



スリット孔を有する高力ボルト摩擦接合継手を付加した耐震装置の力学的挙動

橋本, 国太郎
二宮, 僚
大久保, 佑紀

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 30:47-60

(Issue Date)

2026-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100504175>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100504175>



スリット孔を有する高力ボルト摩擦接合継手を付加した 耐震装置の力学的挙動

Mechanical behavior of seismic equipment with slit-hole high-strength bolt friction joints

橋本 国太郎¹⁾

Kunitaro Hashimoto

二宮 僚²⁾

Ryo Ninomiya

大久保 佑紀³⁾

Yuki Okubo

概要: 南海トラフ地震の発生が懸念される中, 既設鉄道橋では耐震補強が難しい橋梁に対して, レベル1地震に対応するための移動制限装置, レベル2地震には落橋防止装置を設置する方法が採用されている. しかし, レベル1地震を超える規模の地震が発生した場合, 落橋は防げるものの大きな桁ずれが発生し, 構造の安全性や復旧性が低下する課題がある. このような中, 著者らは鋼製の移動制限装置にスリット孔を有する高力ボルト摩擦接合を付加した耐震装置を提案している. この装置は地震時のエネルギーを, スリット孔を有する摩擦接合部の大きなすべり変位によって吸収し, 変位を抑制する機能を持っている. 本研究では, この装置の継手要素および装置本体の耐荷性能, 変形性能およびエネルギー吸収性能を有限要素解析で検討した. その結果, 高力ボルト摩擦接合継手に関しては, 鋼板の板厚・板幅およびすべり降伏耐力比, 摩擦面数が耐荷性能に大きな影響を及ぼすことがわかった. また耐震装置に関しては, 裏当て板の厚さと荷重が加わる位置を適切に調節することで, エネルギー吸収量が増加し, 高性能な装置になる可能性を示した.

キーワード: スリット孔, 高力ボルト摩擦接合, 耐震装置

1. はじめに

阪神大震災後も東日本大震災や熊本地震などの大きな震災が発生しており, 今後, 南海トラフなどの大地震の発生が懸念されている. そのため, 既設構造物における耐震補強の重要性が検討されており, 特に大規模地震に対する適切な対応が求められている. 新設構造物に関しては, レベル2地震に対してすべての部位・部材で各照査を満たすように設計されている. 一方で, 既設構造物においては, 下部工の耐力不足や補強部材の大型化などから, 特に鉄道橋では, すべての部位に対してレベル2地震に対応した設計を行うことが難しい場合がある. そこで, 既設の鉄道構造物においては, レベル1の地震の対策として移動制限装置, レベル2地震の対策としては落橋防止装置を設置するといった方法が用いられている. しかし, レベル1地震を超える規模の地震が発生した場合, 大きな桁ずれが生じることで, 安全性や復旧性が低下するといった課題がある. この課題に対して, ダンパーを導入するといった解決策が存在するが一般的に高コストであるため, コスト面での負担が大きいということが新たな課題となってくる. 以上の背景から, 低コストでありながら高い安全性, 耐震性および復旧性を確保できる耐震装置の開発が求められている.

このような耐震装置に関しては、過去にもいくつかの検討事例があり、張ら^りは、装置の凸部の塑性挙動を利用する新たな移動制限装置の提案を行い、その装置の耐荷性能と橋梁の地震時挙動への影響を検討し、地震力に対するボルトの抵抗を合理的にするためのボルト配置を提案している。また、Samimら²⁾は、エラストマ支承を用いた高架橋を有限要素解析で再現し、大きな地震の際に部材損傷を軽減するための移動制限装置の設計破断強度を提案している。この結果より、破断強度が 1000kN を超える破断強度を持つ移動制限装置を用いることが望ましいとの結論が得られている。さらに、石原ら³⁾は、免震効果が期待されるスリットを設けた移動制限装置を提案し、レベル 2 の地震に対しての性能を評価した。この装置は、レベル 1 程度の地震に対しては、桁ずれなどを防ぐ保護部材となり、レベル 2 の地震に対してはノックオフ部材として横方向の免震効果を発揮すると結論付けられている。このように、耐震性を向上させるためのエネルギー吸収機構を有するいくつかの移動制限装置が考案されている。しかし、比較的安価で安全性および復旧性の向上を目的とした装置はあまり開発が進んでいない。

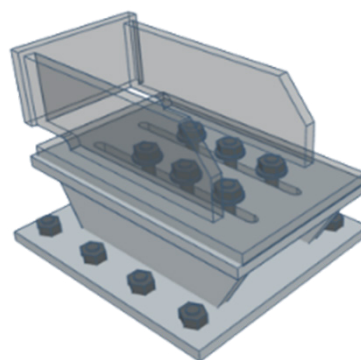


図 1 提案している耐震装置の概要

そこで、一般的に用いられている鋼製の移動制限装置をベースとして、高力ボルト摩擦接合を付加させた構造を持つ耐震装置が著者らによって提案された。具体的には、図 1 に示すように、継手にスリット孔を配置することで、荷重によりスライドする機能を設けて地震時のエネルギーを吸収し、変位の抑制が可能となる。また、桁を支承から落とさないような構造となっているため、安全性かつ地震後の復旧性向上が見込めると考えられる。ボルト孔を長孔とした継手についてはいくつか研究されている⁴⁾が、長孔よりさらに長いスリット孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動はこれまでほとんど研究されていない。著者らはこのようなスリット孔を有する高力ボルト摩擦接合継手に対して、そのすべり挙動を把握するために、実験的な検討や解析を実施している⁵⁾⁶⁾が、継手を構成する鋼板の板厚や板幅、ボルト本数の影響によってすべり挙動が変化するの未解明である。また、このような摩擦接合を用いた耐震装置の挙動に関しても先行した実験結果があるものの、形状の影響などを考慮した検討は実施できていない。

そこで本研究の目的は、高力ボルト摩擦接合継手、および摩擦接合によるすべり変形を活用した耐震装置の耐荷性能、変形性能およびエネルギー吸収性能について、その継手と装置の形状を変えることでどのような変化が生じるのかについて有限要素解析を中心として検討を行う。

2. 有限要素解析によるすべり挙動の再現

本研究では、母板のボルト孔をスリット状にした高力ボルト摩擦接合継手単体における引張実験の結果⁶⁾を有限要素法で再現し、その手法を継手や装置のパラメータ解析に用いた。本章では、どのような手法を用いて実験でみられた鋼板同士の摩擦面のすべり挙動の再現を実施したのかについて説明し、その解析結果と実験結果を比較することで再現手法の妥当性を評価する。

(1) 実験結果再現の解析概要

実験の再現解析モデルの概要を図 2 に示す。実験ではサイズが M16、強度が F10T の高力ボルトを用い、母板と連結板の鋼板にはそれぞれ 22mm と 12mm の板厚の SS400 材を用いた⁶⁾。設計のすべり降伏耐力比は 0.377 であり、母板の降伏よりすべりが先行する継手としている。また、モデル化対象の継手のボルト孔は、連結板は直径 18mm、母板については直径 18mm で長さ 270mm のスリット孔としている。

対象とする実験供試体の摩擦面処理は、溶融亜鉛めっきままとしたもの（以下、めっきま）とし、動的試験結果、および静的試験結果との比較を行う。なお、この実験では他の摩擦面処理でも実験を実施しているが、再現方法などは同様であるため、ここではめっきま 1 種類のための接合面処理の場合の解析を実施した。

(2) 解析モデルおよび解析手法

解析モデルは、図 2 に示すように対称性を考慮した 1/4 モデルとし、8 節点低減積分ソリッド要素を用いた。要素サイズは、解析時間を考慮しいずれの部材も 5mm を目安に分割した。この要素サイズに決定するため

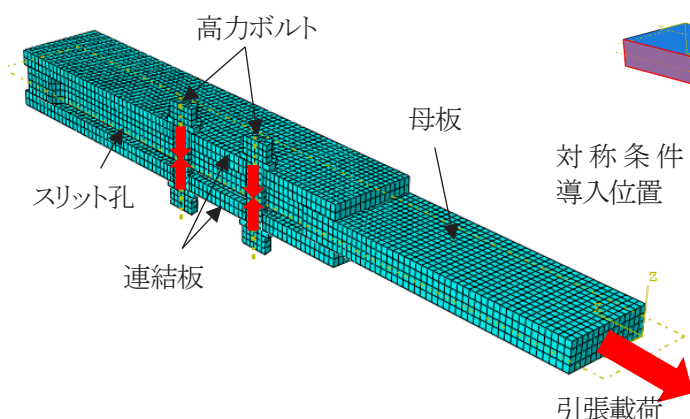


図2 1/4 の有限要素解析モデル

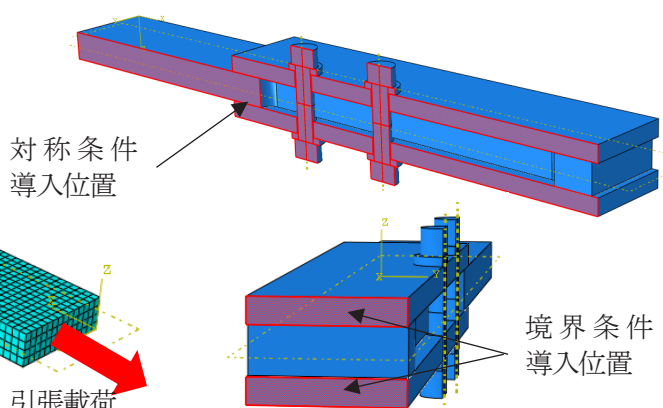


図3 対称・境界条件導入位置

表1 解析で使用了材料特性

	ヤング率 (N/mm^2)	ポアソン比	降伏応力 (N/mm^2) 引張強度 (N/mm^2)	ひずみの入力値
母板・連結板 (SS400)	200000	0.3	235	0
			400	0.8
ボルト・座金 (F10T)			900	0
			1000	0.5

にいくつかの解析を実施しているが、その結果から、メッシュサイズを 5mm より小さくしても、結果に差異はあまり見られないことがわかった。また、要素サイズ 2mm と 5mm では解析にかかる時間が 5 倍ほど変わっていた。よって、効率性を重視し、5mm という要素サイズに決定した。

解析モデルの境界条件は、図 3 に示すように対称条件を導入した部分では y 軸方向に対して拘束をし、連結板端部では全方向を完全に拘束した。材料特性も表-1 に示すように、鋼板の SS400 材および F10T 高力ボルトの設計値および標準的な値を用いた。

本解析では、はじめの解析ステップでボルト軸力(106kN)を導入することで板同士に圧縮応力が作用し、次の解析ステップで母板に引張荷重を与える 2 段階で実施した。ボルト軸力の導入方法は、図 2 に示すように、ボルト軸上の中央付近に締付断面を定義し、そこに荷重としてボルト軸力を付与した。母板への引張荷重は、母板端部に対する一様な強制変位により与えた。

ここで、母板と連結板間の摩擦係数を変化させることにより、実験結果の再現を図っている。摩擦係数の設定について、先に述べたように、ここでは、実験におけるめっきまもの 1 ケースに対して行い、静的と動的で区別して設定を行った。これらの摩擦面処理や载荷速度で摩擦係数が大きく違ったため、それぞれで摩擦係数を設定した。なお、本解析では、強制変位を载荷しているステップ中での摩擦係数の変更ができないため、この解析ステップをさらに数ステップに細かく分け摩擦係数を変更することにより、実験で得られた荷重-変位関係の再現を図ることとした。

(3) 解析結果

めっきプラストの摩擦面処理を施した継手の引張試験の再現に用いた解析ステップを表-2 に示す。また解析で得られた荷重-変位関係を図 4 に示す。

図 4 より、静的に関してはすべり挙動とすべり後の荷重の推移をほぼ再現できていることが分かる。なお、実験値で急激に荷重が増加しているところ(20mm 手前)があるが、これは载荷速度を変化させたためこのような挙動となった。また動的に関しては、実験値での荷重増減を完全に再現することは難しいが、ほぼ再現できていることがわかる。これらの結果から、単純な静的なすべり挙動であればほぼ再現でき、動的な場合でも、荷重振幅などの複雑な荷重の変化がある場合でも大まかではあるが再現できることが分かる。

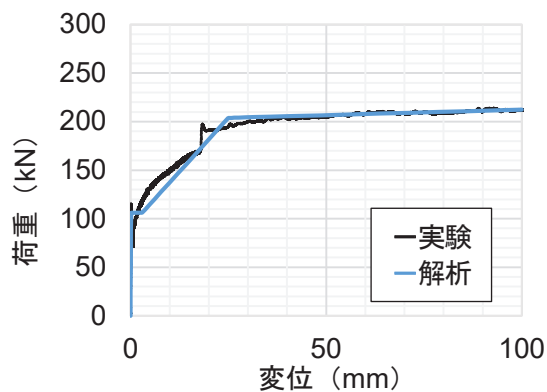
表2 解析ステップ

(a) 静的解析

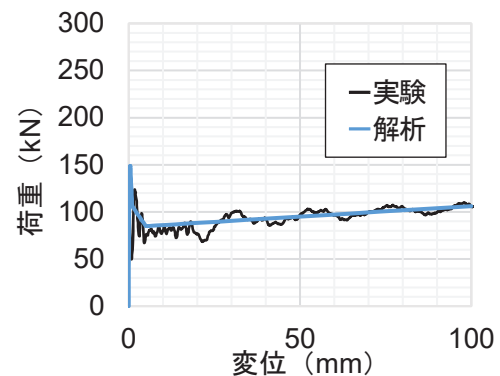
ステップ0	ステップ1	ステップ2	ステップ3
初期の摩擦係数を0.25と設定し、接触条件を定義する	ボルト軸力を導入する(106kN)	微小な強制変位を与える	摩擦係数を0.48に変更し、所定の強制変位を与える
ステップ4			
摩擦係数を0.50に変更し、残りの強制変位を与える			

(b) 静的解析

ステップ0	ステップ1	ステップ2	ステップ3
初期の摩擦係数を0.35と設定し、接触条件を定義する	ボルト軸力を導入する(106kN)	微小な強制変位を与える	摩擦係数を0.25に変更し、所定の強制変位を与える
ステップ4	ステップ5		
摩擦係数を0.20に変更し、所定の強制変位を与える	摩擦係数を0.25に変更し、残りの強制変位を与える		



(a) 静的実験およびその再現解析結果



(b) 動的实验およびその再現解析結果

図4 荷重-変位関係

3. スリット孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のパラメトリック解析

本章では、スリット孔を有する継手の各種パラメータを変更し、それぞれに2章で説明した手法を用いて解析を行う。その結果から各パラメータによる継手の耐荷性能、変形性能およびエネルギー吸収性能を検討する。

(1) 基本モデルと各種パラメータ

本章で行ったパラメトリック解析は、2章でのFE解析で扱った解析モデルと同様のものを基本モデルとして、そのモデルの形状を変化させて実施した。本項では本章で実施したパラメトリック解析のパラメータの概要について示す。解析モデルは大きく分けて、①すべり降伏耐力比 β を変更したモデル、②ボルト本数を変更したモデル、③基本モデルでは1つであるスリット孔の数を増やしたモデル、④2面摩擦を1面摩擦にして様々な裏当て板厚を設置したモデルの4パターンのパラメータ変更モデルを考えた。それぞれについて具体的な説明を以下に示す。

・すべり降伏耐力比 β を変更したモデル

以下の式(1)で表すことのできるすべり降伏耐力比 β を変更することで継手の性能にどのような変化が生じるかを解析結果から算出する。この式より、 β が1.0以上であれば板の降伏がすべりより先行して起こり、1.0以下であれば板のすべりが降伏に先行することがわかる。

表3 パラメトリック解析ケース

(a) すべり降伏耐力比 β

	ボルト行	ボルト列	摩擦係数	母板板厚 (mm)	連結板板厚 (mm)	板幅 (mm)	ボルト径 (mm)	ボルト軸力 (kN)	摩擦面	降伏点 (N/mm ²)	β
基本モデル	1	2	0.45	22	12	136	16	106	2	235	0.313
β変更モデル						77					0.626
						57					0.946
						47					1.273
				15	8	191					0.313
						104					0.629
						76					0.933
						61					1.259

(b) ボルト本数

	ボルト行	ボルト列	摩擦係数	母板板厚 (mm)	連結板板厚 (mm)	板幅 (mm)	ボルト径 (mm)	ボルト軸力 (kN)	摩擦面	降伏点 (N/mm ²)	β
基本モデル	1	2	0.45	22	12	136	16	106	2	235	0.313
ボルト本数		4		33	18	175					
		6		44	24	195					
		8		55	30	207					
		4		22	12	254					
		6		22	12	372					
		8		22	12	490					
		4		44	24	136					
		6		66	36	136					
		8		88	48	136					

$$\beta = (\mu \times m \times n \times N) / (A \times \sigma) \quad (1)$$

ここに、 μ :摩擦係数(0.45で算定した)、 m :摩擦面数、 n :ボルト本数、 N :ボルト軸力、 A :純断面積、 σ :降伏点である。

また、このパラメトリック解析では、母板の板幅と板厚、それとあわせて連結板の板厚を変更させて β の値を変更した。母板の板幅と板厚、連結板の板厚やその他の値を表-3(a)に示す。なお、表-3のボルト行はスリット孔の数、ボルト列は1つのスリット孔に入っているボルト本数を示している。

・ボルト本数を変更したモデル

基本モデルでは2本である継手のボルト本数を変更することで継手の性能にどのような変化が生じるかを解析結果から算出する。また、このパラメトリック解析では、ボルト本数に応じて母板の板幅と板厚、連結板の板厚を変更させてすべり降伏耐力比 β の値を一定の0.313とした。変更したボルト本数とその他の値を表-3(b)に示す。

・スリット孔の数を変更したモデル

基本モデルでは1つであるスリット孔の数と、スリット孔の中のボルト本数を変更することで継手の性能にどのような変化が生じるかを解析結果から算出する。

変更したスリット孔の数とボルト本数、その他の値を表-3(c)に示す。また各スリット孔にあるボルト本数が同じパラメータですべり降伏耐力比 β が同じになるように母板の板幅を調節した。

表 3 パラメトリック解析ケース

(c) スリット孔の数

	ボルト行	ボルト列	摩擦係数	母板板厚 (mm)	連結板板厚 (mm)	板幅 (mm)	ボルト径 (mm)	ボルト軸力 (kN)	摩擦面	降伏点 (N/mm ²)	β
基本モデル	1	2	0.45	22	12	136	16	106	2	235	0.313
スリット孔の 数変更モデル		1									0.156
		2									0.313
		3									0.469
	2	1				0.156					
		2				0.313					
		3				0.469					
	3	1				0.156					
		2				0.313					
		3				0.469					

(d) 摩擦面数 1 面 + 裏当て板

	ボルト行	ボルト列	摩擦係数	母板板厚 (mm)	連結板板厚 (mm)	板幅 (mm)	ボルト径 (mm)	ボルト軸力 (kN)	摩擦面	降伏点 (N/mm ²)	β	裏あて板板厚 (mm)
基本モデル	1	2	0.45	22	12	136	16	106	2	235	0.313	なし
摩擦面数1(裏 当て板考慮なし)						77			1			
摩擦面数1(裏 当て板考慮)												9
												12
												22
											32	

・摩擦面数 1 面 + 様々な厚さの裏当て板を設置したモデル

基本モデルでは 2 面だった摩擦面数を 1 面にし、様々な厚さの裏当て板を設置することで継手の性能にどのような変化が生じるかを解析結果から算出する。理由としては、4 章でパラメトリック解析を行う耐震装置が 1 面摩擦に裏当て板を設置した継手形状となるので、継手単体で 1 面摩擦にしたときにどのような挙動になるか確認するためにこのパラメータを用意した。このパラメータの各種の値を表-3(d)に示す。

(2) 継手のパラメトリック解析方法の概要

解析モデルは、2 章と同様に対称性を考慮した 1/4 モデルとし、8 節点低減積分ソリッド要素を用いた。要素サイズ、境界条件および鋼板とボルトの材料特性についても 2 章と同様のものを用いている。また、パラメータ解析を実施する β 変更モデル、ボルト本数変更モデル、およびスリット孔の数変更モデル 3 つのモデルの一例をそれぞれ図 5 に示す。

解析手順についても 2 章と同様に、まずボルト軸力(106kN)を導入し、次のステップで母板に強制変位を与える 2 段階で実施した。ボルト軸力の導入方法と断面および強制変位についても 2 章と同様にした。この手順の中で、2 章で述べた手法を用いて、鋼板のすべり挙動を再現している。具体的な解析ステップと摩擦係数の設定については次に示す。

本解析では摩擦係数の値としては、初期の摩擦係数を 0.45、すべり発生後の摩擦係数を 0.25 と設定した。2 章では実験に合わせるために、めっきままの摩擦係数として 0.25 としているが、摩擦係数は摩擦面処理方法や摩擦面の状況によって 0.1~0.9 程度の範囲で大きく変化することから、本パラメトリック解析では、一般的な摩擦係数の値としてこの値を用いた。本解析で用いた解析ステップは前章とほぼ同様である。

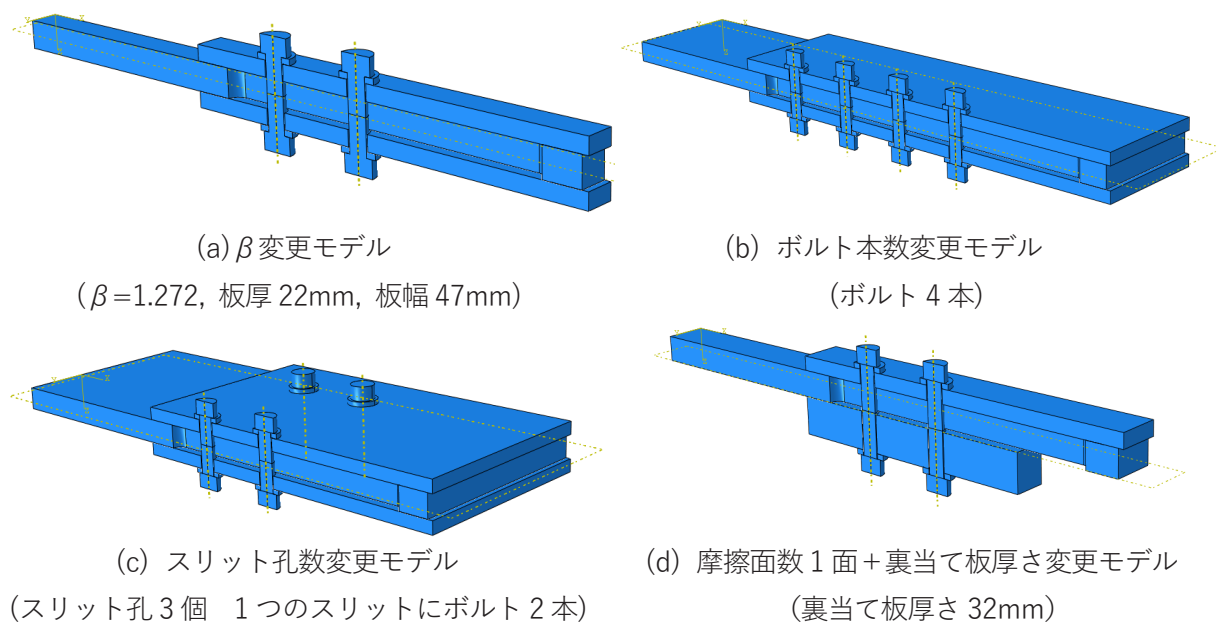


図5 パラメトリック解析の解析モデル例

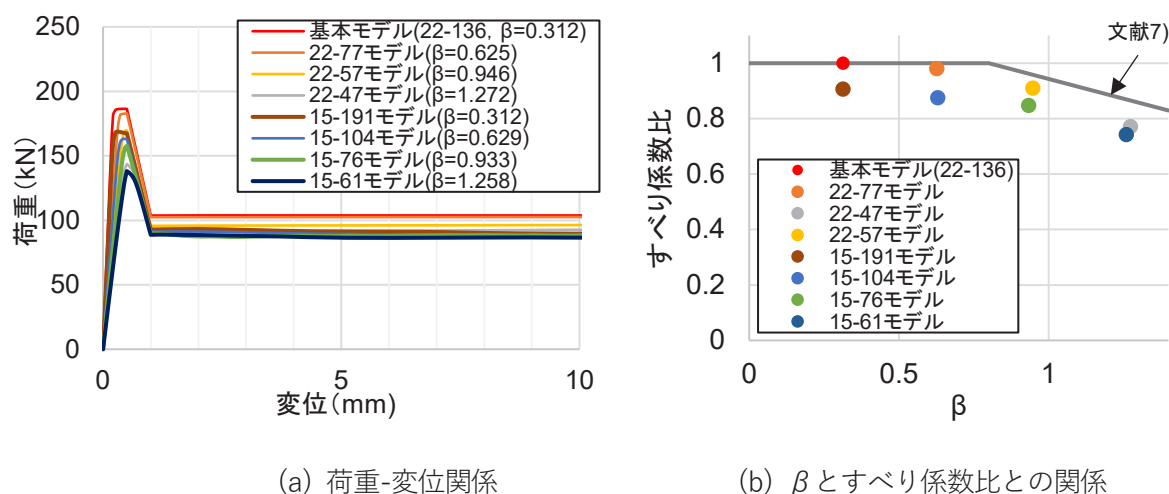


図6 すべり降伏耐力比 β 変更モデルの解析結果

(3) 継手のパラメトリック解析方法の概要

すべり降伏耐力比 β を変更したモデルで解析を行った結果より算出した荷重-変位関係を図 6(a)に示す。また図 6(a)には各パラメータのモデルを(母板の板厚)–(母板の板幅)モデルといった形で表している。例えば 22-77 モデルは、母板の板厚 22mm, 母板の板幅 77mm の β の値が約 0.625 のモデルとなっている。さらに荷重変位関係のグラフについては、すべり発生後は荷重の変化が見られなかったため、変位 10mm までのグラフを示す。

図 6(a)より、板厚を変えずに β の値を変化させることで荷重の大きさが変化することがわかる。例えば板厚 22mm の4つのモデルを比較すると、 β の値を大きくするにつれて荷重の大きさが低下していた。これは、板厚 15mm のモデルで比較しても同じことがいえる。さらに、 β の値が同じである2つのモデルに着目すると、板厚が大きいモデルほどすべり荷重およびすべり後の荷重が大きいことがわかる。例えば、 β の値が約

0.312 の基本モデル(22-136 モデル)と 15-191 モデルを比較すると、基本モデル(22-136 モデル)の方がすべり荷重が 20kN ほど、すべり後の荷重が 10kN ほど大きいことがわかる。これは、22-77 モデルと 15-104 モデルなど、他のモデルについても同様である。また、エネルギー吸収性能に関しては、すべり荷重に対するすべり後の荷重の低減率およびエネルギーの吸収力を荷重変位関係の線と横軸の間の面積で評価する。グラフを見ると、 β を変更することで荷重の低減率はほぼ変化しないが、エネルギー吸収量で考えると β が小さいほど、 β が同じものであれば板厚が大きい方が優れているとわかる。

次に、 β とすべり係数比の関係を図 6(b)に示す。なお、グラフの縦軸は解析で得られたすべり係数を基本モデルのすべり係数で割ったすべり係数比としている。グラフの直線は、標準孔での実験及び解析結果を基にしたにおける β とすべり係数比の回帰直線 η となっている。

図 6(b)より、 β の値が増加するほどすべり係数が低下することがわかる。具体的には、 β が約 0.8 までは緩やかに低下し、0.8 を超えると急激に低下することがわかる。また、 β が同じ値のモデルでも板厚 22mm のモデルの方が板厚 15mm のモデルよりもすべり係数が大きくなっていた。このことから、板厚がすべり係数に大きく影響するとわかる。なお、文献で示された標準孔の継手より大きな低下を示していることから、スリット孔では β が大きくなるとすべり係数が大きく低下する可能性を検討する必要がある。

ボルト本数を変更したモデルで解析を行った結果から算出した荷重変位関係を図 7(a)に示す。また、ボルト本数 8 本で母板の板厚 22mm のモデルは解析が収束しなかったため、結果を省いている。そして、グラフには各パラメータのモデルを(母板の板厚)－(母板の板幅)－(本数)モデルといった形で表している。例えば 22-254-4 本モデルは、母板の板厚 22mm、母板の板幅 254mm でボルト本数が 4 本のモデルとなっている。さらに荷重変位関係のグラフについては、すべり発生後は荷重の変化が見られなかったため、変位 10mm までのグラフを示す。

図 7(a)より、ボルト本数が同じモデルに着目すると荷重の大きな違いは見られなかった。しかし、すべり荷重で少し違いが見られ、板厚が小さいモデルのすべり荷重は、板厚が大きいモデルの値より小さくなっていた。例えば、ボルト本数 4 本のモデルで比べると、板厚 33mm、44mm のモデルより板厚 22mm のモデルの方がすべり荷重が少し小さくなっている。ボルト本数 6 本のモデルでも同様のことがわかる。これは、板厚が小さいほど連結板がボルトに食い込むという、 β 変更モデルの解析結果と同様の原因であると考えられる。さらに、荷重の大きさがボルト本数に比例して大きくなっていることもわかる。また、エネルギー吸収性能については、荷重の低減率についてはボルト本数を変えてもほぼ同じだが、エネルギー吸収量で考慮するとボルト本数に比例して良くなり、同じ本数で比較すると、板厚が大きいモデルの方がわずかに良いことがわかる。

次に、ボルト本数と基本モデルを基準としたすべり係数比の関係を図 7(b)に示す。ボルト本数が変化してもすべり係数にあまり違いは見られなかった。また、ボルト本数が同じモデルを比較すると、板厚が小さいモデルの方がすべり係数が少し小さいことがわかった。

スリット孔の数と 1 つのスリット当たりのボルト本数を変更したモデルで解析を行った結果から算出した荷重変位関係およびスリット孔の数とすべり係数の関係を図 8 に示す。また、スリット孔が 3 つで 1 つのスリット当たりのボルト本数が 3 本のモデルは解析が収束しなかったため、結果を省いている。そして、グラフには各パラメータのモデルを(スリット孔の数)－(1 つのスリット当たりのボルト本数)モデルといった形で表している。例えば 2-3 モデルは、スリット孔の数 2 つ、1 つのスリット当たりのボルト本数が 3 本のモデルとなっている。さらに、

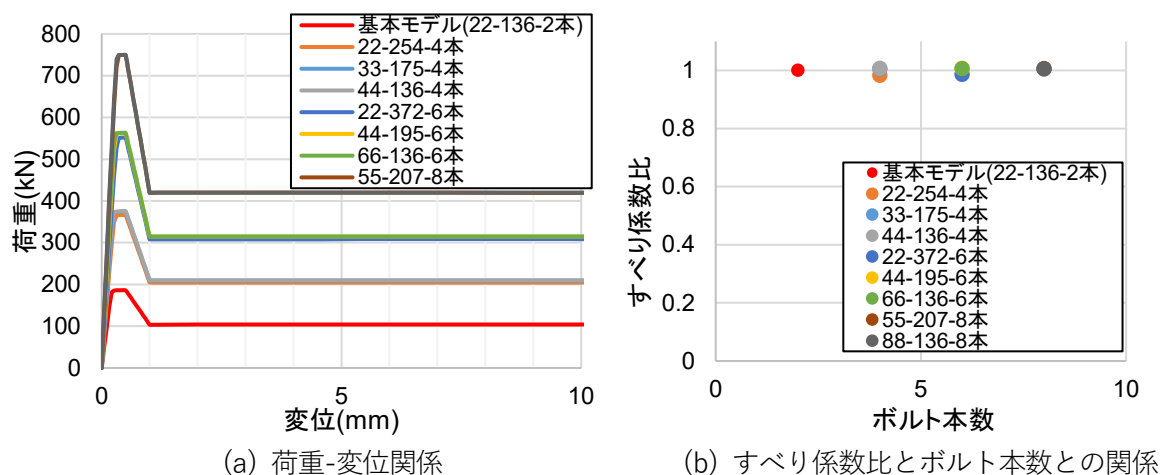


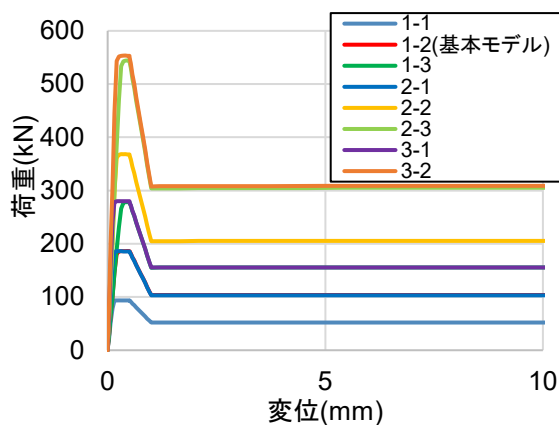
図 7 ボルト本数変更モデルの解析結果

荷重変位関係のグラフについては、すべり発生後は荷重の変化が見られなかったため、変位 10mm までのグラフを示す。

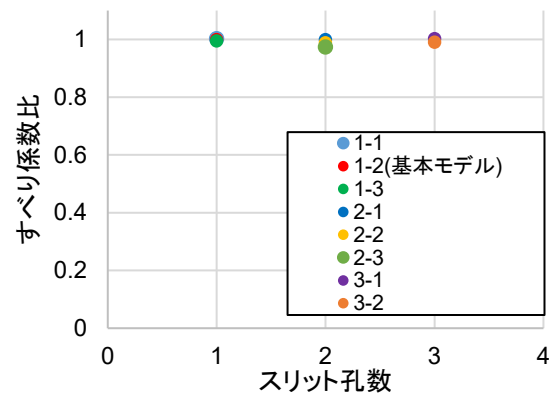
図 8(a)より、荷重の大きさはスリット孔の数に関係なく、ボルト本数に比例していることがわかる。例えば、1-1 モデルはボルト1本、2-3 モデルはボルト6本となっており、荷重の大きさは約6倍変わっている。また、同じボルト本数のモデルで比較してみると、スリット孔の数が多いモデルの方が少し早くすべり荷重に達している。例えば、2-3 モデルと 3-2 モデルは同じボルト本数 6 本のモデルだが、3-2 モデルの方が少し早くすべり荷重に達している。さらに、エネルギー吸収性能に関しては、荷重の低減率はスリット孔を変更してもそれほど変化は生じず、エネルギー吸収量についてはスリット孔の数は関係なく、ボルトの本数が多くなるほど良くなることがわかる。

また、スリット孔の数と基本モデルを基準としたすべり係数比の関係を図 8(b)に示す。まず、スリット孔の数が 1 つと 3 つのモデルに比べて、2 つのモデルはすべり係数が低くなっている。さらにスリット孔の数が同じモデルで比較すると、ボルト本数が増えていくにつれて、すべり係数が小さくなっており、スリット孔の数が 1 つのモデルより 2 つ、3 つのモデルの方がすべり係数の低下幅が大きくなっていることがわかる。

最後に、パラメータとして摩擦面数を 1 面にして裏当て板を設置し、その厚さを変更したモデルで解析を行った。その結果から算出した荷重変位関係および裏当て板の厚さとすべり係数の関係を図 9 に示す。また、荷重変位関係のグラフについては、すべり発生後は荷重の変化があまり見られなかったため、変位 10mm までのグラフを示す。

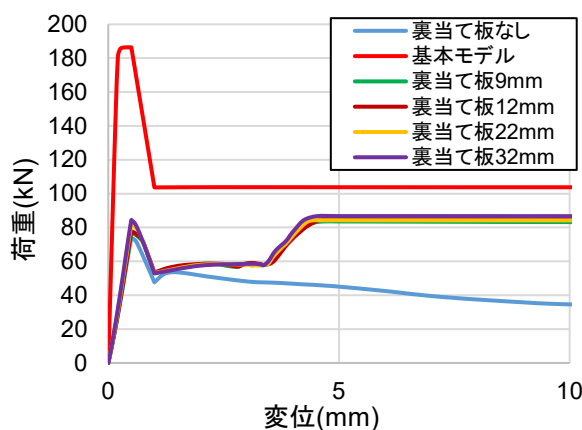


(a) 荷重-変位関係

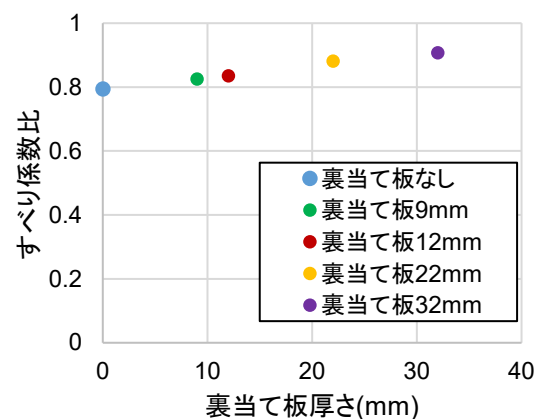


(b) すべり係数比とスリット孔数との関係

図 8 スリット孔数変更モデルの解析結果



(a) 荷重-変位関係



(b) すべり係数比と裏当て板厚との関係

図 9 1 面摩擦+裏当て板厚さ変更モデルの解析結果

図 9(a)より、摩擦面数 2 面の基本モデルと 1 面のモデルでは、荷重の大きさが大幅に変化しており、1 面の方がかなり小さくなっていることがわかる。また荷重の推移の様子も大きく異なっており、すべりが発生して荷重が 1 度低下したのち、1 面のモデルではもう一度荷重が大きくなり、その後一定となっていた。そして、摩擦面数 1 面のモデルでも、裏当て板を設置したモデルと設置していないモデルを比較すると、すべり後の挙動が大きく異なった。さらに、裏当て板の厚さが大きくなるにつれて、すべり荷重およびすべり発生後の荷重が大きくなっていることがわかる。エネルギー吸収性能を考えると、エネルギー吸収量は 2 面摩擦のモデルの方が優れているが荷重の低減率は 1 面摩擦のモデルの方が優れていることがわかる。また、摩擦面数 1 面のモデルで比較すると、荷重の低減率はそれほど変わらないが、エネルギー吸収量は裏当て板厚さが大きくなるほど増加し、すべり後は 2 面ほどではないがそれに近い大きさになることがわかる。

裏当て板の厚さと基本モデルを基準としたすべり係数比の関係を図 9(b)に示す。図 9(b)より、すべり係数の値は、摩擦面数 2 面のモデルと比べて小さくなっている。また、裏当て板なしのモデルですべり係数が最も小さく、裏当て板厚さ 32mm のモデルで最も大きくなっており、裏当て板の厚さが大きくなるほど、すべり係数も大きくなることがわかる。

4. スリット孔を有する耐震装置のパラメトリック解析

本章では、スリット孔を有する耐震装置の各種パラメータを変更し、それぞれに 2 章で説明した手法を用いて圧縮の強制変位を与える解析を行う。その結果より、耐震装置としての耐荷性能、変形性能およびエネルギー吸収性能について検討する。

(1) 基本モデルの概要と各種パラメータ

本章で行うパラメトリック解析の基本モデルの形状について説明する。まず、モデル化の際に参考にした載荷実験に用いた耐震装置の写真と概要図を図 10(a)に示す。装置は摺動部と固定部に分かれており、固定部にスリット状のボルト孔があり、裏当て板を設置している。摺動部は下フランジである連結板にリブとなる鋼板を 2 枚とウェブとなる鋼板を 1 枚設置した形状であり、固定部は上フランジである母板と下フランジとなる鋼板の間に、リブとなる鋼板を 2 枚設置した形状となっている。耐震装置に使用したボルトはサイズが M16、強度が F8T の溶融亜鉛めっきされた高力ボルトを用いており、母板と連結板の鋼板には 22mm、裏当て板には 12mm の板厚の SM490Y 材を用いた。すべり降伏耐力比は 0.104 であり、母板の降伏よりすべりが先行する装置としている。また、モデル化した装置のボルト孔は、連結板は直径 18mm、母板については直径 18mm で長さ 325mm のものとしている。

本章での解析モデル化する摩擦面処理は、実構造に採用予定の溶融亜鉛めっきままとしたもの（以下、めっきまま）を施したものを想定した。

本章で実施した解析において、大きく 2 つのパラメータを変化させた。具体的には①母板に設置する裏当て板の厚さを変更したモデル、②母板の長さを変更したモデルの 2 パターンのパラメータ変更モデルを考えた。それぞれについて具体的な説明を示す。

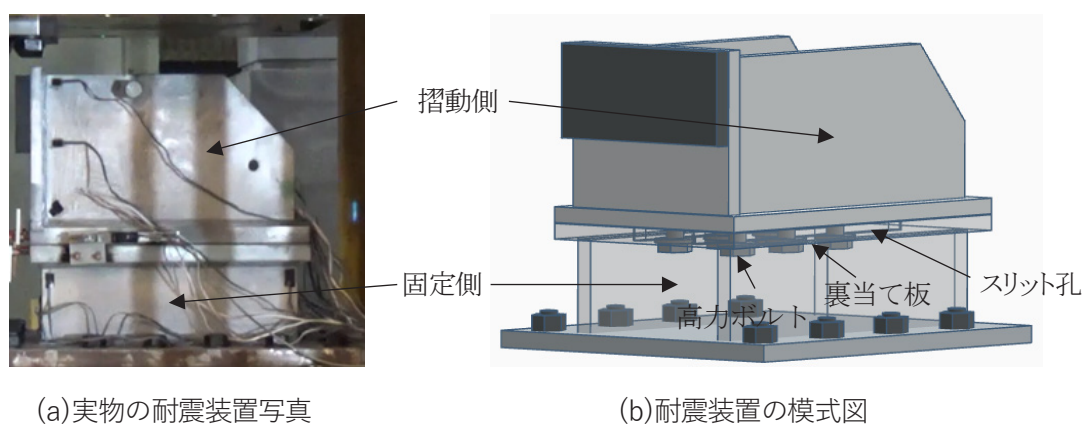


図 10 耐震装置の概要

表 5 耐震装置のパラメトリック解析のパラメータ

(a)裏当て板の板厚変更モデル

	ボルト行	ボルト列	摩擦係数	母板板厚 (mm)	連結板板厚 (mm)	板幅 (mm)	母板長さ (mm)	ボルト径 (mm)	ボルト軸力 (kN)	摩擦面	降伏点 (N/mm ²)	β	裏あて板板厚 (mm)
基本モデル													12
裏当て板厚変更モデル	2	3	0.25	22	22	232	505	16	106	1	355	0.104	9
													22
													32

(b)母材長さ変更モデル

	ボルト行	ボルト列	摩擦係数	母板板厚 (mm)	連結板板厚 (mm)	板幅 (mm)	母板長さ (mm)	ボルト径 (mm)	ボルト軸力 (kN)	摩擦面	降伏点 (N/mm ²)	β
基本モデル							505					
母板長さ変更モデル	2	3	0.25	22	22	232	395	16	106	1	355	0.104
							450					
							560					
							615					

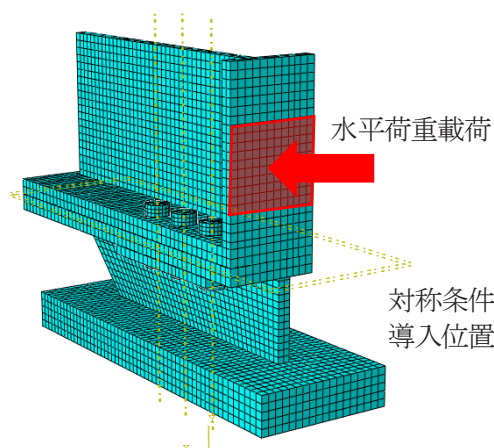


図 11 耐震装置の 1/2 有限要素解析モデル

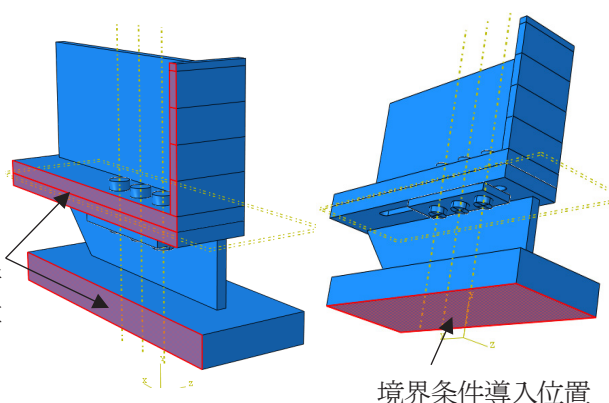


図 12 対称条件・境界条件の導入位置

・裏当て板の板厚変更モデル

基本モデルでは 12mm としていた裏当て板の厚さを変更し、装置の性能にどのような変化が生じるかを解析結果から算出する。具体的な裏当て板の厚さおよびその他の数値を表-5(a)に示す。また、ボルト行はスリット孔の数、ボルト列は 1 つのスリット孔に入るボルトの数を示している。

・母板長さ変更モデル

基本モデルでは 505mm としていた母板の長さを変更することで、装置そのものの曲げやすさに対する抵抗性が変化すると考えられ、それが性能にどのような変化が生じるかを解析結果から算出する。具体的な母板の長さとその他の数値を表-5(b)に示す。

(2) 装置のパラメトリック解析概要

解析モデルは、図 11 に示すように対称性を考慮した 1/2 モデルとし、8 節点低減積分ソリッド要素を用いた。要素サイズは、解析時間を考慮してボルトを 1 要素当たり 5mm、そのほかの部材を 10mm に分割した。図 12 に示すように対称条件を導入した部分では z 軸方向に対して拘束をし、固定部底面では全方向を完全に拘束した。材料特性も表-6 に示すように、鋼板の SM490Y 材および F8T 高力ボルトの設計値を用いた。なお、本章の解析ではボルトの座金を省略したモデルを用いている。

本解析は、2 章と同様にまずボルト軸力(106kN)を導入し、次のステップで摺動側部材の前面に水平荷重

を与える 2 段階で実施した。ボルト軸力の導入方法は 2 章と同様とした。摺動部への水平荷重は、一様な強制変位により与え、荷重値は固定部の底面における反力より求めた。強制変位量は、150mm とした。ここで、2 章で述べた手法を用いて、鋼板のすべり挙動を再現している。先に述べたように、本解析では接合面処理をめっきままとした装置を想定している。具体的な摩擦係数の値としては、初期の摩擦係数を 0.25、すべり発生後の摩擦係数を 0.15 と設定した。ここで、ステップを細かく分けて摩擦係数を変更するといった、2 章で妥当性が確認された手法を用いて、すべり挙動を表した。またその他の接触面の摩擦係数は 0.1 と設定した。強制変位載荷時の解析ステップは前章と同様とした。

(3) 装置のパラメトリック解析結果

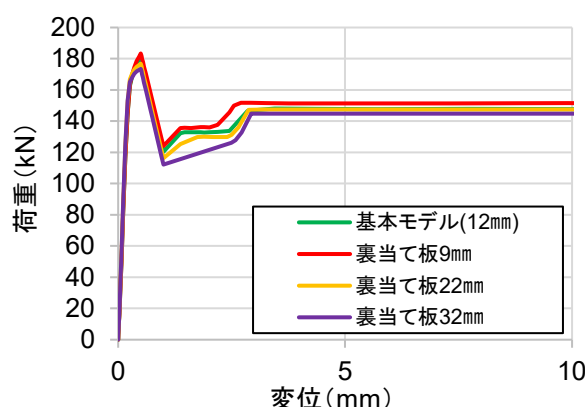
パラメータとして裏当て板の厚さを変更したモデルの解析結果として、荷重-変位関係を図 13(a)に示す。変位 10mm 以降は特に荷重の変化が見られなかったため、変位 10mm までのグラフを示す。

図 13(a)より、すべり発生時の荷重に着目すると、裏当て板の厚さが大きくなるにつれて、すべり荷重が低下していることがわかる。また、すべり発生後の荷重の上昇を見ると、基本モデル(裏当て板厚さ 12mm)の荷重を裏当て板厚さ 22mm モデルの荷重が上回ることがわかる。その後、荷重が一定となる際には裏当て板厚さ 9mm モデルが最も荷重が大きく、裏当て板厚さ 32mm モデルが最も小さくなり、すべり荷重と同様に裏当て板が厚くなるにつれて、荷重が小さくなることがわかる。また、エネルギー吸収性能については、めっきままの摩擦面処理を施した装置であることを考慮して、エネルギーの吸収力を荷重変位関係の線と横軸の間の面積で評価する。エネルギー吸収量を見ると、裏当て板厚さが薄いほど優れていることがわかる。

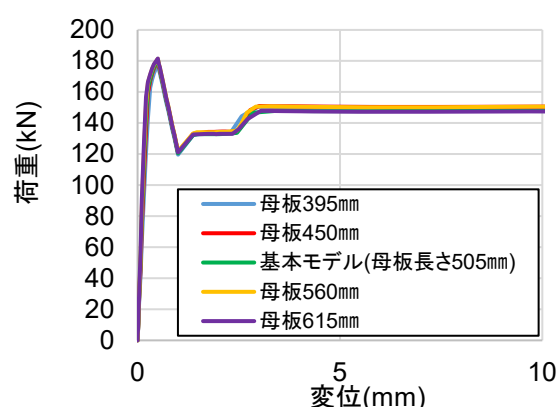
また、継手のパラメトリック解析では裏当て板が厚いモデルで荷重が大きくなっていたが、耐震装置のパラメトリック解析では裏当て板が薄いモデルで荷重が小さくなっていた。耐震装置も継手と同様に裏当て板を厚くすることで、荷重が大きくなると予想したが異なる結果となった。2 つのモデルの違いに着目すると、継手では裏当て板を薄くすることで全体的に曲げ変形が生じていたが、耐震装置では裏当て板 9mm のモデルでもこのような変形は確認できなかった。よって、継手と耐震装置の解析結果における違いは、モデル全体で生じる曲げ変形によるものと考えられる。

パラメータとして母板長さを変更したモデルの解析結果として、荷重-変位関係を図 13(b)に示す。変位 10mm 以降は特に荷重の変化が見られなかったため、変位 10mm までのグラフを示す。

図 13(b)より、すべり荷重については、母板長さが長いモデルほどわずかに大きくなっている。さらに、すべり発生後に荷重が一定となるまでもほぼ同様の挙動をなっていることがわかる。荷重が一定となつてからは、基本モデル、母板 395mm モデルおよび母板 615mm モデルはほぼ同じ大きさの荷重となっていたが、母板 450mm および母板 560mm モデルの 2 つは少し荷重が大きくなっていた。エネルギー吸収性能に関しては、母板 450mm モデルおよび母板 560mm モデルでエネルギー吸収量が多くなっていることがわかる。また、すべり荷重についてはパラメータである母板長さとの相関が見られたが、荷重が一定となつてからは相関が見られなかった。



(a) 裏当て板厚変化モデル



(b) 母板長さ変化モデル

図 13 荷重-変位関係

5. まとめ

本研究は、スリット孔を有した高力ボルト摩擦接合継手および耐震装置に対してパラメトリック解析を行い、耐荷性能、変形性能およびエネルギー吸収性能に対してどのような影響を及ぼすか検討した。以下に本研究で得られた内容をまとめる。

- 1) 継手モデルにおいて、母板および連結板の板厚・板幅を変えてすべり降伏耐力比 β を変更したモデルの解析より、 β を大きくすることで荷重の値が小さくなり、同じ β でも板厚が大きいモデルの方で荷重が大きくなるとわかった。これは、連結板の食い込みによるボルト軸力の低下と連結板の曲げ変形が原因と考えられる。
- 2) 継手モデルにおいて、 β を大きくすることで、すべり係数が低下していた。板厚が大きいモデルでは標準孔における β とすべり係数比の回帰直線を少し下回る挙動となった。また、板厚が小さいモデルではその傾向がさらに顕著となった。
- 3) 継手モデルにおいて、ボルト本数変更モデルおよびスリット孔の数変更モデルからは、ボルトの本数に比例して荷重が大きくなり、スリット孔の数や配置はそれほど影響しないことがわかった。
- 4) 装置モデルにおいて、裏当て板の厚さを変更したモデルの解析から、裏当て板を薄くすることで初期すべり荷重とその後の荷重は大きくなることがわかった。すなわち、エネルギー吸収量も裏当て板が薄い方が大きくなることがわかった。これは、裏当て板が薄い場合、ボルトが裏当て板に食い込むように変形することで、裏当て板を介して母板や連結板に面外力が生じ、母板と連結板の接触圧が局所的に大きくなることが原因と考えられる。
- 5) 装置モデルにおいて、母板の長さ変更モデルからは、初期すべり荷重は母板が長いほど大きくなることがわかった。これは、母板の長さが長いほどすべり面の接触面積が大きくなることが原因と考えられる。すべり発生後の荷重については、パラメータである母板長さと相関が見られなかった。

参考文献

- 1) 張広鋒, 蔵治賢太郎, 和田新, 右高裕二, 大住圭太: 地震による損傷を制御可能な新型橋梁用支承サイドブロックの研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 74, No. 2, pp. 214-228, 2018
- 2) Samim Mustafa, Chitoshi Miki, Design of Rupture Strength of Side Blocks in Elevated Steel Girder Bridges with Elastomeric Bearings, International Journal of Steel Structures, Vol.20, pp.885-896, 2020
- 3) Kazyuyuki Ishihara, Masahide Matumura, Masahiko Yoshida, Knock-off Effect of Steel Side Block as Displacement Restrainers on Dynamic Response of Isolated Bridge Structure, Procedia Engineering, Vol.14, pp.2341-2349, 2011
- 4) 内田大介, 濱達矢, 関根英人, 拡大孔・長孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数低減に関する研究, 土木学会論文集, Vol.78, No.1, pp.34-46, 2022
- 5) 二宮僚, 小林祐介, 山崎信宏, 橋本国太郎, エネルギー吸収能に着目したスリット形状のボルト孔を有する高力ボルト摩擦接合継手, 構造工学論文集, Vol.70A, pp. 599-612, 2024
- 6) 二宮僚, 小林裕介, 山崎信弘, 橋本国太郎: スリット孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のエネルギー吸収能に関する研究, 鋼構造論文集, Vol.32, No.128, pp.97-110, 2025
- 7) 山口隆司, 森猛, 橋本国太郎, 北田俊行: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり強度/降伏強度比とすべり係数に関する検討, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1737-1748, 2005.

筆者: 1) 橋本国太郎、都市安全研究センター、准教授 ; 2) 二宮 僚、大学院工学研究科、後期博士課程;
3) 大久保 佑紀、研究時・大学院工学研究科、前期博士課程

Mechanical behavior of seismic equipment with slit-hole high-strength bolt friction joints

Kunitaro Hashimoto
Ryo Ninomiya
Yuki Okubo

Abstract

In recent years, large-scale earthquakes have occurred, and there is concern that a Nankai Trough earthquake may occur in the future. In this context, seismic reinforcement of existing structures is considered important because it is sometimes difficult for existing structures to fully resist Level 2 earthquakes due to insufficient bearing capacity and larger reinforcing members to be installed. Therefore, existing structures have been reinforced with movement limiting devices to cope with Level 1 earthquakes and bridge fall prevention devices to cope with Level 2 earthquakes. However, in the event of an earthquake of a magnitude exceeding that of a level 1 earthquake, large girder deflections may occur, reducing the safety of the structure and the ability to restore it. In response to this problem, there is a need to develop a low-cost seismic device that can ensure high safety, seismic resistance, and recoverability. The proposed seismic device consists of a steel movement restricting device with an additional high-strength bolt friction joint. Specifically, slit holes are provided in the joints, and the joints slide under load to absorb energy during earthquakes and restrain displacement. However, little research has been conducted on the sliding behavior of slit holes in high-strength bolt friction joints, and the effect on the sliding behavior of joint components is not known.

Therefore, in this study, the load carrying capacity, deformability, and energy absorption performance of high-strength bolt friction joints and seismic devices with sliding deformation due to friction joints are investigated, and the changes that occur when the geometry of the joints and devices is changed are examined mainly through FE analysis.

©2026 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.