



ポリエチレン管およびその継手の力学挙動に関する研究

時吉, 充亮

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2023-03-25

(Date of Publication)

2024-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8664号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482412>

※ 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

ポリエチレン管およびその継手の力学挙動に関する研究

2023 年 1 月

神戸大学大学院農学研究科

時 吉 充 亮

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 我が国の水利用の概況と農業用水管材の特徴.....	1
1.1.2 泥炭地における農業用水管路の不同沈下の実態.....	3
1.1.3 我が国におけるポリエチレン管の普及と耐震性について	5
1.2 既往研究	9
1.2.1 農業用パイプラインの事故事例の調査研究.....	9
1.2.2 農業用パイプラインの屈曲部のスラスト対策に関する研究.....	10
1.2.3 ガラス繊維強化ポリエチレン管の既往研究.....	12
1.3 研究目的	14
1.4 本論文の構成	16
第2章 曲線配管されたポリエチレン管の力学特性に関する検討.....	23
2.1 概説	23
2.2 実験概要	24
2.2.1 内圧負荷	27
2.2.2 繰返し内圧負荷.....	28
2.2.3 局所荷重負荷.....	29
2.2.4 計測	31
2.3 結果および考察.....	33
2.3.1 内圧負荷	33
2.3.2 繰返し内圧負荷.....	38
2.3.3 局所荷重負荷.....	41
2.4 まとめ	43
第3章 ガラス繊維強化ポリエチレン管の配向角と力学特性の関係.....	47
3.1 概説	47
3.2 供給材料と成形方法.....	48
3.2.1 供給材料と実験のケース.....	48
3.2.2 成形方法	48
3.2.3 引張試験	50
3.3 X線 CT を用いた配向解析	52
3.3.1 配向角マッピング.....	52
3.3.2 配向角ヒストグラム.....	54
3.3.3 引張弾性率の推定.....	56
3.4 まとめ	59

第4章 ガラス繊維強化ポリエチレン管の力学特性に関する検討	63
4.1 概説	63
4.2 実験方法	64
4.2.1 実験概要	64
4.2.2 供試管	66
4.2.3 計測	68
4.3 結果および考察	71
4.3.1 水平変位量と荷重の結果	71
4.3.2 ひずみの結果	72
4.3.3 考察	75
4.4 まとめ	79
第5章 ガラス繊維強化ポリエチレン管継手の力学特性に関する検討	83
5.1 概説	83
5.2 実験方法	84
5.2.1 実験概要	84
5.2.2 供試管	87
5.2.3 計測	88
5.3 結果および考察	92
5.3.1 水平変位量と荷重の結果	92
5.3.2 ひずみの結果	93
5.3.3 考察	96
5.4 まとめ	103
第6章 結論	105
6.1 結論	105
6.2 今後の展望	109
謝辞	111
本研究に関する公表論文	114

図一覧

Fig. 1-1	全国の水使用量.....	1
Fig. 1-2	全世界と北海道の泥炭地分布.....	3
Fig. 1-3	上水道・水道用水供給事業の管種別管路構成比の推移.....	5
Fig. 1-4	管種・継手と被害率との関係（阪神・淡路大震災，新潟中越地震）.....	6
Fig. 1-5	全国のポリエチレン樹脂製ガス導管の使用実績.....	7
Fig. 1-6	農業水利施設の突発事故発生状況.....	9
Fig. 1-7	管周方向と管軸方向の剛性指標.....	12
Fig. 2-1	管と継手.....	25
Fig. 2-2	実験管路の平面図と計測断面図.....	26
Fig. 2-3	曲線区間の構築方法.....	26
Fig. 2-4	粒度分布（霞ヶ浦砂）.....	27
Fig. 2-5	実験管路の全景.....	28
Fig. 2-6	圧力計とフランジ部.....	28
Fig. 2-7	内圧負荷装置.....	29
Fig. 2-8	内圧負荷サイクルの条件.....	29
Fig. 2-9	背面地盤の掘削平面図と断面図.....	30
Fig. 2-10	上載荷重の負荷状況.....	30
Fig. 2-11	上載荷重負荷の平面図と断面図.....	31
Fig. 2-12	水平方向移動量計測断面.....	32
Fig. 2-13	ひずみゲージおよび土圧計の設置位置.....	32
Fig. 2-14	鉛直および水平たわみ計測方法.....	32
Fig. 2-15	水平方向移動量と内圧の変化.....	34
Fig. 2-16	内圧と土圧.....	34
Fig. 2-17	土圧投影面積（A1～A5）.....	35
Fig. 2-18	管周方向ひずみの変化.....	37
Fig. 2-19	管軸方向ひずみの変化.....	37
Fig. 2-20	水平方向移動量の変化.....	38
Fig. 2-21	土圧の変化.....	39
Fig. 2-22	管周と管軸ひずみの分布.....	40
Fig. 2-23	内圧と土圧の経時変化.....	42
Fig. 2-24	管内面たわみ率の経時変化.....	42
Fig. 3-1	2軸押出成形機の概略図.....	49
Fig. 3-2	配向角の定義.....	49
Fig. 3-3	PE-GF 管のクロスワインディング法.....	50
Fig. 3-4	引張試験.....	50

Fig. 3-5	2 軸押出成形法による試験片の引張応力とひずみの関係	51
Fig. 3-6	クロスワインディング法による試験片の引張応力とひずみの関係	51
Fig. 3-7	2 軸押出成形法の配向角マッピング	53
Fig. 3-8	クロスワインディング法の配向角マッピング	54
Fig. 3-9	2 軸押出成形法とクロスワインディング法の配向角ヒストグラム	55
Fig. 3-10	成形角 θ	58
Fig. 3-11	引張弾性率と成形角の関係	59
Fig. 4-1	実験の概略図	65
Fig. 4-2	実験管路断面図	67
Fig. 4-3	ガラス繊維の様子	67
Fig. 4-4	ひずみ計測点の配置	70
Fig. 4-5	曲げ特性試験の様子	70
Fig. 4-6	管路の水平変位量の時系列変化	71
Fig. 4-7	管路の水平変位量と荷重	72
Fig. 4-8	管軸ひずみゲージの計測点	73
Fig. 4-9	管軸ひずみ	73
Fig. 4-10	管周ひずみと管軸ひずみの比較	74
Fig. 4-11	発生ひずみと水平変位量の関係	75
Fig. 4-12	60D の実測値と計算値の比較	76
Fig. 4-13	管軸ひずみと水平変位量の関係	77
Fig. 4-14	管周/管軸ひずみの割合と水平変位量の関係	78
Fig. 4-15	計算ひずみと実測ひずみの関係	79
Fig. 5-1	実験の概略図	85
Fig. 5-2	実験管路断面図	87
Fig. 5-3	ひずみ計測点の配置	90
Fig. 5-4	クリップ型隙間ゲージの計測位置	91
Fig. 5-5	曲げ特性試験の様子	91
Fig. 5-6	管路の水平変位量の時系列変化	92
Fig. 5-7	供試管路の水平変位量と荷重	93
Fig. 5-8	EF 継手の管軸方向ひずみ計測点	94
Fig. 5-9	管軸方向ひずみ	94
Fig. 5-10	管周方向ひずみと管軸方向ひずみ比較	95
Fig. 5-11	計算曲率と実測曲率の関係	96
Fig. 5-12	継手の隙間と水平変位量の関係	97
Fig. 5-13	継手の終局点	97

Fig. 5-14	EF 継手のモーメント方向	98
Fig. 5-15	EF 継手の開き量	99
Fig. 5-16	管軸ひずみと水平変位量の関係	100
Fig. 5-17	EF 継手差口側 (No.21) ひずみと水平変位量の関係.....	102
Fig. 5-18	EF 継手受口側 (No.23) ひずみと水平変位量の関係.....	102

表一覧

Table 1-1	農業用水管材の開発時期と機能性（特徴）	2
Table 2-1	埋戻し土（霞ヶ浦砂）の特性.....	27
Table 2-2	測定土圧と発生スラスト力（1 回目）	35
Table 2-3	測定土圧と発生スラスト力（500 回目）	40
Table 3-1	実験のケース	48
Table 3-2	方法 1 および方法 2 の引張降伏応力とひずみ関係.....	52
Table 3-3	PE-GF 管の材料物性値	57
Table 3-4	PE-GF 管の口径と成形角ならびに力学特性.....	58
Table 4-1	実験のケース	66
Table 4-2	PE-GF 管の設計諸元	68
Table 4-3	バット融着条件	68
Table 4-4	計測項目	69
Table 5-1	実験のケース	86
Table 5-2	PE-GF 管の設計諸元	88
Table 5-3	バット融着継手条件	88
Table 5-4	EF 継手条件.....	88
Table 5-5	計測項目	89
Table 5-6	ピーリング試験結果	99

第1章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 我が国の水利用の概況と農業用水管材の特徴

持続可能な社会環境が形成されるために、水は欠かすことができない貴重な資源であり、その輸送手段が生活の基盤を改善させてきたと言っても過言ではない。Fig. 1-1 は、国土交通省（2021）によって我が国の用途別水使用の状況を年度別にまとめたものである。全国の水使用量は、1990 年から 1995 年頃をピークに減少傾向にあるが、2018 年（平成 30 年）の水使用量合計は、約 800 億 m^3 /年で、そのうち農業用水の利用は、依然として高く、約 535 億 m^3 /年と全体の 67%に及んでいる。農業用水を輸送する方法は、我が国の洪水や干ばつなど厳しい自然に適応するため、いわゆる「かんがい事業」が発達し、ため池構築、開水路の

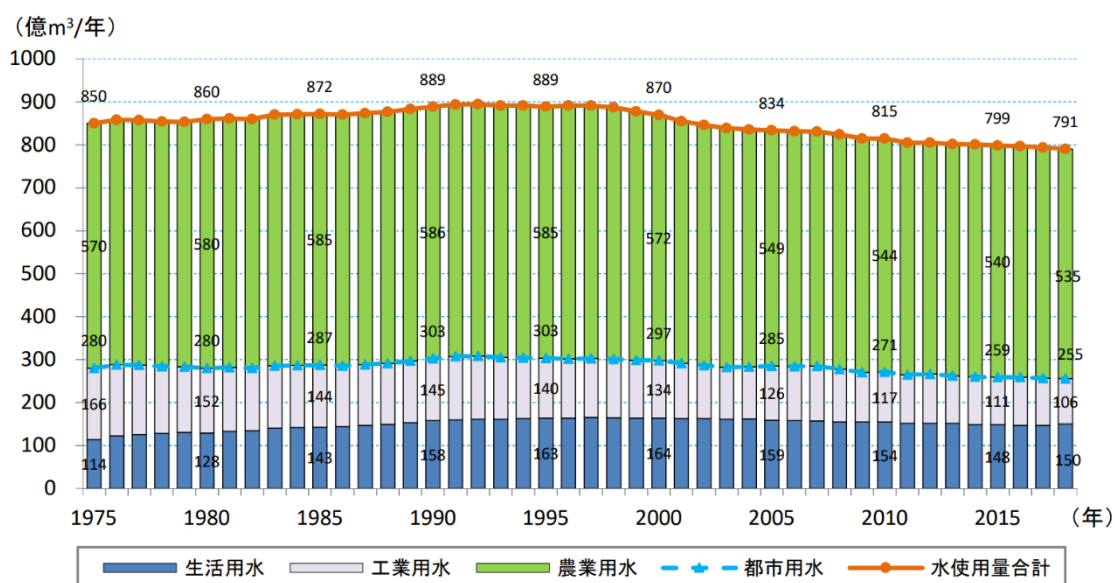


Fig. 1-1 全国の水使用量
Water consumption amount of Japan

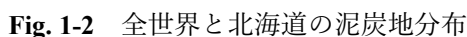
整備，配水，送水の監視システム，パイプラインへと変化を遂げた（坂本，1980 および農村振興局整備部水資源課，2012）．そして，佐藤（1997），花田（2021）が示したように，私たちが共有しなければならない水という財産を公平に分配するために，水利秩序を保ちながら進められてきた変遷がうかがえる．農業用パイプラインの管材は，新管種の開発，在来管種の改良による安全性・機能性・経済性の向上に伴って増加し，役割も広がってきた．農林水産省農村振興局（2021）の土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」（以下，設計基準「パイプライン」という）によると，管材は以下の 8 種類の選択肢の中から安全性，機能性（特徴）（Table 1-1）および経済性等を勘案し採択されている．

Table 1-1 農業用水管材の開発時期と機能性（特徴）
Development terms and characteristics of agricultural pipeline

管種	開発時期	機能性（特徴）
ダクタイル鋳鉄管 (DCI 管)	1954 年	内外圧の高い管路，軟弱地盤の管路などに用いられることが多い．
鋼管 (SP 管)	1913 年	内外圧の大きい管路，軟弱地盤等の管路に用いられることが多い．また溶接による一体構造管路を形成するため，水密性に優れるとともにスラストブロックが不要である．
遠心力鉄筋コンクリート管 (RC 管)	1910 年	農水パイプラインにはソケットを付けてゴム輪により接合される継手が一般的である．大きな圧力がかかるパイプラインは逐次 P C 管に置き換えられている．
硬質ポリ塩化ビニル管 (PVC 管)	1936 年	非腐食性であり，施工性がよいほか小口径管では経済性に優れているため，配水系のパイプライン等で使用されている．
コア式プレストレスト コンクリート管 (PC 管)	1956 年	農業用水路のサイホン系に使用され始め，逐次パイプラインへの採用もされるようになった．
ポリエチレン管 (PE 管)	1942 年	水道配水用として，高強度・高密度の樹脂材料を使用した管，継手が開発された．継手には，溶着接合，電気融着接合，メカニカル接合がある．
強化プラスチック複合管 (FRPM 管)	1964 年	施工性に優れ，耐食性，耐摩耗性，耐電食性，耐衝撃性等が大きく，また管内面は滑らかで水利性に優れている．
ガラス繊維強化ポリ エチレン管 (PE-GF 管)	2008 年	高密度ポリエチレン樹脂にガラス繊維を添加して製造され，管周方向に潰れない高剛性と管軸方向に曲がる弾力性をもつ管である．

農業用水管路は、社会資本形成のため線形や経済性の観点から泥炭地のような軟弱地盤に布設される事がある（北海道農業試験場，1969）．泥炭地は、植物が過湿・低温条件で未分解のまま堆積した土地で，Xu et al.（2018）によると，地球上には，延べ 423 万 km²にわたって泥炭地が点在しており，北海道には，総面積 20 万ヘクタールにおよぶ泥炭地が分布している（**Fig.1-2**，五十嵐，1986）．

横地ら（2022）は、布設後 10 年以上が経過した泥炭地の農業用水管路（FRPM 管）を対象に、縦断的な埋設状況を調査し、不同沈下の定量的な評価を行った。調査は、石狩川下流



3

域の月形町，新篠津村，当別町，江別市にまたがる石狩泥炭地内，篠津泥炭地に布設された管路を対象に実施された．その結果，平均の管体沈下量は 20.7cm で，最も管体沈下量が大きかった区間では 44.1cm の沈下が見られたと報告されている．農林水産省農村振興局制定の土木工事施工管理基準による出来形管理値は，管水路の基準値±20mm に定められていることから，上記の沈下は，竣工後に生じたと考えられる．

以上のように，北海道を中心に広がる泥炭地では，局所的な不同沈下が生じるため，管路の布設には有効な沈下対策もしくは，沈下を吸収できる管路構造が求められる．

1.1.3 我が国におけるポリエチレン管の普及と耐震性について

ポリエチレン管（以下、PE 管という）は、厚生労働省が所轄管掌する上水道の管路材に採択されるケースが増加している。Fig. 1-3 は、公益社団法人日本水道協会発行の水道統計総論が示した上水道・水道用水供給事業の管種別管路構成比の推移である。

高度経済成長期に「錆びない」「安い」水道管材料として広く使われた石綿セメント管は、昭和 30 年～40 年頃をピークに管材強度の問題から布設替が進められ、健康面での問題発覚後製造・使用が禁止され、現在ではダクタイル鋳鉄管、硬質ポリ塩化ビニル管および PE 管といった管材料が主流であることがわかる。PE 管の使用が増加した理由の 1 つとして我が国に頻発する地震がある。

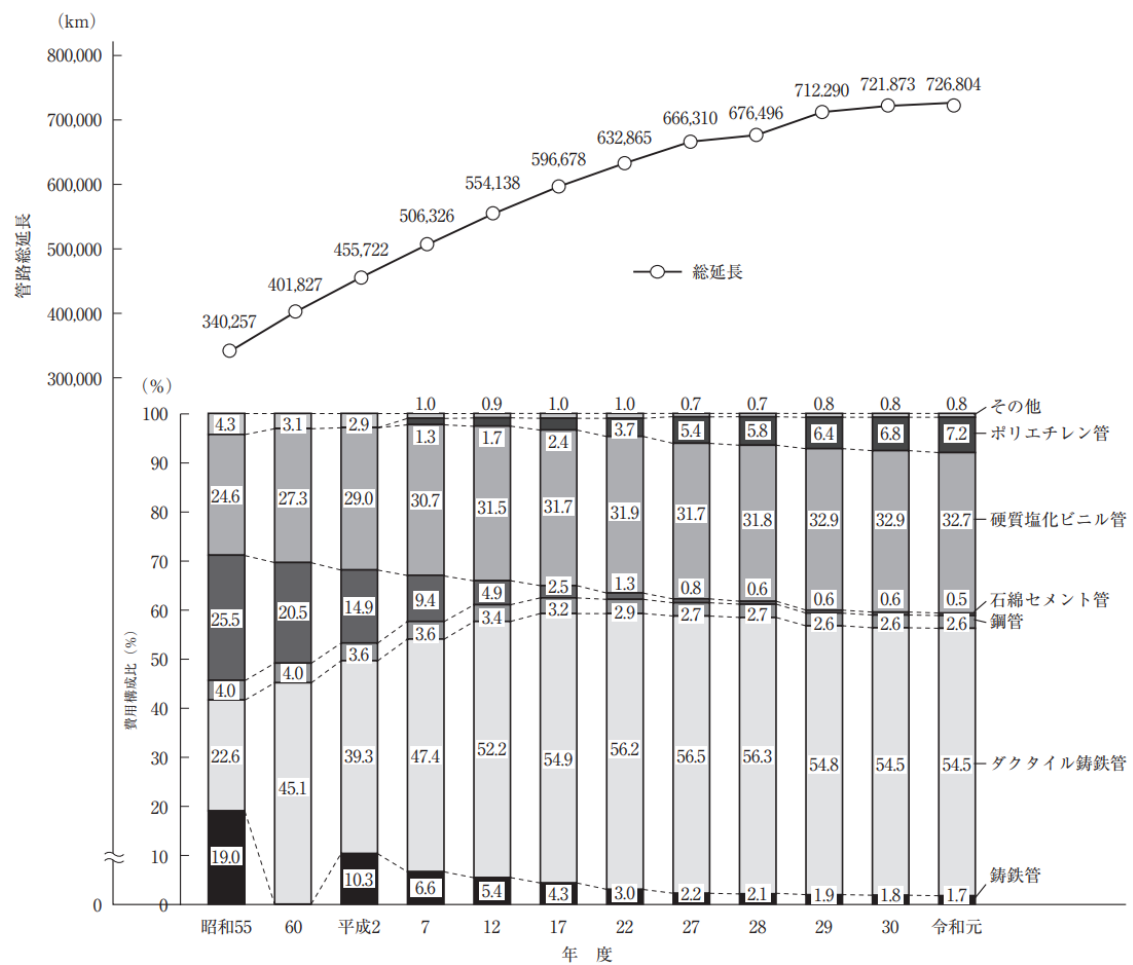


Fig. 1-3 上水道・水道用水供給事業の管種別管路構成比の推移

Trend of component ratio by kinds of pipes about waterworks and TAP water supply business

1995 年 1 月 17 日の阪神淡路大震災，2004 年 10 月 23 日の新潟県中越地震，2011 年 3 月 11 日の東日本大震災，2016 年 4 月 14 日の熊本地震（土木学会，2016），そして 2018 年 9 月 6 日の北海道胆振東部地震（土木学会，2018）などライフラインに影響した地震の記録は，上げれば枚挙にいとまがない．

Fig. 1-4 に，阪神・淡路大震災，新潟中越地震の管種・継手と被害率の関係を示す（厚生労働省，2007）．**Fig. 1-4** より，石綿セメント管の被害率が最も高く，続いて硬質塩化ビニル管，铸铁管の順に高い結果となった．PE 管の被災事例は，極めて少なく阪神淡路大震災では，厚生労働省が把握する水道管に不具合はなかった．同報告書には，ガスパ管の被災も掲載されていたが，PE 管の事故事例はなく，PE 管の耐震性の高さが明らかとなった．

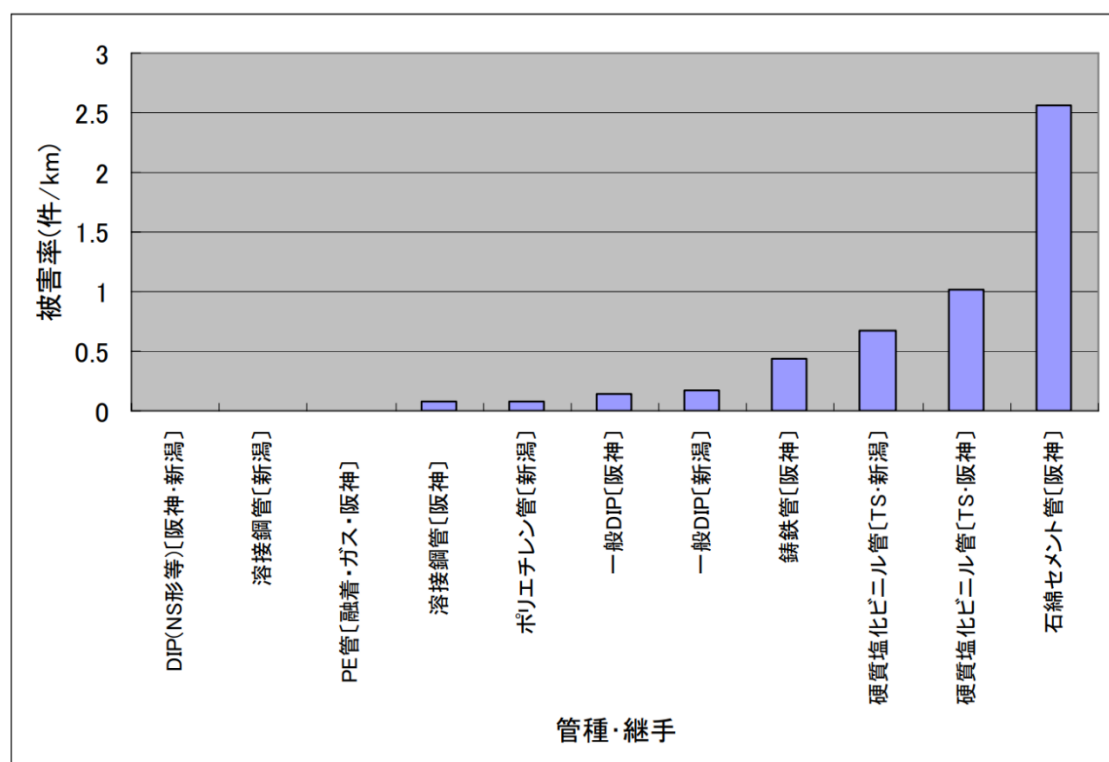


Fig. 1-4 管種・継手と被害率との関係（阪神・淡路大震災，新潟中越地震）

Relationship with each type of pipe / fittings and damage ratio

(The great Hanshin Awaji Earthquake, Niigata-ken Chuetsu-Oki Earthquake)

PE 管は、いわゆるポリエチレン樹脂を原料として製造されるが、ポリエチレン樹脂が汎用的に製造されるようになったのは 1970 年代である（永井, 2007）。1942 年のイギリスにおいて世界で初めて PE 管が製造され、遅れること 16 年後の 1958 年に日本でも PE 管の製造が開始された。いずれの年代から見ても PE 管の歴史は他の管材に比べて浅い。一方、PE 管の規格に視点を置くと、一般用の PE 管（日本工業規格, 2017）として 1956 年に、水道用のポリエチレン二層管（日本工業規格, 2019）として 1959 年に制定されたものがある。さらに、ガス用 PE 管（日本産業規格, 2022a, 2022b, 2022c, 2022d）としては、1979 年 3 月に制定されており、1982 年 11 月にはガス事業法の技術基準に低圧ガス導管の材料として PE 管が制定されている。

その後、全国の PE 製導管（本支供管を含むガス用 PE 管）の使用実績が報告されている（Fig. 1-5, 西村ら, 2005, 2006）。この報告によると、1995 年の阪神・淡路大震災を機に PE 管の使用量が急増しているが、このことは先に述べた通り PE 管の耐震性が高いことが理由として考えられる。また、鋤田ら（2013）は、2011 年の東日本大震災後、宮城県北西部の管路被害状況の調査をまとめている。宮城県北西部の栗原市、大崎市、美里町、松島町および

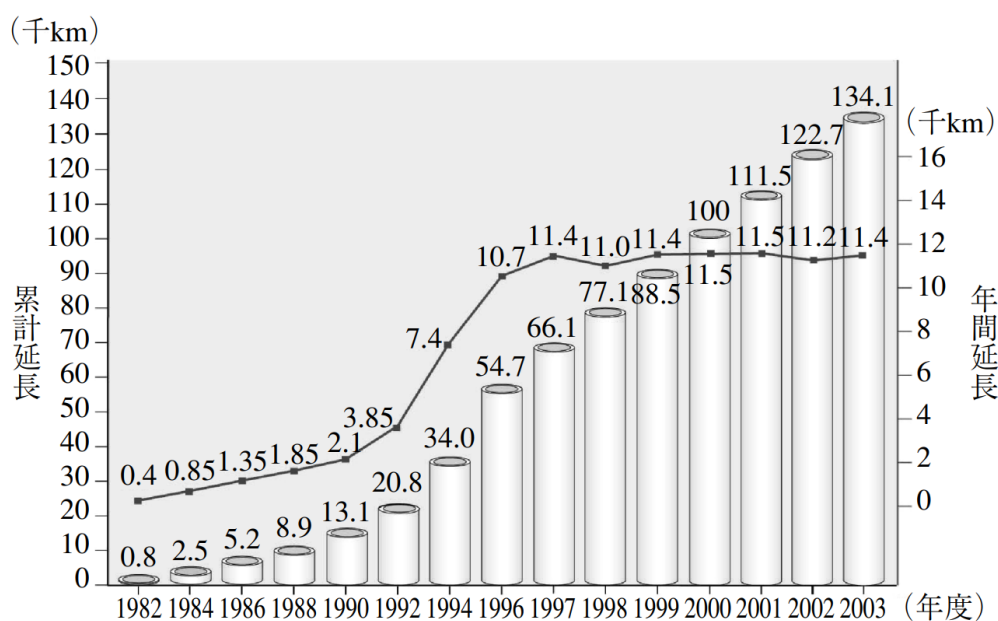


Fig. 1-5 全国のポリエチレン樹脂製ガス導管の使用実績

Usage results of polyethylene gas pipe of Japan

塩竈市において、配水管総延長 2,183km に対し被害件数は 684 件であった。管路への被害が甚大であった中、PE 管の継手には被害が見られなかった。

このように PE 管は、軽量で可とう性に優れた材料であることから、耐震性があり、併せて、電気融着という継手接続方式によって継手を一体化できる方法が、地震に対しても有効性があると確認された。よって、我が国に頻発する地震によって大きな被害が出なかった PE 管がガス管としても広く採用されるようになった背景が理解できる。農業用パイプラインにおいても、PE 管が持つ柔軟性が地盤沈下への追従性を発揮し、とりわけ、北海道石狩地方に点在するような泥炭性軟弱地盤では、その適用が拡大している。

1.2 既往研究

農業用パイプラインの事故事例や管路設計における課題については、我が国の災害の歴史とともに明らかにされてきたと推察される。ここでは、それらの事故調査に加えて、農業用パイプライン設計に関する研究や、本研究で扱われる PE 管の新たな管材開発について示す。

1.2.1 農業用パイプラインの事故事例の調査研究

農業用水利施設の老朽化は、施設の破損や漏水等の突発事故として顕在化するが、（農林水産省(2014), **Fig. 1-6**), 室本 (2011) によると工種毎の突発事故発生件数は、農業用パイプラインが実に 70%を占めており、その割合は年々高まっている。稲垣 (2019) は今後、水田の畑地化や水路のパイプライン化が推進されると、30～40 年経過後にも新たに施工された農業用パイプラインに突発事故が生じる可能性があるとしている。

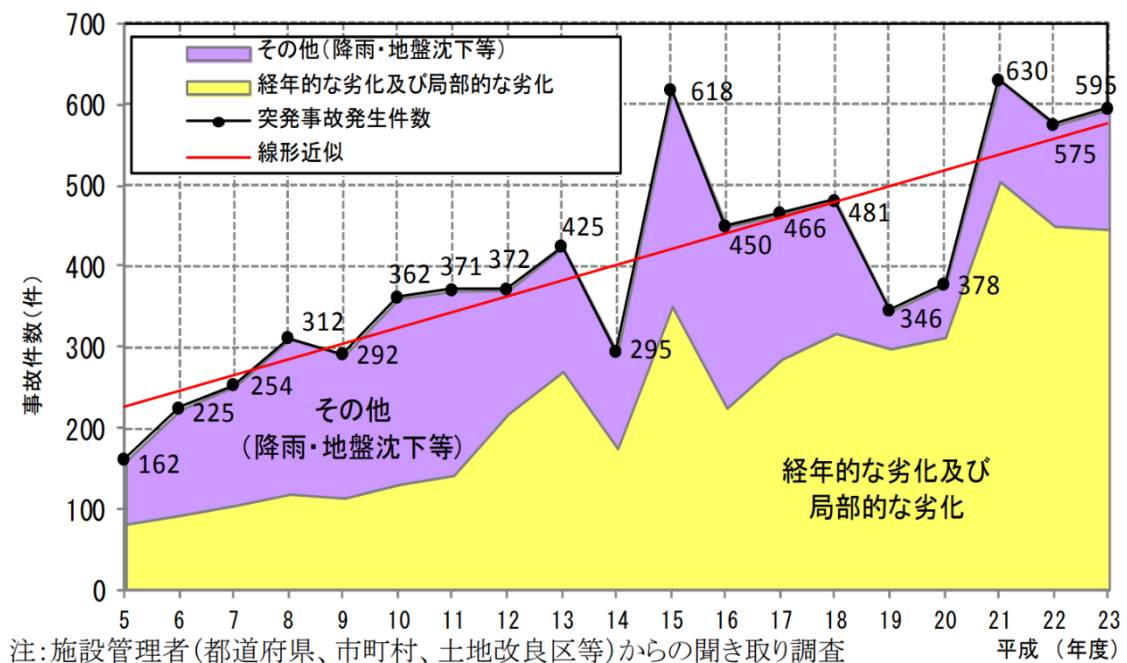


Fig. 1-6 農業水利施設の突発事故発生状況

Unexpected accidents of irrigation facilities

そこで、事故の事例・内容に着目して既往の研究を振り返ると、井谷ら（2015b）は、パイプラインの事故事例のうち管種毎の事故発生頻度を分析した結果をまとめている。調査の対象としたパイプラインの総延長は、約 316.5km で、管種はダクタイル鋳鉄管（DCIP）、FRPM 管、プレストレストコンクリート管（PC）、鋼管（SP）、石綿管（ACP）、塩化ビニル管（PVC）の 6 種類で構成されている。本調査の結果では、ダクタイル鋳鉄管や鋼管の事故は発生しておらず、相対的に事故発生頻度が低かった。

一方で、FRPM 管の事故発生頻度（事故率 0.010 件/km/年）は、プレストレストコンクリート管（事故率 0.011 件/km/年）や石綿管（事故率 0.006 件/km/年）と同程度であった。事故が発生する箇所は継手部が多いため、パイプラインは継手を中心とした改善が期待されている。また、事故事例に見られる特徴として毛利（1985）、安中ら（1996）、有吉ら（2012）および春本ら（2015）が、パイプラインの屈曲部、スラストブロック際の管の継手が大きく抜け出すなどスラストブロック近傍に、より多くの問題がある点を挙げている。土木学会（2018）の北海道胆振東部地震の被害調査報告書でも曲管部の継ぎ手離脱は、64 箇所に及んでいると報告されている。

1.2.2 農業用パイプラインの屈曲部のスラスト対策に関する研究

設計基準「パイプライン」（農林水産省農村振興局，2021）によると、パイプラインの曲管部にはその屈曲角度と内圧の大きさに応じたスラスト力が作用し、スラスト力に抵抗する曲管背面の受働土圧の大きさからスラスト対策構造物の要否を決定する必要が示されている。

毛利（1996）は、液状化を模擬した地盤中で継手構造管路を対象とした水平載荷実験と、数値解析を実施し、曲管部を含む継手構造管路の力学的挙動を検証した。その結果、コンクリート防護によってスラスト力に抵抗する従来の構造は、大きな内圧に対しても有効に作用し、スラストブロックの移動量を小さく抑えることを実証した。しかしながら、剛構造で

あるスラストブロックと管路の近傍は、地震時のウィークポイントになることが報告されている (Mohri et al, 1995)。

河端ら (2011) は、塩化ビニル管の曲管部を含む埋設模型管路を対象に実規模振動台実験を行い、従来工法であるスラストブロックを用いたモデルと砕石およびジオグリッドを用いたスラスト対策モデルの動的挙動ならびに、各工法の優位性を検討した。その結果、管路として機能性を失うほど砂地盤が液状化した状態であっても、砕石部分は液状化せず、ジオグリッドの引抜き抵抗も発揮され、スラスト対策としての効果を明らかにした。しかし、この工法の具体的な設計手法は確立されていない。

それらの課題から、農林水産省は直管の継手性能を利用し、継手伸縮による曲げ配管を構築する検討を行ってきた。その結果、農林水産省は「官民連携新技術研究開発事業 (H15～H17)」を通して FRPM 管を用いた曲げ配管工法を開発した。加えて、井谷ら (2015a, 2016) は、ダクタイル鋳鉄管による継手の離脱防止機能がついた鎖構造管路の屈曲部を対象とした実験ならびに解析を実施し、その挙動を検証した。その結果、スラストブロックがなくとも改善された継手構造を用いて有効に機能する曲線配管工法を提案した。

以上のように、農業用パイプライン屈曲部の課題解決に対して、ダクタイル鋳鉄管および FRPM 管では、対策工法の研究がなされてきた。PE 管などの樹脂製管についても、農業用水分野の採用を益々増やすためにはスラストブロックを要しない配管工法の研究開発が求められる。そこで本論文では、農業用パイプラインの屈曲部対策として、スラストブロックを必要としない曲線配管工法を検討する。

1.2.3 ガラス繊維強化ポリエチレン管の既往研究

設計基準「パイプライン」（農林水産省農村振興局，2021）によると，農業用パイプラインは，土圧による管の変形によって，不とう性管であるコンクリート管と，とう性管である其他管材に大別される．とう性管であるガラス繊維強化ポリエチレン管（以下，PE-GF 管という）は，他管と同様，地形条件，土質条件，水理条件および施工条件等を想定して，耐震設計のほかに縦断方向および横断方向の設計がなされる．管の縦断設計は，土圧，内圧など管の周方向に作用する影響を考慮し，設計がなされる．また，管の横断方向の設計は，管に同時に働く内外圧の複合作用について検討し，管底部に生じる最大曲げモーメントから計算される曲げ応力が材料特有の許容応力度よりも小さいことを確認する．いずれも負荷条件や荷重作用方向別の設計手法を基本とし，外圧や内圧条件に加えて管周方向の剛性や地盤剛性が設計上重要となる．一方，耐震性や軟弱地盤での地盤追従性を考えると管軸方向にはある程度の柔軟性が求められる．**Fig. 1-7** は，Inoue et al. (2021) が示したダクタイル

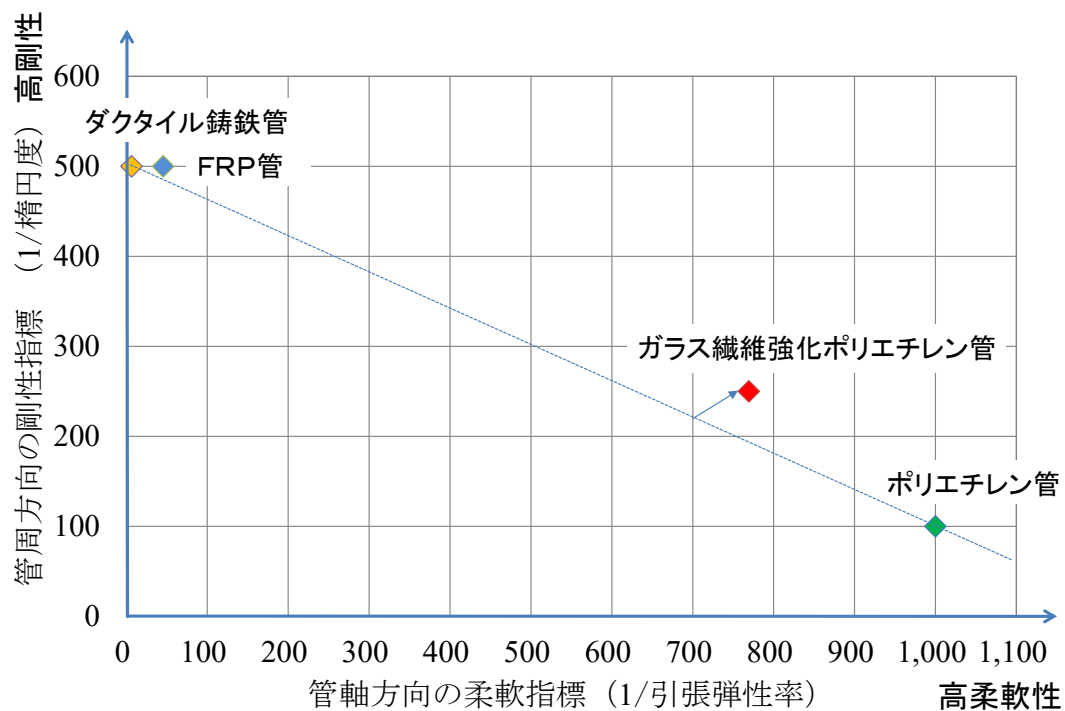


Fig. 1-7 管周方向と管軸方向の剛性指標

Stiffness index for circumferential and longitudinal direction of pipe

鉄管，強化プラスチック管（FRP 管），PE 管および PE-GF 管の管周，管軸方向の簡易的な剛性関係である．縦軸は，管周方向の剛性である楕円率（偏平許容量）の逆数とし，横軸は，管軸方向の柔軟指標として弾性係数の逆数でプロットされている．

剛性の高いダクタイル鋳鉄管は管周方向の剛性が高いので，管軸方向の柔軟性は得られない．PE 管は柔軟性があり，地盤追従性が期待されるものの管周剛性は期待できない．しかしながら，GF の複合と成形法によって異方性を堅持した PE-GF 管は，管周方向の剛性が PE 管より高く，管軸方向の柔軟性もダクタイル鋳鉄管よりもかなり高い．一見相反する物性を併せ持つ PE-GF 管は，農業用水分野において，例えばパイプラインの屈曲部等，既往研究で明らかになった課題の解決に向けてその適用が期待できる．

さて，PE-GF 管の規格について，日本工業規格（2018a, 2018b, 2018c）では，2008 年にアメリカ規格（ASTM, 2008），2011 年にドイツ規格（DIN, 2011a, 2011b）の制定が示されている．さらに，2022 年には ISO の公開仕様書（ISO, 2022a, 2022b）が発行されている．

他方，PE-GF 管の力学挙動に関する研究は，国外では Celentano et al.（2015）が行ったばかりは見当たらず，国内では時吉ら（2016, 2017）の力学特性の報告と高原ら（2017a, 2017b）が軟弱地盤条件下で 14.0cm の強制変位を与えた埋設挙動特性を評価したもの，および Tokiyoshi et al.（2021）が工業分野で採用された PE-GF 管の施工事例について，その設計の妥当性報告に留まっている．これまで，PE-GF 管の異方性に関する定量的な評価がなされておらず，口径によって若干ではあるが変化する異方性を評価する手法が求められている．

以上の観点から PE-GF 管の力学特性について，X 線 CT 法を用いて内部構造を明らかにした結果を第 3 章にまとめる．また，一見相反する管周方向の剛性と管軸方向の柔軟性は，農業用パイプラインの実施工において，どの程度地盤追従するのか曲げ性能限界を把握する必要がある．第 2 章で行われた PE 管の曲げ試験と同様に PE-GF 管およびその継手を対象とした曲げ性能評価結果をそれぞれ 4 章および 5 章にまとめる．ただし，PE-GF 管の状態・挙動を詳細に把握するため，あえて埋設状態とせず，室内で水平曲げ試験を行った．

1.3 研究目的

農林水産省（2014）によると、全国の基幹的農業水利施設の約 2 割が既にその耐用年数を超過し、新たに毎年約 500 の施設が更新時期を迎えている。農業用パイプラインにおいても、老朽化の進行にともない、突発事故があとを絶たない現状にある。加えて、地震大国である我が国は、インフラ施設の地震被害も甚大であるため、ガス、水道、下水道等の管や上水道管に用いられる管材は、軽量で可とう性に優れ、地震に強く腐食しないという利点から PE 管が注目されている。農業用パイプラインにおいても、PE 管が持つ柔軟性が地盤沈下への追従性を発揮し、とりわけ、北海道石狩地方に点在するような泥炭性軟弱地盤では、その適用が拡大している。しかしながら、従来の PE 管は、管軸方向の柔軟性を有すると同時に管周方向の剛性が低いことが課題であった。こうした背景を受けて、本研究の目的は、以下の 3 点に集約する。

- 1) 既往研究で明らかにされたように農業用パイプラインの屈曲部は、これまでも継手の離脱や構造物周辺の管の切断といった事例があとを絶たない状況にある。PE 管は、管や継手そのものに柔軟性があるうえ、継手は電気融着継手(以下、EF 継手という)を用いて一体化継手を構成することができる。この特徴を活かしたスラストブロックを必要としない曲線配管工法について、地盤追従性の指標となる許容曲率半径を評価する。本研究では、内径 450mm、管厚 27mm、有効長 5.5m の PE 管を EF 継手で接続された曲率半径 25.2m、 22.7° の交角相当の水平曲線布設された全長 23m の管路を対象に行った内水圧試験から評価を行う。
- 2) 材料の効率的な使用と長期寿命が求められている昨今、農業用パイプラインに用いられる樹脂製材料についても合理的設計に資するよう研究を進めなければならない。（農林水産省、2011）そこで、柔軟性を管軸方向に保持しつつ管周方向の剛性が強化された PE-GF 管を対象に、X 線 CT 法に基づく繊維の配向角と引張強度特性の関係を検討するとともに

に、2 軸押出成形法に基づくクロスワインディング法で製管された PE-GF 管の引張弾性率を推定する手法を検討する。

- 3) PE 管によるスラストブロックを必要としない曲線配管工法の検討と同様に、PE-GF 管を用いた曲線配管工法の適用性を検討する。本研究では、内径 610mm、管厚 20mm、異なる有効長の PE-GF 管をバット融着継手または EF 継手で接続した全長 12m の管路を対象に、強制的に水平変位を与えた室内実験を基に検討する。

1.4 本論文の構成

本論文は主に以下の構成でまとめられる。

序論	第 1 章	
	<u>研究背景, 既往研究および目的</u> ・泥炭地等の地盤変状時, パイプラインで問題となりやすい継手部や屈曲部について, PE 管と PE-GF 管を用いた挙動を明らかにすること. ・PE-GF 管の力学挙動を解明すること. <u>泥炭地等に用いる PE-GF 管の力学挙動</u> Inoue, K., Karino, T., Tokiyoshi, M. Kawabata, T. and Kuriyama, T. (2021) : New challenging application as used peat land, <i>Proceedings of the 20th International Plastic Pipes Conference and Exhibition</i>, Amsterdam, Netherlands, https://plasticpipesconference.com, (11pages).	
本論	第 2 章	第 3 章
	<u>PE 管を用いた屈曲部挙動解明</u> 時吉充亮, 日野林譲二, 有吉 充, 毛利栄征 (2021) : 中口径ポリエチレン管による曲線配管工法の実大規模実験, 農業農村工学会論文集, 313, 325-332.	<u>PE-GF 管の力学挙動の解明</u> 時吉充亮, 竹内翔吾, 木津遼太郎, 澤田 豊, 河端俊典 (2023) : X 線 CT を用いたガラス繊維強化ポリエチレン管の配向角に関する検討, 農業農村工学会論文集, 316, IV_1-IV_4.
	第 4 章	
	<u>PE-GF 管を用いた屈曲部挙動解明</u> 時吉充亮, 日野林譲二, 河端俊典, 栗山 卓 (2022) : ガラス繊維強化ポリエチレン管の曲げ変形特性, 農業農村工学会論文集, 314, 93-99.	
	第 5 章	
	<u>PE-GF 管継手を用いた屈曲部挙動解明</u> 時吉充亮, 日野林譲二, 河端俊典, 栗山 卓 (2022) : ガラス繊維強化ポリエチレン管の EF 継手の曲げ変形特性と曲げ性能限界, 農業農村工学会論文集, 315, 229-237.	
まとめ	第 6 章	
	<u>総括</u> ・本研究のまとめ	

第 1 章の引用文献

安中正実, 谷 茂, 毛利栄征 (1996) : 平成 5 年 (1993 年) 北海道 南西沖地震による農地・農業用施設の被害調査報告, 農業工学研究所報告, **35**, 111-142.

有吉 充, 毛利栄征, 浅野 勇, 上野和広 (2012) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による国営限戸川農業水利事業における農業用パイプラインの被災と復旧, 農村工学研究所技報, **213**, 201-215.

ASTM (2008) : ASTM F2720/F2720M-20, Standard Specification for Glass Fiber Reinforced Polyethylene (PE-GF) Spiral Wound Large Diameter Pipe.

Diego, Celentano., Danilo, Wimmer., Lucas, Colabella. and Adrian, P. Cisilino (2015) : Viscoelastic mechanical characterization of a short-fiber reinforced polyethylene tube : Experiments and modelling, International journal of Pressure Vessels and Piping, **134**, 82-91.

DIN (2011a) : DIN SPEC 19674-1, Plastics piping systems made from glass fibre reinforced polyethylene (PE-GF) for water supply and for drainage and sewerage under pressure – Part 1 : General.

DIN (2011b) : DIN SPEC 19674-2, Plastics piping systems made from glass fibre reinforced polyethylene (PE-GF) for water supply and for drainage and sewerage under pressure – Part 2 : Pipes.

土木学会 (2016) : 2016 年熊本地震被害調査報告書.

土木学会 (2018) : 2018 年北海道胆振東部地震・大阪府北部の地震被害調査報告書.

花田潤也 (2021) : 瑞穂の国の水土里の軌跡ー我が国固有の「農業土木」の歴史的経緯についてー土木技術 76 巻 7 号, pp. 13-19.

春本朋洋, 宮田 勉, 有吉 充, 毛利栄征, 井谷昌功, 河端俊典 (2015) : 液状化地盤における管路挙動ー限戸川地区幹線用水路の被災事例ー, 農業農村工学会京都支部第 72 回研究発表会講演要旨集, pp. 210-211.

秀島好昭，数矢憲一，石岡浩一，西川裕司（1995）：泥炭性軟弱地盤における管路の沈下・変形挙動，農土誌，**63**(12)，1249-1254.

北海道農業試験場（1969）：泥炭地の農業．泥炭地研究室創立 50 年記念論文集．

五十嵐八枝子（1986）：泥炭地の生成とその変遷，＜特集＞北海道の資源と環境，地学教育と科学連動，**15**(0)，166-172.

稲垣仁根（2019）：経年パイプラインにおける突発事故の爆発的発生の可能性．

Inoue, K., Karino, T., Tokiyoshi, M. Kawabata, T. and Kuriyama, T. (2021) : New challenging application as used peat land, *Proceedings of the 20th International Plastic Pipes Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands, <https://plasticpipesconference.com>, (11 pages).

ISO (2022a) : ISO/PAS 22101-1, Polyethylene reinforced with short glass fibres (PE-sGF) piping systems for industrial applications – Part 1: General.

ISO (2022b) : ISO/PAS 22101-2, Polyethylene reinforced with short glass fibres (PE-sGF) piping systems for industrial applications – Part 2: Pipes.

井谷昌功，藤田信夫，有吉 充，毛利栄征，河端俊典（2016）：液状化地盤中の管路屈曲部の動的挙動に関する検討，農業農村工学会論文集，No.301（84-1），pp. I_1-I_8.

井谷昌功，藤田信夫，横田木綿，有吉 充，毛利栄征，河端 俊典（2015a）：水平載荷時の継手構造管路屈曲部の挙動メカニズム，農業農村工学会論文集，No.300（83-6），pp. I_177-I_183.

井谷昌功，西山竜朗，井端 洸，河端俊典（2015b）：農業用パイプラインにおける漏水事故実態に関する調査研究－琵琶湖周辺の幹線系パイプラインの事例－*Journal of Rainwater Catchment Systems* Vol.20/No.20/No.2/pp. 61-66.

河端俊典，澤田 豊，毛利栄征，Ling, H.I.（2011）：液状化地盤内 における内圧管路屈曲部スラスト防護工法の動的挙動に関する検討，土木学会論文集 C，**67**（3），399-406.

国土交通省水管理・国土保全局水資源部（2021）第 2 章 水資源の利用状況．

厚生労働省（2007）：平成 18 年度管路の耐震化に関する検討会報告書，平成 19 年 3 月．

鍬田泰子，大野顕大（2013）：東北地方太平洋沖地震における宮城県北西部の管路被害の特徴，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69，No.4（地震工学論文集第 32 巻），I_734-I_741．

Mitsuaki Tokiyoshi, Yoshitaka Watanabe, Yuichi Shibao and Toshinori Kawabata. (2021)：

Discharged Large Diameter Pipeline for Coal Fired Generation Plant by PE-sGF in Japan,
Proceedings of the 2021 Pipelines, Design, ASCE, 306-315.

毛利栄征（1985）：1983 年日本海中部地震によるパイプラインの被災調査報告，農業土木試験場技報，**169**，93-147．

毛利栄征（1996）：パイプライン曲管部の内水圧負荷時の挙動，農土誌，**64**(12)，41-45．

Mohri, Y., Yasunaka, M. and Tani, S., 1995. “Damage to buried pipeline due to liquefaction induced performance at the ground by the Hokkaido-Nansei Oki Earthquake in 1993.” In Proc. 1st Int. Conf. Earthquake Geotech. Eng., edited by K. Ishihara, 31-36. Tokyo: IGS.

室本隆司（2011）：農業水利施設ストックの老朽化の現状と将来動向について，JAGREE，**82**，pp. 30-33．

永井洋三（2007）：ポリエチレン 総説特集 高分子化学工業の将来展望 2—プラスチック—Vol.80 第 8 号，pp. 282-287．

日本工業規格（2017）：JIS K 6761，一般用ポリエチレン管．

日本工業規格（2018a）：JIS K 6799-1，ガラス繊維強化ポリエチレン管システム—第 1 部；通則．

日本工業規格（2018b）：JIS K 6799-2，ガラス繊維強化ポリエチレン管システム—第 2 部；管．

日本工業規格（2018c）：JIS K 6799-3，ガラス繊維強化ポリエチレン管システム—第 3 部；継手．

-
- 日本工業規格（2019）：JIS K 6762，水道用ポリエチレン二層管．
- 日本産業規格（2022a）：JIS K 6774，ガス用ポリエチレン管．
- 日本産業規格（2022b）：JIS K 6775-1，ガス用ポリエチレン管継手第 1 部．
- 日本産業規格（2022c）：JIS K 6775-2，ガス用ポリエチレン管継手第 2 部．
- 日本産業規格（2022d）：JIS K 6775-3，ガス用ポリエチレン管継手第 3 部．
- 日本水道協会（2018）：日本水道協会規格の変遷（第 3 版）．
- 西村寛之，川口隆文（2005）：ガス用ポリエチレン管および継手融着部の長期性能評価方法，成形加工，**17**(4)，pp. 258-263．
- 西村寛之，川口隆文（2006）：プラスチックパイプにおける機械的長期特性評価，マテリアルライフ学会誌，**18**(1)，pp. 23-28．
- 農林水産省「官民連携新技術研究開発事業」（2003～2005 H15～H17）：可とう性継手による曲げ配管工法の研究開発．
- 農林水産省（2011）：農業水利施設の長寿命化のための手引き．
- 農林水産省（2014）：農業水利の現状，平成 26 年 1 月 20 日国土審議会水資源開発分科会調査企画部会資料．
- 農林水産省（2007）：農業水利ストック情報データベース H19.10 管種別延長比率．
- 農林水産省農村振興局（2021）：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」．
- 農村振興局整備部水資源課（2012）：平成 24 年 5 月農業用水の歴史と水利権について．
- 佐藤政良（1997）：農業用水の特性と今後のあり方，水資源・環境研究 Vol.10，pp.1-8．
- 坂本 貞（1980）：パイプライン化の現状と将来，農業土木学会誌，第 48 巻，第 3 号 pp. 157-162．
- 高原源太郎，日野林譲二，加後郁也，花山一典，中村和正，栗山 卓，河端俊典（2017a）：泥炭地盤におけるガラス繊維強化ポリエチレン管システムの埋設挙動，平成

29 年農業農村工学会大会講演集, pp. 488-489.

高原源太朗, 時吉充亮, 加後郁也, 花山一典, 栗山 卓, 河端俊典, 中村和正 (2017b) :

ガラス繊維強化ポリエチレン管の開発と泥炭地盤での埋設挙動, 第 66 回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集, pp. 36-39.

時吉充亮, 瀬戸敦詞, 栗山 卓, 舩原保雄, 狩野武志, 井上賢生 (2016) : 押出成形によ

るガラス繊維強化ポリエチレンの研究, プラスチック成形加工学会, A-213, pp. 24-25.

時吉充亮, (2017) : ガラス繊維強化ポリエチレン管システムの開発, 農業農村工学会概要集, pp. 480-481.

横地 穰, 関本幸一, 井上 京 (2022) : 泥炭地に敷設された農業用管水路の不同沈下の実態, 農業農村工学会論文集, **314** (90-1), I_45-I_52.

Zhuwen, Xu., Mai-He, Li., Niklaus, E. Zimmermann., Shao-Peng, Li., Hui, Li., Haiyan, Ren., Hao, Sun., Xingguo, Han., Yong, Jiang. and Lin, Jiang. (2018) : Plant functional diversity modulates global environmental change effects on grassland productivity, *Journal of Ecology*, Vol.106, No.5, pp. 1941-1951.

第2章

曲線配管されたポリエチレン管の力学特性に関する検討

2.1 概説

農業用パイプラインでは、設計基準「パイプライン」（農林水産省農村振興局，2021）で示されているように、ダクタイル鋳鉄管や FRPM 管などのたわみ性管が採用されている。それらは、複雑な水路網を呈する農業用排水施設において、その線形や現地の状況に応じて異形管が用いられている。とくに、曲管部では、スラスト力と呼ばれる不平衡力が常時発生することからスラスト対策工が必要である。スラスト対策工として、一般的にはスラストブロックを用いて対策が行われ、その有効性は毛利（1996）の試験等によって確認されている。しかしながら、地震時の液状化に伴いスラストブロックが移動する等の課題が確認されたため、Mohri et al.（1995）、河端ら（2011）は、塩化ビニル製管を対象に碎石およびジオグリッドを用いた軽量な対策工法の有効性を検討し、液状化地盤に対するジオグリッドの抵抗力から提案されたスラスト対策工が有効に作用することを明らかにした。

一方で、ダクタイル鋳鉄管や FRPM 管のゴム輪継手は、ゴム輪接合のため、軸方向に許容曲げ角度を持った変位可能な構造である。藤田ら（2007）は大口径の継手構造パイプラインとして実績が豊富なダクタイル鋳鉄管と FRPM 管を対象にスラストブロックを用いない工法での挙動把握を目的に、継手を連続的に屈曲させた区間と、同一角度の曲管とで内圧負荷の挙動を比較した。これらの研究を通して直管を用いた曲線布設の妥当性が明らかとなり、FRPM 管の曲線状布設の配管工法設計施工マニュアルが農村工学研究所（2007）から示された。

しかしながら近年の異常気象による局所集中豪雨に加え、諸外国と比較しても極めて地

震の多い我が国では、パイプラインの被害があとをたたない。毛利ら（2012）は、東北地方太平洋沖地震によって発生した被害状況をまとめた。その結果、とりわけパイプの曲管部や構造物が配置される近傍の継手に問題点があることを指摘した。

細川ら（2005）、丸山ら（2014）は、それぞれ東北地方太平洋沖地震や新潟県中越地震により被災した都市ガスおよび水道管の被害状況を明らかにした。それらによると PE 管の被害は認められず、地盤追従性が高いことが明らかとなった。ここで、PE 管の継手は、おもに電気融着方式を採用しており、継手部にあらかじめ取り付けられた電熱線に規定の時間通電すると継手が熔融し、継手が一体化する方式である。これまでの使用実績から PE 管は、高い耐震性を持つことが確認された。しかし、農業用パイプラインとしての PE 管は、設計基準「パイプライン」（農林水産省農村振興局，2021）が発行されるまで、内径 300mm 以下の基準しかないため使用実績が少なく、埋設挙動も十分に明らかにされていない。

そこで、本章では中口径（φ450）の PE 管の安全性を実証するために、EF 継手により直管を一体化し、曲線布設した管路を対象として実際のフィールドを模擬した環境条件下での実大規模実験を行った。安全性検証の負荷条件には内圧負荷、繰返し内圧負荷およびその管路に大偏平が生じた場合の局所荷重負荷を与えた。

2.2. 実験概要

管路を構成した管および継手は、**Fig. 2-1** に示すように内径 450mm、管厚 27mm、有効長 5.5m の PE 管（PE100）とした。管の両端は、EF 継手ができるよう電熱線を含む受口と差口継手で構成されている。また、管路両端部はフランジ構造とし、特別な加工を行わないプレーンエンド管とカップリング継手（両受口）で接続した。

実験管路の平面図と計測断面図を **Fig. 2-2** に示す。5 本の PE 管を電気融着方法によって長さ 23m に接続し、曲率半径 25.20m、22.7°の交角相当の水平曲線布設とした。22.7°は、一般的な曲管角度 45°の 2 等分角（22.5°）を想定し決定した。実験の曲線配管を作成した手順

は、以下の通りである。まず関東ロームの原地盤を設計上必要とされる掘削断面と曲線構築に必要な固定杭設置のため、2m の掘削幅で曲線状に掘削した。次に、5 本の管を原地盤上で EF 継手を用いて一体化し、掘削溝内に屈曲しながら布設した。

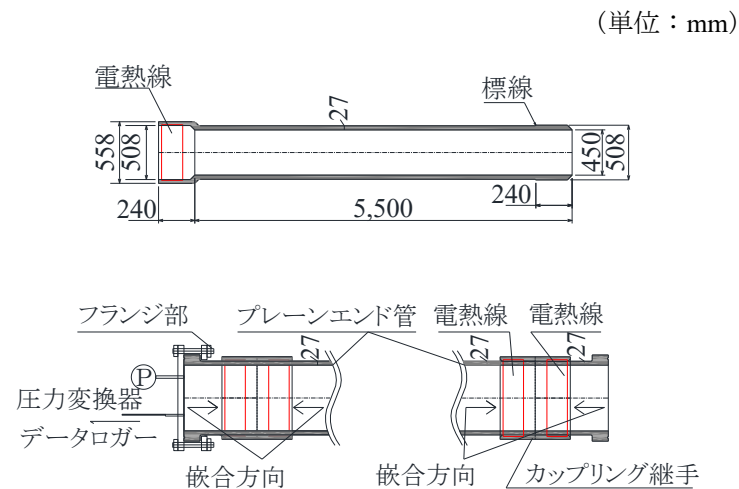


Fig. 2-1 管と継手

Pipes and fittings

曲線布設は、Fig. 2-3 に示すように S2 および S4 断面に固定杭を配置し、両端部に配管を維持するためのコンクリートブロックを固定することによって 22.7°の交角を構築した。管とコンクリートブロックは、スラスト力に対し、管軸方向に変位できない構造とした。この時、Fig. 2-4 に示す粒度分布の霞ヶ浦砂を撒出し厚 0.3m ごとに締固め度（D 値）が 95.0%となるよう振動コンパクター（60kg 級）にて転圧し、土被り 0.6m まで埋め戻した。使用した霞ヶ浦砂の特性を、Table 2-1 に示す。

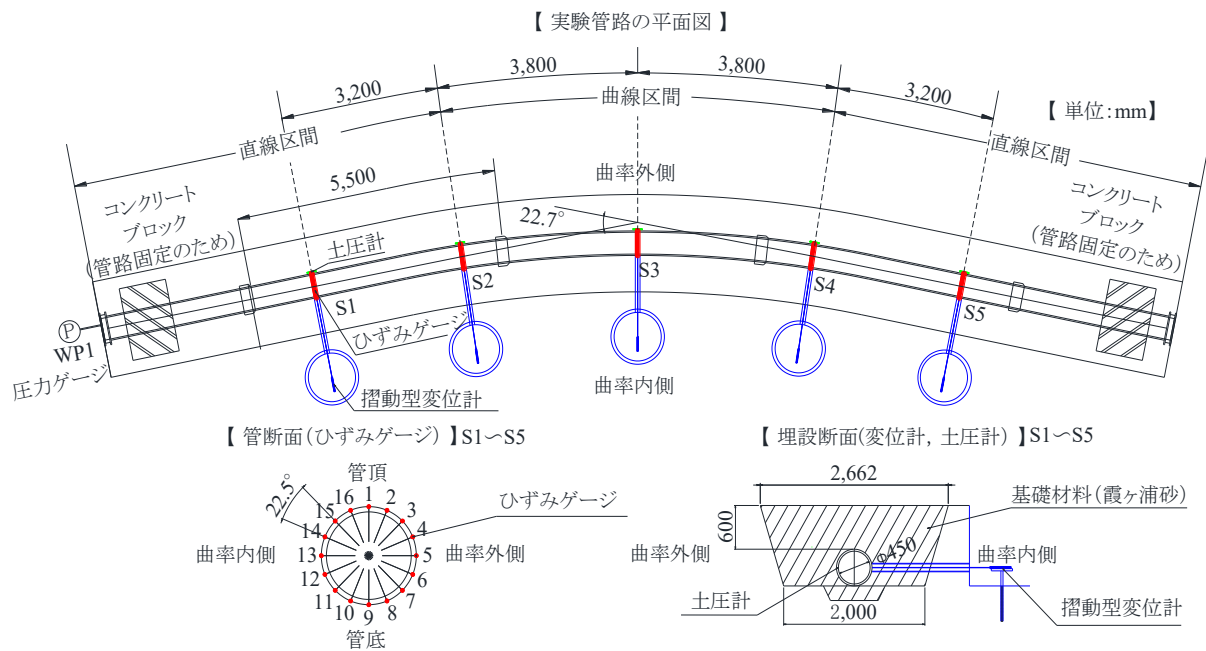


Fig. 2-2 実験管路の平面図と計測断面図

Plane figure of experimental pipeline and cross section of measurement point

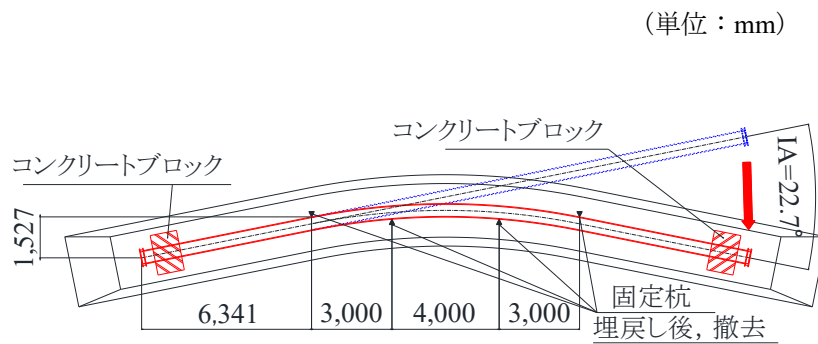


Fig. 2-3 曲線区間の構築方法

Procedure to make the curved pipeline

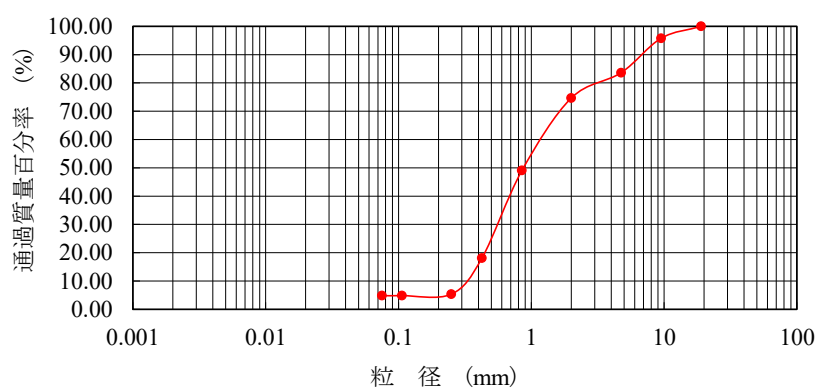


Fig. 2-4 粒度分布 (霞ヶ浦砂)

Particle size distribution (Kasumigaura sand)

Table 2-1 埋戻し土 (霞ヶ浦砂) の特性

Characteristics of the back of soil parameters (Kasumigaura sand)

項目	単位	霞ヶ浦砂
土粒子の密度	g/cm^3	2.683
土の乾燥密度	g/cm^3	1.626
土の最大乾燥密度	g/cm^3	1.711
土の最小乾燥密度	g/cm^3	1.369
最適含水比	%	15.60
平均含水比	%	11.14
均等係数	---	3.930
内部摩擦角	°	39.40

2.2.1 内圧負荷

まず、曲線布設された埋設管路に常時発生する内圧影響を確認するため、内圧負荷試験を行った。設計静水圧と動水圧の和となる 1.0MPa の内圧をパイプラインの通水試験で一般的である 7 日間負荷することを条件とした。実験管路の全景を Fig. 2-5 に、圧力計とフランジ部を Fig. 2-6 に、内圧負荷装置を Fig. 2-7 に示す。内圧はフランジ端部 (Fig. 2-6 右) より実験管路全体に対し内圧負荷装置 (Fig. 2-7 左) を用いて行った。ただし、管の膨張等によって管内圧が約 0.9MPa まで低下した場合、1.0MPa まで本装置により自動的に再加圧された。

2.2.2 繰返し内圧負荷

次に、農業用パイプラインにおいて水利用の状況等により水压が変動する状態を想定し、**Fig. 2-8** に示す内圧の負荷サイクルで繰返し内圧負荷試験を行った。その条件は、あらかじめプログラムされた昇圧・保持・除圧および無負荷を 1 つのサイクル（180 分）とし 500 サイクル（約 2 カ月間）行い、安全性の検証には、内圧耐性で評価した。



Fig. 2-5 実験管路の全景

Whole appearance of experimental pipeline

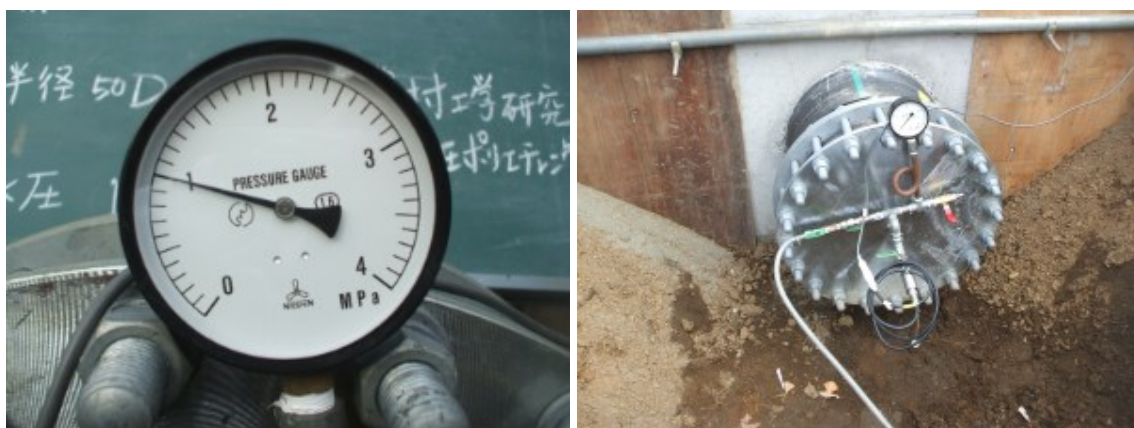


Fig. 2-6 圧力計とフランジ部

Internal pressure gauge and flange



Fig. 2-7 内圧負荷装置
Internal pressure device

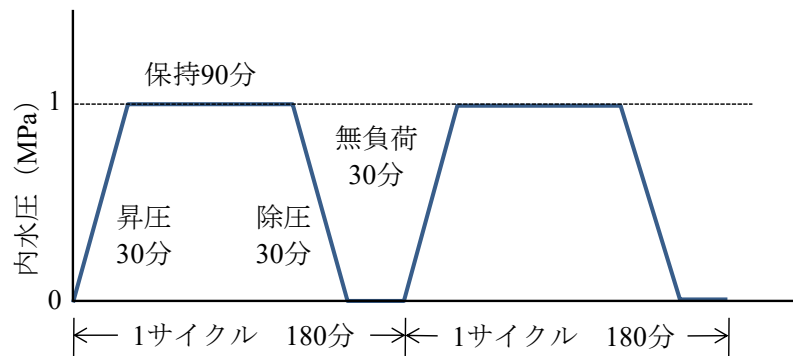


Fig. 2-8 内圧負荷サイクルの条件
Condition of repeated internal pressure

2.2.3 局所荷重負荷

最後に、圧力管路の曲管部が液状化したり、背面の受働土圧などの抵抗力が軟弱地盤等で十分期待できない場合などを想定し、繰返し内圧負荷の後に、スラスト抵抗力を減少させた状態で内圧を負荷し、さらに、大偏平を促すため上載荷重を与える実験を行った。

その手順はまず、**Fig. 2-9**に示すようにスラスト力を受ける曲線布設部の背面地盤に横断方向 600mm、縦断方向 2,000mm の空隙を設けた。次に、**Fig. 2-10**に示すように供試管の横断方向中央部に 5%たわみが発生する荷重状態を想定し、上載荷重を負荷した。上載荷重は、**Fig. 2-11**に示すコンクリートブロック (700mm×900mm×1,400mm) と鉄板で必要荷重を負荷

した. その後, 管路全体に 1.0MPa の内圧を負荷し, 管および継手に不具合がないことを **Fig. 2-6** の圧力計により確認し, 前節の繰返し負荷条件に従って 50 サイクルの評価を行った.

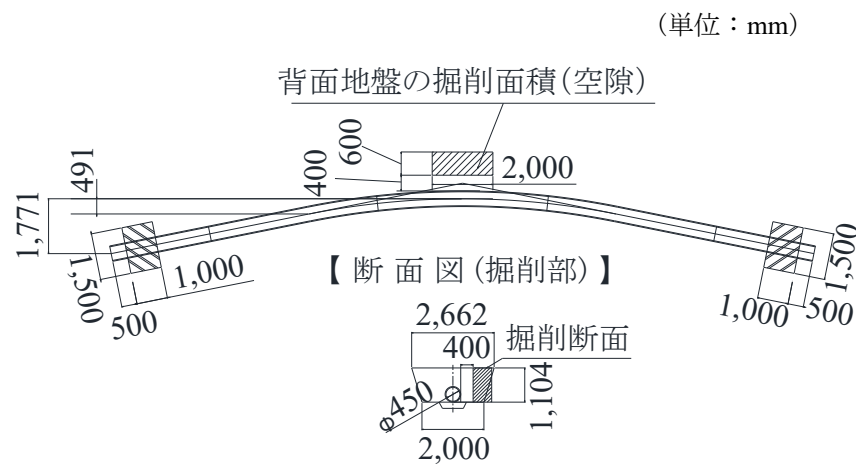


Fig. 2-9 背面地盤の掘削平面図と断面図
Plane figure and cross section of back fill



Fig. 2-10 上载荷重の負荷状況
Appearance of upper load

(単位：mm)

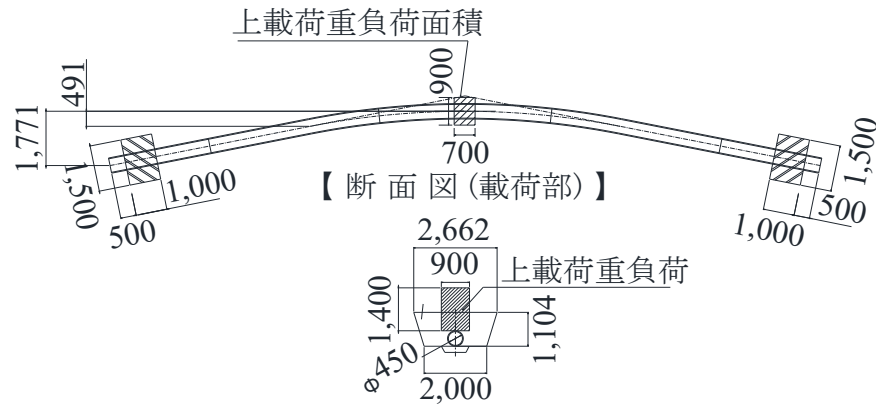


Fig. 2-11 上载荷重負荷の平面図と断面図

Cross section detail figure of upper load

2.2.4 計測

計測項目は、水平方向移動量、管背面の土圧および管外面のひずみである。水平方向移動量は、**Fig. 2-12** に示すように曲率内側から曲率外側へのスラスト力による水平変位を確認するため摺動型変位計 (SDP-100C) を用いて計測した。その計測点は **Fig. 2-2** の S1～S5 の 5 断面とした。そして、曲率外側の管背面に発生する水平土圧は、**Fig. 2-2** および **Fig. 2-13** に示す断面において土圧計 (KD-200KPA) を用いて計測した。管外面のひずみは、**Fig. 2-13** に示す 22.5°ごとに 5 断面の管周方向および管軸方向に貼り付けた計 160 枚のひずみゲージ (GFLA-6-70) によって計測した。また、管路中央部では、**Fig. 2-14** に示す鉛直たわみ量および水平たわみ量をひずみゲージとりん青銅板で作成した変位計により計測した。なお、それぞれの試験終了後にそれらの値をゼロ点に取って実験を行った。

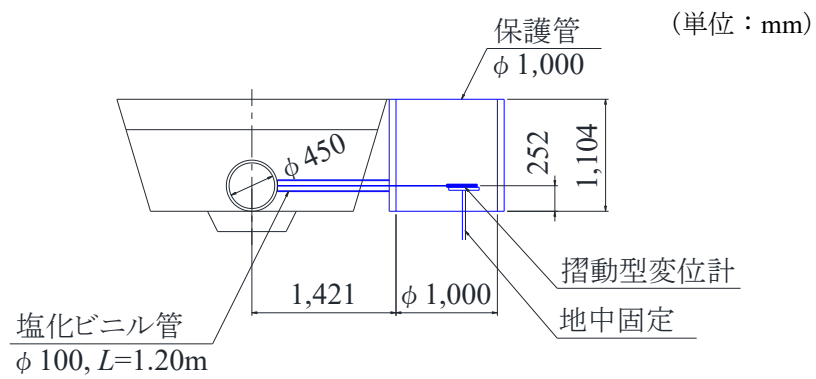


Fig. 2-12 水平方向移動量計測断面
Cross section figure of horizontal displacement

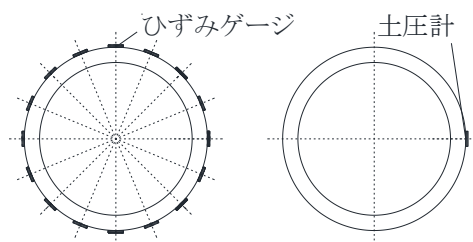


Fig. 2-13 ひずみゲージおよび土圧計の設置位置
Measurement position of strain gauges and soil pressure

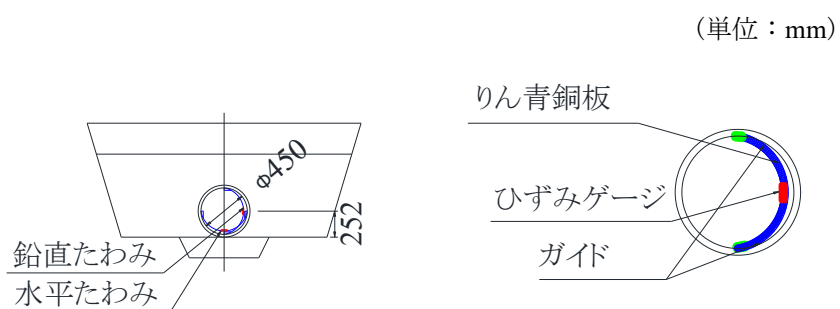


Fig. 2-14 鉛直および水平たわみ計測方法
Vertical and horizontal deflection measurement

2.3. 結果および考察

2.3.1 内圧負荷

2.3.1.1 管路の水平方向移動量

経過日数に対する管路の水平方向移動量の変化を **Fig. 2-15** に示す。グラフ中の WP1（第2軸）は内圧の変化である。管の膨張により内圧の変化が見られるが極端に低下していないことから、管路は健全な状態であったことがわかる。水平方向移動量はスラスト力の作用方向（曲率内側から外側へ向かう方向）を正とした。7日間の最大水平方向移動量は、曲線布設部の S2 において 6.2mm であり、一方、S4 は曲線管路を作成するため固定杭を管頂埋設時まで設置した影響で変位が最小となったと考えられる。

これらは、内圧負荷に伴うスラスト力により、管路全体が背面側に移動しているが、曲線区間（S2～S4）に突出した水平方向移動量が見られないことから局所的な変形はしていないことがわかる。

2.3.1.2 管背面の土圧分布

Fig. 2-16 に管背面に作用する土圧の変化を示す。グラフ中の WP1（第2軸）は内圧の変化である。背面土圧は 7.8～8.8kPa で、収束していることがわかる。グラフ中の急激な土圧の変化は、内圧の再負荷によるものである。また、S1～S5 はほぼ同等の土圧が分布されており、全体的に管路が変位し、局所的な変位はしていないことがわかる。設計基準「パイプライン」（農林水産省農村振興局，2021）に示される式 (2.1) からの理論的なスラスト力は、62.5kN であった。

$$P' = 2(H \cdot a_c) \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.1)$$

ここで、 P' ：曲管部に作用するスラスト力 (kN)， H ：設計水圧（静水圧＋水撃圧）(1,000kN/m²)， a_c ：管の断面積 (0.1589m²)， θ ：曲管の曲がり角度 (22.7°) である。一方、**Fig. 2-17** に示す

ように A1～A5 の土圧を発生投影断面で分割するように仮定し、曲線区間となる A2～A4 の各部に発生した内圧 1.0MPa 時のスラスト力は、Table 2-2 に示す 54.5kN となった。曲管を用いる場合は、曲管部分にスラスト力が集中すると考えられるが、この実験では A2～A4 の 3 断面にそれぞれ 1/3 程度に分散し、なめらかな曲線管路全体で受働していたことがわかった。また、理論値と整合したことによって供用時のスラスト力の想定が PE 管にも適用できることが明らかとなった。

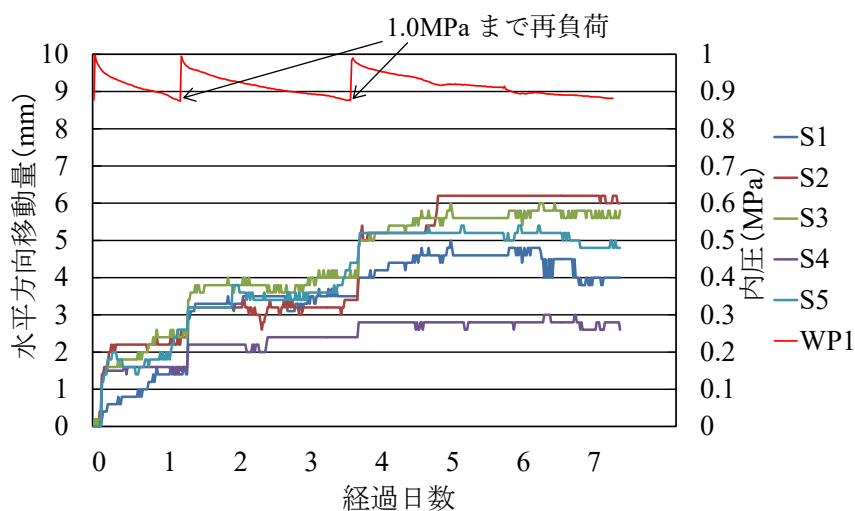


Fig. 2-15 水平方向移動量と内圧の変化

Trends of horizontal displacement and internal pressure

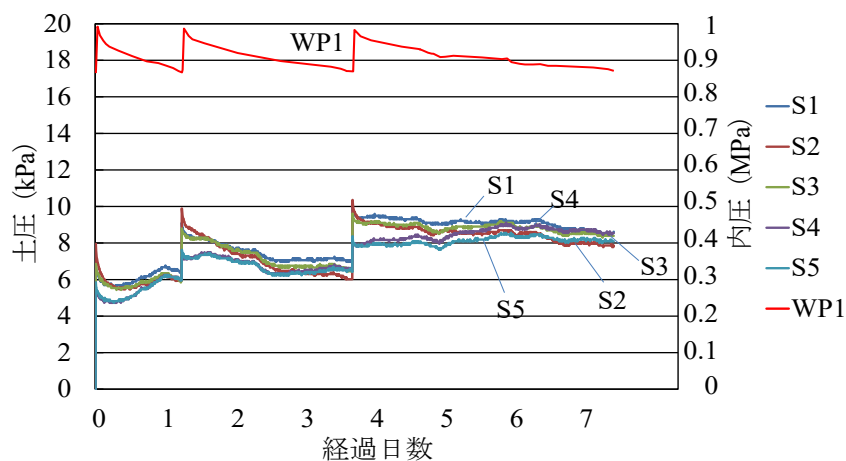


Fig. 2-16 内圧と土圧

Internal pressure and soil pressure

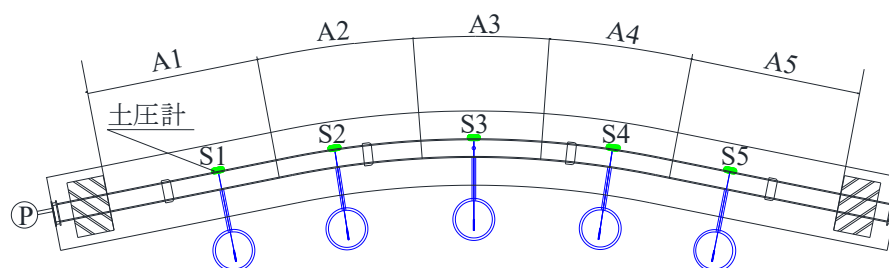


Fig. 2-17 土圧投影面積 (A1～A5)

Position of soil pressure area

Table 2-2 測定土圧と発生スラスト力 (1回目)

Soil pressure and thrust force (cycle 1)

項目	A2	A3	A4	計
測定土圧 (kPa)	10.35	9.61	9.12	—
水平方向投影面積 (m ²)	1.92	1.92	1.92	5.76
スラスト力 (kN)	19.4	18.0	17.1	54.5

2.3.1.3 管外面のひずみの変化

S1～S5 区間における管外面ひずみを Fig. 2-18 および Fig. 2-19 に示す。いずれも管側外面のひずみを示し Fig. 2-2 の No.13 (曲率内側) と No.5 (曲率外側) のひずみ値を抽出した。ひずみは、直線布設された状態を 0 ひずみとした。Fig. 2-18 に示す管周方向のひずみは、管内空虚時の曲率外側 S3 断面で最も小さく、内圧負荷時、曲率内側 S4 断面で最大 15,000 μ のひずみが発生した。いずれの断面も大きく逸脱した管周ひずみは見られず、内圧による管周方向 5 断面のひずみ平均値は、曲線布設直後で発生した空虚時のひずみを除けば 8,581 μ であった (時吉ら, 2012a, 2012b)。この値は、設計基準「パイプライン」(農林水産省農村振興局, 2021) および猿渡 (1978) の「改訂パイプラインハンドブック: 計画・設計および施工」に採用されている設計式 (2.2) から求められる値 (9,014 μ) とほぼ同等であり、曲げ配管の PE 管に発生する応力を想定できることがわかった。

$$\varepsilon = \frac{P(D-t)}{2tE} \quad (2.2)$$

ここで、 ε ：ひずみ、 P ：内圧（1.0MPa）、 D ：管の外径（504mm）、 t ：管の厚み（27mm）、 E ：弾性率（980MPa）である。

Fig. 2-19 に示す管軸方向ひずみは、管内空虚時の曲率内側 S3 断面で最も小さく、内圧負荷時の曲率外側 S4 断面で最大となった。管周方向と同様に最大 15,000 μ のひずみが発生したが、材料の許容引張ひずみ（3%、30,000 μ ）から比較すると十分な安全性が見込まれる。S4 断面の管軸方向に最大の引張ひずみが発生したのは、**Fig. 2-3** に示すように S2 と S4 断面に固定杭を設置し、管頂まで埋め戻した後に引き抜き、曲線区間を構築したことによる影響が考えられる。また、全体的なスラスト力方向の変位影響は、PE 管継手が融着によって一体化しているため、隣接する管への連鎖影響が無視できないことによると考えられる。なお、この実験では、スラスト力に対し、管軸方向の管の移動を両端のコンクリートブロックで抑制している。そのため、スラスト力に対し、管軸方向の引張量（ひずみ）は管路全体に作用されるように考えた。その反面、スラスト力を受けた時、管路は自由に動くことができないので、コンクリートブロックの影響を定量的に計測できない課題が残った。

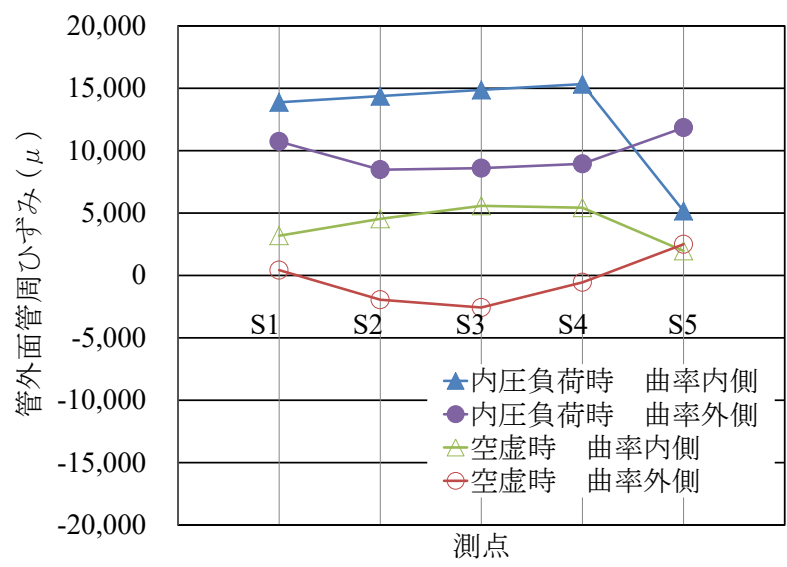


Fig. 2-18 管周方向ひずみの変化

Trends of strain gauge for circumferential direction

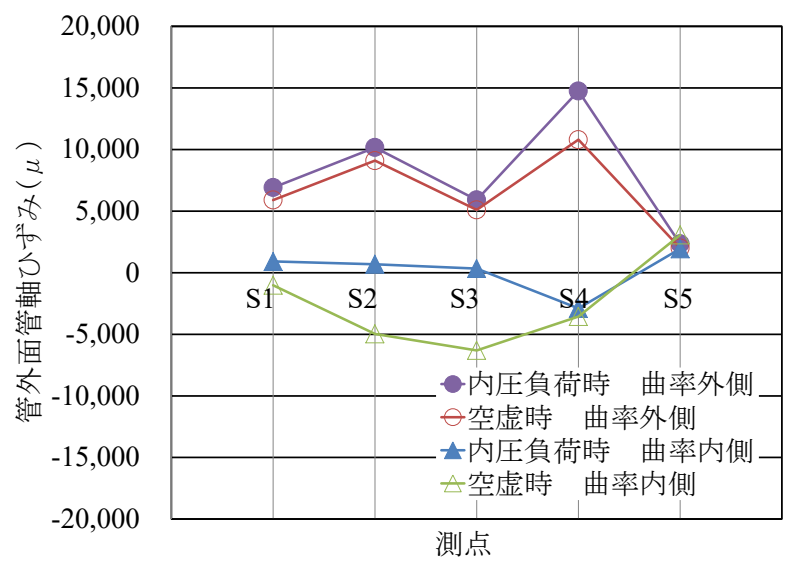


Fig. 2-19 管軸方向ひずみの変化

Trends of strain gauge for longitudinal direction

2.3.2 繰返し内圧負荷

2.3.2.1 管路の水平方向移動量

1.0MPa の水圧を 1 回、150 回、300 回および 500 回負荷した時の測点 S1～S5 における水平方向移動量を **Fig. 2-20** に示す。水平方向移動量はスラスト力の作用方向（曲率内側から外側へ向かう方向）を正とした。水平方向移動量については S2, S4 の曲線配管部で顕著に増加しているが、一体管路として管路全体でバランスを取ろうとする様子がうかがえる。ただし、S4 に見られるように移動量の増加は繰返し内圧負荷回数とともに収束方向に向かっているとは言えない。これは、前述の通り曲線配管施工を行った時、固定杭を設置し曲率起点とした S4 に比較的高い残留応力があり、繰返し負荷とともに応力が解放され、大きな移動量を示したものと考えられる。

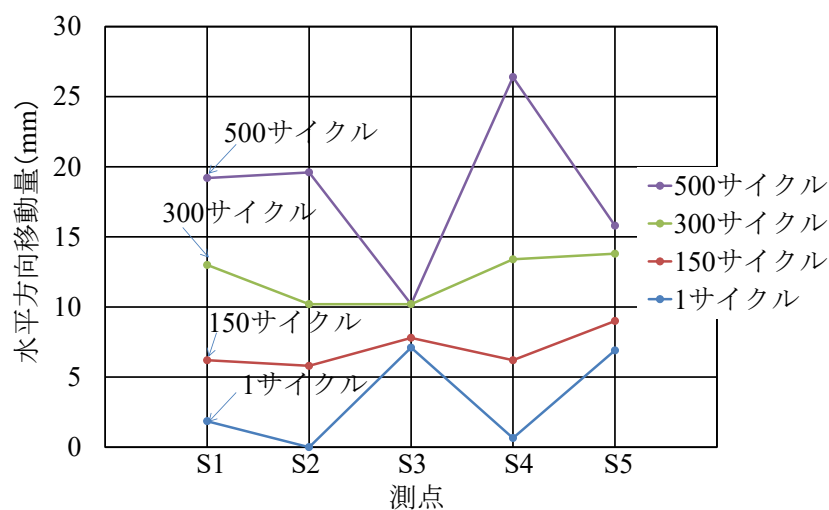


Fig. 2-20 水平方向移動量の変化

Trends of displacement

2.3.2.2 管背面の土圧分布

1.0MPa の水圧を 1 回、150 回、300 回および 500 回負荷した時の測点 S1～S5 における管背面の水平土圧を **Fig. 2-21** に示す。S2～S4 の曲線配管部だけでなく S1, S5 の直線配管部でも受働土圧の増加が見られ管路全体で内圧によって作用する不平衡力とバランスを取っ

ている。S3を除いては繰返し回数の増加により受働土圧の増分量が低下傾向にあり、全体的に安定化に向かっている様子がうかがえる。ただし、内圧から計算される不平衡力(62.5kN)とTable 2-3に示す〔受働土圧〕×〔A2～A4間の背面断面積〕から求められた500回目の不平衡力(スラスト力)(175.2kN)には大きな差がある。これは、課題であると捉えるとともに繰返し内圧負荷によって管が曲率外側に徐々に変位したことと、圧密化されていく背面地盤との間で計測した土圧の妥当性を考えなければならない。

2.3.2.3 管外面のひずみの変化

1.0MPaの水圧を1回(◇線)および500回(○線)負荷した時にS4断面に発生した外面ひずみをFig. 2-22に示す。管周方向のひずみは、繰返し負荷によって管周全体に拡大している様子が見て取れる。管軸方向のひずみは、曲線配管の影響で曲率内側No.13に圧縮のひずみ、曲率外側No.5に引張のひずみが確認された。最大値はNo.5で11,662 μ (材料の許容引張ひずみ30,000 μ)であった(時吉ら, 2013)。しかしながら、500回の繰返し負荷においても最大ひずみが蓄積されることはなく、回数によるひずみ蓄積の影響は低いことが考えられる。

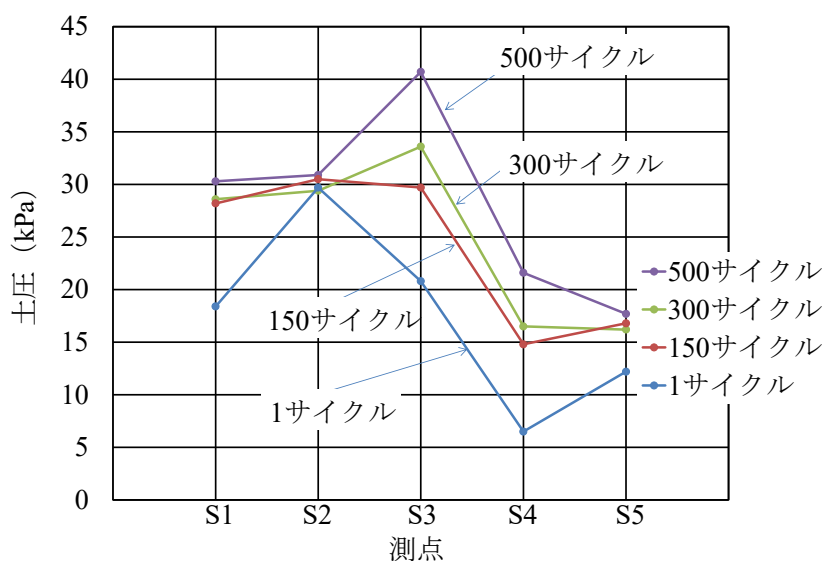


Fig. 2-21 土圧の変化

Trends of soil pressure

Table 2-3 測定土圧と発生スラスト力（500 回目）

Soil pressure and thrust force (cycle 500)

項目	A2	A3	A4	計
測定土圧 (kPa)	30.9	40.7	21.6	——
水平方向投影 面積(m ²)	1.92	1.92	1.92	5.76
スラスト力 (kN)	58.1	76.5	40.6	175.2

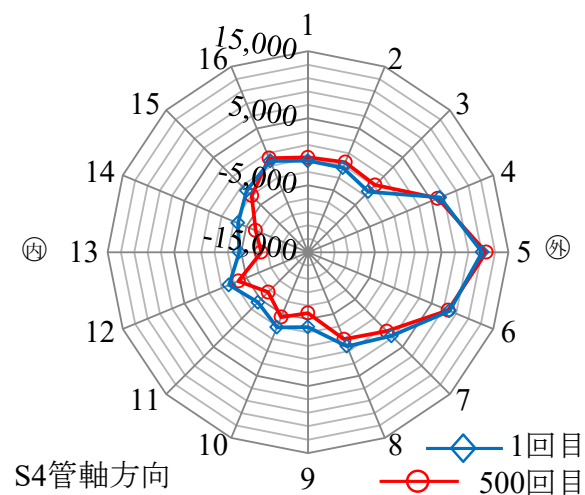
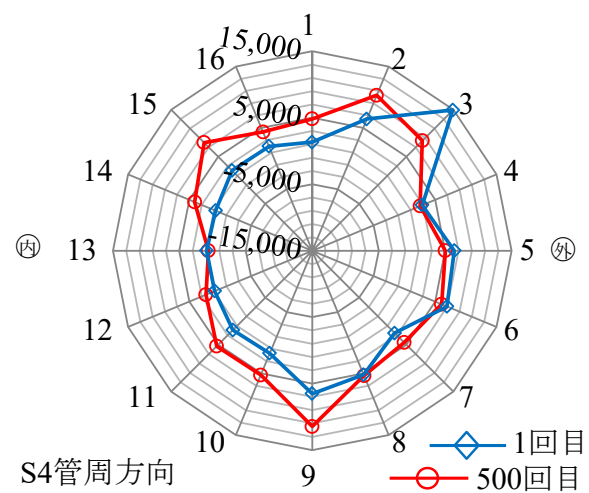


Fig. 2-22 管周と管軸ひずみの分布

Distribution of circumferential and longitudinal strain

2.3.3 局所荷重負荷

2.3.3.1 管背面の土圧分布

1.0MPaの内圧を負荷した時の測点 S1～S5 における管背面の水平土圧を **Fig. 2-23** に示す。グラフ中の WP1（第2軸）は内圧の変化を示し、内圧負荷によって、水平土圧には若干の増加が見られる。

測点 S3 では、2 回目の内圧負荷で地盤の緩みの影響から土圧が増加しなかった。3 回目の内圧負荷および追加荷重載荷により受働土圧が 30kPa（土被り 3.34m 相当）まで増加しているが、これは荷重を加えたことによって受働土圧が増加したものによると考えられる。また、**Fig. 2-16** と内圧変化の挙動を比較するとクリープ変形や再加圧に起因しない漏水、破断、亀裂等からの内圧の変化は見られず、一体化した管路に影響がないことが推定される。

2.3.3.2 管内面のたわみの変化

供試管中央部の測点 S3 管内において鉛直方向および水平方向のたわみ量を計測した。試験開始前の状態を 0%とし、増分の変化を **Fig. 2-24** に示す。大偏平を促すため 5%たわみに相当する荷重を管路中心に直接負荷した。その結果、管路には設計基準「パイプライン」（農林水産省農村振興局，2021）に記述されている設計たわみ量の 2 倍となる 8%以上のたわみが加えられることになった。しかし、内圧、外圧による管や継手からの漏水、割れは認められなかった。

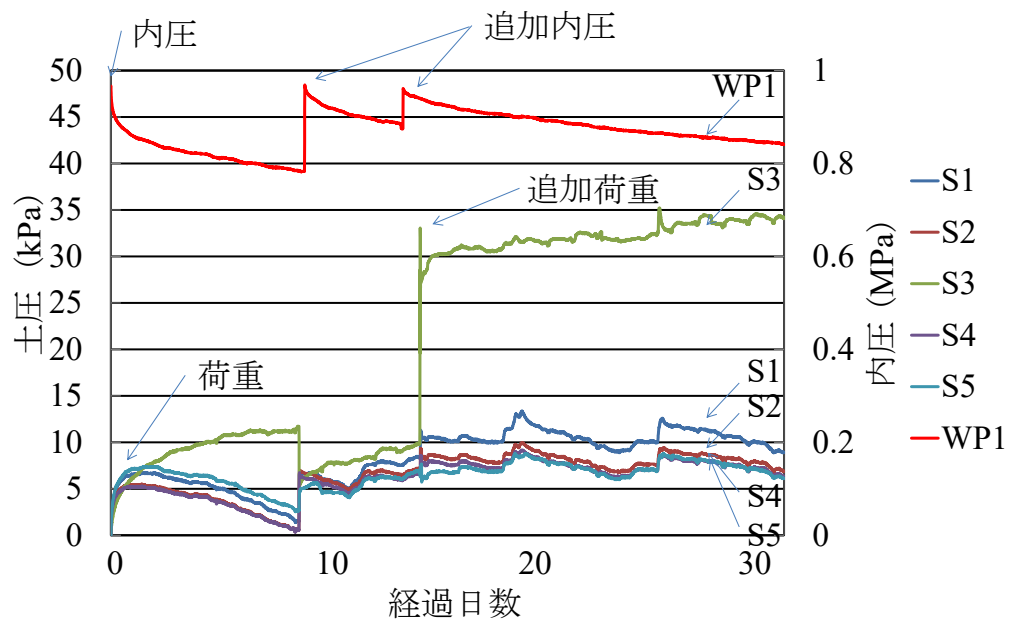


Fig. 2-23 内圧と土圧の経時変化
Internal pressure and soil pressure with time

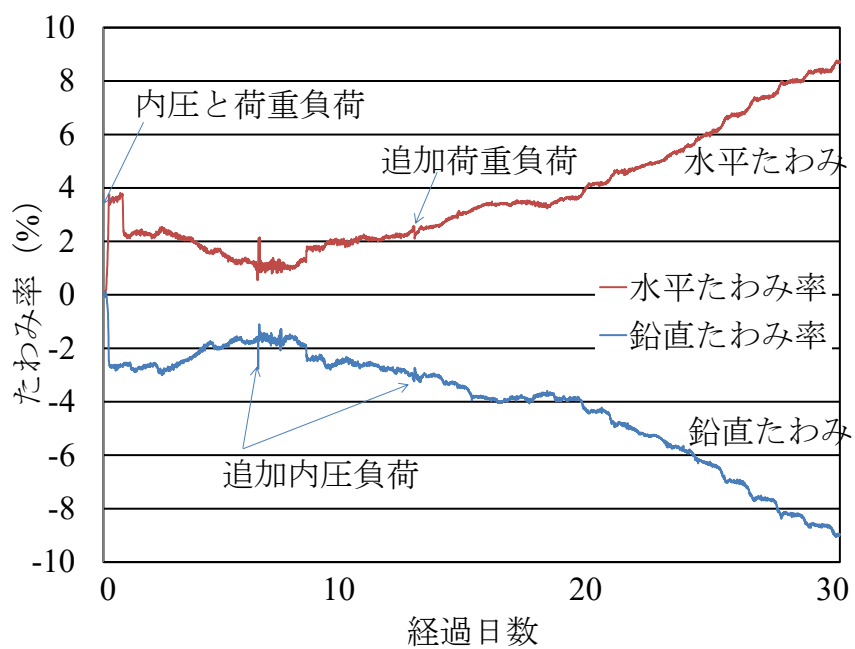


Fig. 2-24 管内面たわみ率の経時変化
Deflections of internal diameter with time

2.4. まとめ

本章では農業用パイプラインにおけるスラストブロックを必要としない中口径 PE 管の曲線配管工法の安全性の検証を行った。本研究で得られた結果および課題を以下に示す。

- 1) 中口径の PE 管を用いた曲線配管工法の実大規模の実験を行った結果、総じて局所的に大きな水平方向移動量、管背面の土圧、管側面のひずみは発生しなかった。しかし、それぞれの試験でひずみ値をゼロ点に取り評価したため、残留ひずみの蓄積量について評価されないという課題が残った。
- 2) 1.0MPa の内圧負荷時に発生するスラスト力は、曲線配管に広く分布し、EF 継手で一体化した管路全体で受働されることがわかった。また、設計基準「パイプライン」（農林水産省農村振興局，2021）から求められる設計式（2.1）を用いたスラスト力と曲線区間に分布された実際のスラスト力の和は、それぞれ 62.5kN と 54.5kN であった。つまり、設計式（2.1）から求められるスラスト力の想定が PE 管の曲線配管工法にも適用できることがわかった。一方、管路がスラスト力を受けた時に両端のコンクリートと管の縁切りがされていないため、スラスト力を受けた時のコンクリートブロックの影響を定量的に評価されないという課題が残った。
- 3) 1.0MPa の繰返し内圧負荷による管周方向のひずみは、全体的に拡張される方向に引張ひずみが発生し、曲線布設による管軸方向のひずみは、曲率内側の圧縮ひずみと曲率外側の引張ひずみが顕著に表れていた。
- 4) 繰返し内圧負荷で発生する管周方向および管軸方向のひずみ増加量は顕著ではない。しかし、曲線布設された背面土圧と S4 断面の水平方向移動量は繰返し内圧負荷に伴い増加していることがわかった。ただし、最大引張ひずみは $11,662\mu$ で材料の許容引張ひずみ $30,000\mu$ から考えると十分安全であると言える。
- 5) 局所荷重負荷によって設計たわみ率の 2 倍となる 8%以上のたわみを加えたが、内圧、外圧による管や継手からの漏水、割れは認められなかった。

第2章の引用文献

- 藤田信夫, 毛利栄征, 鈴木尚登 (2007) : 地震動に対する継手構造管路の伸縮余裕と安全性, 農土論集, **249**, 63-73.
- 細川直行, 菜花健一, 中根宏行, 中山 渉 (2005) : 2004 年新潟県中越地震における都市ガスの被害, 地震工学研究発表会報告集, **28**, 91-94.
- 河端俊典, 澤田 豊, 毛利栄征, Ling, H.I. (2011) : 液状化地盤内における内圧管路屈曲部スラスト防護工法の動的挙動に関する検討, 土木学会論文集 C, **67**(3), 399-406.
- 丸山喜久, 伊藤智大, 若松加寿江, 永田 茂 (2014) : 東北地方太平洋沖地震における宮城県仙台市の水道管路被害状況の分析, 土木学会論文集 A1, **70**(3), 377-388.
- 毛利栄征 (1996) : パイプライン曲管部の内水圧負荷時の挙動, 農土誌, **64**(12), 41-45.
- 毛利栄征, 有吉 充, 河端俊典 (2012) : 大口径パイプラインの地震被害－被害状況と復旧の考え方－, 地盤工学ジャーナル, **7**(1), 185-194.
- Mohri, Y., Yasunaka, M. and Tani, S., 1995. “Damage to buried pipeline due to liquefaction induced performance at the ground by the Hokkaido-Nansei Oki Earthquake in 1993.” In Proc. 1st Int. Conf. Earthquake Geotech. Eng., edited by K. Ishihara, 31-36. Tokyo: JGS.
- 農林水産省農村振興局 (2021) : 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計 「パイプライン」.
- 農村工学研究所 (2007) : 可とう性継手による曲げ配管工法設計施工マニュアル暫定版.
- 猿渡良一 (1978) : 改訂パイプラインハンドブック : 計画・設計および施工, 山海堂.
- 時吉充亮, 工藤秀穂, 日野林譲二, 毛利栄征, 有吉 充 (2012a) : 中口径ポリエチレン管 EF 継手の実験的研究, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, 49-50.
- 時吉充亮, 工藤秀穂, 日野林譲二, 毛利栄征, 有吉 充 (2012b) : 中・大口径ポリエチレン管による曲線配管工法の開発, 平成 24 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 844-845.

時吉充亮，工藤秀穂，日野林譲二，毛利栄征，有吉 充（2013）：中口径ポリエチレン管による曲線管路の繰返し内水圧負荷実験，平成 25 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，766-767.

第3章

ガラス繊維強化ポリエチレン管の配向角と力学特性の関係

3.1 概説

農業用パイプライン等に用いられる PE-GF 管は、管軸方向の柔軟性を十分有するとともに、管周方向の剛性が PE 管より高い。一見相反する物性を併せ持つ PE-GF 管は、農業用水分野において、これまで事故事例が多いパイプラインの屈曲部等の課題解決にその適用が期待できる。PE-GF 管は、PE にガラス繊維（以下、GF という）が配合された複合管で、2 軸押出成形法に基づくクロスワインディング法で得られ、Inoue et al. (2021) の測定結果に見られるように強化系材料の力学効果が全方位同等ではなく、押出方向、いわゆる管周方向にだけ高剛性化する異方性を発現する。この特性は、一般的な 2 軸押出成形法で得られる材料には現れない。（竹田，1991；中野ら，2008）

クロスワインディング法は、2 軸押出成形法と同様にダイスから樹脂を押し出す方法であるが、押し出された GF とポリエチレン樹脂は、2 軸押出成形後、管状の金型にらせん状に巻き取られ、管として成形される。両者の方法で作製される材料の力学特性が異なることは、GF の方向や矩形の方法が異なることが原因であると考えられるが、これまで明らかにされていない。そこで、一般的な 2 軸押出成形法で得られる試験片とクロスワインディング法で得られる PE-GF 管の切出片を対象に各種試験を行い、その力学特性を検討するとともに、両試験片に X 線 CT 法を用いて、内部構造を明らかにした。さらに、既往研究で提案された複合材料に対する引張弾性率の予測式について PE-GF 管への適用性を検討した。本章では、両者の関係を区別して説明するため、PE-GF 管の成形法はクロスワインディング法と定義する。

3.2 供給材料と成形方法

3.2.1 供給材料と実験のケース

供給材料と実験ケースは、**Table 3-1** に示す 3 通りとした。Case A は、農業用パイプライン等に用いる PE-GF 管の配合である。Case B は、GF を含む PE-GF 管の 1 回再生材が 8%含まれた配合である。再生材に含まれる理論上の GF 量も 20%であるため、Case B の合計理論 GF 量は 21.6%となる。そして、Case C は Case A に比べ GF 量を 5 ポイント多くした。なお、Case B および Case C の GF 量は、550℃で焼成した結果、それぞれ 22.87%、24.95%であった。

Table 3-1 実験ケース

Experimental case study					(%)
Case	ポリエチレン	ガラス繊維	相溶化材	再生材	顔料
A	73	20	2	0	5
B	65	20	2	8	5
C	68	25	2	0	5

3.2.2 成形方法

Fig. 3-1 に 2 軸押出成形機の概略図を示す(方法 1 とする)。この試験機を用いて幅 130mm、厚み 2mm のシートを成形した。シートの押出方向、成形角度および GF 配向角の定義は、**Fig. 3-2** に示す。シートの押出方向は、Z 方向であり、その直交方向は X 方向である。また、シートの厚み方向は Y 方向と定義した。**Fig. 3-1** の引取機の引取り速度は、ダイスに近い 1 つ目のロールで 0.306m/min (ポリシングロール)、2 つ目のロールで 0.299m/min (ピンチロール速度)であり、この結果、樹脂圧力は 8.9MPa となった。**Fig. 3-2** にクロスワインディング法による PE-GF 管の成形概略図を示す(方法 2 とする)。管を成形するため、押し出される方向は、管周方向 (Z 方向) とも表現し、管軸方向は押出直交方向 (X 方向) に相

当する．成形方向や成形角度の定義は，**Fig. 3-3** の通りであり，成形金型の引取り速度は，8.0m/min で **Fig. 3-1** の 2 軸押出成形法と比較すると，約 27 倍の引取り速度である．これにより樹脂圧力は 20.6MPa であった．

以上より，両方法の大きな違いは，ダイス通過後の樹脂の引き取りが 2 つのロールで行われるか，成形金型で巻き取られるかの違いであり，これらの違いが引取り速度および樹脂の引取り時の圧力を変化させている．

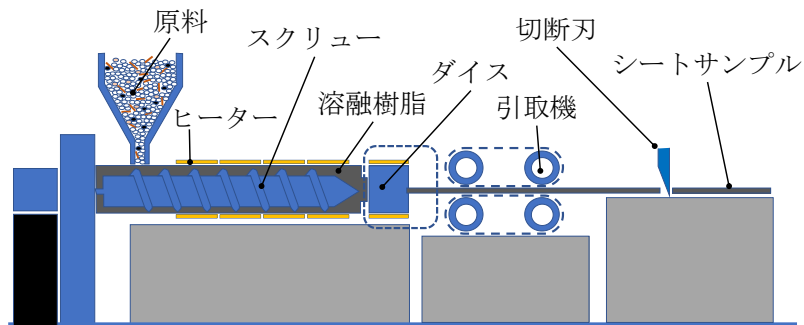


Fig. 3-1 2 軸押出成形機の概略図
Drawing of twin screws extruder

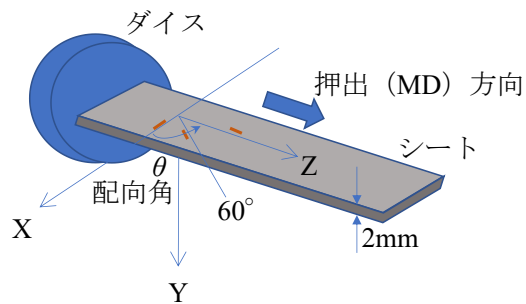


Fig. 3-2 配向角の定義
Definition of orientation angle

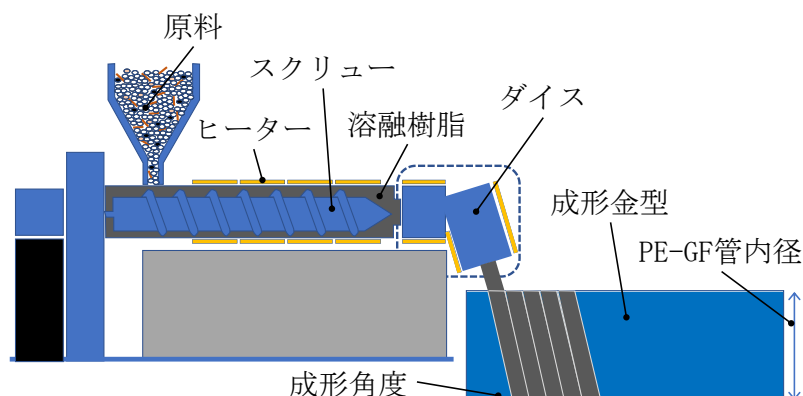


Fig. 3-3 PE-GF 管のクロスワインディング法
Drawing of cross winding method of PE-GF tested pipe

3. 2. 3 引張試験

引張試験は、日本工業規格（2014）に示される 23℃の標準雰囲気下 2 級で 5 時間以上、状態調整された試験片を島津製作所製 AG-X 10kNX を用いて引張速度 50mm/min で引張した。なお、試験片は日本工業規格（2008）に示す形状とし、チャック間距離は 80mm、ひずみは標線間のひずみ変化量とした。**Fig. 3-4** には、試験の様子を示し、**Fig. 3-5** は本研究の 2 軸押出成形法により得られたシート試験片から、それぞれ押出方向、74° 方向および押出直交方向に切り出し、引張試験を行った結果として応力ひずみ関係を示す。**Fig. 3-5** より、引張降伏応力に顕著な差は見られないが、押出直交方向は押出方向に比べ傾きが若干小さく、引張弾性率が低いことがわかる。一方、**Fig. 3-6** はクロスワインディング法より得られた試験片による引張試験結果を行った結果であるが、押出方向と押出直交方向に顕著な引張降伏応力の差が現れた。**Table 3-2** に方法 1 および方法 2 の引張降伏応力と引張降伏ひずみをまとめる。



Fig. 3-4 引張試験
Tensile strength test

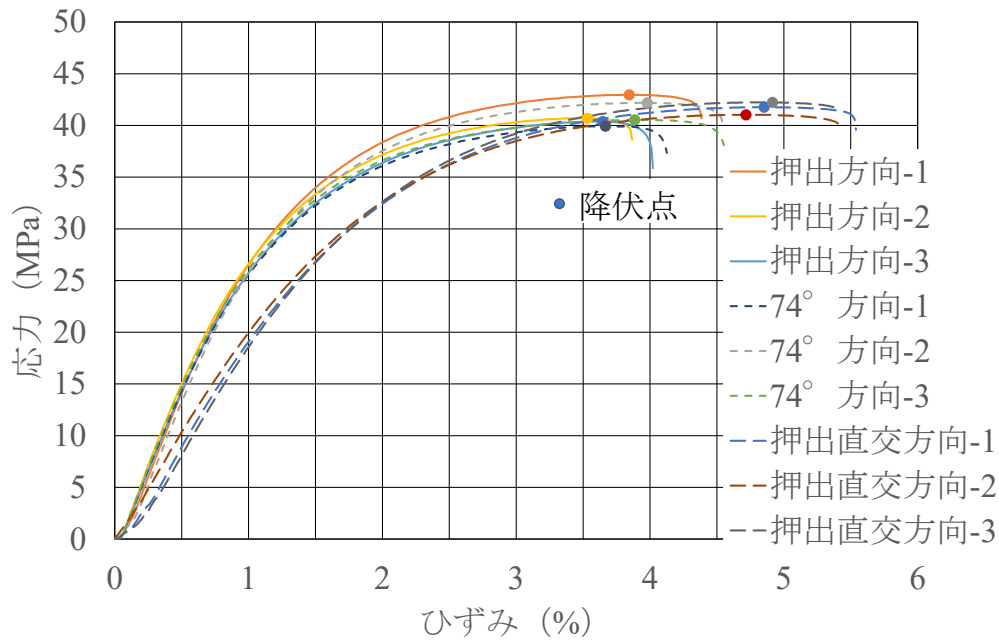


Fig. 3-5 2軸押出成形法による試験片の引張応力とひずみの関係

Stress strain curve of samples by twin screws extruder

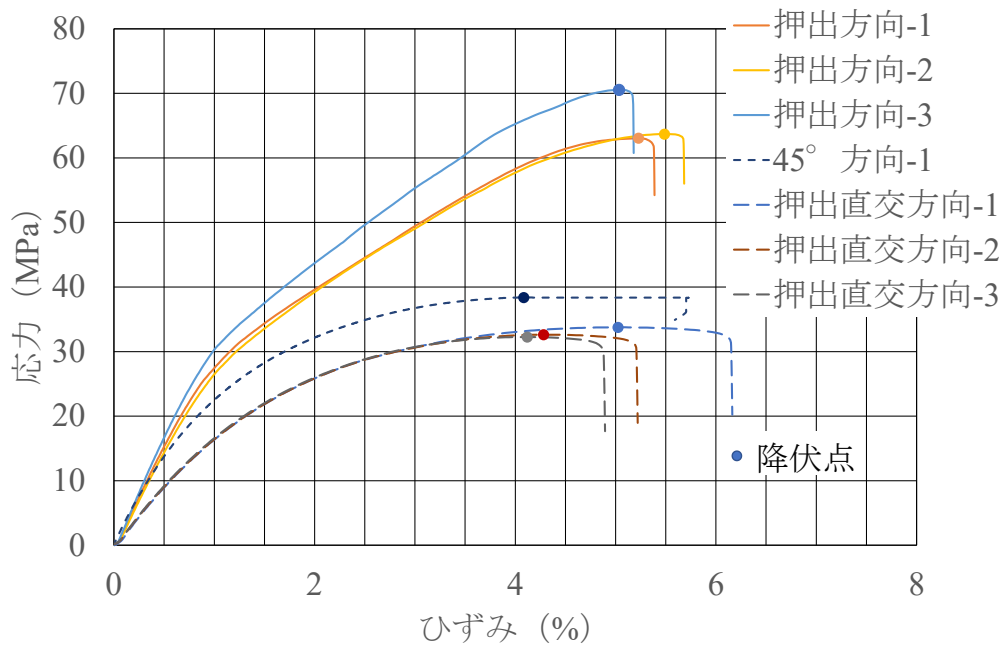


Fig. 3-6 クロスワインディング法による試験片の引張応力とひずみの関係

Stress strain curve of samples by cross winding method

Table 3-2 方法 1 および方法 2 の引張降伏応力とひずみ関係

Relationship with tensile strength and strain of method 1 and 2

方法 1			方法 2		
成形方向	応力 (MPa)	ひずみ	成形方向	応力 (MPa)	ひずみ
押出-1	42.96	3.84	押出-1	63.05	5.23
押出-2	40.69	3.53	押出-2	63.69	5.49
押出-3	40.39	3.65	押出-3	70.55	5.03
74° -1	39.93	3.67	45° -1	38.08	4.08
74° -2	42.19	3.98			
74° -3	40.54	3.89			
押出直交-1	41.77	4.85	押出直交-1	33.76	5.02
押出直交-2	41.03	4.72	押出直交-2	32.62	4.28
押出直交-3	42.23	4.91	押出直交-3	32.25	4.12

3.3 X線 CT を用いた配向解析

3.3.1 配向角マッピング

2 軸押出成形法とクロスワインディング法が示す力学特性は、それぞれ異なる結果を示した。両者の断面構造を明らかにするため X 線 CT を用いた配向解析を行った。2 軸押出成形法（方法 1）では平板試験片（長さ 600mm，幅 130mm，厚さ 2mm）を取出し，GF 配向の様子を X 線 CT 法で観察した。X 線 CT 撮像は，ニコンソリューションズ製の計測用 X 線 CT システム MCT225 を用いた。投影は，平面投影モードであり，設定電圧は 90kV，設定電流は 100 μ A である。計測対象となる GF は直径 13 μ m，平均繊維長 0.8mm，アスペクト比はおよそ 60 である。また，X 線 CT の可視化範囲は 50mm $\times$ 20mm $\times$ 20mm となっている。

クロスワインディング法（方法 2）では，公称内径 300mm の PE-GF 管の管片からそのまま試験片（長さ 50mm，幅 20mm，厚さ 20mm）を取出したものとし，評価した供給材料と方法のケースは，いずれの実験も同等である。

Fig. 3-7 および **Fig. 3-8** は，2 軸押出成形法およびクロスワインディング法で得られた試験片を X 線 CT 法で GF 配向角をマッピングした X-Z 断面の様子を示す。その結果，2 軸押

出成形法のいずれのケースも表層部は 90°付近（緑系）の着色が見られ、押出方向に配向している様子がうかがえる。一方、内部は 0°、180°付近（赤系）の着色が見られ押出直交方向に GF が配向している。再生材を 8%含んだ方法 1 の Case B の内部は、およそ 30°（黄系）の配向角を示す結果となった。これらは、竹田（1991）の実験結果や中野ら（2008）の観察結果と近似していたが、クロスワインディング法は表層部と内部に明確な GF 配向差はなく、一律に押出方向（管周方向、青系）へ配向するという違いが明らかとなった。さらにクロスワインディング法のいずれのケースも厚み方向に進むに連れて青系－緑系－青系色の変化を示し、成形角度は 108°付近と 72°付近に交互にクロス配向する様子が見られた。これは、熔融された樹脂の成形角度と概ね整合し、樹脂の流れに影響された GF の挙動が視覚的に確認された結果と言える。ただし、3 次元 GF 配向については確認されていないため、課題として残った。

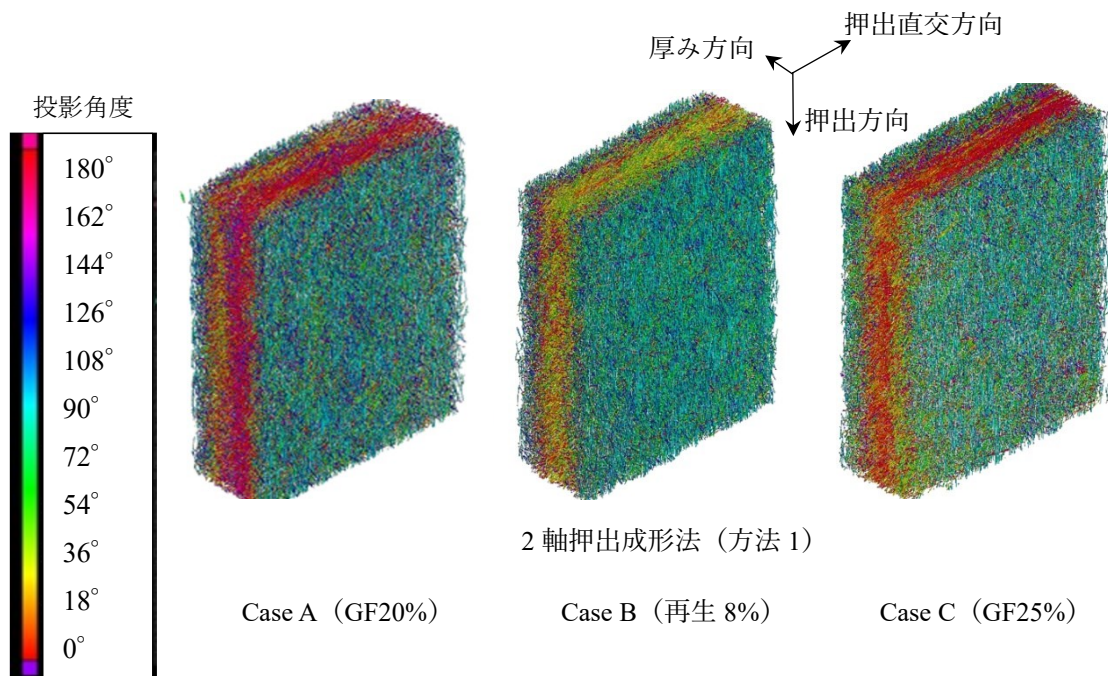


Fig. 3-7 2 軸押出成形法の配向角マッピング

Mappings of the orientation angle of twin screws extruded method

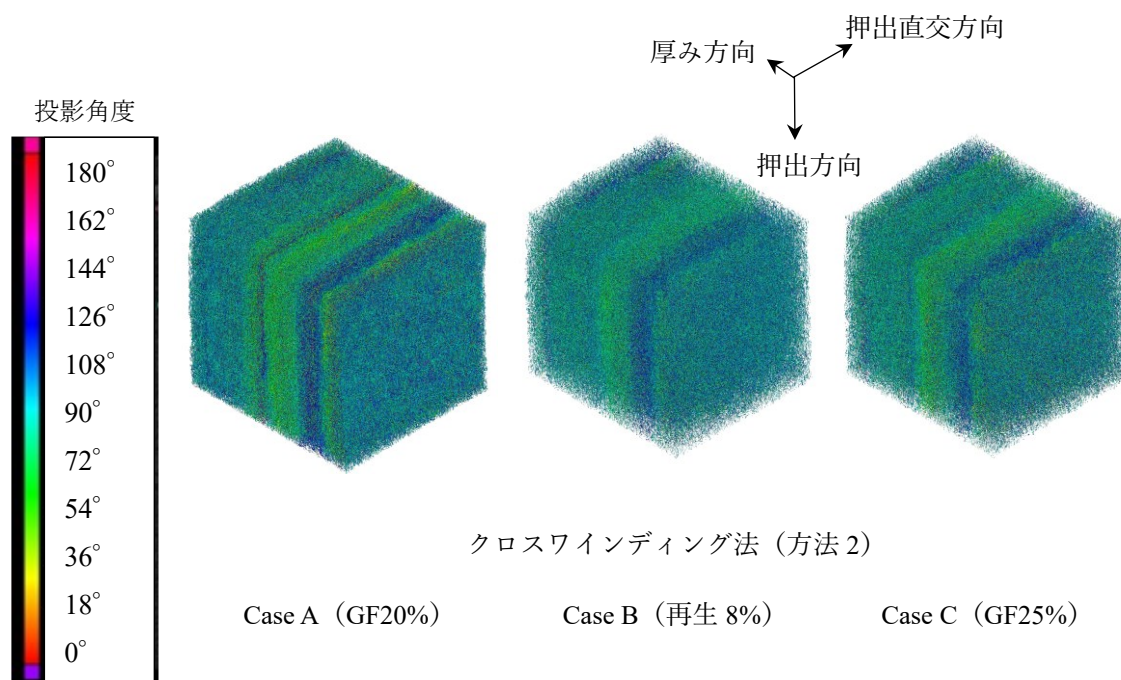
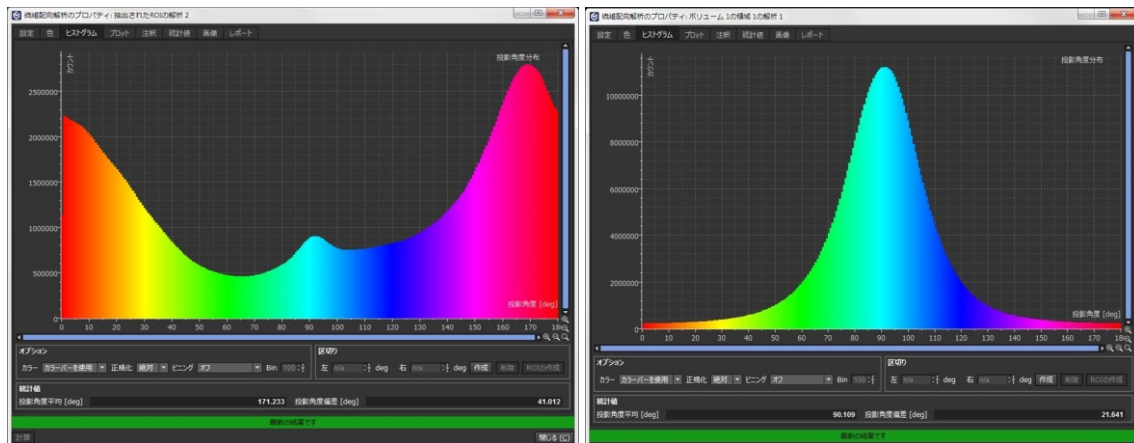


Fig. 3-8 クロスワインディング法の配向角マッピング
Mappings of the orientation angle of cross winding method

3.3.2 配向角ヒストグラム

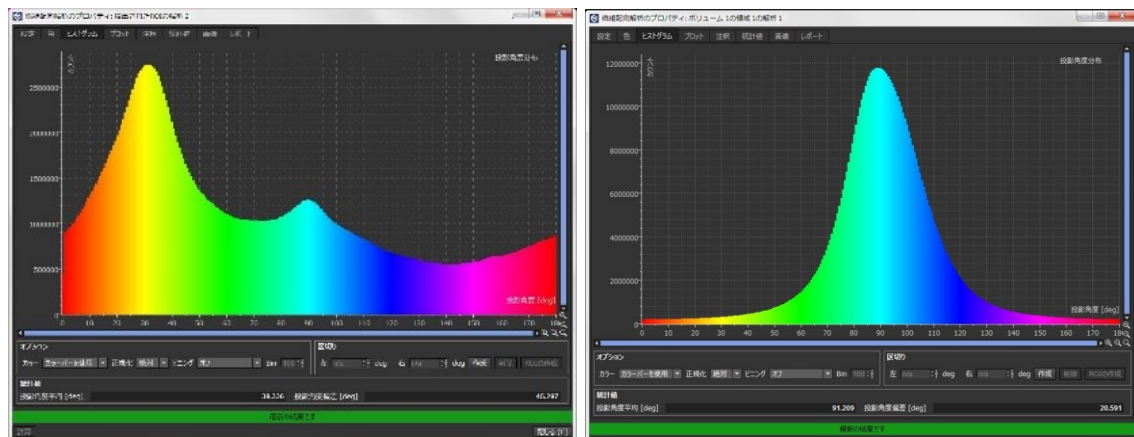
Fig. 3-9 は、2 軸押出成形法およびクロスワインディング法で得られた X-Z 断面の X 線 CT 法 GF 配向角ヒストグラムを観察した様子を示す。横軸は GF 配向角を示し、縦軸は GF のボリュームと X 線 CT のピクセル数を合わせたボクセル数で表した。

2 軸押出成形法の実験結果は、いずれも押出直交方向への GF 配向が、比較的高い数値であったが、クロスワインディング法では、押出方向がいずれのケースも主配向である。つまり、押出成形方法が同一であってもクロスワインディング法では、GF の配向が押出方向へ一律に揃っているとみなすことができる。このようなクロスワインディング法で得られる PE-GF 管は、口径によって成形角度が微妙に異なっている。そこで、PE-GF 管の口径に対する引張弾性率の予測式について次節で検討した。



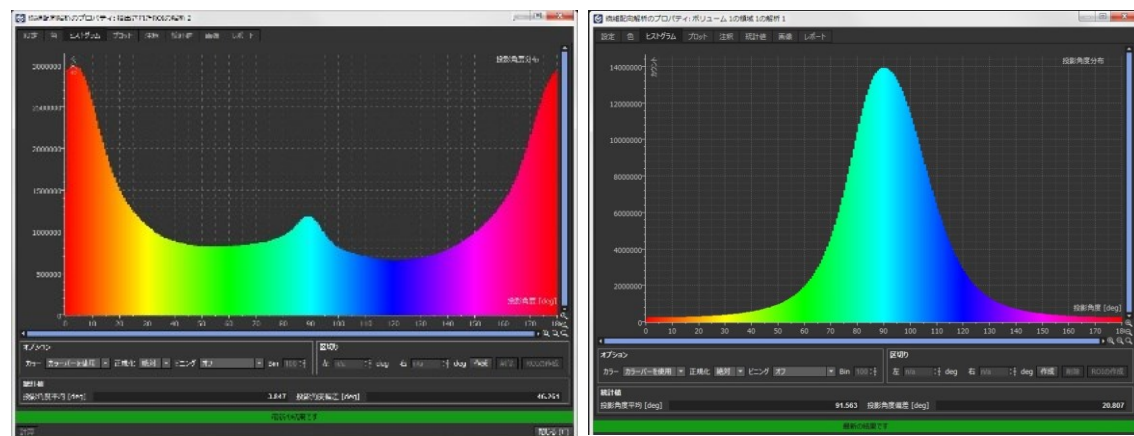
方法 1 Case A (GF20%)

方法 2 Case A (GF20%)



方法 1 Case B (再生 8%)

方法 2 Case B (再生 8%)



方法 1 Case C (GF25%)

方法 2 Case C (GF25%)

2 軸押出成形法 (方法 1)

クロスワインディング法 (方法 2)

Fig. 3-9 2 軸押出成形法とクロスワインディング法の配向角ヒストグラム

Histogram of the orientation angle of twin screws extruded method and cross winding method

3.3.3 引張弾性率の推定

強化系材料が整列配向している場合，Hull（1984）や，佐野村（2001）は，Cox によって提唱されたシアラグ・モデルを用いて複合材料の引張弾性率 E が以下の式（3.1）で予測できることを示した．

$$E = \eta_l E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3.1)$$

ここで， E_f, E_m, V_f は，それぞれ GF の縦弾性係数，母材の縦弾性係数および GF の体積含有率を表す． η_l は，GF 長 l が成形時に短くなるために生じる剛性低下の割合で，式（3.2）と式（3.3）によって与えられる．GF 長 l は，PE-GF 管試験片を 550℃で焼成し，任意に抽出した GF400 本の平均繊維長である．

$$\eta_l = 1 - (\tanh \frac{1}{2} \beta l) / (\frac{1}{2} \beta l) \quad (3.2)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2G_m}{E_f r_f^2 \ln \left(\frac{R}{r_f} \right)}} \quad (3.3)$$

ここで， r_f と G_m と R は，それぞれ GF の半径と母材の横弾性係数ならびに繊維間隔である．さらに，繊維や母材が理想的な整列配向にあったと仮定すると， G_m と R は式（3.4）と式（3.5）で求まる．

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + EV_m)} \quad (3.4)$$

$$R = \frac{r_f}{2} \sqrt{\frac{2G_m}{V_f}} \quad (3.5)$$

V_m は，母材のポアソン比を表す．GF の体積含有率 V_f と重量含有率 W_f の換算式は，式（3.6）の通りとした．

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_f / \rho_f + W_m / \rho_m} \quad (3.6)$$

ここで、 ρ_f と ρ_m は、それぞれ GF と母材の密度を示す。 W_m は、母材の重量含有率である。
そして、PE-GF 管の成形角 θ と GF 配向係数 η_{GF} を用いて PE-GF 管の引張弾性率 E_{GF} を式
(3.7) で予測した。なお、 η_{GF} は、佐野村ら（2006）が提案した直交異方性の最大値 1 の基
準から、PE-GF 管口径ごとの成形角 θ の関係性を考慮して式（3.8）とした。

$$E_{GF} = \eta_{GF} \eta_l E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3.7)$$

$$\eta_{GF} = \cos(90 - \theta) \quad (3.8)$$

これらの式に本研究のクロスワインディング法で得られた材料物性値（Table 3-3）を代入
した。

Table 3-3 PE-GF 管の材料物性値

Material characteristics of PE-GF pipe

E (MPa)	η_l	E_f (MPa)	V_f	E_m (MPa)
3,984	0.213	75,000	0.2	980
β	l (mm)	G_m (MPa)	R (mm)	r_f (mm)
2.118	0.875	408.3	2.6×10^{-5}	1.3×10^{-5}

なお、Table 3-4 は、PE-GF 管の口径と成形角の関係ならびに配向係数 η_{GF} と実測された引
張弾性率の関係を示す。ただし、クロスワインディング法から明らかにされた PE-GF 管の
引張弾性率 E_{GF} の値は、すべての口径でなく、限定的であるが、成形角が大きくなるに従っ
て引張弾性率も大きくなる傾向が見られた。

一方、シアラグ・モデルに基づいた引張弾性率の予測式 (3.7) の値と日本工業規格 (2018)
に従って得られた引張弾性率測定結果および成形角 θ の関係を Fig. 3-10 と Fig. 3-11 に示し
た。成形角が最も 90°に近い口径 3,000mm の PE-GF 管の引張弾性率は実験値 4,051MPa で、
シアラグ・モデルに基づいた予測式から求められる引張弾性率は、3,984MPa と極めて近似
した。従って、PE-GF 管の引張弾性率特性は、配向角 75°～90°においてシアラグ・モデルか

らの予測式の値に近似することが推察される．ただし，これらの定式化は統計的に解析されておらず今後の課題と言える．

一方，両者の引張弾性率が概ね近似することは，PE-GF 管が完全な異方性であることを示している．

Table 3-4 PE-GF 管の口径と成形角ならびに力学特性

Inside diameter, orientation angle and mechanical property of PE-GF pipe

PE-GF 管 口径 (mm)	PE-GF 管 成形角 θ ($^{\circ}$)	GF 配向係数 η_{GF}	引張 弾性率 実測 (MPa)
200	80.2	0.9854	3,785
300	83.4	0.9934	3,953
600	86.7	0.9983	3,900
900	87.8	0.9993	---
1,800	88.9	0.9998	---
3,000	89.3	0.9999	4,051

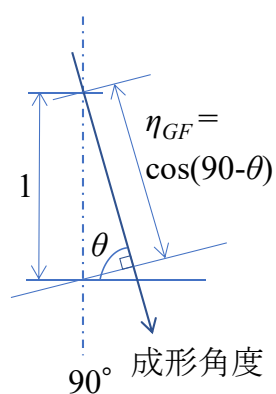


Fig. 3-10 成形角 θ

Orientation angle, θ

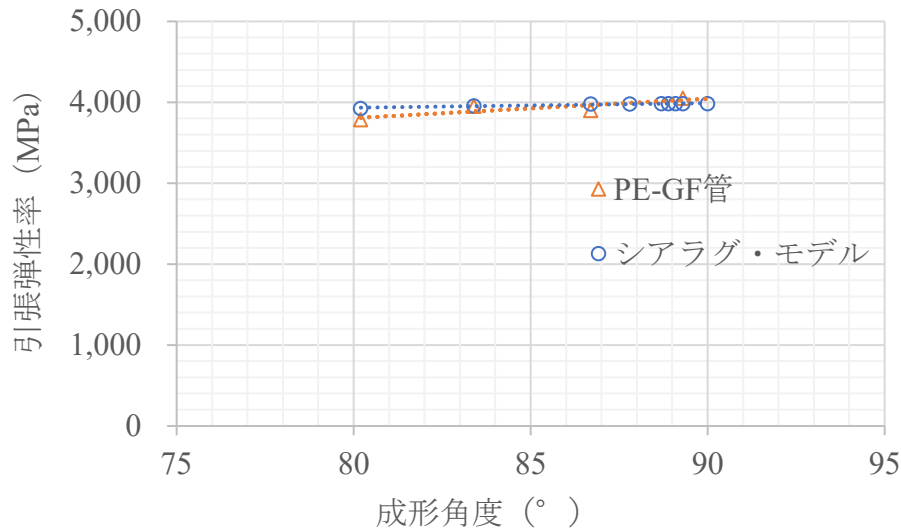


Fig. 3-11 引張弾性率と成形角の関係

Relation between tensile modulus and orientation

3.4 まとめ

本章では2軸押出成形法による材料とクロスワインディング法による PE-GF 管の切出し材料の力学特性の違いを説明するために、両者の引張試験を行うとともに断面構造を X 線 CT 法を用いて検討した。その結果を以下にまとめる。

- 1) 2 軸押出成形法で得られる材料には明確な異方性が認められないが、2 軸押出成形法に基づくクロスワインディング法で製造される PE-GF 管では、明確な異方性を示すことが視覚的に明らかになった。
- 2) X 線 CT 法による断面構造を観察した結果、2 軸押出成形法では押出方向に対して、GF が表層部で押出方向に配列し、内部で押出直交方向に配向するような特異な分布を示すことに対して、PE-GF 管を成形するクロスワインディング法では、断面全てにおいて GF が押出方向に配向していることが明確になった。つまり、PE-GF 管は、積層して得られるすべての積層面において、管周方向に GF が配向するという客観的事象が認められた。
- 3) Cox が提唱したシアラグ・モデルに基づいて提案された予測式から求められた引張弾性

率の値は，PE-GF 管の試験片から明らかにされた引張弾性率の値に概ね近似する傾向が得られた．よって，PE-GF 管の引張弾性率は，このシアラグ・モデルに基づいた予測式で想定することが可能であると考えられる．

第3章の引用文献

Hull D. (1984) : 複合材料入門, 宮入裕夫, 池上皓三, 金原 勲訳, 培風館.

Inoue, K., Karino, T., Tokiyoshi, M., Kawabata, T. and Kuriyama, T. (2021) : New challenging application as used peat land , *Proceedings of the 20th International Plastic Pipes Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands, <https://plasticpipesconference.com>, (11pages).

中野 亮, 塩田忠弘, 開本 亮, 滝 克彦, 高塩 創, 千 容星 (2008) : X 線 CT による繊維配向観察とシュミレーション, 成形加工, **20**(4), 237-241.

日本工業規格 (2008) : JIS K 6780, 耐圧ポリエチレンリブ管.

日本工業規格 (2014) : JIS K 7161-1, プラスチックー引張特性の求め方ー第1部 : 通則.

日本工業規格 (2018) : JIS K 6799-1, ガラス繊維強化ポリエチレン管 システムー第1部 : 通則.

佐野村幸夫 (2001) : 押出しによる短繊維強化複合材料の配向制御と縦弾性係数の予測, 日本複合材料学会誌, **27**(3), 161-166.

佐野村幸夫, 早川邦夫, 水野 衛, 川村宗弘 (2006) : 短繊維強化ポリプロピレン押出材の縦弾性係数と強度に及ぼす成形条件の影響, 成形加工, **18**(4), 293-299.

竹田 啓 (1991) : 繊維複合材における繊維配向度評価, 繊維学会誌, **47**(1), 122-127.

第4章

ガラス繊維強化ポリエチレン管の力学特性に関する検討

4.1 概説

食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会（2015）によると農業水利施設の基幹的な用排水路は、約 5 万 km、末端も含めれば 40 万 km 以上の施工延長がある。それら施設の機能保全を考えなければならない一方、人口減少などを背景に施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図ることが重要で、節水に一定の効果があることからパイプライン化が進められてきた。

パイプラインは、丸山ら（1980）が示したように用水の節約のほか、水管理の容易性、用地費の節約、水質の保全および水圧の有効利用などにメリットが考えられる。しかし、例えば地盤が軟弱な泥炭地盤等にパイプラインを施工しなければならない場合は、課題もある。渡部ら（2012）は、管偏平や不同沈下による継手の抜け、漏水、管の切断といった事例を報告している。また、不同沈下の影響は、西村・三木（2014）の報告によると数年～数十年の時間スケールで最大数十 cm 程度になることもわかっている。さらに、南雲ら（2019）は、泥炭地に施工後 19 年が経過した農業用管水路が不同沈下した実際の状況を明らかにした。

このような泥炭地盤は、おもに北海道に点在し、その延べ面積は、およそ 2,000km² に及ぶ。N 値が 0 に近い値となることが多く、可とう性管、継手が融着できる一体化管路は、長寿命、長期的なライフサイクルの観点で適している。

PE 管は、不同沈下等が発生しても地盤追従性を示し、EF 継手やバット融着継手による一体管路方式が可能なため採用されるケースが年々増加している（西村，2008）。中でも、PE に GF を配合して作られる PE-GF 管は、経済産業省が示す日本工業規格に制定され（日本

工業規格, 2018a, 2018b, 2018c), 配向する GF の効果で管周方向の内圧耐性が PE 管よりも高いことが Tokiyoshi et al. (2014, 2016, 2018) の報告で示された。つまり, 内圧に対する管周方向の応力が高い PE-GF 管の管厚は, 設計基準「パイプライン」(農林水産省農村振興局, 2021) によって求められる設計式 (p.312, 式 9.4.6) から求めると, PE 管に比べおよそ 40%減となり, 今後の水利施設として期待されている。ところが, PE-GF 管は, 複合材料によって高強度, 軽量, 低コストを実現できる反面, PE 管に比べると延性の低下, 脆性化させることになる。とりわけ不同沈下を考えた場合, PE-GF 管は, 地盤追従性に関わる管軸方向の曲げ性能限界を把握する必要があった。

そこで, 本章では実大規模の PE-GF 管 (管内径 $\phi 610$) をバット融着継手を用いて 12m の長さに接続し, 10m 間隔の支点を設けた状態で, その中央部を管路水平方向に一定速度, 1,000mm の水平変位量 (曲率半径: $20D$ (D : 管外径)) まで引張した。その結果, PE-GF 管の管軸方向許容曲率半径は, $60D$ として期待できることが明らかとなった。

4.2 実験方法

4.2.1 実験概要

実験の概略図を **Fig. 4-1** に示す。実験管路は, 予め 12m に接続された状態を構築し, 実験室内で水平に設置した。支点は, 管路中央からそれぞれ 5m 端の位置に応力集中点とならないよう $\phi 100$ の鋼製円柱を用意し, 管側面に鉛直に接触させた。なお, 鋼製円柱は, 管の変位に伴って移動したり, 変位することがないように試験室床面と溶接固定した。そして, 管路中央部は, 力点として管路管軸方向と直交する向きに油圧ジャッキを固定し, 段階的に一定の速度で管を引張できる (水平変位量を与える) ように接続した。また, 管路の両端は, 管路の安全性評価として加圧試験が行えるように鋼製フランジ板でそれぞれ封緘した。そのフランジ板の一方端は, 加圧用コンプレッサーに接続し, 加圧は最大 0.15MPa までとした。

計測した項目は、引張時の荷重、水平変位量、管軸方向ひずみ、管周方向ひずみおよび管の内圧とし、スイッチボックス、データロガーを用いてそれぞれの数値を出力した。なお、実験のケースは、**Table 4-1** に示す7ケースで水平変位量、載荷・除荷・加圧のタイミングを設定した。ここで、250mmの水平変位量は、下水道用ポリエチレン管・継手協会（2015）が示す長期許容曲率半径 $75D$ を参照した。そして、550mmの水平変位量は $60D$ 以下の曲率半径において管路の安全性を確認するため、加圧確認工程を加えて設定した。1,000mmの水平変位量は、 $20D$ に相当し、同じく下水道用ポリエチレン管・継手協会（2015）から短期許容曲率半径の値を参考にした。

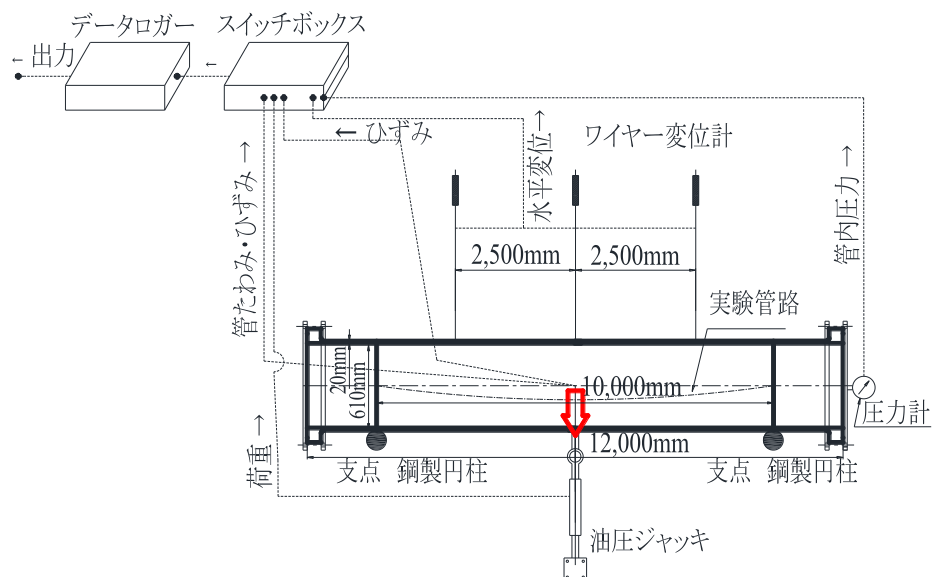


Fig. 4-1 実験の概略図

Experimental schematic of test

Table 4-1 実験のケース
Case study of experimental study

case	水平変位量	載荷	除荷	加圧
①	0mm			○
②	250mm	○		
③	50mm		○	
④	550mm	○		
⑤	550mm			○
⑥	1,000mm	○		
⑦	200mm		○	○

4.2.2 供試管

供試管は、内径 610mm、管厚 20mm の PE-GF 管とし、その管路断面図を **Fig. 4-2** に示す。管路は、両端に継手を持たないプレーンエンド管 3,000mm を 2 本、5,000mm を 1 本とし、両端部は、500mm 長さのスタブエンド構造とした。

PE-GF 管は、PE 樹脂 (PE100) に GF を配合し、スパイラル状に成形されることから管周方向に GF を配向することができる。スパイラルの成形角度は、内径 610mm、成形幅 110mm のテープ状に連続成形されることから 79.8°であることがわかる。**Fig. 4-3** は、内径 1,500mm の PE-GF 管の 3 断面を X 線 CT で捉えた GF の様子を示す。 z 方向とは管軸方向を示し、 θ 方向は管周方向を表す。また、 r 方向は管の半径方向を見た断面写真である。 z - r 断面では GF の端部が見られ、 z - θ 断面および θ - r 断面から管周方向に GF が配向されている様子がわかる。このような PE-GF 管の設計諸元については、**Table 4-2** に示す。一方、管路の継手はすべてバット融着継手で接続されている。バット融着とは、PE 管の接続方法の 1 つで、接続する両端部を材料が溶解する融点以上に予熱し、その後一定の時間、一定の圧力で突き当てることで一体化継手を作る方法である。PE-GF 管のバット融着条件については **Table 4-3** に示す。

(単位：mm)

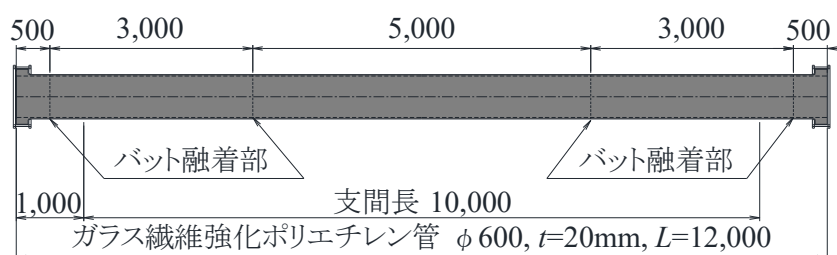


Fig. 4-2 実験管路断面図

Cross section of tested pipe

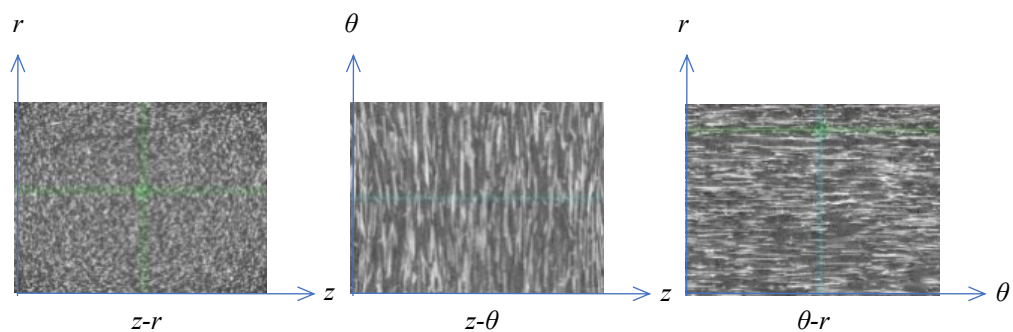
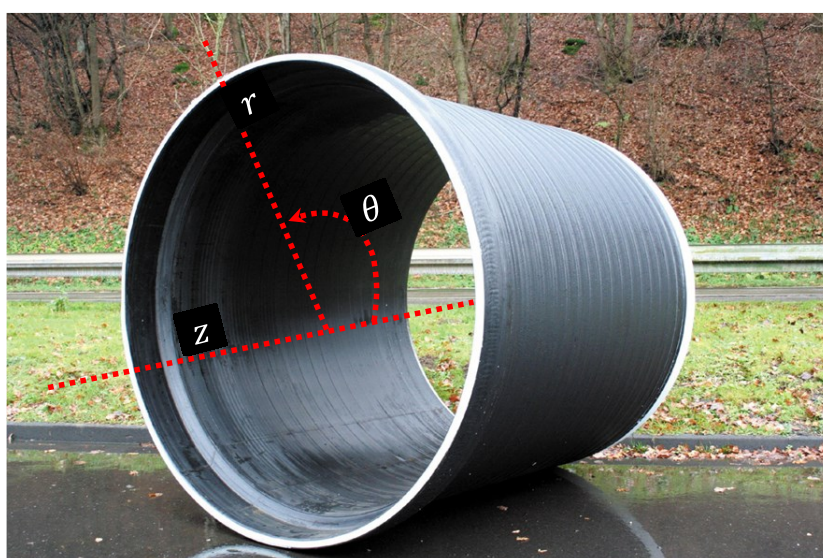


Fig. 4-3 ガラス繊維の様子

Orientation of the glass fiber

Table 4-2 PE-GF 管の設計諸元

Design characteristics of polyethylene reinforced with short glass fiber pipe

項目	単位	値
内径	mm	610
管厚	mm	20
引張降伏強さ（管軸方向）	MPa	24
弾性率（管周方向）	MPa	2,500
（管軸方向）	MPa	1,300
EI	kN・m ²	1.67

Table 4-3 バット融着条件

Technical specification of butt fused joint

項目	単位	値
SIDR（内径厚さ比）	—	30.5
熱板温度	°C	220
加熱圧力	bar	14
冷却時間	min	24
ビード高さ	mm	3

4.2.3 計測

実験で求めた計測項目は、**Table 4-4** に示した 5 項目である。ただし、ひずみ計測点については、**Fig. 4-4** に示す管軸・管周方向の配置とした。そして、管路中央から水平方向に油圧ジャッキを用いて一定の速度（約 10mm min^{-1} ，ひずみ速度 $3\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ ）で引張させた時の荷重（ロードセル TC-500kN）を 1 点計測した。さらに、水平変位量は、ワイヤー式変位計（共和電業製 DTP-D-2KS, DTP-05MDS）を用いて管中央と中央より管軸方向両端へ 2,500mm 離れた位置の 3 点を計測した。

Table 4-4 計測項目

Measurements			
計測項目	計測点数	計測方法	計測位置
荷重	1	ロードセル	管中央部
水平変位量	3	変位計	管中央, 中央より 2,500mm
管軸ひずみ	41 断面 2 等分点	ひずみゲージ	No.1～No.41 引張, 圧縮端
管周ひずみ	3 断面 16 等分点	ひずみゲージ	No.11, 21, 31 管周方向
内圧	1	加圧ゲージ	管端部

管軸方向のひずみは、管の外面上において、275mm の間隔で 41 断面、引張端および圧縮端の合計 82 点で計測した。一方、管周方向のひずみは、管中央と中央より管軸方向両端へそれぞれ 2,750mm 離れた位置の 3 断面、円周方向 16 等分点での計測とした。

管軸方向のひずみには、単軸計測用ゲージ（東京測器研究所製 CFLA-3-120-50-5LT）を用いて計測し、管周方向のひずみには、2 軸計測用ゲージ（CFCA-3-120-50-5LT）を用いて計測した。

なお、管路全体の健全性を確認するため、水平変位量が 0mm, 550mm および 1,000mm まで到達した後に、コンプレッサーを用いて加圧試験を行った。加圧試験の圧力ゲージは、共和電業製 PG-10KU を用いて 1 点計測した。実験の様子は Fig. 4-5 の写真と概略断面図に示す。

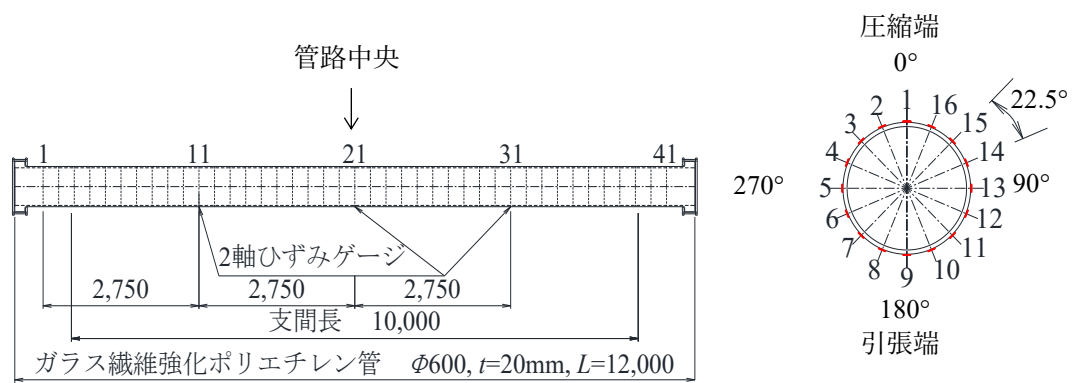


Fig. 4-4 ひずみ計測点の配置

Position of strain gauges

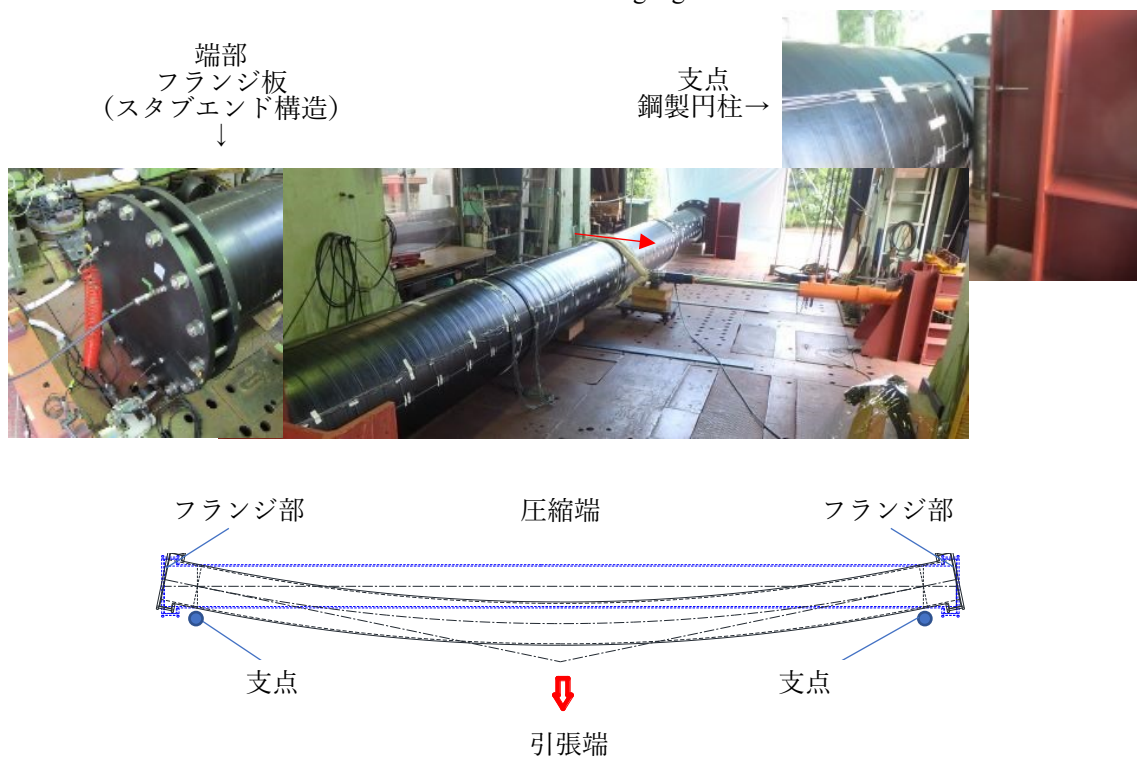


Fig. 4-5 曲げ特性試験の様子

Bending test

4.3 結果および考察

4.3.1 水平変位量と荷重の結果

水平変位量の時系列変化を **Fig. 4-6** に示す。グラフ中の丸数字は、**Table 4-1** に示す試験 case 番号を示す。case③⑦では除荷したため、水平変位量が減少した様子が観察され、case ⑥では最大の水平変位量が確認できる。Oldfield et al. (2016) の研究から PE 管の許容曲率半径が管外径 D との関係を用いて $60D$ と記述されていたことから、PE-GF 管についても許容曲率半径 $60D$ を曲げ特性の仮基準として設定した。 $60D$ における管路中央の水平変位量は、この試験の支点間距離と $60D$ の円弧、三平方の定理から求められる式 (4.1) を用いて 319mm が導かれ、**Fig. 4-6** の破線ラインに相当する。除荷後、100 分程度で 200mm 近くまで水平変位量が復元したことがわかる。

$$R = \frac{x^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}{2x} \quad (4.1)$$

ここで、 R ：曲率半径 (m)、 x ：水平変位量 (m)、 L ：支点間距離 (m) である。

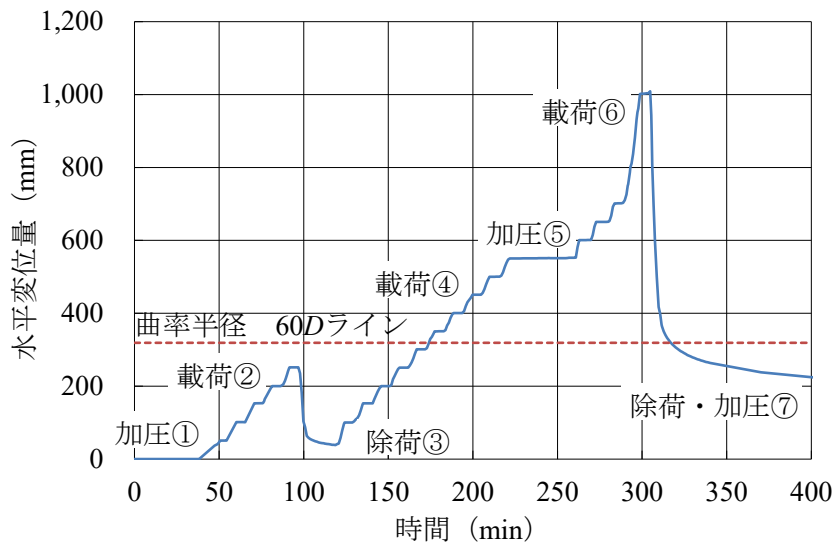


Fig. 4-6 管路の水平変位量の時系列変化

Displacement with time frame

管路に与えられた荷重と水平変位量の関係を **Fig. 4-7** に示す。水平変位量 250mm から水平変位量 50mm へ荷重曲線が 0kN に向かっている (case③) のは、除荷の工程を設けたためである。曲率半径 60D (変位量 319mm) の荷重は 31.06kN であり、曲率半径 20D (変位量 1,000mm) での荷重は 66.76kN であった。

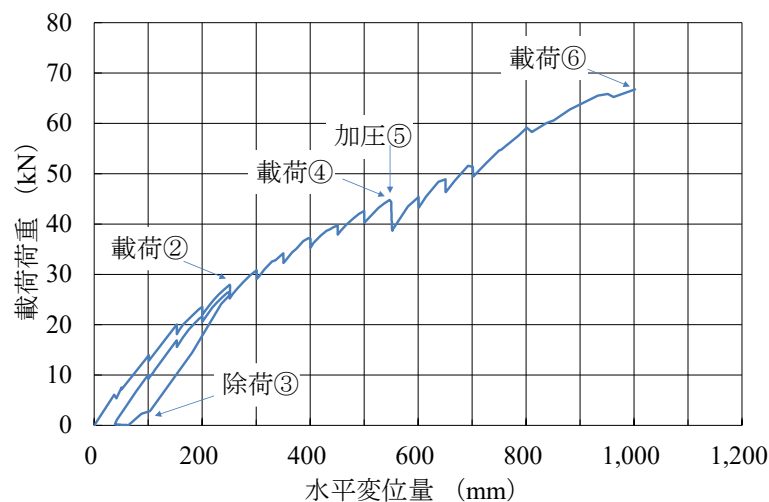


Fig. 4-7 管路の水平変位量と荷重
Comparison with displacement and force

4.3.2 ひずみの結果

4.3.2.1 管軸方向ひずみ

管軸方向ひずみの計測点は、**Fig. 4-8** に示す 41 断面とした。No.21 が管路中央に位置し、管軸両端方向にそれぞれ 2,750mm 離れた場所が No.11 および No.31 に相当する。それら計測点のうち、管路中央から両端方向に 10 断面、合計 21 断面における水平変位量と管軸方向ひずみの関係を、**Fig. 4-9** に示す。凡例マーカがない 250mm の水平変位量は、case②の工程であり、凡例マーカ○で示す 250mm の水平変位量は、case③から case④へ向かう工程の管軸方向ひずみである。両者のグラフは、ほぼ一致していることから差異は見られない。管軸方向ひずみは、圧縮端と引張端 (0°, 180°) の 2 等分点を計測したので、**Fig. 4-9** の上

図は、圧縮端の管軸方向ひずみを示し、下図は、引張端の管軸方向ひずみ分布とした。

計測の結果、管路中央の引張端管軸方向ひずみは、曲率半径 $60D$ （水平変位量 319mm ）の時、 1.2% であった。さらに水平変位量 $1,000\text{mm}$ の時、圧縮端中央管軸方向ひずみは、最大 3.9% を示し、引張端では、中央より1ピッチ左方に変位した場所で最大 4.3% の引張ひずみとなった。引張ひずみが中央より左方に変位した原因は、PE-GF 管がスパイラル状に連続して成形されているため、成形残留ひずみによるねじれ影響が考えられる。圧縮端においても最大点は管路中央であったが、近似した3点の平均位置は右方に変位しており、この点も引張最大点と圧縮最大点にねじれが生じていることが見て取れる。 $1,000\text{mm}$ の最大水平変位量に到達後、除荷し管内加圧試験を行ったが、管の破断、継手となるバット融着部の破断等による漏洩は見られなかった。

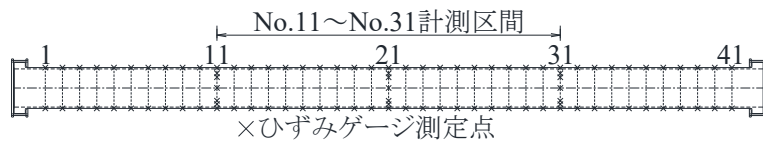


Fig. 4-8 管軸ひずみゲージの計測点
Strain gauge position of longitudinal direction

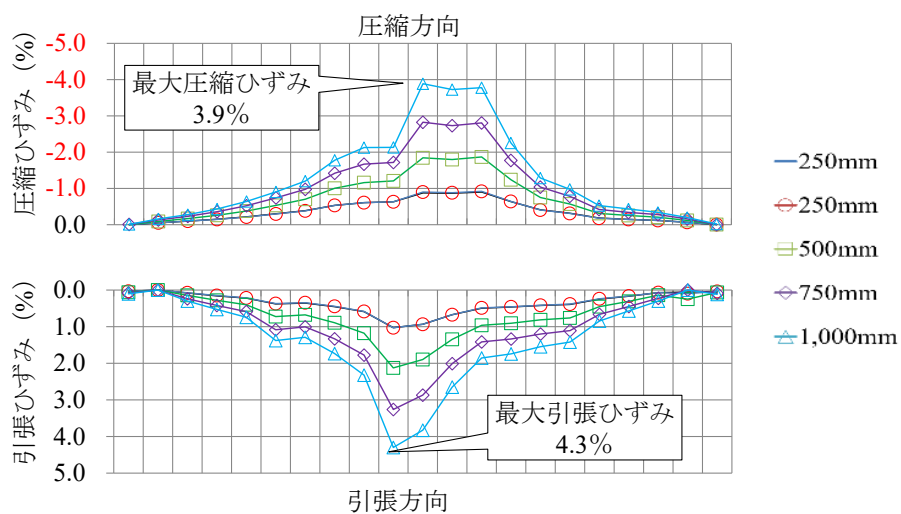


Fig. 4-9 管軸ひずみ
Strain of longitudinal direction

4.3.2.2 管周方向ひずみ

計測点 No.21 断面（管路中央）の水平変位量と管周方向ひずみの変化を **Fig. 4-10** に示す。
なお、管周方向ひずみの計測は、2 軸ゲージを用いたため、管周方向ひずみと共に出力された同点の管軸方向ひずみについても比較検証として同じレーダーチャートのレンジで示した。その結果、管周方向ひずみは、水平変位量 1,000mm まで全体的に有意差は見られない。これは、20D 程度までの緩やかな曲げ配管の流路断面には大きな変化がなく円形が保たれたことを示す一方、水平変位量に伴って管軸方向ひずみは顕著に増加する様子が見られる。

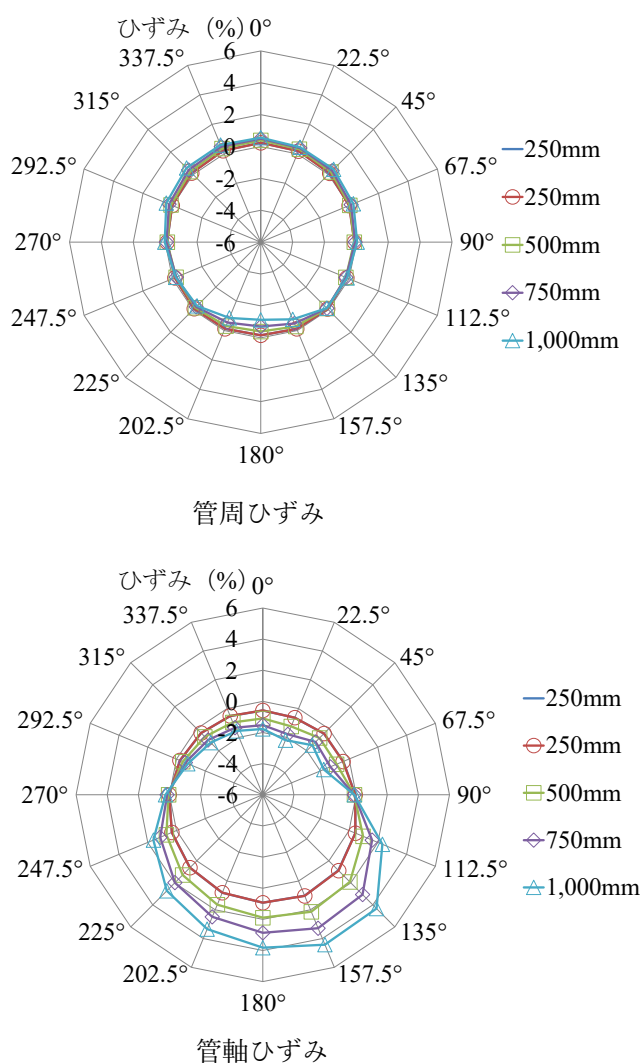


Fig. 4-10 管周ひずみと管軸ひずみの比較

Comparison with strain of circumferential and longitudinal

4.3.2.3 管軸方向ひずみと管周方向ひずみの比較

計測点 No.21 断面（管路中央）のうち、管軸方向ひずみの2点（0°, 180°）および管周方向ひずみの4点（0°, 90°, 180°, 270°）について水平変位量との関係を **Fig. 4-11** に示す。水平変位量を縦軸に取り、横軸は発生ひずみとした。その結果、管軸方向ひずみは圧縮と引張の関係でおよそ対称となる関係が出力された。最大ひずみは、管軸方向 180°（引張端）位置で 3.8%であった。一方で、管周方向ひずみは、最大でも 1.0%程度と管軸方向のおよそ 4分の1程度となった。管側の管周ひずみには、ほぼ変化が見られず、管周方向 180°位置で 0.6%の引張ひずみ、管周方向 0°位置で 1.1%の圧縮ひずみが確認される程度に留まった。

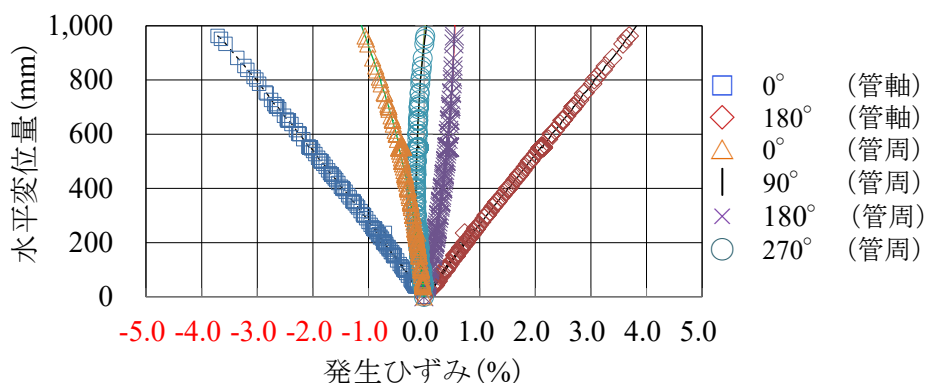


Fig. 4-11 発生ひずみと水平変位量の関係

Relationship with actual strain and displacement

4.3.3 考察

4.3.3.1 曲率

設計管厚をもとに半径 $60D$ の円弧が描く曲線と、半径 $60D$ の円弧から求められる管路中央の水平変位量が 319mm の時に、管路中央からそれぞれ両端管軸方向に 2,500mm の位置で計測された実測値を結んで作成された実管路の曲線を **Fig. 4-12** に示す。その結果、半径 $60D$ の円弧が描く曲線よりも実測された曲率は小さくなり、半径 $60D$ の円弧より実際の管路は、高い曲げ性能を示していたことがわかった。その反面、円弧の計算によって導かれる曲率では、PE-GF 管の曲率が安全側に検討されていることが明らかとなった。

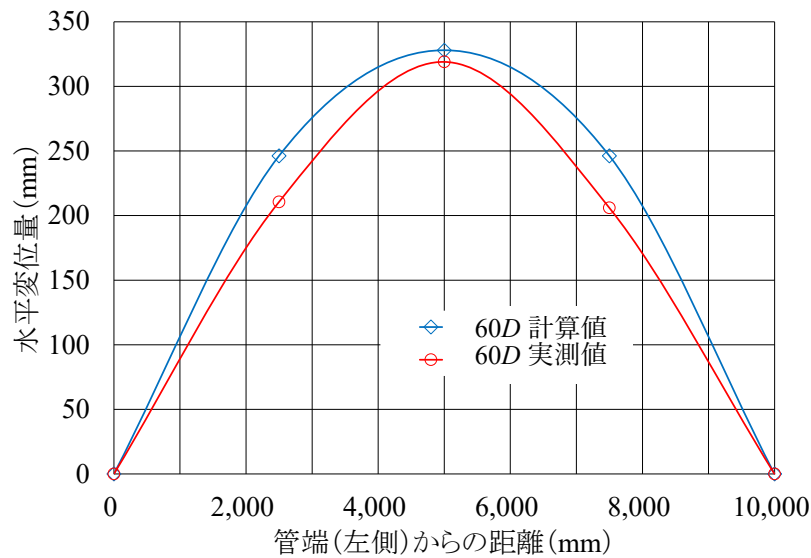


Fig. 4-12 60D の実測値と計算値の比較
Actual and calculated value of bending curvature (60D)

4.3.3.2 管軸方向ひずみと水平変位量の関係

管路中央の引張端管軸方向ひずみと水平変位量の関係を図 4-13 に示す。考察と共に Fig. 4-13 に示す試験の流れを振り返ると、case①において水平変位量が 250mm まで 10mm min^{-1} の速度で変位させ、case②で载荷が 0 となるまで除荷を行った。case③では、再载荷のポイントから再び 10mm min^{-1} の速度で载荷を行った。曲率半径 $60D$ は、水平変位量 319mm に相当する。

試験 case①～case③の結果は、一次関数直線上に回帰した。曲率半径 $60D$ 以下では直線応答であったことに加え、材料管軸方向の降伏ひずみ 4.0%と比較しても、管軸方向最大ひずみが 1.2%と十分安全側であることから、PE-GF 管の許容曲率半径を $60D$ 以下とすることに問題ないことが一考できる。

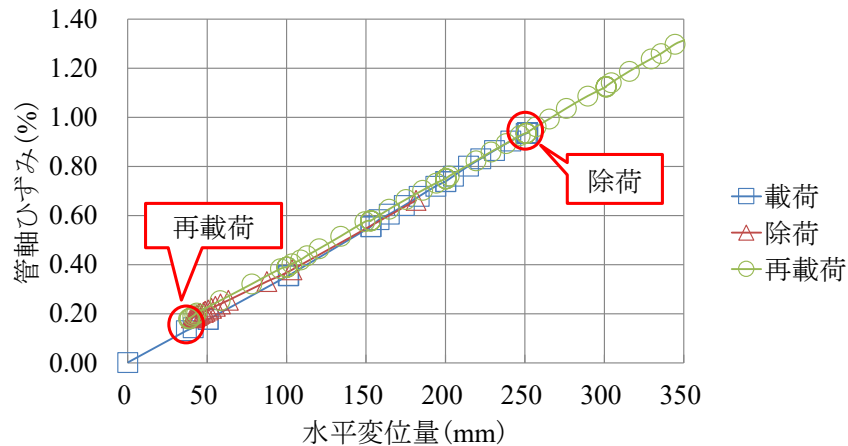


Fig. 4-13 管軸ひずみと水平変位量の関係

Cross section view of displacement

4.3.3.3 管周/管軸方向ひずみの割合と水平変位量の関係

管路中央の引張端管周方向ひずみを同位置で直交する管軸方向ひずみで除した値に対する水平変位量の間係を **Fig. 4-14** に示した。縦軸にはその比の絶対値を示し、横軸は水平変位量とした。水平変位量 180mm 付近の鉛直変化点は、除荷時の無負荷状態を示し、水平変位量 550mm 付近の鉛直変化点は、加圧試験のため一時的に停止した後の連続プロット点を示す。載荷過程と除荷過程のプロット点に有意差が見られないことや、特異点が現れていないことから、管路全体に損傷がないことがわかる。また、除荷後の管内加圧試験でも圧力の低下、漏洩による問題が見られないことから、20D までの曲率変位後に除荷しても管路としての健全性は確認された。ただし、管端部に発生するスラスト力の影響で変化するひずみ変化量は考慮していない。

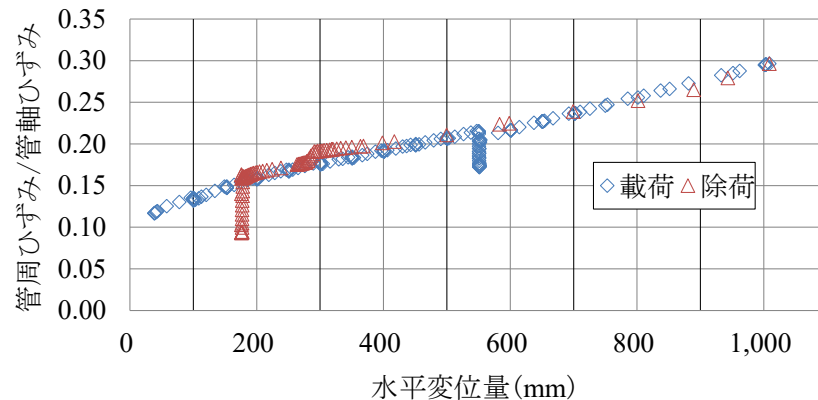


Fig. 4-14 管周/管軸ひずみの割合と水平変位量の関係
Relationship between ratio of strain and displacement

4.3.3.4 計算ひずみと実測ひずみの関係

60D の円弧における管路中央の引張端管軸方向ひずみの実測値と式 (4.2) を用いて計算された管路中央の引張端管軸方向ひずみの関係を **Fig. 4-15** に示す.

$$\varepsilon = \frac{6Dx}{L^2} \quad (4.2)$$

ここで、 ε : ひずみ、 D : 管外径 (mm)、 x : 水平変位量 (mm)、 L : 支点間距離 (mm) である.

まず、この実験で明らかになった管内径 610mm の管路中央管軸方向引張ひずみの実測値を○印で示した. そして、式 (4.2) に実験で用いた条件を入力し、計算によって求められた管軸方向ひずみを◇印でプロットした. 式 (4.2) は、単純梁、自由端、2 点支持の条件からひずみを求める式である. その結果、管内径 610mm では計算管軸方向引張ひずみ値 12,554 μ であり、実測された管軸方向引張ひずみ値 12,540 μ とまったく有意差は見られず、よく整合した. そのため、PE-GF 管の曲げ特性は、単純梁の一般的な公式でよく整合することが明らかとなった. また、PE-GF 管の標準口径 (管内径 300mm～2,000mm) の計算ひずみ値を求めると、口径が大きくなるほど発生引張ひずみは小さくなる傾向が見られた. 管内径 2,000mm

では式 (4.2) から $12,505\mu$ となる一方、最も大きな管軸方向ひずみは管内径 300mm において $12,720\mu$ であった。これらは、PE-GF 管材料の管軸方向降伏ひずみ 4.0% ($40,000\mu$) と比較しても十分な安全性が認められるが、管内径 610mm を除く他口径の検証は今後必要と考える。

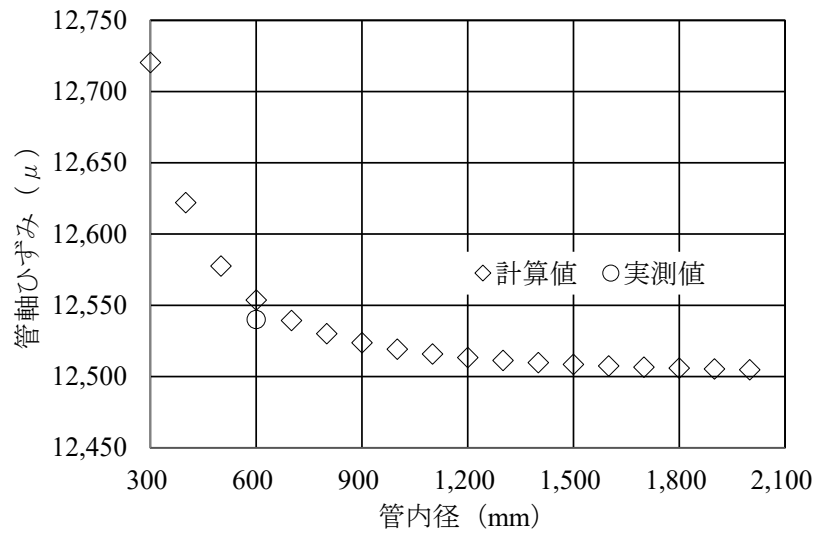


Fig. 4-15 計算ひずみと実測ひずみの関係
Comparison of calculated strain and actual strain

4.4 まとめ

本章では PE-GF 管の直管を用いた実大曲げ変形特性の評価試験を行った。本章で得られた知見や課題を以下に示す。

- 1) 最大水平変位量 1,000mm に到達した時の曲率半径は、 $20D$ に相当した。最大変位到達後、管路内の密閉性を加圧試験によって検証したが、バット融着部を含め一体化された管路全体に不具合箇所は認められなかった。
- 2) 曲率半径 $60D$ の時、管内径 610mm の引張端中央部管軸方向に発生した実測ひずみと、式 (4.2) を用いて求められた計算ひずみの値は、よく整合した。また、実験と同等の円弧による水平変位量、支点間距離を条件とし、式 (4.2) から求められる管内径と管軸方向引

張ひずみの関係は **Fig. 4-15** の通り示された。ただし、実験以外の口径については、今後検証の必要性がある。

- 3) PE-GF 管の大きな特徴と言える管周方向の剛性と管軸方向の柔軟性を示す異方性が、実物大規模の曲げ試験を通して初めて明らかにされた。さらに、曲率半径 $60D$ での引張端管軸方向の最大ひずみは、1.2%であった PE-GF の材料管軸方向の降伏ひずみが 4.0%であることから設計許容曲率半径 $60D$ 以上とすることが妥当であると判断できる。
- 4) PE-GF 管を用いた緩やかな曲線化管路では、管断面に大きな変化はなく、円形が保たれ、流路断面に影響しないことがわかった。

第4章の引用文献

- 下水道用ポリエチレン管・継手協会(2015):下水道用ポリエチレン管技術資料(PA-11-2015), (JSWAS K-14).
- 丸山利輔, 三野 徹, 渡辺紹裕 (1980):パイプライン化と水資源, 農土誌, **48**(3),13-18.
- 南雲 人, 今泉祐治, 寺田健司 (2019):施工後 19 年経過した泥炭地における農業用管水路と周辺地盤の沈下, 第 63 回北海道開発技術研究発表会, 941-945.
- 日本工業規格 (2018a): JIS K 6799-1, ガラス繊維強化ポリエチレン管システムー第 1 部: 通則.
- 日本工業規格 (2018b): JIS K 6799-2, ガラス繊維強化ポリエチレン管システムー第 2 部: 管.
- 日本工業規格 (2018c): JIS K 6799-3, ガラス繊維強化ポリエチレン管システムー第 3 部: 継手.
- 西村寛之 (2008):プラスチックパイプの製品設計と長期耐久性評価, 成形加工, **20**, 790-796.
- 西村 聡, 三木拓也 (2014):泥炭地盤中の管状構造物の長期沈下に関する模型実験, 地盤工学会北海道支部技術報告集, **54**, 189-194.
- 農林水産省農村振興局 (2021):土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」.
- Oldfield, T., Turner, T. and Young, A. (2016): Influence of cold formed bending on strain based design buckling limits, *2016 11th International Pipeline Conference*, IPC2016-64342.
- 食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会 (2015):農業水利施設の機能保全の手引き, まえがき.
- Tokiyoshi, M., Kudo, H., Endo, M., Inoue, K., Shibasaki, N., Nakayama, T., Matsukuma, H., Kodera, M., Niinomi, Y., Masuko, M. and Vanspeybroeck, P. (2014): Performance of polyethylene pipes

with glass fiber, *Proceedings of the 17th Plastic Pipes Conference*, Chicago, Illinois, USA, <https://plasticpipesconference.com>, (8 pages).

Tokiyoshi, M., Vanspeybroeck, P., Inoue, K., Fullgrabe, S., Kuriyama, T., Kawabata, T. and Hinobayashi, J. (2016) : Long-term behavior of glass fiber reinforced polyethylene, *Proceedings of the 18th Plastic Pipes Conference*, Berlin, Germany, <https://plasticpipesconference.com>, (7 pages).

Tokiyoshi, M., Takahara, G., Hinobayashi, J., Kawabata, T. and Kuriyama, T. (2018) : Field test of glass fiber reinforced polyethylene pipe system at soft ground, *Proceedings of the 19th Plastic Pipes Conference*, Las Vegas, Nevada, USA, <https://plasticpipesconference.com>, (15 pages).

渡部龍正, 鋤田泰子, 後藤浩之 (2012) : 北海道浦河町の泥炭地盤震動特性と管路被害, 土木学会論文集 A1, **68**(4), I_244-I_252.

第5章

ガラス繊維強化ポリエチレン管継手の力学特性に関する検討

5.1 概説

泥炭地盤に布設される農業用パイプラインの継手に起因する抜け、破断といった事例がたびたび発生している。渡部ら（2012）は、管軸方向の抜けだけでなく曲げによる継手からの漏水被害を報告している。井谷ら（2015）は、軟弱地盤に埋設された管路の継手事故の事例を報告している。また、軟弱地盤に関する不同沈下の影響は、西村・三木（2014）の報告によると、数年～数十年の時間スケールで最大数十 cm 程度になることもわかってきた。さらに、南雲ら（2019）は、泥炭地において施工後 19 年経過した農業用管水路が不同沈下した実際の状況を明らかにした。

このような泥炭地盤は、N 値が 0 に近い値となることが多い。こうした軟弱な地盤では、管路が不同沈下して継手部の離脱が生じやすいため、融着等による一体化管路を用いることが望ましい。

そのような一体化管路には、第 4 章の通り PE-GF 管が有効であるが、PE-GF 管は複合材料によって高強度、軽量、低コストを実現できる反面、PE 管に比べると延性が低下し、脆性化させることになる。とりわけ不同沈下を考えた場合、地盤追従性に関わる管軸方向の曲げ性能限界を把握する必要があった。

そこで、第 4 章では、実大規模の PE-GF 管（内径 $\phi 610$ ）を 12m の長さに接続し、その両端部にバット融着継手を配した管路の水平曲げ試験を実施した。その結果、曲率半径 $60D$ （ D ：管外径）での引張端管軸方向の最大ひずみは、1.19%であり PE-GF 管の材料管軸方向

の降伏ひずみ 4.0%と比較しても設計許容曲率半径 $60D$ 以上とすることが妥当であると判断された。

さらに、PE-GF 管を曲率半径 $20D$ に相当する水平変位量 1,000mm まで変位させた状態で、管内に空気圧を負荷する加圧試験を実施したが、バット融着部を含め一体化させた管路全体に漏洩などの不具合は生じなかった。一方、円周方向のひずみ分布などから PE-GF 管を用いた水平曲げ試験の曲線化した管路では、管周方向の断面に大きな変化はなく、円形が保たれ、流路断面に影響しないこともわかった。

しかしながら、これらの実験結果は、直管に応力集中点を設けており、継手を起点とする変状が生じた時は、どのような挙動となり、どの程度の曲率に応答するのか明らかにされたものはない。そこで、PE-GF 管の水平曲げ試験と同様に実大規模の PE-GF 管の EF 継手を管路中央に配置し、水平曲げ試験を実施した。加えて、継手の終局限界を確認するため、破壊点を確認できるまで管路に水平変位を与え続けた。

5.2 実験方法

5.2.1 実験概要

実験の概略図を **Fig. 5-1** に示す。実験管路は、第 4 章の管体の許容曲率半径を求める実験と同様に、予め 12m に接続された状態を構築し、実験室内で水平に設置した。支点は、管路の継手中央からそれぞれ 5m 端の位置に応力集中点とならないよう $\phi 100$ の鋼製円柱を用意し、管側面に鉛直に接触させた。なお、鋼製円柱は、管継手の変位に伴って移動したり、変位することがないように試験室床面と溶接固定した。

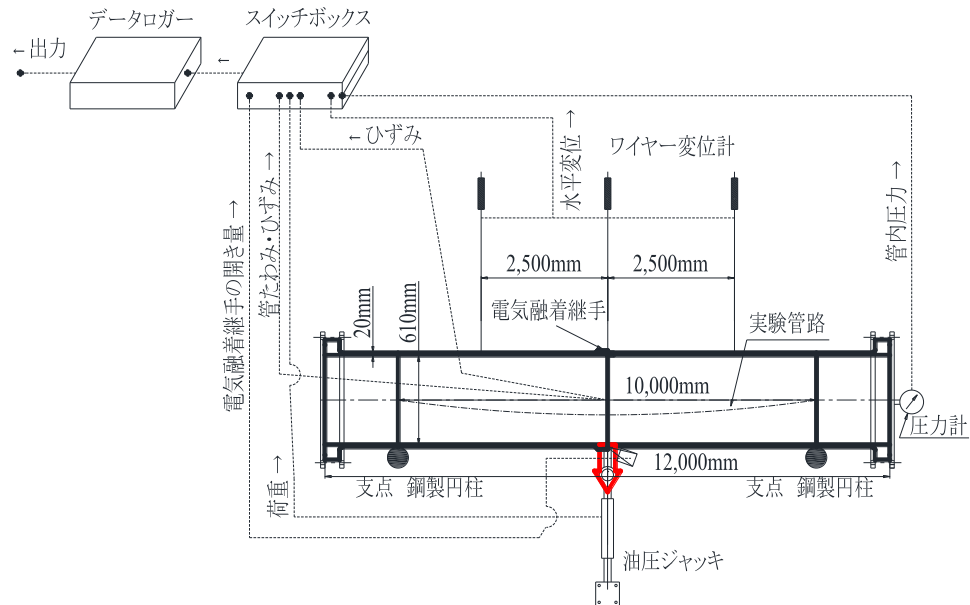


Fig. 5-1 実験の概略図

Schematic diagram of the experiment

そして、管路中央継手部は、力点として管軸方向と直交する向きに、リング状のベルトを管に巻き付け、油圧ジャッキと接続した。また、段階的に一定の速度で破断点が目視確認できるまで継手を引張できる（水平変位量を与える）構造とした。

管路の両端は、継手管路の安全性評価として、管内に空気圧を負荷する加圧試験が行えるように鋼製フランジ板でそれぞれ封緘した。そのフランジ板の一方端は、加圧用コンプレッサーに接続し、加圧条件は、第4章の管路試験の2倍となる 0.30MPa とした。

計測した項目は、引張時の荷重、水平変位量、管軸方向ひずみ、管周方向ひずみ、内圧に加え、引張側管軸方向中央の EF 継手の継手開き量とした。なお、実験のケースは、Table 5-1 に示す 8 ケースで水平変位量、载荷（油圧ジャッキによる管路中央部の引張）・除荷（油圧ジャッキの引張荷重の除荷）・加圧のタイミングを設定した。

Case②の 250mm の水平変位量は、下水道用ポリエチレン管・継手協会（2015）が示す長期許容曲率半径 $75D$ である。そして、Case④および Case⑤の 550mm の水平変位量は、 $60D$

以下の曲率半径において管路の安全性を確認できるよう，加圧確認工程を加えて設定した．Oldfield et al. (2016) の研究から PE 管の許容曲率半径が管外径 D との関係を用いて $60D$ と記述されていたことから，PE-GF 管の継手についても許容曲率半径 $60D$ を曲げ特性の仮基準として設定した．なお， $60D$ における管路中央の水平変位量は，この試験の支点間距離と半径 $60D$ の円弧，三平方の定理から求められる式 (5.1) を用いて 316mm が導かれる．

$$R = \frac{x^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}{2x} \quad (5.1)$$

ここで， R ：曲率半径 (m)， x ：水平変位量 (m)， L ：支点間距離 (m) である．Case⑥および Case⑦の 1,000mm の水平変位量は， $20D$ に相当し下水道用ポリエチレン管・継手協会 (2015) の短期許容曲率半径の値を参考に設定した．

Table 5-1 実験のケース
Experiment case

Case	水平変位量	載荷	除荷	加圧
①	0mm			○
②	250mm	○		
③	50mm		○	
④	550mm	○		
⑤	550mm			○
⑥	1,000mm	○		
⑦	1,000mm			○
⑧	>1,000mm	○		

5.2.2 供試管

供試管は、内径 610mm、管厚 20mm の PE-GF 管とし、その管路断面図を **Fig. 5-2** に示す。管路は、管の一方端に受口または差口を有し、その他方に継手を持たないプレーンエンド構造の長さ 5,500mm 管を 2 本である。その両端部は、500mm 長さのスタブエンド構造とした。それら 4 本を接続した管路全長は、12,000mm で、管路中央にある一体成形された受口と差口の嵌合部分は、EF 継手で接続した。

一方、スタブエンドとプレーンエンド部は、バット融着継手で接続した。なお、EF 継手とは、継手部に予め取り付けられた電熱線に規定の時間通電すると継手が熔融し、一体化される方法である。そして、バット融着継手は、EF 継手同様に PE 管の接続方法の 1 つで、接続する両端部を材料が溶解する融点以上に余熱され、その後一定の時間、一定の圧力で突き当てることで一体化継手を作る方法である。

PE-GF 管の諸元は **Table 5-2** に示し、バット融着継手条件および EF 継手条件は、それぞれ **Table 5-3** と **Table 5-4** に示す。

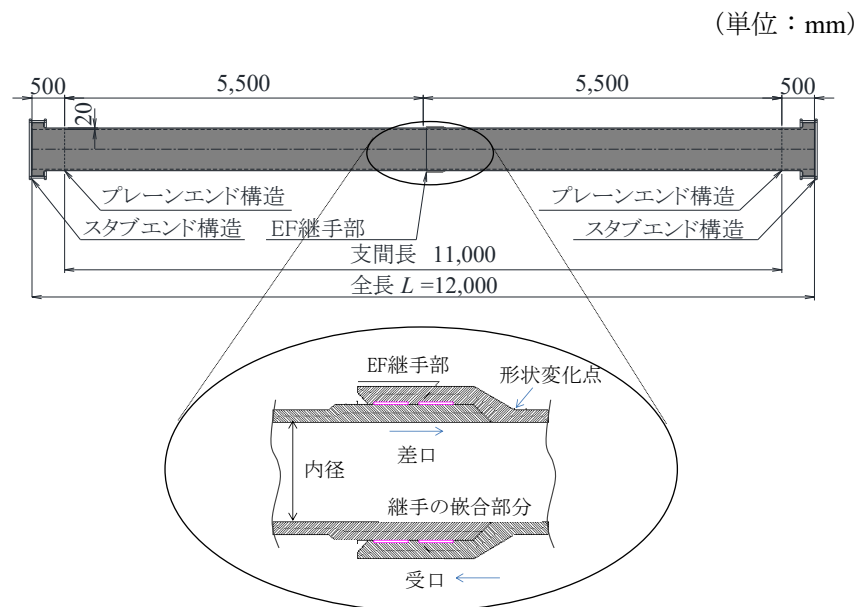


Fig. 5-2 実験管路断面図

Cross section of test pipe

Table 5-2 PE-GF 管の設計諸元

Design characteristics of polyethylene reinforced with short glass fiber

項目	単位	値
内径	mm	610
管厚	mm	20
引張降伏強さ	(管軸方向) MPa	24
弾性率	(管周方向) MPa	2,500
	(管軸方向) MPa	1,300
EI	(管周方向) kN・m ²	1.67
	(管軸方向) kN・m ²	0.87

Table 5-3 バット融着継手条件

Technical specification of butt fusion joint

項目	単位	値
SIDR (内径厚さ比)	-	30.5
熱板温度	°C	220
加熱圧力	bar	14
冷却時間	min	24
ビード高さ	mm	3

Table 5-4 EF 継手条件

Technical specification of electrofusion joint

項目	単位	値
電圧	V	47
抵抗	Ω	0.64
通電時間	min	25
冷却時間	min	60

5.2.3 計測

実験で求めた計測項目は、**Table 5-5** に示した 6 項目である。ただし、ひずみ計測点については、**Fig. 5-3** に示す管軸および管周方向の配置とした。管軸方向のひずみについては、単軸ゲージ（東京測器研究所製 CFLA-3-120-50-5LT）で計測し、管周方向のひずみは、2 軸

Table 5-5 計測項目
Measurements

計測項目	計測点数	計測方法	計測位置
荷重	1	ロードセル	管中央部
水平変位量	3	変位計	管中央, 中央より 2,500mm
管軸ひずみ	42 断面 2 等分点	ひずみゲージ	No.1～No.42 引張端 圧縮端
管周ひずみ	3 断面 16 等分点	ひずみゲージ	No.21, 22, 23 の 管周
継手部開き	1	クリップゲージ	EF 継手部 受口端
内圧	1	加圧ゲージ	管端部

ゲージ（東京測器研究所製 CFCA-3-120-50-5LT）で計測した。

そして、管路の中央から水平方向に油圧ジャッキを用いて一定の速度（約 10mm min^{-1} 、ひずみ速度 $3 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ ）で引張させた時の荷重（ロードセル TC-500kN）を 1 点計測した。さらに、水平変位量は、ワイヤー式変位計（共和電業製 DTP-D-2KS, DTP-05MDS）を用いて管中央と中央より管軸方向両端へ 2,500mm 離れた位置の 3 点で計測した。管軸方向のひずみは、管の外面上において、275mm の間隔で 42 断面、引張端および圧縮端の合計 84 点での計測とした。

管周方向のひずみについては、管中央と中央より管軸方向両端へ EF 継手の形状変化点となる位置の計 3 断面、円周方向 16 等分点とした。

また、管路中央に配置された EF 継手は、受口と差口による嵌合構造であるため、水平曲げに対して引張端、融着部分に開きが生じる。そのため、**Fig. 5-4** に示すクリップ型の隙間ゲージ（東京測器研究所製 クリップ型変位計 UB-5）を用いてその変化を計測した。

最後に、管路全体の健全性を確認するため、水平変位量が 0mm, 550mm および 1,000mm まで変位した後に、コンプレッサーを用いて加圧試験を行った。加圧試験用の圧力ゲージ

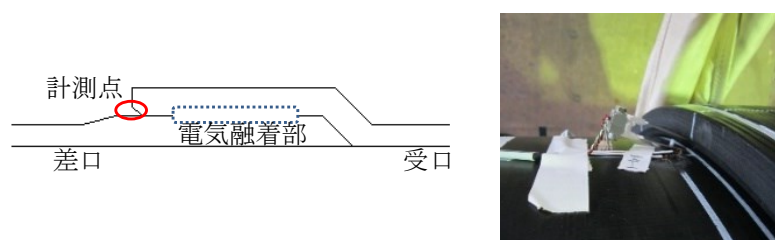


Fig. 5-4 クリップ型隙間ゲージの計測位置

Measurement position of clip feeler gauge

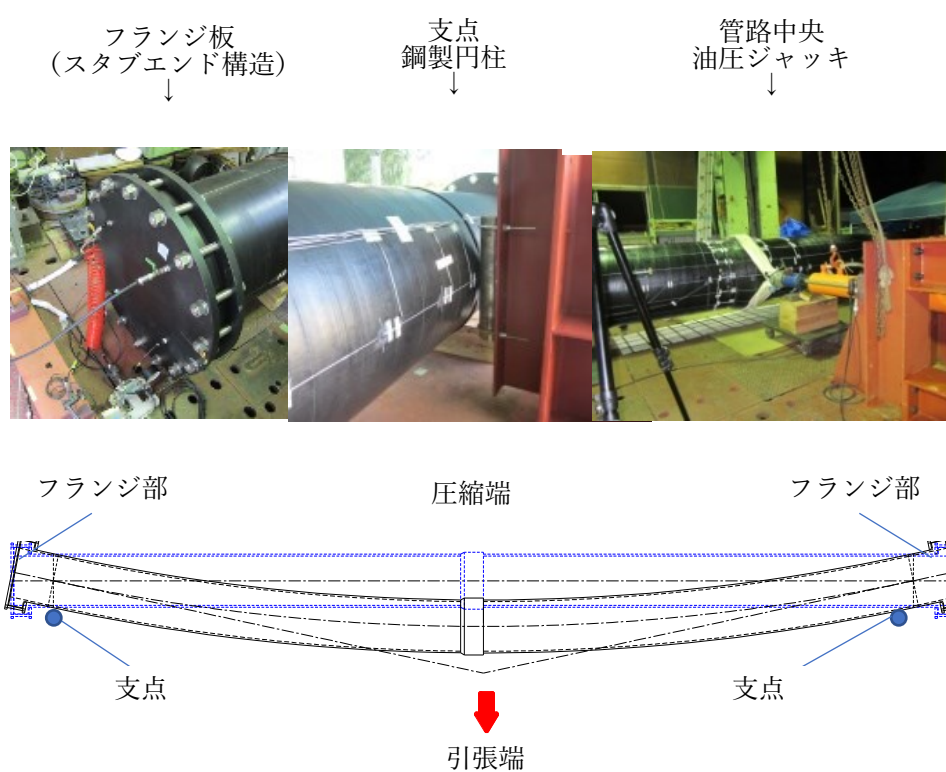


Fig. 5-5 曲げ特性試験の様子

Bending test

5.3 結果および考察

5.3.1 水平変位量と荷重の結果

水平変位量の時系列変化を **Fig. 5-6** に示す。グラフ中の丸数字は、**Table 5-1** に示す実験のケース番号を表す。Case②,④,⑥は載荷を行い、Case③では除荷したため、水平変位量が減少した様子が見られる。Case①,⑤,⑦では、加圧試験を行い管路の安全性を確認した。

管路に与えられた荷重と水平変位量の関係を **Fig. 5-7** に示す。水平変位量 250mm から水平変位量 50mm へ荷重曲線が 0kN に向かっている (Case③) のは、除荷の工程を設けたためである。曲率半径 60D (変位量 316mm) の荷重は 29.62kN であり、曲率半径 20D (変位量 1,000mm, Case⑥) での荷重は 66.06kN となった。

第4章の管路中央が管体であった曲げ試験の同様曲率における荷重は、それぞれ 31.06kN, 66.76kN であったことから、形状差や継手有無による荷重の有意差は見られず、同じ荷重で曲線化した管路を構築できることがわかった。

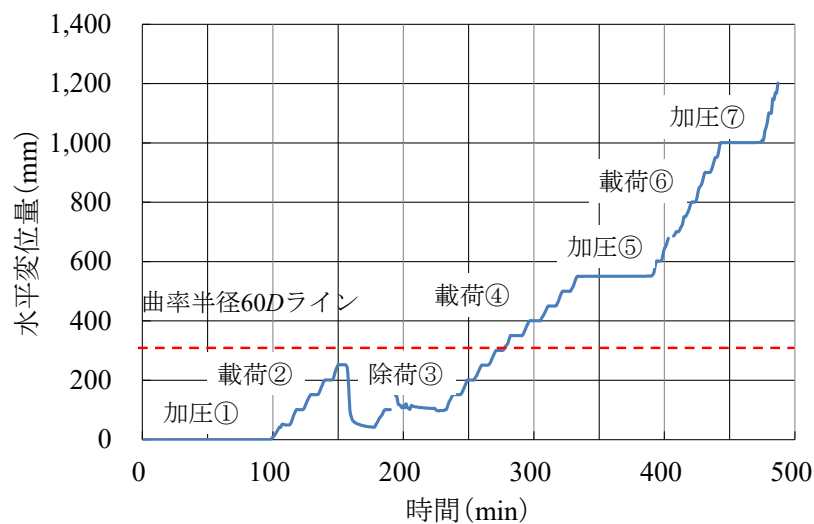


Fig. 5-6 管路の水平変位量の時系列変化
Time history of horizontal displacement

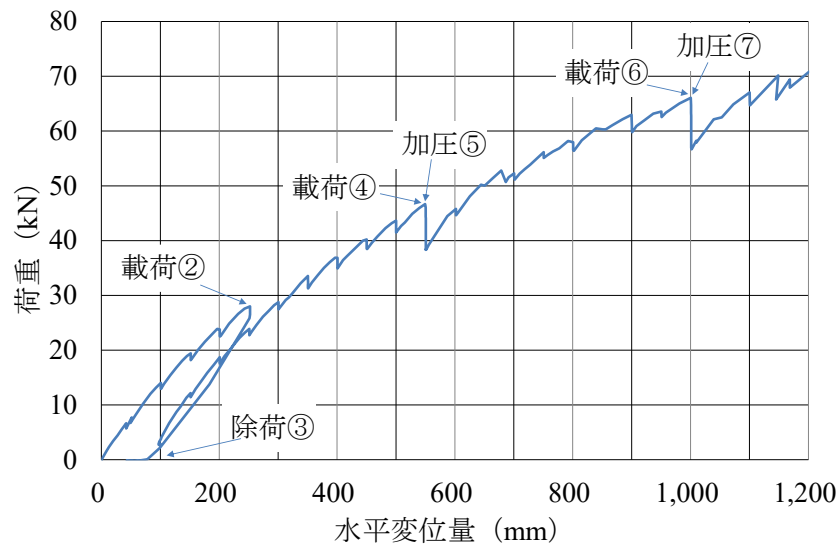


Fig. 5-7 供試管路の水平変位量と荷重
Relation between horizontal displacement and force

5.3.2 ひずみの結果

5.3.2.1 管軸方向ひずみ

管軸方向のひずみ計測点のうち、継手部はひずみの変化を確認するのに重要であるため、**Fig. 5-8** に No.21～No.23 のひずみゲージの詳細位置および油圧ジャッキと接合するベルトの位置を示す。なお、受口と差口の重なり部には電気融着を行うための電熱線がある。そして、比較的大きなひずみの変化が確認された 19 断面における水平変位量と管軸方向ひずみの関係を **Fig. 5-9** に示す。

管軸方向ひずみは、圧縮端と引張端 (0° , 180°) の 2 等分点を計測したので、**Fig. 5-9** の上図は、圧縮端の管軸方向ひずみを示し、下図は、引張端の管軸方向ひずみ分布とした。凡例マーク付き実線は、この実験から求められた結果を示し、点線・破線は第 4 章のデータを引用した。

計測の結果、管路中央継手部の引張端管軸方向ひずみは、曲率半径 $60D$ の時、受口の形状変化点 (No.23) で最大の引張ひずみ $12,522\mu$ (1.25%) が発生し、破壊終局点の起点となることが想定された。

管路中央が管体で行った第 4 章の実験では、同等水平変位量の管軸方向最大引張ひずみが $11,874\mu$ (1.19%) であったことから、継手がある場合、管体のひずみ値と比較して継手が 5% 高い管軸方向ひずみ値を示すことが確認された。なお、No.22 の圧縮ひずみが No.21, No.23 と比較して小さくなっているのは、継手の受口と差口が厚み方向に重なった形状であり、剛性が高いことが要因である。加えて、管厚図心を中心とする曲げモーメントにおいて、圧縮モーメントが No.21 や No.23 の図心位置と異なる No.22 では小さく出力されたことがもう 1 つの要因として考察できる。

1,000mm の水平変位量に到達後、管内加圧試験を行ったが管の破断、EF 継手およびバット融着部の破断等による漏洩は見られなかった。ただし、内圧によって管端部にはスラスト力が生じるが、スラスト力による管軸方向ひずみは、ここでは評価していない。

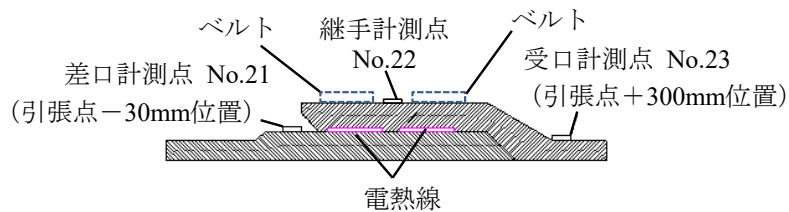


Fig. 5-8 EF 継手の管軸方向ひずみ計測点

Measurement point of longitudinal strain at electrofusion joint

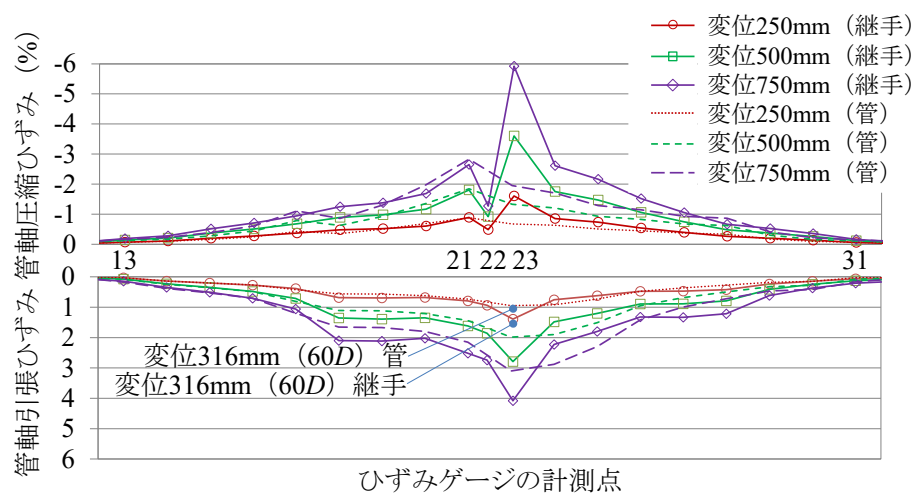


Fig. 5-9 管軸方向ひずみ

Longitudinal strain

5.3.2.2 管周方向ひずみ

水平変位量 250mm, 500mm, 750mm, 1,000mm 時における, 計測点 No.23 断面 (形状変化点) の管周方向ひずみを **Fig. 5-10** に示す. なお, 管周方向ひずみの計測は, 2 軸ゲージを用いたため, 管周方向ひずみと同様に管軸方向ひずみについても, レーダーチャートを示した.

その結果, 管周方向ひずみは, 水平変位量 1,000mm まで全体的に有意差は見られない. これは, 20D 程度までの緩やかな曲げ配管の流路断面には大きな変化がなく, 円形が保たれたことを示している. 一方, 水平変位量に伴って管軸方向ひずみは顕著に増加する様子が見られる. これは, 管路中央が管体で行った第4章の実験と同様の傾向である.

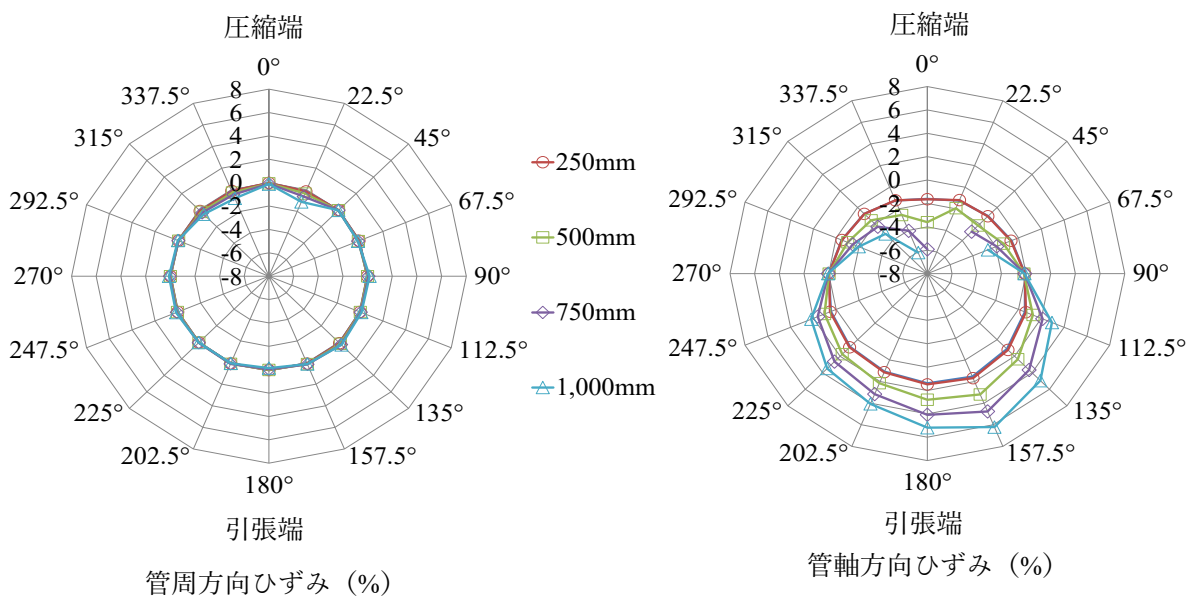


Fig. 5-10 管周方向ひずみと管軸方向ひずみ比較
Comparison with strain of circumferential and longitudinal

5.3.3 考察

5.3.3.1 曲率

設計管厚と半径 $60D$ の円弧から求めた曲線と、半径 $60D$ の円弧から計算した管路中央部の水平変位量 316mm 時における変位計の計測値と実管厚から求めた曲線を **Fig. 5-11** に示す。その結果、半径 $60D$ の円弧が描く曲線よりも実測された曲率は小さくなり、半径 $60D$ の円弧より実際の管路は、高い曲げ性能を示していたことがわかった。一方、円弧の計算によって導かれる曲率では、PE-GF 管継手部の曲率が安全側に検討されていることが明らかとなった。

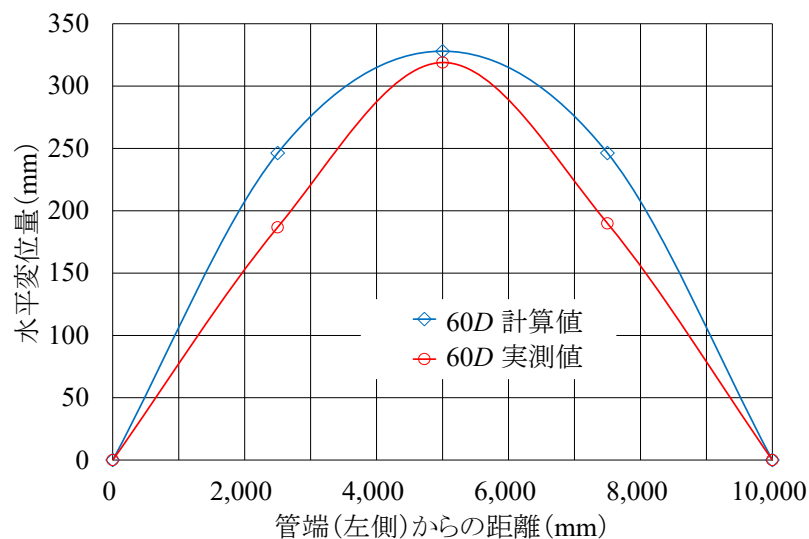


Fig. 5-11 計算曲率と実測曲率の関係

Relation between calculated and actual bending curvature

5.3.3.2 EF 継手の開き量と EF 継手の終局限界

管路中央の EF 継手部に取り付けられたクリップ型隙間ゲージの値と水平変位量の変化を **Fig. 5-12** に示す。継手の隙間 2.5mm 付近で水平変位量が 250mm から 50mm へ向かっているのは、除荷を行った Case③の工程を示している。また、その後は、継手の隙間 4mm から最大 7.5mm まで一定の割合で増加している様子がわかる。なお、管の破断点は、水平変

位置 1,200mm (曲率半径 17D) を超えた 1,207mm で, **Fig. 5-13** に示す 3) の受口側引張端の形状変化点 (継手のテーパ部) であった. ここで, 実際の結果とともに EF 継手部全体の終局限界を考察する. 終局限界とは, 管路として機能しない状態, いわゆる破断, せん断変形が生じたことを示す.

水平変位量の増加に伴って終局限界に向かう EF 継手部は, **Fig. 5-13** に示す 3 点に終局点が集約される. 1 つ目は, 受口側圧縮端による圧縮座屈破壊が考えられ, 形状変化点に生じる応力集中点に発生する管軸および管周方向のいずれかのひずみが, 材料の許容値を超過した時に座屈する.

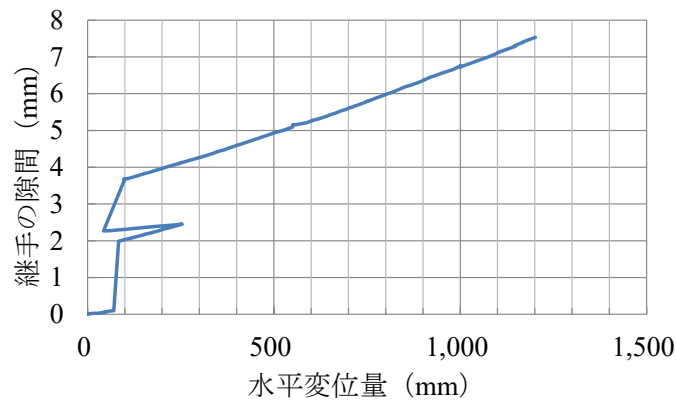


Fig. 5-12 継手の隙間と水平変位量の関係

Relation between gap of joint and horizontal displacement

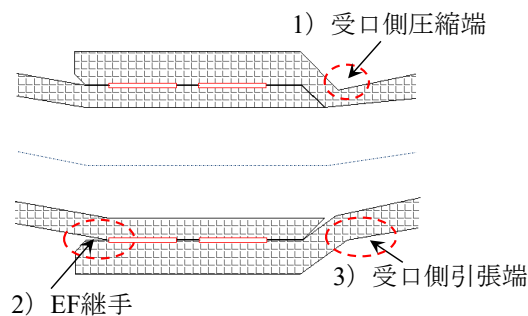


Fig. 5-13 継手の終局点

Fracture point of the joint

2 つ目は、EF 継手の剥離または電熱線近傍の管を起点とする破断によって終局を迎えることが考えられる。そして 3 つ目は、この試験で終局点となった受口側引張端による引張破断であり、圧縮端同様に形状変化点に発生する管軸および管周方向引張ひずみのいずれかが、材料の許容値を超過した時に破断に至る。

EF 継手部は、曲げ試験によって **Fig. 5-14** に示す曲げモーメントが負荷された時、受口端部スリット部 (Slit) が **Fig. 5-15** のように開口する。その開口角度は式 (5.2) で与えられる。

$$\tan \theta_{opening} = \Delta / l_s \quad (5.2)$$

ここで、 $\theta_{opening}$: 継手部の開口角度、 Δ : 開口量 (slit gap)、 l_s : スリット部初期長さである。次に、管体が破断した時の開口角度は、クリップ型隙間ゲージで計測された数値より式 (5.3) の通り示される。

$$\theta_{opening,c} = \tan^{-1}(\Delta c / l) = 10^\circ \quad (5.3)$$

ここで、 $\theta_{opening,c}$: 管体破断時の開口角度、 Δc : 管体破断時の開口量 (7.5mm)、 l : スリット部長さ (40mm) である。スリット部長さは、**Fig. 5-15** に示す受口継手平行端部から EF 継手の電熱線までの長さを表す。他方、**Table 5-6** に示す EF 継手部のピーリング試験 (ISO,1997) 結果より剥離角度は、式 (5.4) の関係であった。

$$15^\circ \leq \theta_{peeling} \quad (5.4)$$

ここで、 $\theta_{peeling}$ はピーリング試験から求められる剥離角度である。すなわち、管体曲げ破壊時には、EF 継手端部に剥離等の損傷が発生していないことが明らかである。

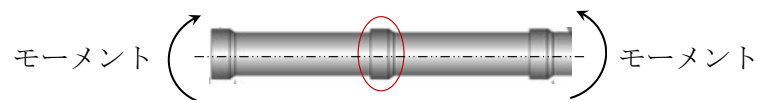


Fig. 5-14 EF 継手のモーメント方向
Moment direction of electrofusion joint

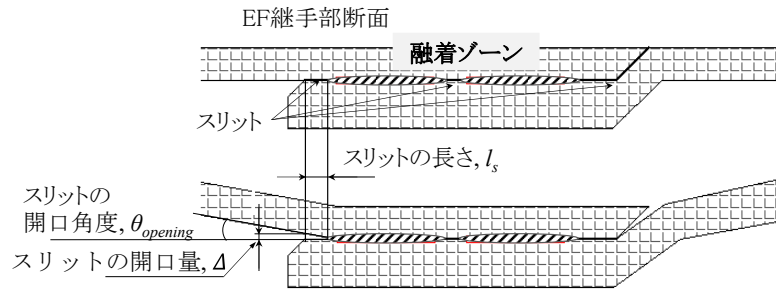


Fig. 5-15 EF 継手の開き量

Gap of electrofusion joint

Table 5-6 ピーリング試験結果

Peeling test results

No.	試験速度 (mm min ⁻¹)	破断点	剥離角度 $\theta_{peeling}$ (°)
1	50	管体	16.7
2	50	管体	15.3
3	50	管体	18.4

5.3.3.3 管軸方向ひずみと水平変位量の関係

管路中央の引張端管軸方向ひずみ (Fig. 5-9, No.22) と水平変位量の関係を図 5-16 に示す。考察とともに Fig. 5-7 に示す試験の流れを振り返ると、Case②において水平変位量が 250mm まで 10mm min⁻¹ の速度で変位させ、Case③で載荷が 0 となるまで除荷を行った。Case④では再載荷のポイントから再び 10mm min⁻¹ の速度で載荷を行った。曲率半径 60D は、水平変位量 316mm に相当する。

試験 Case②～Case④の結果は、一次関数直線上に回帰した。曲率半径 60D 以下では Case③を除き直線応答であったことに加え、第 4 章に示す材料管軸方向の降伏ひずみ 4.0%と比較しても、管軸方向最大ひずみが受口の形状変化点 (No.23) で 1.25%と十分安全側であることから、PE-GF 管継手部の許容曲率半径は、60D 以下とすることに問題がないことが一考できる。

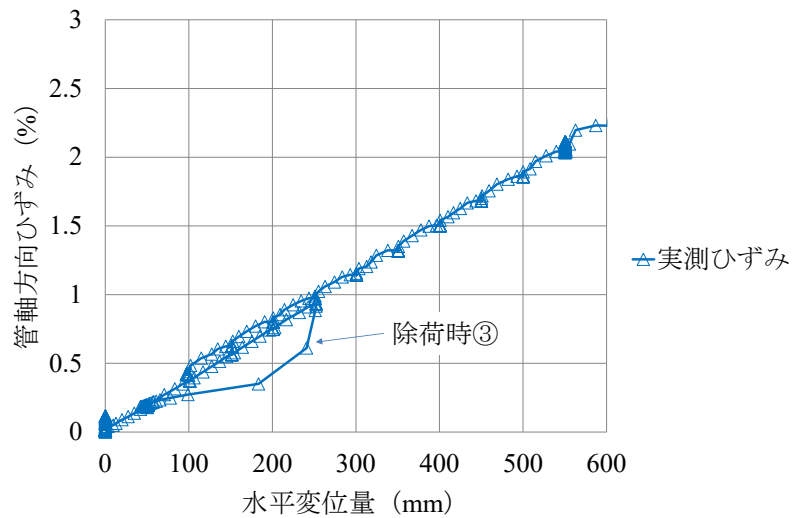


Fig. 5-16 管軸ひずみと水平変位量の関係

Relation between longitudinal strain and horizontal displacement

5.3.3.4 管軸方向ひずみと継手の終局状態

ひずみの値から継手部の終局状態を考察する．始めに，No.21 で計測された管軸方向および管周方向ひずみと水平変位量の間を **Fig. 5-17** に示す．ひずみ測定結果は，終局点の可能性のある 4 点を抽出した．抽出した 4 点は，管軸方向圧縮ひずみ ($\varepsilon_{z,0^\circ}$)，管軸方向引張ひずみ ($\varepsilon_{z,180^\circ}$)，管周方向圧縮ひずみ ($\varepsilon_{\theta,0^\circ}$) および管周方向引張ひずみ ($\varepsilon_{\theta,180^\circ}$) である．

Fig. 5-17 の x 軸は水平変位量を示し，水平変位量 316mm は，この実験で提供された管の曲率半径 $60D$ を表す．No.21 の $\varepsilon_{z,180^\circ}$ では，最大変位時に引張降伏伸び (4%) に近いひずみが観測されたが，終局点とはならなかった．引張降伏伸びとは，管軸方向に切り出した引張試験片から求まる一軸引張試験で荷重降伏点までの伸び量である．

次に，No.23 で計測された管周方向および管軸方向ひずみと水平変位量の間について **Fig. 5-18** に示す．実験の終局時，No.23 の $\varepsilon_{z,0^\circ}$ に 7.6% の圧縮ひずみが現れた．しかし，管路として機能しなくなる偏平や塑性変形を伴う座屈は見られなかった．圧縮終局限界はそれ以上であることがわかる．

その他の点に発生したひずみは，以下の関係式 (5.5) ～式 (5.8) の状態にあった．

No.23 断面（受口側）圧縮端のひずみの関係

$$\varepsilon_{z,0^\circ}, \varepsilon_{\theta,0^\circ} < 0 \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_{z,0^\circ} < \varepsilon_{\theta,0^\circ} < 0 \quad (5.6)$$

No.23 断面（受口側）引張端のひずみの関係

$$0 < \varepsilon_{z,180^\circ} \quad (5.7)$$

$$\varepsilon_{\theta,0^\circ} \approx 0 \approx \varepsilon_{\theta,180^\circ} \leq \varepsilon_{z,180^\circ} \quad (5.8)$$

続いて、No.23 断面（受口側）圧縮端 $\varepsilon_{z,0^\circ}$ と No.23 断面（受口側）引張端 $\varepsilon_{z,180^\circ}$ の終局状態を確認する．まず、圧縮端は、式 (5.5) に示す通り管軸・管周方向ともにひずみは負の値を示した．そして、圧縮端の管軸・管周方向ひずみは、式 (5.6) の関係が成立した．

一方、引張端の管軸方向ひずみは、式 (5.7) の通り正の値を示し、引張端の管軸・管周方向ひずみは、式 (5.8) の関係が成立した．さらに、第4章の曲げ試験から明らかとなった圧縮端と引張端の管軸方向ひずみを曲率半径 $20D$ で比較した値は、式 (5.9) および式 (5.10) のように示される．

$$\alpha_{EF,z,0^\circ} \approx 3.01 \quad (5.9)$$

$$\alpha_{EF,z,180^\circ} \approx 1.31 \quad (5.10)$$

ここで、 $\alpha_{EF,z,0^\circ}$ は、No.23 断面（受口側）圧縮端の $\varepsilon_{z,0^\circ}$ を管体曲げ試験の管路中央圧縮端で発生した管軸方向ひずみで除した値である． $\alpha_{EF,z,180^\circ}$ は No.23 断面（受口側）引張端の $\varepsilon_{z,180^\circ}$ を管体曲げ試験の管路中央引張端で発生した管軸方向ひずみで除した値で、式 (5.10) の値である．このように形状変化点に応力集中が見られるが、圧縮端では管体と比べ 3.01 倍、引張端では管体と比べ 1.31 倍になり、圧縮端がより高いひずみ差を示したと言える．加えて、圧縮端では曲げモーメントが引張端よりも増大したことが要因として推察される．これは、管厚中心にある曲げモーメントが継手の引張端では内側に入る方向に加わり、ひずみを打ち消す方向に作用する一方、圧縮側では逆のモーメントとなり、大きな値となったことが考えられる．

それでもなお、管路破断の終局点は、引張端であったことを考えると、PE-GF 管の受口側引張端のひずみ改善において例えば継手形状（テーパ角度）を見直す等ができれば、継手の終局状態を改善することができると考えられる。

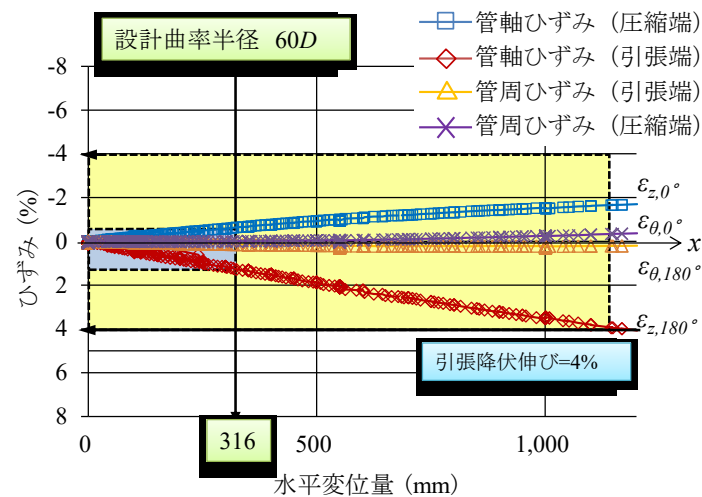


Fig. 5-17 EF 継手差口側 (No.21) ひずみと水平変位量の関係
Relation between strain (No.21) and horizontal displacement

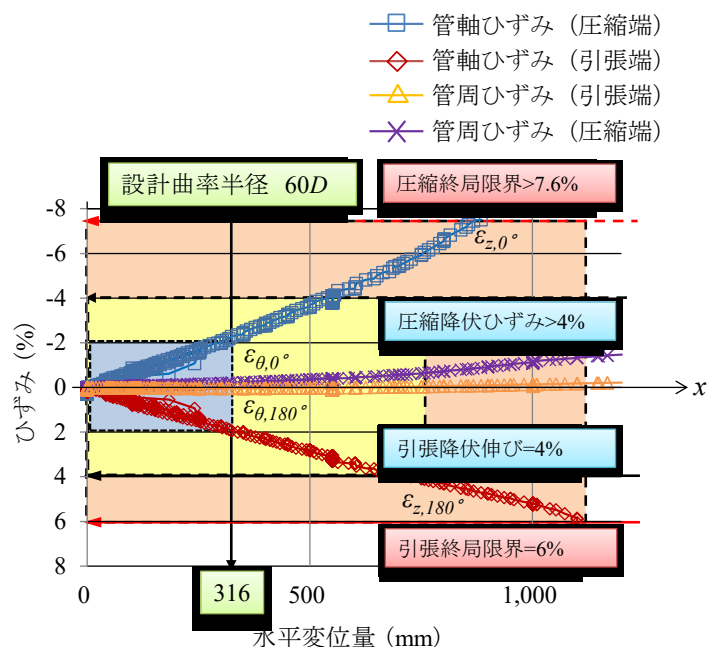


Fig. 5-18 EF 継手受口側 (No.23) ひずみと水平変位量の関係
Relation between strain (No.23) and horizontal displacement

5.4 まとめ

本章では PE-GF 管継手を用いた実大曲げ変形特性と継手の終局限界の確認試験を行った。本研究で得られた知見や課題を以下に示す。

- 1) 最大水平変位量 1,000mm に到達した時の曲率半径は $20D$ に相当した。最大変位到達後、管路内の密閉性を加圧試験によって検証したが、EF 継手を含め一体化された管路全体に不具合箇所は認められなかった。
- 2) PE-GF 管継手の大きな特徴と言える管周方向の剛性と管軸方向の柔軟性を示す異方性が実物大規模の継手曲げ試験を通して明らかにされた。さらに、曲率半径 $60D$ での引張端継手管軸方向の最大ひずみは、1.25%であり、管体の引張端管軸方向の最大ひずみ 1.19%と大きな有意差が見られないことや、PE-GF 管の材料管軸方向降伏ひずみ 4.0%と比較しても十分安全側にあるため、設計許容曲率半径を $60D$ 以下とすることが妥当であると判断できる。
- 3) PE-GF 管継手部の終局状態は、EF 継手部、形状変化点（圧縮端または引張端）に集約された。終局を迎えたのは、引張端であり、その他 2 点と比べると終局限界に差が見られた。つまり、引張端の応力集中状況を緩和させることで継手全体の終局限界を改善できることがわかった。例えば継手形状（テーパ角度）の見直しは有効な改善手段の 1 つと言える。
- 4) PE-GF 管継手を用いた緩やかな曲線化した管路（曲率半径 $20D$ 程度）では、管周方向の断面に大きな変化はなく、**Fig. 5-10** に示した管周方向ひずみの結果から円形が保たれ、管路断面に影響しないことがわかった。

第5章の引用文献

下水道用ポリエチレン管・継手協会 (2015) : 下水道用ポリエチレン管技術資料 (PA-11-2015), [JSWAS K-14].

ISO (1997) : ISO 13954, Plastics pipes and fittings - Peel decohesion test for polyethylene (PE) electrofusion assemblies of nominal outside diameter greater than or equal to 90 mm.

井谷昌功, 西山竜朗, 井端 洸, 河端俊典 (2015) : 農業用パイプラインにおける漏水事故実態に関する調査研究, 雨水資源化システム学会誌, **20**(2), 61-66.

南雲 人, 今泉祐治, 寺田健司 (2019) : 施工後 19 年経過した泥炭地における農業用管水路と周辺地盤の沈下, 第 63 回北海道開発技術研究発表会発表論文集, 941-945.

西村 聡, 三木拓也 (2014) : 泥炭地盤中の管状構造物の長期沈下に関する模型実験, 地盤工学会北海道支部技術報告集, **54**, 189-194.

Oldfield, T., Turner, T. and Young, A. (2016) : Influence of cold formed bending on strain based design buckling limits, *2016 11th International Pipeline Conference*, IPC2016-64342.

渡部龍正, 鋤田泰子, 後藤浩之 (2012) : 北海道浦河町の泥炭地盤震動特性と管路被害, 土木学会論文集 A1, **68**(4), I_244-I_252.

第 6 章

結論

6.1 結論

全国の基幹的農業水利施設の約 2 割が既にその耐用年数を超過し、新たに毎年約 500 の施設が更新時期を迎えている。農業用パイプラインにおいても、老朽化の進行にともない、突発事故があとを絶たない現状にある。加えて、地震大国である我が国では、インフラ施設の地震被害も甚大であるが、農業用パイプラインの地震被害に着目すると、地震動およびこれに伴う地盤液状化により、管体の浮上、亀裂、継手離脱などの被害が報告されている。

一方、ガス、水道、下水道等のインフラ設備に使用される管材は、軽量で可とう性に優れ、地震に強く腐食しないという利点から PE 管が注目されている。農業用パイプラインにおいても、PE 管の持つ柔軟性が地盤沈下への追従性を発揮し、とりわけ、北海道石狩地方に点在するような泥炭性軟弱地盤では、その適用が拡大している。しかしながら、従来の PE 管は、管軸方向の柔軟性を有すると同時に管周方向の剛性が低いことが課題である。こうした背景を受けて、本論文では、PE 管に着目し、とくに突発事故や地震被害が目立つパイプライン屈曲部に対して、新たな曲線配管工法の提案と有効性の検証を行った。また、地盤追従性と管周方向の剛性を向上させる観点から、PE-GF 管を対象に繊維配向角と力学特性に関わる基礎的研究を実施した。さらに、PE-GF 管を用いた曲線配管工法を確立するため、その管軸方向力学特性について解明を試みた。なお、これらの結論は、各章で得られた結果より明らかにし、その結論は以下に要約する。

第 2 章では、農業用パイプラインの屈曲部対策としてスラストブロックを必要としない

曲線配管工法を検討し、地盤追従性の指標となる許容曲率半径を実大規模の実験から評価した。本研究で得られた結果および課題を以下に示す。

1) 中口径の PE 管を用いた曲線配管工法の実大規模の実験を行った結果、総じて局所的に大きな水平方向移動量、管背面の土圧、管側面のひずみは発生しなかった。しかし、それぞれの試験でひずみ値をゼロ点に取り評価したため、残留ひずみの蓄積量について評価されないという課題が残された。

2) 1.0MPa の内圧負荷時に発生するスラスト力は、曲線配管に広く分布し、EF 継手で一体化した管路全体で広く受け持たれることが明らかとなった。また、設計基準「パイプライン」（農林水産省農村振興局，2021）の設計式から求められるスラスト力と曲線区間に分布された実際のスラスト力の和は、それぞれ 62.5kN と 54.5kN となり、設計値と実験値が概ね一致したことから、本実験の妥当性ならびに、PE 管の曲線配管工法にも当該設計式が適用できることが明らかとなった。

一方、管路がスラスト力を受けた時に両端のコンクリートと管の縁切りがされていないため、スラスト力を受けた時のコンクリートブロックの影響を定量的に評価されないという課題が残された。

3) 1.0MPa の繰返し内圧負荷による管周方向のひずみは、全体的に拡張される方向に引張ひずみが発生し、曲線布設による管軸方向のひずみは、曲率内側の圧縮ひずみと曲率外側の引張ひずみが顕著に表れていた。

4) 繰返し内圧負荷で発生する管周方向および管軸方向のひずみ増加量は、顕著ではない。しかし、曲線布設された背面土圧と S4 断面の水平方向移動量は、繰返し内圧負荷に伴い増加していることがわかった。ただし、最大引張ひずみは 11,662 μ で材料の許容引張ひずみ 30,000 μ から考えると十分安全であると言える。

5) 局所荷重負荷によって設計たわみ率の 2 倍となる 8%以上のたわみを加えたが、内圧、外圧による管や継手からの漏水、割れは認められなかった。

第3章では、管軸方向に柔軟性を保持しつつ、管周方向の剛性を GF で強化した PE-GF 管を対象に、X 線 CT 法に基づく繊維の配向角と引張強度特性の関係を検討した。その結論を以下にまとめる。

- 1) 2 軸押出法で得られる材料には明確な異方性が認められないが、クロスワインディング法で製造される PE-GF 管では明確な異方性が確認された。
- 2) X 線 CT 法による断面構造を観察した結果、2 軸押出成形法では押出方向に対して、GF が表層部で押出方向、内部で押出直交方向に、クロスワインディング法では、管断面の全てにおいて押出方向に向いていることが明確になった。
- 3) 既往研究で提案された複合材料に対する引張弾性率予測式を用いて、PE-GF 管の引張弾性率を計算した。その結果、計算結果の引張弾性は引張試験の結果と概ね近似する傾向が得られ、PE-GF 管に対する予測式の適用性が明らかになった。

第4章では、PE-GF 管の直管を用いた実大曲げ変形特性の評価試験を行った。本研究で得られた知見や課題を以下に示す。

- 1) 最大水平変位量 1,000mm に到達した時の曲率半径は、 $20D$ に相当し、最大変位到達後には、管路内の密閉性を加圧試験によって検証したが、バット融着部を含め一体化された管路全体に不具合箇所は認められなかった。
- 2) 曲率半径 $60D$ の時、管内径 610mm の引張端中央部管軸方向に発生した実測ひずみと、式 (4.2) を用いて求められた計算ひずみの値は、よく整合した。また、実験と同等の円弧による水平変位量、支点間距離を条件とし、式 (4.2) から求められる管内径と管軸方向引張ひずみの関係は **Fig. 4-15** の通り示された。ただし、実験以外の口径については、今後検証の必要性がある。
- 3) PE-GF 管の大きな特徴と言える管周方向の剛性と管軸方向の柔軟性を示す異方性が、実物大規模の曲げ試験を通して初めて明らかにされた。さらに、曲率半径 $60D$ での引張端

管軸方向の最大ひずみは、1.2%であった。PE-GF の材料管軸方向の降伏ひずみが 4.0%であることから設計許容曲率半径 $60D$ 以上とすることが妥当であると判断できる。

- 4) PE-GF 管を用いた緩やかな曲線化管路では、管断面の変形量も極めて小さく、流路断面への影響は無視できる程度であることが明確になった。以上より、バット融着接合された PE-GF 管の曲線配管工法の設計手法の確立に有益な知見が得られた。

第 5 章では、PE-GF 管継手を用いた実大曲げ変形特性ならびに継手の終局限界について確認試験を行った。本研究で得られた結論や課題を以下に示す。

- 1) 最大水平変位量 1,000mm に到達した時の曲率半径は $20D$ に相当し、最大変位到達後には、管路内の密閉性を加圧試験によって検証したが、EF 継手を含め一体化された管路全体に不具合箇所は認められなかった。
- 2) PE-GF 管継手の大きな特徴と言える管周方向の剛性と管軸方向の柔軟性を示す異方性が実物大規模の継手曲げ試験を通して明らかにされた。さらに、曲率半径 $60D$ での引張端継手管軸方向の最大ひずみは、1.25%と管体の 1.19%と同程度であり、材料の降伏ひずみ 4.0%と比較しても十分安全側であることが検証された。このことから、EF 継手の設計許容曲率半径を $60D$ 以下とすることが妥当であることが示された。
- 3) PE-GF 管継手部の終局状態は、EF 継手部での離脱ではなく、EF 継手受口拡大部での応力集中が生じることで管軸方向の引張破断が発生することが明らかとなった。
- 4) PE-GF 管継手を用いた緩やかな曲線化した管路（曲率半径 $20D$ 程度）では、管周方向の断面に大きな変化はなく、**Fig. 5-10** に示した管周方向ひずみの結果から円形が保たれ、流路断面に影響しないことが明らかとなった。

以上より、EF 継手を中央に有する条件に対する PE-GF 管の曲線配管工法の設計ならびに破壊メカニズムの解明を通して継手部構造の更なる改善に資する有益な知見が得られた。

6.2 今後の展望

本研究成果によって、PE 管や PE-GF 管が、泥炭性軟弱地盤における農業用パイプラインに採用され、長期にわたって鉛直沈下が発生しても、その沈下量に応じた縦断・横断方向の管路変形挙動を予測し、管路の長期的安全性の推定が可能となった。また、PE-GF 管の曲線配管工法の検証を通して、継手の破壊限界点と破壊モードのメカニズムが明らかになったことから、今後は、CAE 解析を用いて EF 継手の適正な形状を理論検証し、PE-GF 管 EF 継手の更なる改善が期待できる。一方で、PE-GF 管の異方性については、GF が円周方向へ整列配向されている状況を視覚的に明らかにしたが、管周方向に積層して得られる PE-GF 管の各層毎の重なり影響や、多層積層がゆえに発揮される内圧への耐性など複合的な解明には至っていない。よって、CAE 解析を用いて PE-GF 管の成形条件や押出方法をもとに、PE-GF 管として示される特性について理論検証しておくことは今後の重要な課題である。材料開発の観点に着目すると、PE 管や PE-GF 管は、熱可塑性樹脂材料を用いていることから、管や継手をさまざまな形状に変化することができる。したがって、設計基準「パイプライン」（農林水産省農村振興局，2021）に正確に適合する製品設計を提供し、地球規模で考えなければならない材料の有効利用に資する製品化が期待される。

以上のように、研究が絶え間なく続けられるとともに、実現場への適用を図りながら、我が国の農業水利施設の事業基盤とインフラ事業基盤を支えていくことを待望したい。その先に、例えば気候変動への洪水対策パイプライン、流域水位を監視しながら河川間をつなぐバイパスパイプライン、地下水位が高く施工が困難を極める場所でのパイプライン布設など本学術成果が広く、かつ横断的に展開されていくことを切に期待したい。

謝辞

本論文は、筆者が2020年4月から現在に至るまで積み重ねてきた研究成果を取りまとめたものです。これまでも振り返ると、筆者を支えてくださったみなさま1人ひとりと出会うべき瞬間に出会えなければ今日まで本研究を進めることはできませんでした。みなさまへの深い感謝の意を表します。

神戸大学 河端俊典先生には博士課程で学ぶ機会を与えて頂きました。この3年間における指導に加え、神戸大学との共同研究での指導、国際学会への挑戦の機会、経済産業省が主導した高機能JIS等整備事業を通じて数々のご助言を賜りました。ここに感謝を申し上げます。そして、農業用パイプラインに関わる材料研究をさらに深耕するため、神戸大学大学院農学研究科准教授 澤田 豊先生には何度も何度もご助言を賜りました。本論文3章をまとめるため、ご指導いただきましたことが大きな糧となりました。ありがとうございます。

また、入学後、研究成果報告会等を通じて筆者の研究に関して的確なアドバイスをいただきました神戸大学大学院農学研究科教授 田中丸治哉先生、ならびに同教授 井上一哉先生にも深く御礼申し上げます。ありがとうございます。

茨城大学農学部特任教授 毛利栄征先生ならびに農研機構上級研究員 有吉 充氏には、本論文第2章の研究に関して実験指導を頂くとともに、農研機構敷地内フィールドでの長期試験の場を提供いただきました。数か月に及ぶ昼夜連続での実証実験によってポリエチレン管に関する多くの挙動解析ができました。感謝いたします。

本論文4章、5章にまとめられたガラス繊維強化ポリエチレン管とその継手研究は、開発期が近年で世界的な研究事例も少ないことに加え、複合材の知見に乏しい筆者は、研究

当初、実験計画の切り口が見い出せず進め方に苦慮していましたが、プラスチック材料や製品の寿命、複合材料の破壊挙動に関する知識と見識を有され、世界的に著名な山形大学大学院工学部高分子・有機材料工学科 栗山 卓教授に出会い、ご指導・ご鞭撻を賜りました。栗山 卓先生のご指導がなければ、先進的な研究を継続的に世界へ発信することができませんでした。ここに感謝を申し上げます。ありがとうございます。

加えて、第4章および第5章は、経済産業省の高機能 JIS 等整備事業の支援を受けて実施しています。日本プラスチック工業連盟 規格部 鎌田浩史氏には当該事業の終始において大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

一方、在学期間中、筆者はガラス繊維強化ポリエチレン管および継手に関する国際規格開発のコンベナー業務を続けました。世界中のエキスパートと意見交換できる機会にも恵まれ、時には議論のためにイギリスのエジンバラまで出向き討議することもありました。博士課程に進む決意の1つには、エジンバラで討議した SHB Consulting 社の Steve Beech 氏の質疑に対し、研究者の1人として答えることにありました。残念ながら2022年5月7日にご逝去され、この研究成果を直接伝えることはできませんでしたが、筆者が研究を続けるためのモチベーションとなり、これまで続けられたことを感謝したいと思います。

同じく国際規格開発で訪欧する機会が続く中、Polyplastics Europe GmbH 社長の奥泉 了氏（後に、ポリプラスチックス株式会社テクニカルソリューションセンター センター長）にも大変お世話になりました。筆者が訪独できる折は、欠かさず連絡を取り、材料研究に関する打合せを繰り返し、プラスチック材料の見地からたくさんのアドバイスを頂きました。本論文がまとまるときにお礼とともに研究成果を申し上げるところでしたが、2022年7月25日に急逝され、この報告がかないませんでした。ここに記して深く御礼申し上げたいと思います。ご冥福をお祈り申し上げます。

筆者は、所属企業において 2020 年 10 月に開発部門から製造部門の責任者を拝命することとなりました。製造部門に籍を置きながら、ここまで学業との両輪ですすめられたのは、タキロンシーアイシビル株式会社のみなさまの配慮があったことに他なりません。

神戸大学博士課程への入学の機会を与えてくれたタキロンシーアイシビル株式会社執行役員 開発技術部長 日野林譲二氏に感謝いたします。また、取締役生産本部長 植田立郎氏、赤穂工場長 小林邦幸氏、土浦工場長 本間義和氏には大学で研究することに関して多大な配慮をいただき、製造部門の業務を支えて頂きました。ありがとうございます。また、入社以来社会人の基礎をご指導頂き、ここまで育てて頂いた取締役執行役員生産副本部長 天野成樹氏に心より御礼申し上げます。

2020 年の 3 月から日本では新型コロナウイルスの感染が認められ、神戸大学入学当時は緊急事態宣言下にありました。神戸大学での授業がオンラインに切り替わる中、筆者と博士課程をともにした太田遥子氏、園田悠介氏、ならびに神戸大学土地環境学研究室の皆様には温かく迎え入れていただき、ともに学業に参加させて頂きましたことを光栄に思います。ありがとうございます。

最後に、会社業務、国際規格化業務に加え学生生活を平行して進めることができたのは、家族の協力なくしてあり得ませんでした。自分の思う道を常に温かく見守り、心強く支援頂いた両親、妻 飛鳥と長女 玲奈に感謝いたします。

本研究に関する公表論文

本論文を構成した主な公表論文は以下のとおりである。

第2章

時吉充亮, 日野林譲二, 有吉 充, 毛利栄征 (2021) : 中口径ポリエチレン管による曲線配管工法の実大規模実験, 農業農村工学会論文集, **313**, 325-332.

第3章

時吉充亮, 竹内翔吾, 木津遼太郎, 澤田 豊, 河端俊典 (2023) : X線CTを用いたガラス繊維強化ポリエチレン管の配向角に関する検討, 農業農村工学会論文集, **316**, IV_1-IV_4.

第4章

時吉充亮, 日野林譲二, 河端俊典, 栗山 卓 (2022) : ガラス繊維強化ポリエチレン管の曲げ変形特性, 農業農村工学会論文集, **314**, 93-99.

第5章

時吉充亮, 日野林譲二, 河端俊典, 栗山 卓 (2022) : ガラス繊維強化ポリエチレン管のEF継手の曲げ変形特性と曲げ性能限界, 農業農村工学会論文集, **315**, 229-237.

