06

(in Japanese) 松本優大, 田中剛, 上田遼, 山本涼, 西澤淳, 塚大空哉: 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響

(その5 中型断面を対象とした有限要素数値解析), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.325-328, 2024.06

- 11) R. Yamamoto, T. Tanaka, R. Ueta, R. Maeda, S. Azegami, K. Matoba, T. Tsukao: Effect of Weld Defects on Crack Propagation in H-Section Beam End Welds Part 1: Shop Welding Type; Loading Tests on Effects of Height of Weld Defect, Architectural Institute of Japan(hokkaido) material construction, pp.1047-1048, 2022.07

(in Japanese) 山本涼, 田中剛, 上田遼, 前田涼太, 畔上進, 的場耕, 塚大空哉: H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響

(その1 工場溶接形式; 欠陥高さを因子とした載荷実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) 材料施工, pp.1047-1048, 2022.07

- 12) R. Yamamoto, T. Tanaka, R. Ueta, R. Maeda, S. Azegami, K. Matoba, T. Tsukao: Effect of Weld Defects on Crack Propagation in H-Section Beam End Welds Part 2: Shop Welding Type; Crack Propagation Modes and Plastic Deformation Capacity, Architectural Institute of Japan(hokkaido) material construction, pp.1049-1050, 2022.07

(in Japanese) 山本涼, 田中剛, 上田遼, 前田涼太, 畔上進, 的場耕, 塚大空哉: H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響

(その2 工場溶接形式; 亀裂進展状況および塑性変形能力), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) 材料施工, pp.1049-1050, 2022.07

- 13) Ueta, R. T. Tanaka, R. Yamamoto, S. Azegami, T. Tsukao: Effect of Weld Defects on Crack Propagation in H-Section Beam End Welds Part 3: Field Welding Type; Loading Tests on Effects of Height of Weld Defect, Architectural Institute of Japan(kinki) material construction, pp.1047-1048, 2023.07

(in Japanese) 上田遼, 田中剛, 山本涼, 畔上進, 塚大空哉: H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響

(その3 現場溶接形式; 欠陥高さを因子とした載荷実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿) 材料施工, pp.1047-1048, 2023.07

- 14) R. Yamamoto, T. Tanaka, R. Ueta, S. Azegami, T. Tsukao: Effect of Weld Defects on Crack Propagation in H-Section Beam End Welds Part 4: Field Welding Type; Crack Propagation Modes and Plastic Deformation Capacity, Architectural Institute of Japan(kinki) material construction, pp.1049-1050, 2023.07

(in Japanese) 山本涼, 田中剛, 上田遼, 畔上進, 塚大空哉: H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響

(その4 現場溶接形式; 亀裂進展状況および塑性変形能力), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿) 材料施工, pp.1049-1050, 2023.07

- 15) K. Takatsuka, Y. Tahara, T. Tanaka, R. Ueta, S. Azegami, T. Tsukao: Effect of Weld Defects on Crack Propagation in H-Section Beam End Welds Part 5: Loading Tests on Effects of Beam Section Size, Architectural Institute of Japan(kinki) material construction, pp.1051-1052, 2023.07  
(in Japanese) 高塚康平, 田原侑季, 田中剛, 上田遼, 畔上進, 塚大空哉 : H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響  
(その 5 梁断面寸法を因子とした载荷実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 材料施工, pp.1051-1052, 2023.07
- 16) Y. Tahara, K. Takatsuka, T. Tanaka, R. Ueta, S. Azegami, T. Tsukao: Effect of Weld Defects on Crack Propagation in H-Section Beam End Welds Part 6: Crack Propagation Modes and Deformation Capacity on Effects of Beam Section Size, Architectural Institute of Japan(kinki) material construction, pp.1053-1054, 2023.07  
(in Japanese) 田原侑季, 高塚康平, 田中剛, 上田遼, 畔上進, 塚大空哉 : H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響  
(その 6 梁断面寸法を因子とした場合の亀裂進展状況および変形能力), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 材料施工, pp.1053-1054, 2023.07
- 17) Ueta,R. T. Tanaka, R. Yamamoto, S. Azegami, T. Tsukao: Deformation Capacity of H-Section Beam with Weld Defect (Part1) Effect of Groove Type on Deformation Capacity and Crack Propagation, (Transactions of AIJ), Vol. 89, No. 823, pp.908-916, 2024.09  
(in Japanese) 上田遼, 田中剛, 山本涼, 畔上進, 塚大空哉 : 溶接欠陥を有する H 形断面梁の塑性変形能力 (その 1) 開先形状が変形能力および亀裂進展に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 89 巻, 823 号, pp.908-916, 2024.09  
(DOI <https://doi.org/10.3130/aijs.89.908>)

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり，神戸大学鋼構造研究室，教授 田中 剛先生には，終始変わらぬ懇切丁寧なご指導，ご鞭撻を賜りましたことを深く感謝致します。

共同研究者の吉田美萌氏（現大成建設），磯野千紗氏には，多くの点でご協力いただき，新たな視点を頂きました。心より感謝致します。

末筆ながら，3年間の研究室の生活において共に励まし合い，研鑽し合ってきた神戸大学鋼構造研究室の皆様に深く感謝致します。

2025 年 7 月 9 日

神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

塚大 空哉

神戸大学博士論文「母材と溶接金属の強度比を考慮した隅肉溶接継目の最大耐力評価」全166頁

提 出 日 2025年7月9日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ Kernel にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの  
該当ページ上に掲載されます。

© 塚大 空哉

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。