

Study of behavior of ductile iron pipeline with earthquake resistant joint buried across a fault

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/42363

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博 士 論 文

断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の
挙動に関する研究

金沢大学大学院自然科学研究科

環境科学専攻

環境計画講座

学籍番号 1223142002

氏名 金子 正吾

主任指導教員名 宮島 昌克

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	2
1.2 近年発生した主な地震	3
1.3 市民生活への影響	4
1.4 耐震継手ダクタイル鉄管	5
1.4.1 機能・構造	5
1.4.2 地震に耐えた事例	7
1.5 関連する既往の研究	10
1.5.1 地震による断層挙動の主な事例	10
1.5.2 断層挙動に対する管路挙動	10
1.6 本論文の構成	11
第1章の参考文献	12
第2章 断層再現土槽を用いた実管路挙動実験	13
2.1 はじめに	14
2.2 実験概要	14
2.2.1 実験方法	14
2.2.2 測定項目、実験条件	15
2.2.3 断層影響範囲	17
2.3 実験結果	18
2.3.1 断層影響範囲	18
2.3.2 断層変位速度	20
2.3.3 管路の変位	20
2.3.4 継手屈曲角	21
2.3.5 管体曲げモーメント	24
2.4 まとめ	25
第2章の参考文献	26
第3章 既存断層横断部の管路挙動のシミュレーション解析	27
3.1 はじめに	28
3.2 解析手法	28
3.2.1 解析モデル	28
3.2.2 ばねモデル	29
3.3 実験結果の検証	33
3.3.1 管路挙動	33
3.3.2 継手屈曲角	34
3.3.3 管体曲げモーメント	36
3.4 解析条件設定	37
3.4.1 断層条件	37
3.4.2 管路モデル	39
3.5 解析結果(管路挙動の全体的な傾向)	41
3.5.1 管路挙動	42
3.5.2 継手屈曲角	43

3.5.3 管体発生応力	46
3.5.4 軸力	50
3.6 解析結果(断層位置の条件を固定)	52
2.4.1 管路挙動	52
2.4.2 継手屈曲角	56
3.7 解析結果のまとめ	57
第3章の参考文献	58
第4章 断層横断部の配管設計方法の提案	59
4.1 はじめに	60
4.2 管路挙動の検証	60
4.2.1 管路挙動のモデル化	60
4.2.2 継手屈曲角の算出	62
4.2.3 管路挙動の解析結果との比較	63
4.3 管路挙動推定式の立案	63
4.3.1 変位影響度 k 値の推定	63
4.3.2 管路挙動および継手屈曲角の推定	64
4.3.3 地盤条件の影響	65
4.4 配管設計方法	66
第4章の参考文献	68
第5章 結論	69
5.1 はじめに	70
5.2 本研究から得られた知見	70
5.3 今後の課題	71
謝辞	73
付録	75
付図-1 管路挙動の解析結果(呼び径 75)	76
付図-2 管路挙動の解析結果(呼び径 250)	79
付図-3 継手屈曲角の解析結果(呼び径 75)	82
付図-4 継手屈曲角の解析結果(呼び径 250)	85
付図-5 管体発生応力の解析結果(呼び径 75)	88
付図-6 管体発生応力の解析結果(呼び径 250)	91
付図-7 軸力の解析結果(呼び径 75)	94
付図-8 軸力の解析結果(呼び径 250)	97
付図-9 管路挙動の解析結果(呼び径 100)	100
付図-10 管路挙動の解析結果(呼び径 150)	101
付図-11 管路挙動の解析結果(呼び径 200)	102
付図-12 継手屈曲角の解析結果(呼び径 100)	103
付図-13 継手屈曲角の解析結果(呼び径 150)	104
付図-14 継手屈曲角の解析結果(呼び径 200)	105
付表-1 継手屈曲角の推定結果一覧	106

第 1 章 序論

第1章 序論

1. 1 はじめに

2011年3月11日に太平洋三陸沖を震源として発生した2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）は、我が国の観測史上最大規模となるマグニチュード9.0を記録し¹⁾、被災地は地震と津波により、1995年に発生した阪神・淡路大震災をも凌ぐ甚大な被害を受けた。

水道施設も例外でなく、水道管路被害等により長期間にわたり断水し、市民生活に多大な影響を与えた。その一方で、耐震継手ダクトイル鉄管には被害が認められていない²⁾。

ダクトイル鉄管とは、日本の上水市場の半数以上を占める主要な管材であり、耐震継手ダクトイル鉄管は、継手部に伸縮・屈曲・離脱防止機構を有している。この耐震継手ダクトイル鉄管は、1964年に発生した新潟地震を契機に開発がすすめられ、今から約40年前に実用化され、今日に至っている。これまで日本では多くの大地震が発生しているが、いずれの地震においても耐震継手ダクトイル鉄管には被害が発生していない。

地震の発生機構は大きく分けて二つある。一つは、東日本大震災に代表される海底プレート境界面の滑りにより発生する地震であり、もう一つは、阪神・淡路大震災に代表される内陸部に存在する活断層が動くことにより発生する地震である。内陸部の活断層を震源とする地震の場合、断層のずれが数mに及ぶ場合もある。その断層が地表にまで現れると地表面付近の構造物においては局部的に大きなダメージを受ける場合がある。阪神・淡路大震災は、内陸の野島断層を震源としており、約30°の傾斜角で水平方向2.0m、鉛直方向1.1mのずれが観測されている³⁾。東日本大震災においても、その後に福島県いわき市で起こった地震では地表に現れた断層が確認され、約70°の傾斜角で約1.8mのずれが観測されている⁴⁾。2014年11月22日に長野県北部で発生した地震においても、神城断層が動き、約90cmの上下変位が観測されている⁵⁾。

断層が地表まで現れると、地表面付近の構造物においては局部的に大きなダメージを受ける場合があるため、断層横断部の管路設計は極めて重要である。鋼管などの一体構造管路に関しては、高田ら⁶⁾が断層横断部の設計方法を提案している。ダクトイル鉄管などの継手構造管路に関しては、地盤の永久変位対策として、液状化などの地盤変状に対しては数多くの実績を有する^{7),8),9),10)}ものの、断層変位に対しては、これまで地震時に挙動した断層直上に埋設されていた事例がなく、その性能が確認されているわけではない。断層横断部の管路挙動を詳細に研究した事例も少なく、その設計方法は確立されていない。

そこで本研究では、断層横断部の耐震継手ダクトイル鉄管の管路挙動を、実管路を用いた土槽実験により調査した。また、静的解析により管路挙動を詳細に分析し、実験結果との比較により解析結果の妥当性を検証した。さらに、その解析結果を基に断層横断部の管路挙動を推定する手法を立案し、断層横断部の管路の安全性を評価できるようにした。図-1.1に本研究のフローを示す。

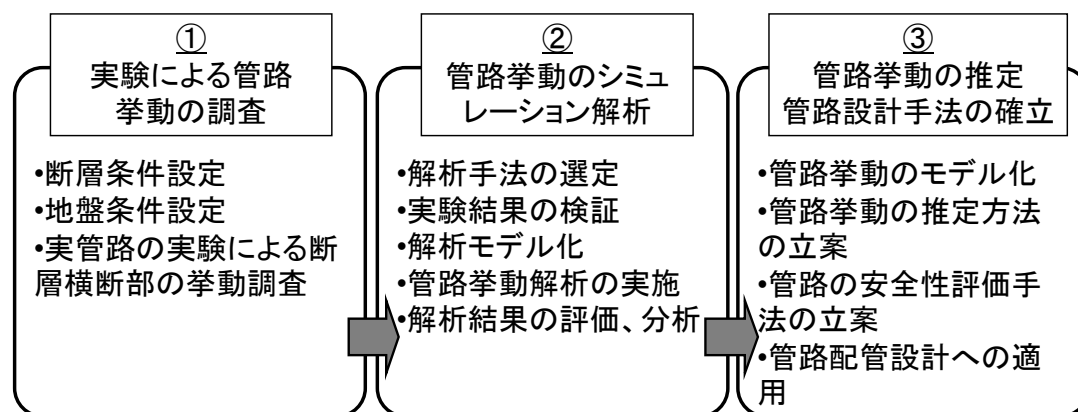


図-1.1 本研究のフロー

1. 2 近年発生した主な地震

図-1.2 に 1993 年以降に発生した震度 6 以上の地震分布を示す。ほぼ日本全土にわたって震度 7 が 3 回、震度 6（震度 6 強および 6 弱含む）が 41 回の合計 44 回発生しており¹⁾、概ね 1 年に 2 回の割合で大きな地震が発生していることになる。

表-1.1 に阪神・淡路大震災以降の主な地震の概要^{11),12),13),14)}を示す。震度 6 弱以上の比較的規模の大きな地震が発生すると、数万人規模で断水の影響を受けることが分かる。

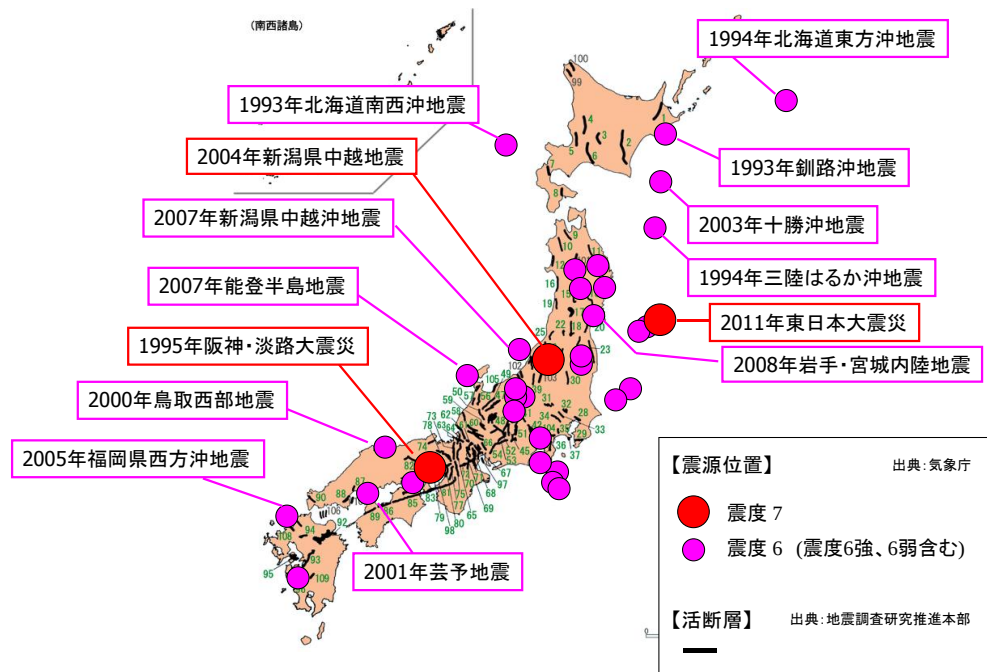


図-1.2 1993 年以降に発生した震度 6 以上の地震震源分布^{1), 15)}

表-1.1 主な地震の概要^{11), 12), 13), 14)}

名称	発生日	規模	最大震度	断水戸数
1995年兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災)	1995年1月17日	M7.3	7	約122万戸
2000年鳥取県西部地震	2000年10月6日	M7.3	6強	8,338戸
2001年芸予地震	2001年3月24日	M6.7	6弱	40,938戸
2003年十勝沖地震	2003年9月26日	M8.0	6弱	15,956戸
2004年新潟県中越地震	2004年10月23日	M6.8	7	129,750戸
2007年能登半島地震	2007年3月25日	M6.9	6強	13,290戸
2007年新潟県中越沖地震	2007年7月16日	M6.8	6強	58,961戸
2008年岩手・宮城内陸地震	2008年6月14日	M7.2	6強	5,560戸
2011年東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災)	2011年3月11日	M9.0	7	2,567,210戸

1. 3 市民生活への影響

今日、都市化が進み、私たちの生活は水道、電気、ガスなどのライフラインに大きく依存し、かつその機能が停止しないことを前提としている。しかし、大きな地震が発生するとライフラインの機能が停止し、市民生活へ影響を及ぼしている。

小川ら¹⁶⁾は、新潟県中越地震におけるライフラインの機能停止が市民生活へ及ぼす影響を把握するため、新潟県小千谷市において市民へのアンケート調査を行っている。図-1.3 に示すライフライン（水道、電気、ガス、下水、道路、通信、交通）の機能停止による困難度の調査結果では、水道の機能停止である断水が非常に困ったと回答した市民が7割強と最も多かったとしている。ライフラインの中でもとりわけ水道への依存が高いと言えよう。

また、図-1.4 の水道を利用する日常生活（風呂、洗濯、トイレ、炊事、飲料、洗面）についての困難度の調査結果では、風呂、洗濯、トイレの順に困難の割合が高く、使用水量の多い用途において困難と感じられているようである。さらにこれらの用途においては、応急給水やペットボトルなどの代替手段での対応はその必要水量においてほぼ不可能であるため、断水が日常生活の困難に直結するものと思われる。

さらに、大きな地震においては、一般に断水の復旧作業が長期化する。阪神・淡路大震災では、神戸市で復旧が完了したのは地震発生から3か月後の4月17日であり¹⁷⁾、東日本大震災では、津波被災地域を除いて復旧が完了したのは地震発生の半年後であった¹⁴⁾。

このように、水道施設の機能停止が市民生活へ与える影響は非常に大きいと考えられる。

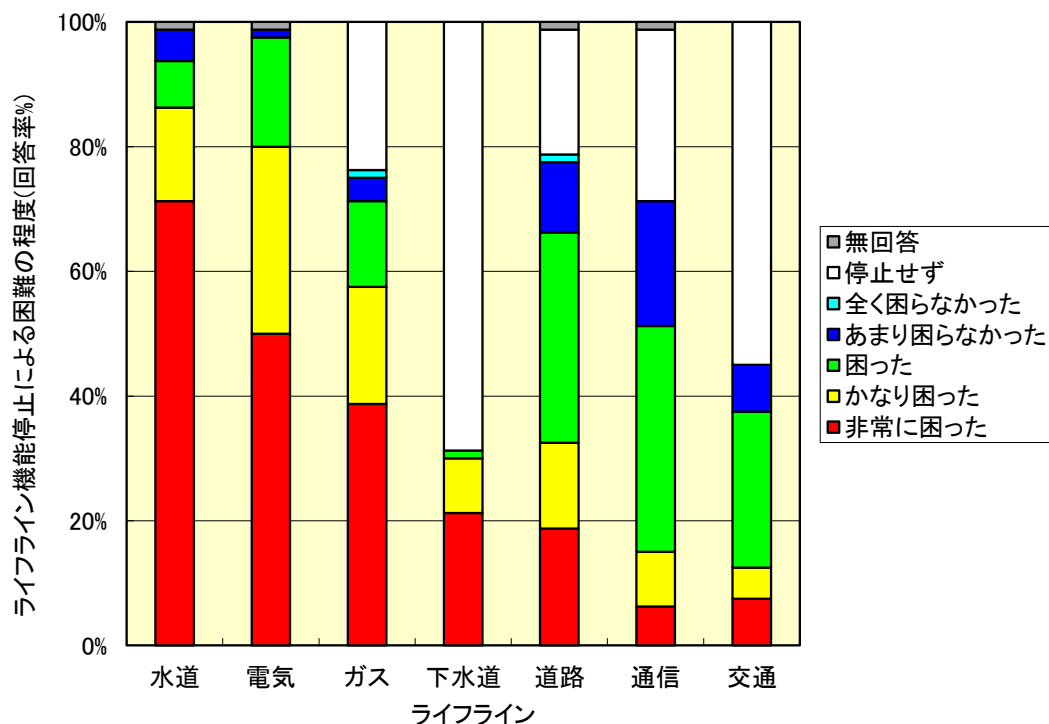


図-1.3 ライフラインの機能停止による困難度¹⁶⁾

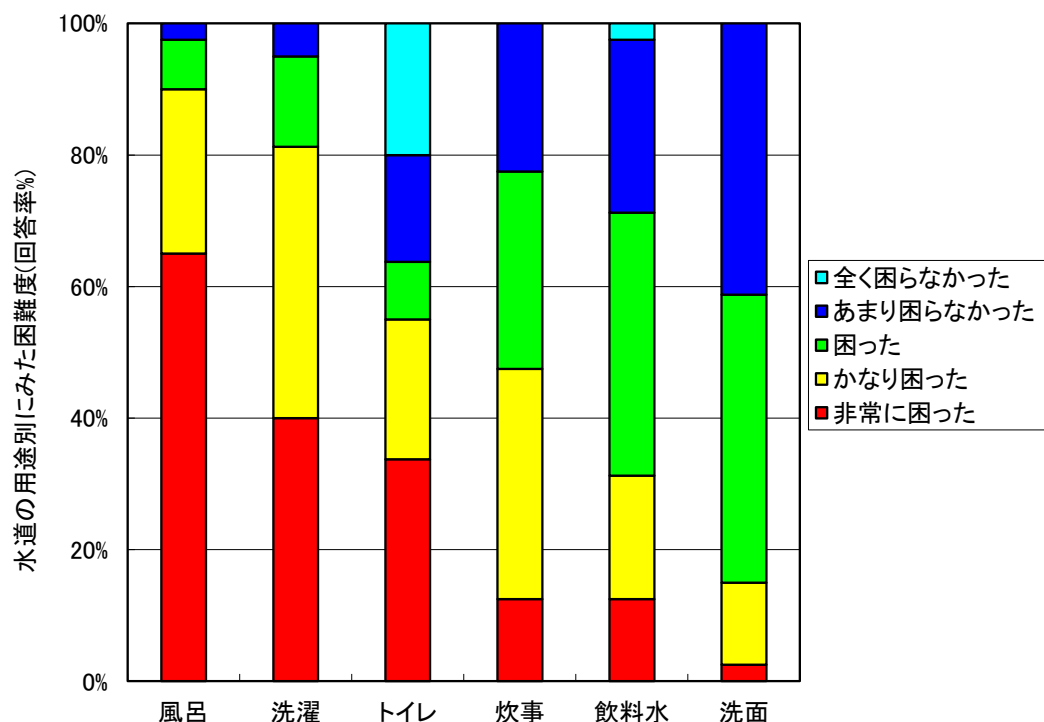


図-1.4 水道の用途別に見た困難度 ¹⁶⁾

1. 4 耐震継手ダクタイル鉄管

大きな地震が発生して水道施設の機能が停止し、断水が発生すると市民生活に多大な影響を及ぼすことになる。同時に、水道事業者や工事事業者においては、不眠不休で復旧対応にあたることも珍しくない。

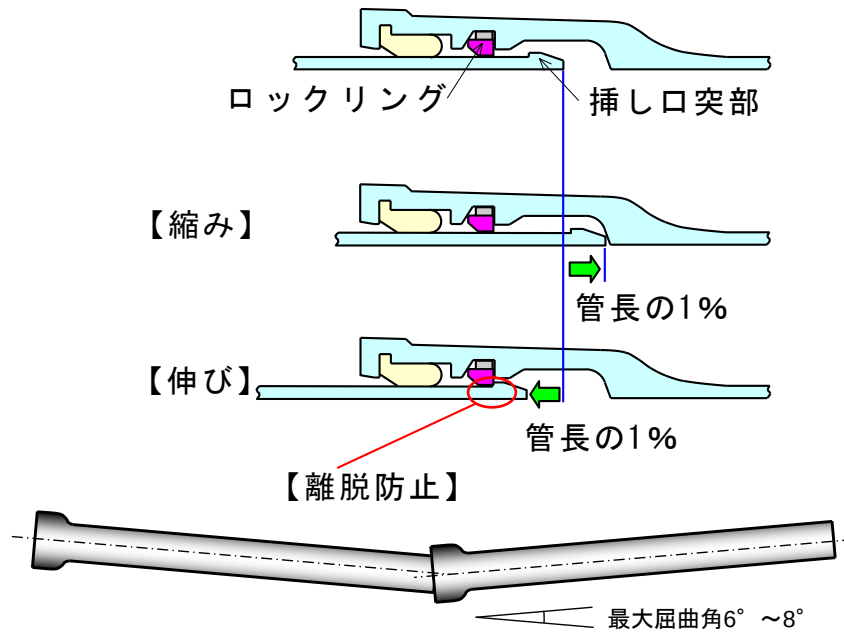
このような事態の発生を軽減させるため、日本の水道事業者においても、水道施設の地震対策が積極的に行われており、耐震管路の普及にも積極的に取り組まれている。

1.4.1 機能・構造

水道管路の耐震化にあたっては、図-1.5 に示す NS 形ダクタイル鉄管 ¹⁸⁾ に代表される耐震継手ダクタイル鉄管が一般的に使用されている。耐震継手ダクタイル鉄管は、1964 年の新潟地震を契機に開発がすすめられ、約 40 年前に最初の耐震継手である S 形ダクタイル鉄管が実用化された。その後改良がすすめられ、NS 形ダクタイル鉄管は 1996 年に実用化されている。図-1.5 に示すようにゴム輪により水密性を確保しており、ゴム輪の静摩擦力を越える抜出し力または圧縮力が作用すると、管長の 1% 伸縮することができる。さらに離脱防止機構により抜出しが防止され、地震時の大きな外力に対しても耐えることが可能である。これらの継手による管路は、図-1.6 に示すように大きな地盤変状に対して、ちょうど地中に埋設された鎖のように継手が伸縮、屈曲しながら追従し、さらに限界まで伸び出した後は、離脱防止機構によって管路の機能を維持できる鎖構造の管路となる。

この鎖構造管路は、1973 年 3 月に旧厚生省で策定された「南関東大震災対策調査報告書」¹⁹⁾の中でこれからの理想的な管路として提唱されたものである。1995 年に発生した阪神・淡路大震災では、被災地域に約 270km 布設されていた鎖構造管路に被害はなく ¹¹⁾、その後に発生した鳥取県西部地震、十勝沖地震、新潟県中越地震などにおいても被害がなかった ¹³⁾ ことが確認されている。東日本大震災においても、約 1000km 布設されていたが被害はなかった ²⁾。

管路の耐震化について、厚生労働省の報告書²⁾では、東日本大震災における水道被害と耐震化率の関係を図-1.7のように分析している。地盤条件や管路構成など各事業体の諸条件が異なるため単純な比較はできないが、概ね耐震化率が高くなるほど被害率が低くなっていた。



項目	性能
継手伸縮量	管長の $\pm 1\%$
離脱防止力	$3DkN$ (D : 呼び径mm)
最大屈曲角	$6^{\circ} \sim 8^{\circ}$

図-1.5 NS形ダクタイル鉄管の継手構造と継手性能

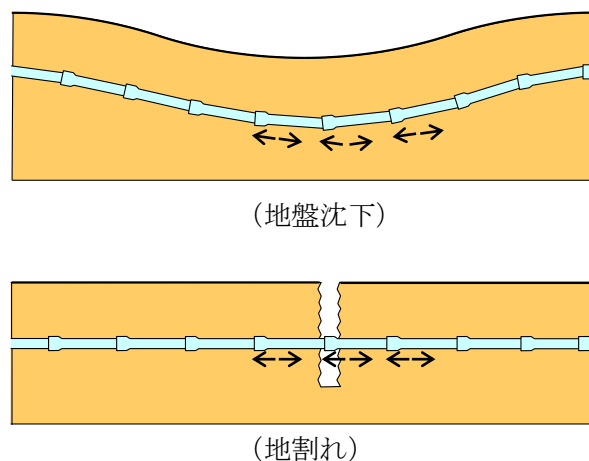


図-1.6 耐震継手ダクタイル鉄管の地盤変位に対する挙動

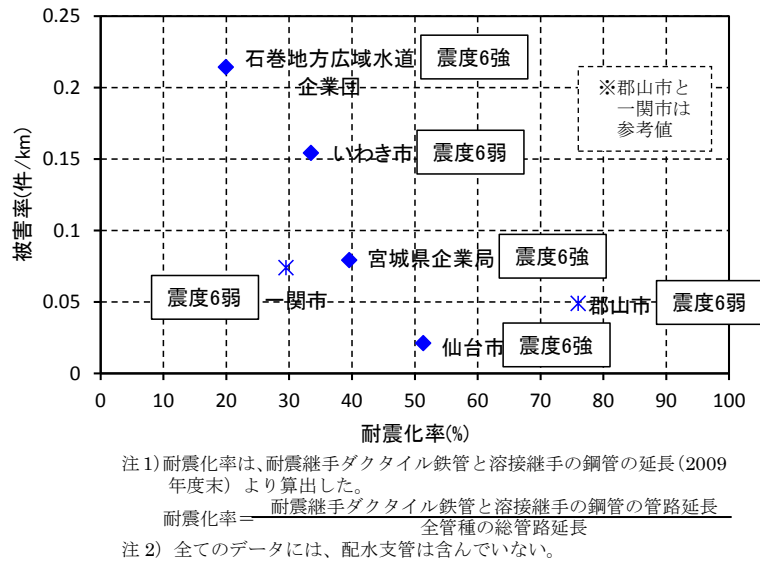


図-1.7 耐震化率と被害率の関係 2)

1.4.2 地震に耐えた事例

地震によって水道管路に物理的被害が生じる原因は主に2通りある。一つは振動や波動の伝播による揺れによって被害が生じるもの、もう一つは地盤の永久変位によって被害が生じるものである。液状化による地盤変位や断層変位などが後者に相当する。地盤の永久変位は局部的に生じるものであるが、その変位量の大きさから、当該地盤に地震対策が施されていない非耐震継手管が埋設されていると、甚大な被害が生じることが過去の地震においても明らかとなっている。

耐震継手ダクタイル鉄管の埋設地盤において、過去の大地震によって液状化が発生した事例も多く存在し、いずれの地震においても被害は一切報告されていない。また、液状化地盤に埋設されていた耐震継手ダクタイル鉄管が地震時にどのように挙動したのかを測定した事例も報告されており、いくつか紹介する。いずれも、耐震継手の伸縮・屈曲・離脱防止機構の働きにより地盤変位を吸収していることが分かる。

一方、地震により断層が動いたとき、断層横断部に耐震継手ダクタイル鉄管が埋設されていた事例はこれまでなく、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管がどのように挙動するかもわかっていないのが実情である。

(1) 阪神・淡路大震災

神戸市水道局の三浦 7は、阪神・淡路大震災後、液状化が発生した人工島のポートアイランドおよび六甲アイランドにおいて、呼び径 200 および 300 の SⅡ 形ダクタイト鉄管内にテレビカメラを挿入し、管路挙動調査を行っている。図-1.8 にポートアイランドにおける継手伸縮量および管路伸び量の測定結果を示す。一部の継手は離脱防止機構が働き、耐震機能を発揮していたと報告されている。

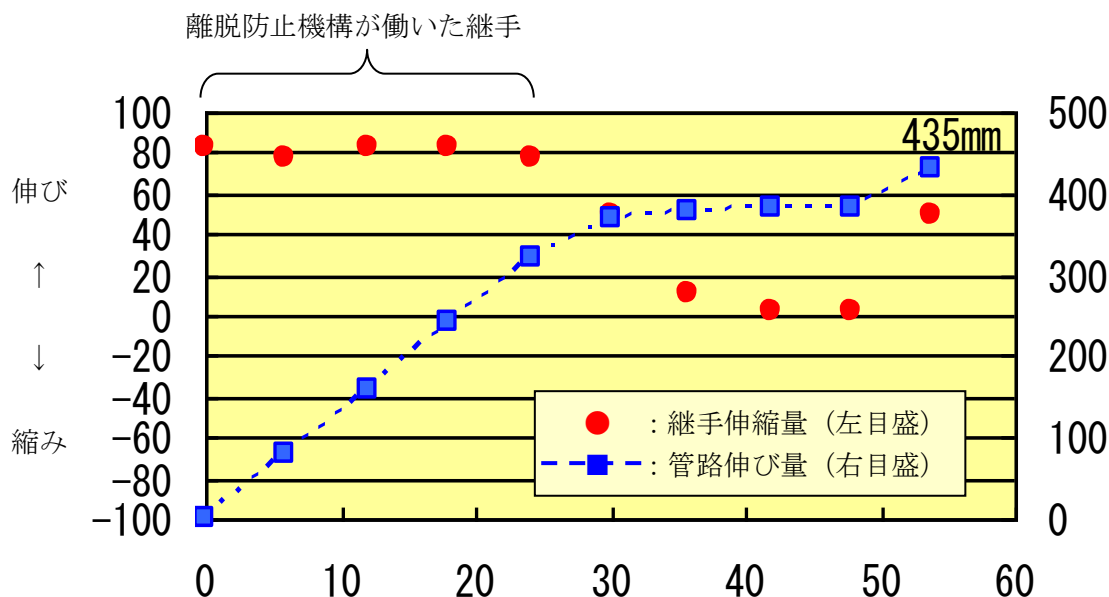


図-1.8 継手伸縮量と管路伸び量の測定結果

(2) 2000 年鳥取県西部地震

米子市水道局の三島ら 8は、鳥取県西部地震後、埋立地で全域にわたって液状化が発生した竹内団地において、呼び径 150 の NS 形ダクタイト鉄管の挙動調査を行っている。図-1.9 に継手伸縮量の測定結果を示す。NS 形管路は、液状化による大きな地盤変状を継手の伸縮・離脱防止機能で吸収し、耐震継手ダクタイト鉄管の有効性が確認できたと報告されている。

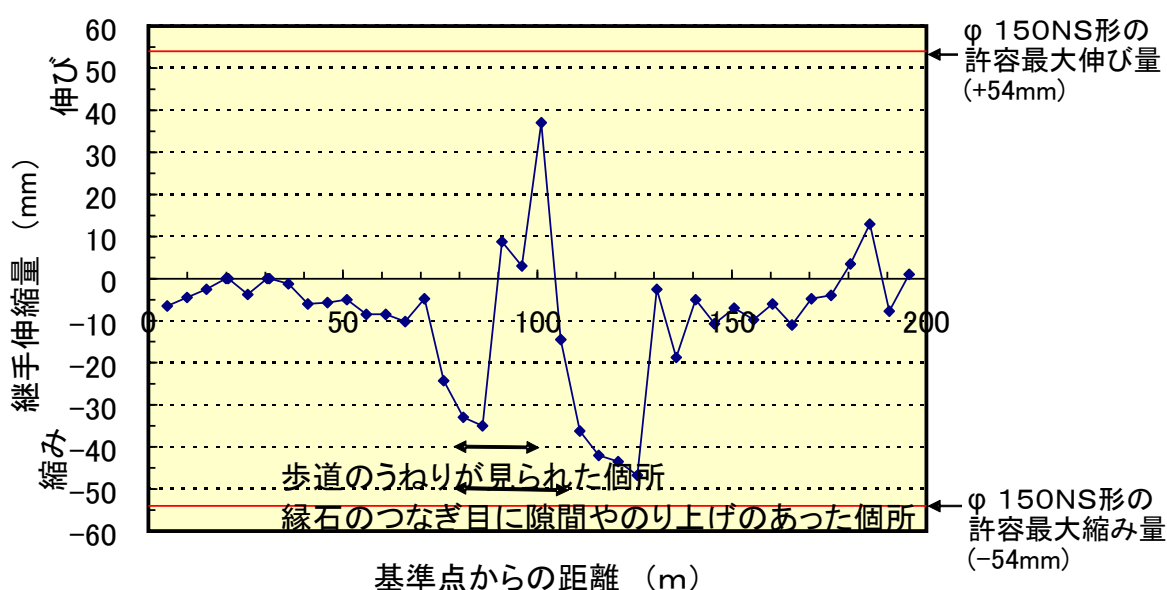


図-1.9 継手伸縮量の測定結果

(3) 2003 年十勝沖地震

釧路市水道部の畑中⁹⁾は、2003 年十勝沖地震において、崩壊した盛土部の道路下に布設されていた呼び径 150 の NS 形ダクタイル鉄管について、のちの水圧テストで漏水がなく無被害であった管路の沈下量を測定している。図-1.10 に沈下量の測定結果を示す。管路は最大 50cm 沈下しており、継手部の伸縮・屈曲及び離脱防止機構により管路が地盤沈下を吸収できていたと報告されている。

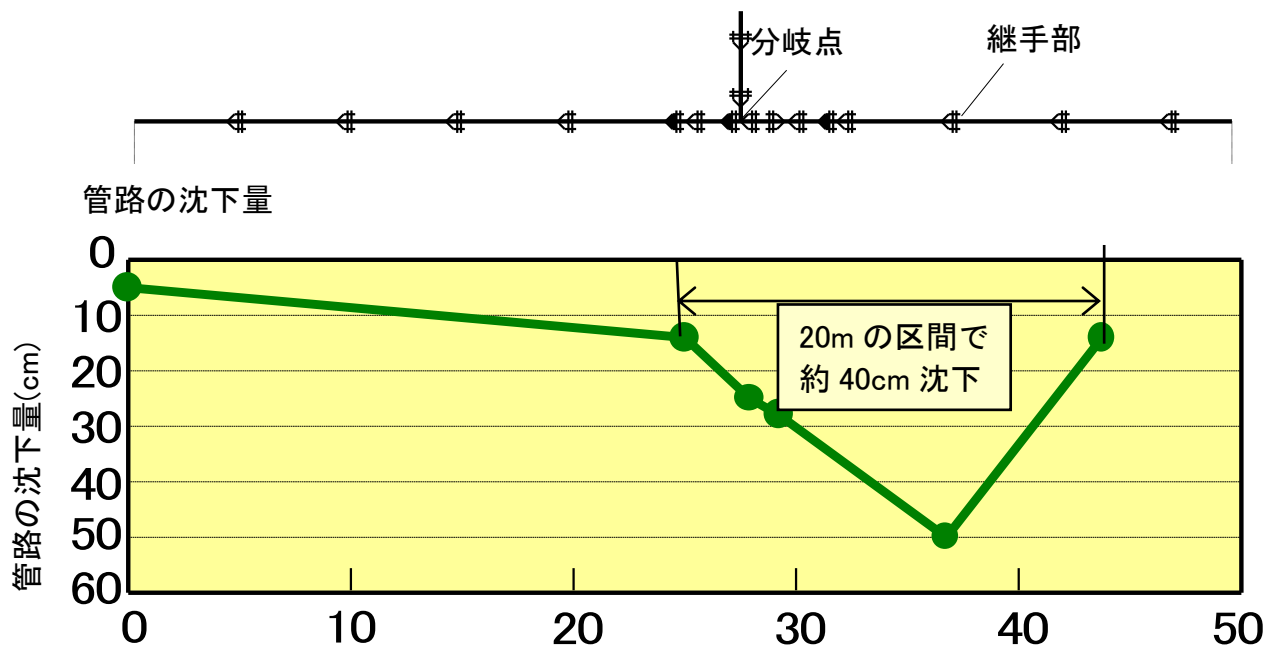


図-1.10 管路の沈下量の測定結果

(4) 東日本大震災

金子、宮島¹⁰⁾は、東日本大震災において、津波被災地域である宮城県仙台市、石巻市、気仙沼市にて耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動調査を行っている。仙台市の調査箇所では、対象管路の管内にカメラを挿入して継手伸縮量・屈曲角を測定している。図-1.11 に継手伸縮量の測定結果を示す。いくつかの継手が部分的に集中して伸び、地盤変位を吸収していた。

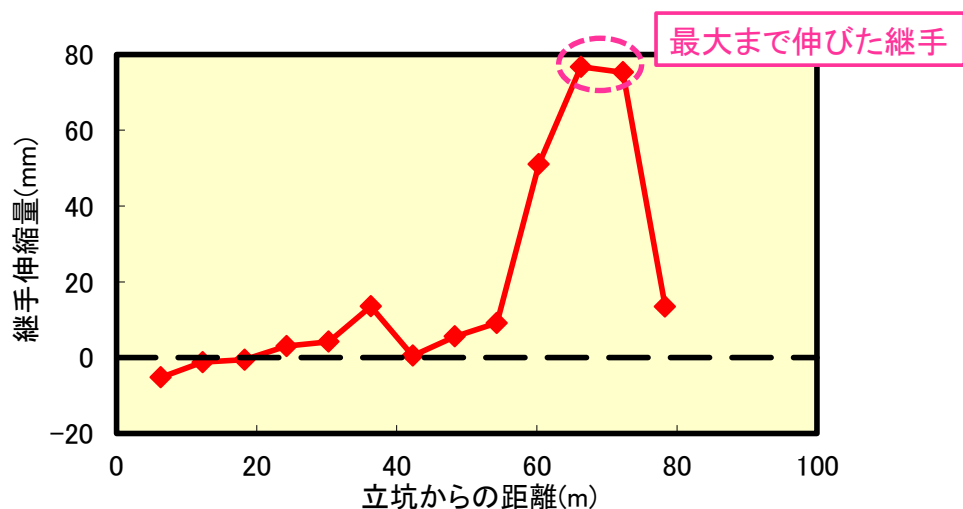


図-1.11 継手伸縮量の測定結果

1. 5 関連する既往の研究

1.5.1 地震による断層挙動の主な事例

日本列島には多くの活断層が存在しており、文献 20)には地表地震断層がまとめられている。また、文部科学省の地震調査研究推進本部では、主要活断層の長期評価を行っており、日本全国の 110 の活断層の評価結果が公開されている¹⁵⁾。

大地震の原因となった断層や、大地震時に動いた断層挙動について、以下のような既往の研究があるが、いずれも、数メートル規模の断層変位となっている。

(1)阪神・淡路大震災

1995 年に発生した兵庫県南部地震、いわゆる阪神・淡路大震災では、六甲・淡路島断層帯の一部である野島断層が全長約 30km の範囲で活動した¹⁵⁾。ずれの量は、右横ずれ成分約 2m、上下成分約 1m と大きく、マグニチュードは 7.3 を記録した。

(2)新潟県中越地震

2004 年新潟県中越地震は、新潟県魚沼市から湯沢町に至る六日町断層帯付近で発生し¹⁵⁾。ずれ量は、西側地盤が東側地盤に対し相対的に 2m 程度隆起した可能性があると考えられる。

(3)東日本大震災

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震、いわゆる東日本大震災は、海底プレート境界の滑りにより発生した地震であるが、その一か月後に起こった福島県浜通りの地震に伴い、福島県いわき市内において長さ約 14km の断層が確認された⁴⁾。

1.5.2 断層挙動に対する管路挙動

水道管路のように地中に埋設される管路は、主に 2 つの種類がある。一つは、鋼管やポリエチレン管に代表される、一体構造管路である。一体構造管路は、管同志を溶接や融着で接続するものであり、継手部分に伸縮や屈曲の機能はなく、管体の強度で地盤変位に耐える構造となっている。もう一つは、ダクタイル鉄管に代表される、継手構造管路である。継手構造管路は、管の受口に挿し口を挿入して接続するものであり、耐震継手においては伸縮・屈曲・離脱防止機能を有する。この継手機能により、地盤変位に耐える構造となっている。

断層挙動を受ける埋設管路がどのように挙動するかについては、以下のような研究事例がある。

一体構造管路については、高田ら⁶⁾が、断層横断部の鋼管管路をモデル化した設計式を提案している。同研究では、管路口径や断層変位量、断層との交差角をパラメータとした 3 次元シェル解析を行い、管路の曲げ角度と管路最大ひずみとの関係を簡易的な設計式により求めている。

継手構造管路に関しては、楢田ら²¹⁾が、個別要素法を用いた管路解析モデルを開発してパラメトリック解析を行い、断層横断部の耐震性を研究している。同研究では、断層変位による簡易推定モデルを提案し、その有効性を評価している。しかしながら、同研究で検討されているダクタイル鉄管はガス用耐震継手であり、使用実績が少なく、本研究で対象とする主に水道用として使用される耐震継手ダクタイル鉄管とは基本的に性能や構造が異なる。

以上から、断層横断部に水道用の耐震継手ダクタイル鉄管がどのように適用できるかを研究することは急務であると考えられる。したがって本研究では、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動を明らかにし、その設計方法を確立することを目的としている。

1. 6 本論文の構成

本論文の構成は次に示すとおりである。

第1章	序論
第2章	断層再現土槽を用いた実管路挙動実験
第3章	既存断層横断部の管路挙動のシミュレーション解析
第4章	断層横断部の配管設計方法の提案
第5章	結論

第1章は本論文の序論であり、まず研究の背景と目的を述べる。これまでの地震によって生じた水道管路被害、市民生活への影響及び本論文が対象とする耐震継手ダクタイル鉄管の有効性について述べる。また、既往の調査・研究について整理している。併せて本論文の構成を示す。

第2章では、実管路を用いて行った土槽実験について述べ、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動を観測・調査している。

第3章では、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動のシミュレーション解析の内容について述べる。実験結果との比較において、解析手法の妥当性も確認している。

第4章では、解析結果をもとに導出した、耐震継手ダクタイル鉄管の断層横断部の管路挙動推定手法について提案した内容を述べる。

第5章では、本研究で得られた成果と今後の課題について示し、取りまとめる。

【第1章の参考文献】

- 1) 国土交通省 気象庁 HP : (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>).
- 2) 厚生労働省健康局水道課：平成 23 年(2011 年)東日本大震災水道施設被害等現地調査団報告書, 2011.
- 3) 片岡正次郎, 日下部毅明：内陸地震の規模・タイプと地表地震断層の特性との関係, 土木学会論文集, No.801/ I -73, pp.21-32, 2005.
- 4) 黒澤英樹他 9 名：2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層, 活断層研究, 36 号, pp.22-30, 2012.
- 5) 日本活断層学会 HP : (<http://danso.env.nagoya-u.ac.jp/jsafr/jishin/index.html>).
- 6) 高田至郎他 2 名：断層を横断する地中管路の設計法の提案, 土木学会論文集, No.668/ I -54, pp.187-194, 2012.
- 7) 三浦久人：阪神・淡路大震災による耐震形ダクトイル鉄管の挙動調査, ダクトイル鉄管, 第 61 号, pp.41-48, 1996.
- 8) 三島洋一他 3 名：2000 年鳥取県西部地震により液状化の発生した埋立地での NS 形ダクトイル鉄管管路の挙動調査, ダクトイル鉄管, 第 70 号, pp.30-36, 2001.
- 9) 畑中幸雄：2003 年十勝沖地震における釧路市での水道管路の被害, 第 55 回全国水道研究発表会講演集, pp.672-673, 2004.
- 10) 金子正吾, 宮島昌克：東日本大震災における津波被災地域の耐震形ダクトイル鉄管管路の挙動調査, 平成 25 年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp.776-777, 2013.
- 11) (社)日本水道協会：「1995 年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析」, 1996.
- 12) (社)日本水道協会：「水道施設耐震工法指針・解説 1997 年版」, 1997.
- 13) (社)日本水道協会：「水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版」, 2009.
- 14) 厚生労働省健康局水道課：「東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書」, 2013.
- 15) 文部科学省 研究開発局 地震・防災研究課 地震調査研究推進本部 HP : (<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>).
- 16) 小川雄二郎, 有村源介：新潟県中越地震における水道の機能停止が市民生活へ及ぼす影響, 水道協会雑誌, 第 75 巻, 第 7 号, pp.14-20, 2006.
- 17) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災 水道復旧の記録, 1996.
- 18) 日本ダクトイル鉄管協会：「NS 形・SII 形・S 形ダクトイル鉄管管路の設計, 2007.
- 19) 厚生省：「南関東大震災対策調査報告書」, 1973.
- 20) 活断層研究会編, 「新編日本の活断層 - 分布図と資料 - 」, 東京大学出版会, 1991.
- 21) 鉾田泰子他 3 名：断層を横断する硬質塩化ビニル管路とダクトイル管路の許容断層変位簡易推定式の提案, 構造工学論文集, Vol.51A. pp.1597-1604, 2005.

第 2 章 断層再現土槽を用いた実管路挙動実験

第2章 断層再現土槽を用いた実管路挙動実験

2.1 はじめに

日本には、確認されていないものも含め無数の活断層が存在すると言われている。地震により内陸の活断層が動くと、地表には局部的に大きな地盤変位が生じることもある。しかし、これまで日本で発生した地震において、活断層横断部に水道管路が埋設されていた例は少なく、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管がどのように挙動するかを調査した事例もない。

そこで、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動を明らかにするため、実管路を用いた土槽実験を行った。

2.2 実験概要

2.2.1 実験方法

2分割の土槽の中に呼び径75で管長1mのNS形ダクタイル鉄管を埋設し、一方の土槽を変位させることによって断層挙動を表現した。実験は、①断層の傾き 90° で一方の土槽を油圧ジャッキによりゆっくり上昇させた場合と、②断層の傾き 60° で一方の土槽を落下させて急速に変位させた場合の2通りについて行った。それぞれの実験方法について、以下に示す。

(1)断層の傾き 90°

図-2.1に実験土槽の断面を示す。長さ9m×幅1.0m×高さ1.5mの中央で分割された鋼鉄(厚さ:12mm、材質:SS400)製の土槽の中に、底面から0.6mの位置に供試管を配管し、土被り0.6mにて埋設した。変位側土槽の4カ所に設置した油圧ジャッキ(D2-500(定格容量500kN)¹⁾、理研機器(株)製)により、土槽を低速(約0.2mm/sec)で500mm上昇させた。それぞれの油圧ジャッキの油量を独立して操作することで各油圧ジャッキの伸縮量が均等になるように調整した。断層の傾きは、測定誤差が少なく実験装置も簡素化できることから 90° とした。実験データは、高速データロガー(TDS-630²⁾、(株)東京測器研究所製)にて取得した。

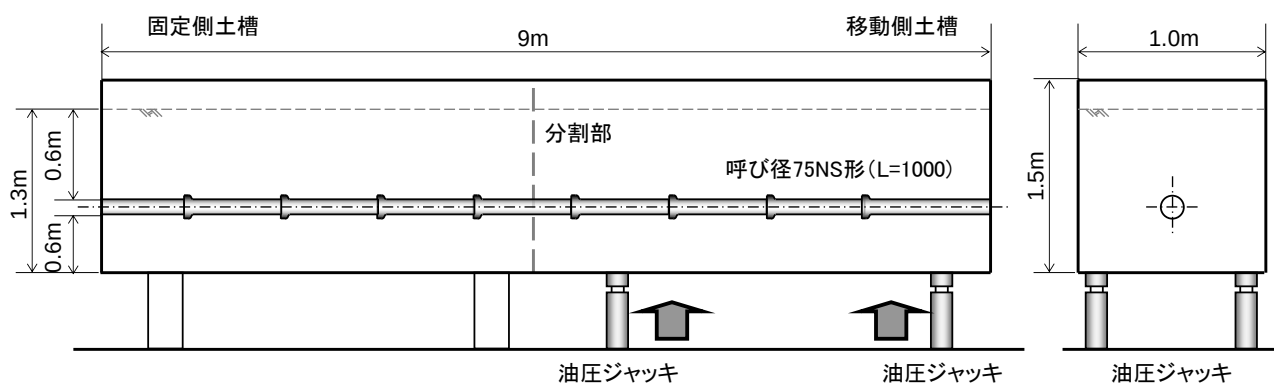


図-2.1 実験土槽の断面図（断層の傾き 90° ）

(2)断層の傾き 60°

図-2.2 に実験土槽の断面を示す。長さ 15m×幅 0.8m×高さ 1.3m の中央で分割された鋼鉄(厚さ：12mm、材質：SS400)製の土槽の中に、底面から 0.4m の位置に供試管を配管し、土被り 0.6m にて埋設した。金沢大学平松教授によると、断層がずれる速度は 1.0m/s 程度³⁾であることから、目標地盤変位速度を 1.0m/s として一方の土槽を落下させた。管軸方向にも変位成分を有し、土槽がスムーズにかつ水平に落下するよう、断層の傾きは 60° とし、土槽の側面に 60° のガイドレールを設置し、断層挙動を模してガイドレールに沿って土槽を変位させた。変位量は、鉛直方向 300mm、水平方向 173mm で、断層面に沿って 346mm とした。実験データは、高速データロガー(TDS-630²⁾、(株)東京測器研究所製)及びユニバーサルレコーダー(EDX-100A⁴⁾、(株)共和電業製)にて、10Hz のサンプリング周期により取得した。

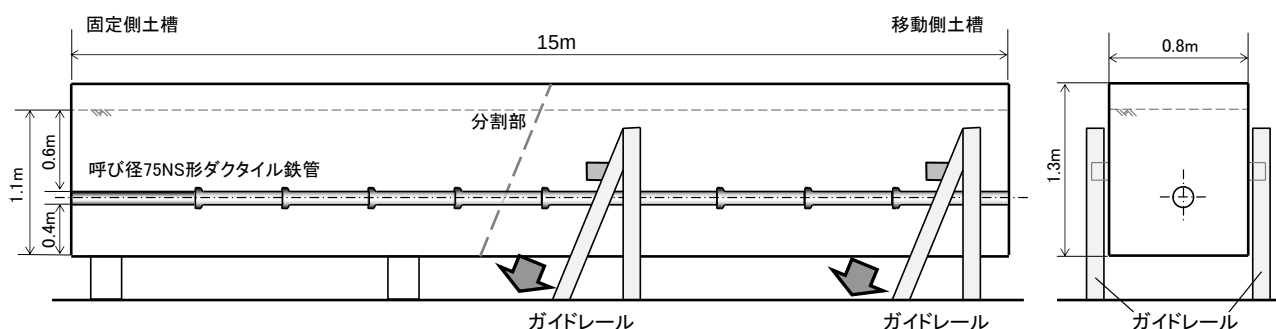


図-2.2 実験土槽の断面図（断層の傾き 60°）

2.2.2 測定項目、実験条件

図-2.3 に示すように、各管の継手位置に取り付けた管体変位計 (DTP-D-1KS(定格容量 1000mm)⁴⁾、(株)共和電業製)により、管路挙動を測定した。図-2.4 に示すように、各継手部には変位計 (SDP-100C(定格容量 100mm)²⁾、(株)東京測器研究所製)を取り付け、上下方向の継手屈曲角を測定した。分割部近傍では、図-2.5 に示すように管外面に貼付した歪ゲージ (KFG-5-120-D16-11⁴⁾、(株)共和電業製)により管体発生歪を測定し、管体発生応力を算出した。管路の両端は土槽に固定した。表-2.1 に実験条件を示す。

地盤は N 値 15 相当の砂質地盤とし、30cm 埋め戻すごとに転圧を行った後 N 値を測定し、地盤の固さを調整した。

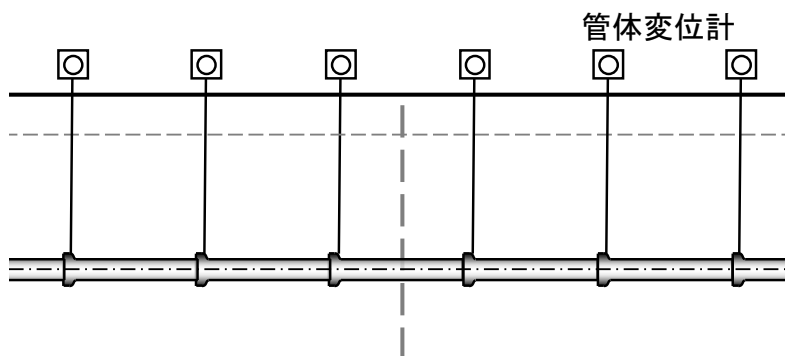


図-2.3 管路挙動測定方法（断層の傾き 90° の例）

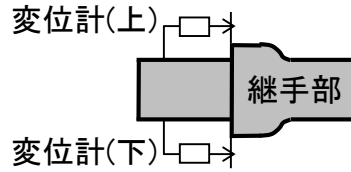


図-2.4 継手部の変位計の設置個所

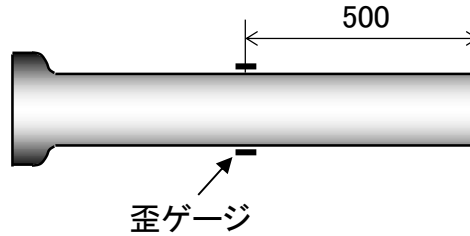


図-2.5 管体外面の歪ゲージ設置個所

表-2.1 実験条件

	断層の傾き 90°	断層の傾き 60°
供試管	呼び径75NS形ダクタイル鉄管	
管路長さ	L=1m×9(全長9m)	L=1m×15(全長15m)
断層変位量：V	500mm 〔鉛直方向：500mm 水平方向：0mm〕	346mm 〔鉛直方向：300mm 水平方向：173mm〕
変位速度 変位させる方法	約0.2mm/sec程度 油圧ジャッキ使用	1.0m/s 自然落下
変位の向き	上向き	下向き
断層の傾き	90°	60°
地盤種類	砂質地盤	
土層厚さ：H	1.3m	1.1m
土被り	0.6m	
締固め	N値15程度 〔管路位置より30cm埋め戻すごとに 転圧してN値を測定し調整した。〕	
測定項目	・管路変位量 ・継手屈曲角 ・管体発生ひずみ	
サンプリング周期	(静的測定)	10Hz

2.2.3 断層影響範囲

我々の生活の舞台となる平地部に存在する活断層は、沖積層などの堆積物で覆われていることが多い。鬼塚らは、模型実験において基盤断層の傾斜角や堆積層の層厚を変えた場合の地表面への影響を調査している。以後、この地表面への影響範囲を「断層影響範囲」と定義する。図-2.6に断層影響範囲の概要を、表-2.2に鬼塚らの調査結果を本実験に適用した場合の断層影響範囲の推定値を示す。

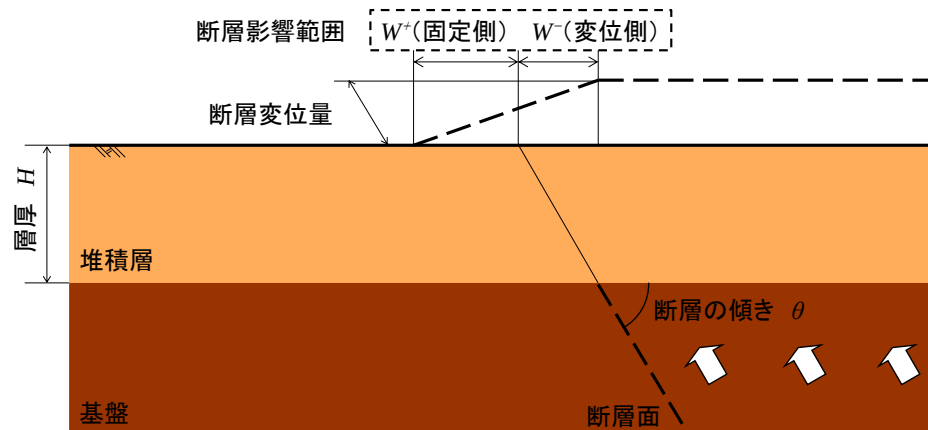


図-2.6 断層影響範囲の概要

表-2.2 本実験における断層影響範囲の推定

実験 No.	断層の 傾き	堆積層厚 H (m)	地盤	鬼塚らの 調査結果	推定値 (mm)
1	90°	1.3	下(固定)側	$W^+=0.40 \cdot H$	520
			上(移動)側	$W^-=0.23 \cdot H$	299
2	60°	1.1	下(移動)側	$W^+=0.37 \cdot H$	407
			上(固定)側	$W^-=0.08 \cdot H$	88

2. 3 実験結果

2.3.1 断層影響範囲

(1)断層の傾き 90° (静的実験)

図-2.7 に実験後の状況写真を、図-2.8 に実験後の地表面の状況写真を示す。500mm 変位時には数本の断層線が地表に達し、地表には多数の亀裂が認められた。

断層影響範囲は、固定側 550mm、移動側 350mm であった。土槽厚さ(=1.3m)に対する比率は $W^*/H=0.42$ 、 $W/H=0.27$ となり、鬼塚らの結果⁵⁾であるそれぞれ 0.40、0.23 と比較的良好一致していた。

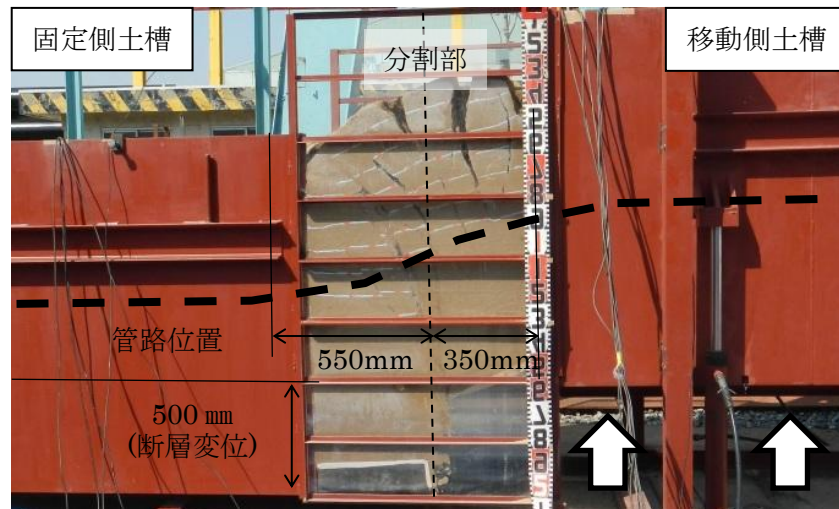


図-2.7 実験後の状況



図-2.8 実験後の地表面の状況

(2) 断層の傾き 60° (動的实验)

図-2.9 に実験後の地表面の状況写真を示す。土槽の側面からの映像より得られた 0.08 秒ごとの地盤変位の時刻歴変化を表-2.3 に示す。最終変位時には数本の断層線が地表に達し、地表には多数の亀裂が認められた。また、約 0.2 秒を過ぎたあたりから変位が増大していた。

断層影響範囲は、固定(上)側 100mm、移動(下)側 400mm であった。土槽厚さ(=1.1m)に対する比率は $W^2/H=0.36$ 、 $W/H=0.09$ となり、鬼塚らの結果⁵⁾であるそれぞれ 0.37、0.08 とよく一致していた。

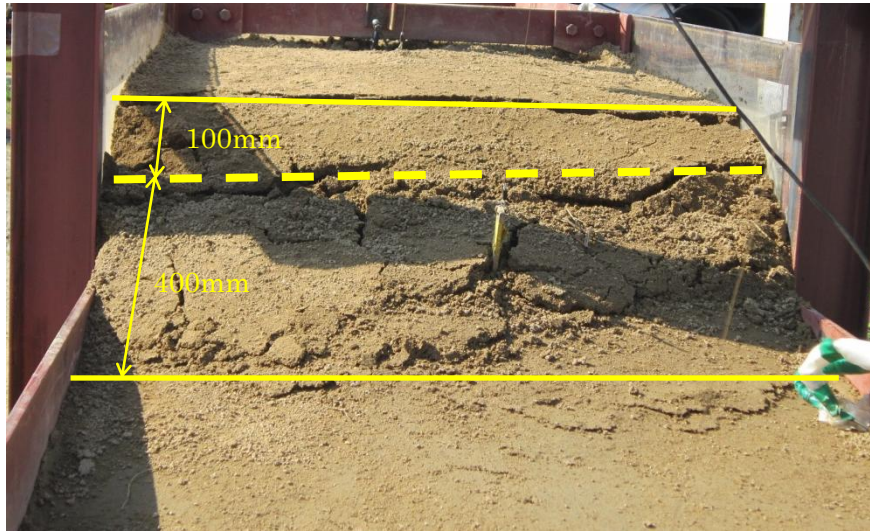
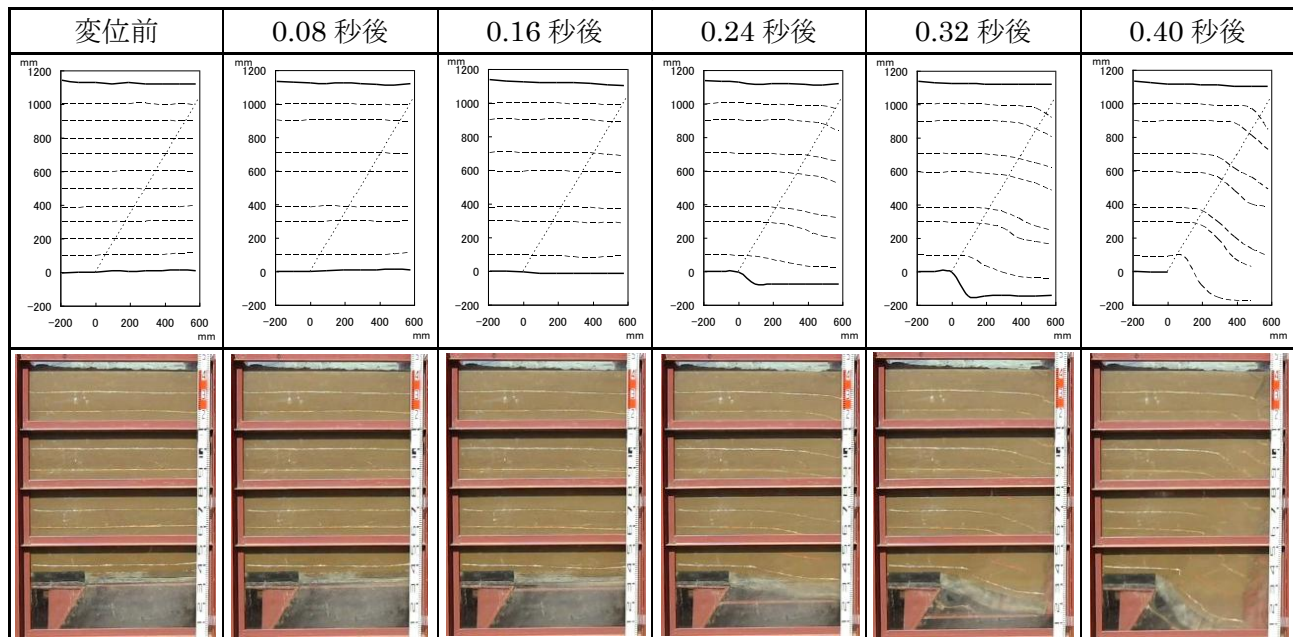


図-2.9 実験後の地表面の状況

表-2.3 地盤変位の時刻歴変化



2.3.2 断層変位速度

図-2.10 に動的実験における地盤変位の時刻歴変化を示す。0.5 秒で 346mm 変位しており(平均変位速度：692mm/s)、最終変位到達時の地盤変位速度は、 $99.2\text{mm}/0.1\text{s}=992\text{mm/s}$ とほぼ目標断層変位速度である 1.0m/s に達していることが確認できた。

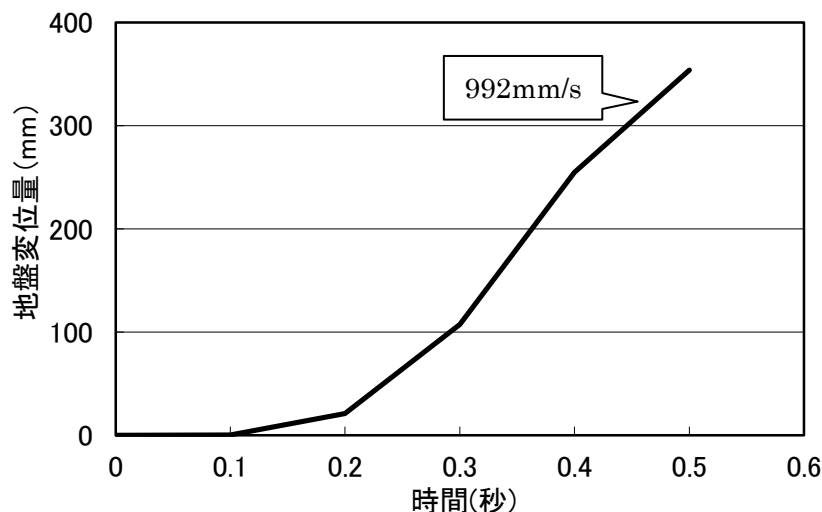


図-2.10 地盤変位の時刻歴変化(断層の傾き 60° 、動的変位)

2.3.3 管路の変位

各管体に取り付けた変位計により管路位置を測定した。図-2.11 に断層の傾き 90° の場合の測定結果を、図-2.12 に断層の傾き 60° の場合の測定結果を示す。いずれも、分割部を挟む継手 A および継手 A' の変位は地盤変位と一致していなかったが、その隣の継手 B～D および B'～D' の変位は地盤変位とほぼ一致していた。これは、管体強度が大きいと地盤変位に対して抵抗として働き、継手 A および A' の変位と地盤変位との間に相対変位が生じたと考えられる。

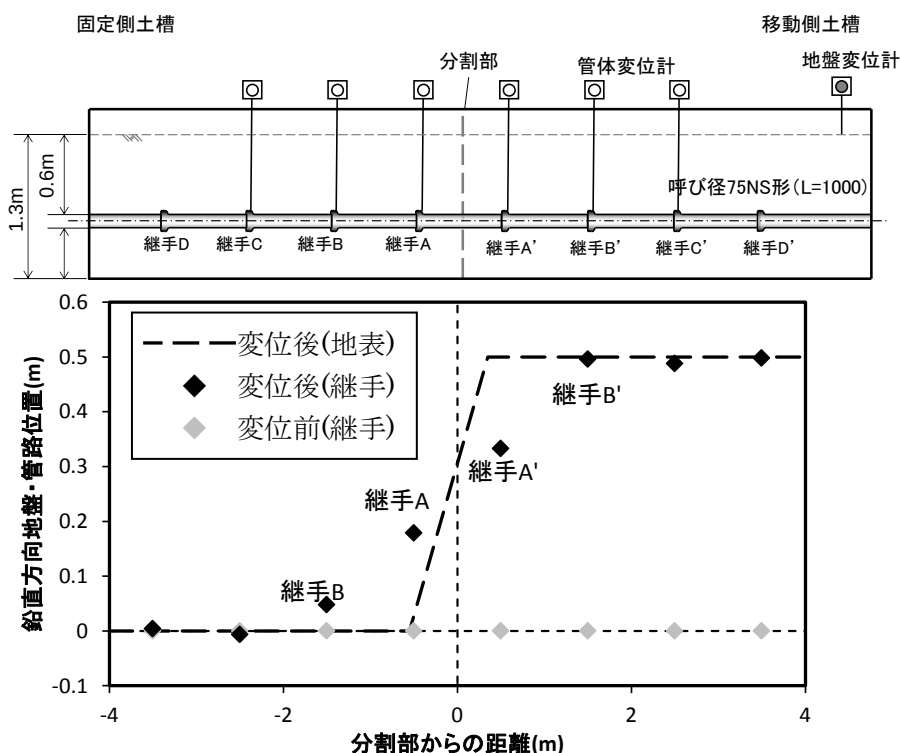


図-2.11 管路挙動の測定結果(断層の傾き 90° 、静的変位)

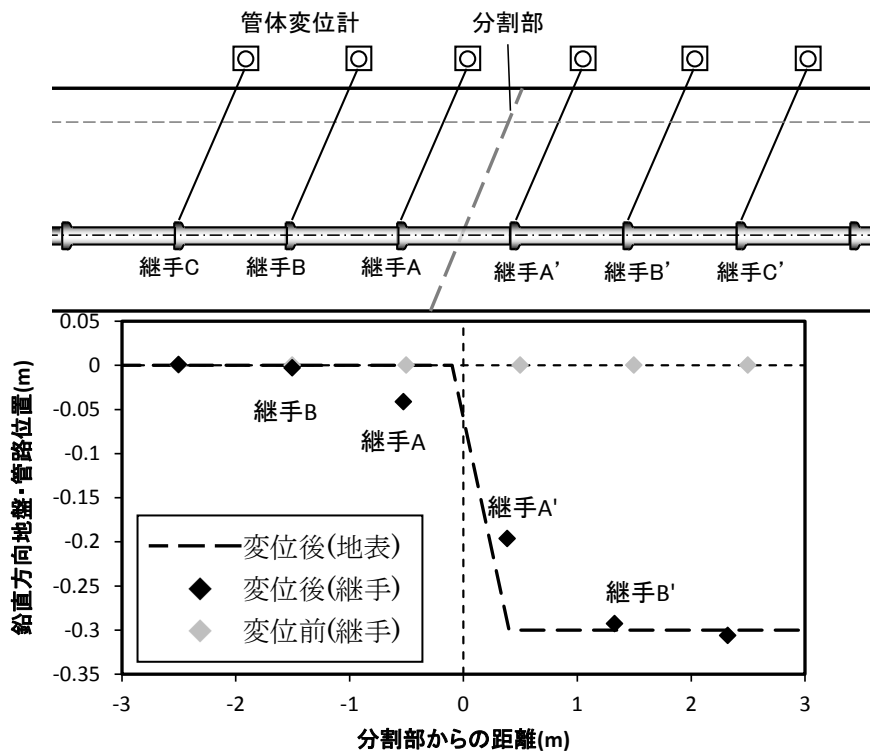


図-2.12 管路挙動の測定結果(断層の傾き 60°、動的変位)

2.3.4 継手屈曲角

移動側の土槽は上方向または下方向に変位させているので、継手は上下方向に屈曲する。継手屈曲角は、図-2.13 に示すように継手部の上下に 130mm の間隔で取り付けた変位計の測定差から、式(2-1)により求めた。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d_2 - d_1}{130} \right) \quad (2-1)$$

ここで、

- θ : 継手屈曲角
- d_1 : 変位計(上)による変位の測定値(mm)
- d_2 : 変位計(下)による変位の測定値(mm)

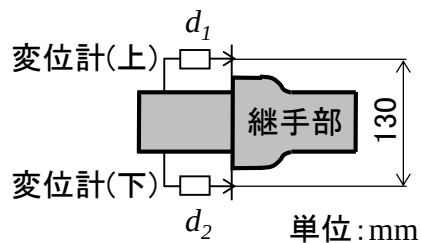


図-2.13 継手屈曲角算出のための変位計取付位置

断層の傾き 90° で静的に土槽を変位させた場合の、継手屈曲角の測定結果を図-2.14 に示す。分割部近傍の継手 B～B' の屈曲角が大きくなる傾向が認められた。固定側地盤と移動側地盤を比較すると、固定側地盤では分割部に近い継手 A よりも隣の継手 B の屈曲角の方が大きくなっていたが、移動側地盤では継手 A' と継手 B' の屈曲角はほぼ同じであった。分割部近傍の継手 A および継手 B の地盤変位に対する継手屈曲角の測定結果を図-2.15 に示す。継手 A の屈曲の進行が止まるタイミングと、継手 B の屈曲が進行するタイミングはいずれも地盤変位量が 0.2m 程度でほぼ同じであった。

断層の傾き 60° で動的に土槽を変位させた場合の、継手屈曲角の測定結果を図-2.16 に示す。静的変位と同様、分割部近傍の継手 B～B' の屈曲角が大きくなる傾向が認められた。固定側地盤と移動側地盤を比較すると、固定側地盤では分割部に近い継手 A の方が隣の継手 B の屈曲角よりも大きくなっており、移動側地盤では継手 A' よりも継手 B' の屈曲角の方が大きくなり、静的試験と逆の傾向が見られた。分割部近傍の継手 A および継手 B の地盤変位に対する継手屈曲角の測定結果を図-2.17 に示す。継手 A の屈曲の進行が止まり、継手 B の屈曲が進行する傾向は静的試験と同様であったが、継手 B の屈曲が始まるのが地盤変位量約 0.25m であるのに対し、継手 A の屈曲の進行が止まるのは地盤変位量約 0.3m とやや遅く、この時 8 度近くまで屈曲していた。

以上をまとめると、次のことが推定される。

静的実験では移動側地盤を上方に変位させ、動の実験では移動側地盤を下方に変位させている。このため、両実験で継手が受ける地盤反力の方向が異なり、固定側土槽の場合静的実験では管上地盤から、動の実験では管下地盤から反力を受ける。管上の地盤は、土槽の変位とともに崩壊して急激に反力が弱まり、継手は屈曲しやすくなると考えられる。一方管下地盤の反力は弱まることはないため、管路の変位に対して抵抗となる。このため、静的実験では固定側地盤の継手 A、動の実験では移動側地盤の継手 A' の屈曲が抑制され、隣の継手 B および B' の屈曲が進行していくものと考えられる。以上から、静的実験も動の実験も管路挙動の傾向は同じであると判断できる。

また、通常継手は約 5° で曲がりにくくなるが、動の実験では 8° 近くまで屈曲しており、継手 A に局部的に荷重がかかったものと思われる。この理由として、動の実験では土槽底面から管底部まで 0.4m とやや短く、管底部からの地盤反力が土槽変位とともに増大していったためであると考えられる。実際の断層ではこのような条件は考えにくいので、今後の実験では土槽底面から管底部までの距離を十分に長くするよう心掛けたい。

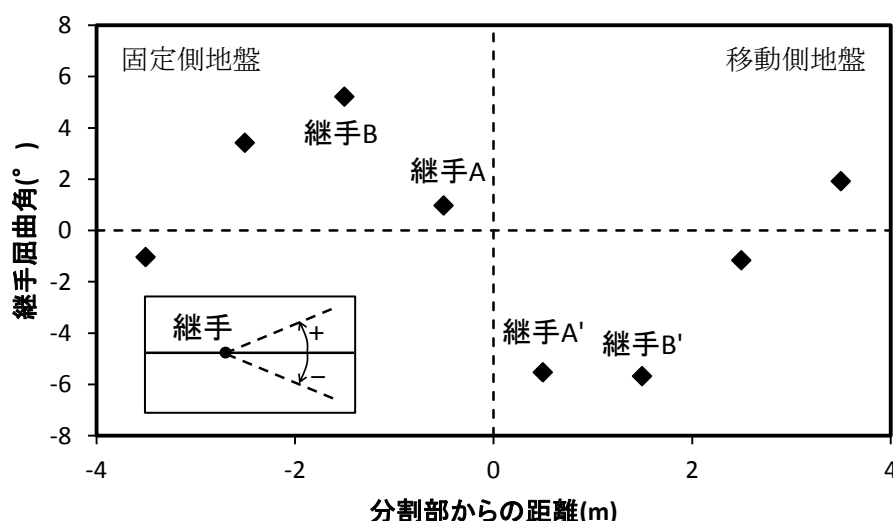


図-2.14 地盤変位後の継手屈曲角の測定結果(断層の傾き 90° 、静的変位)

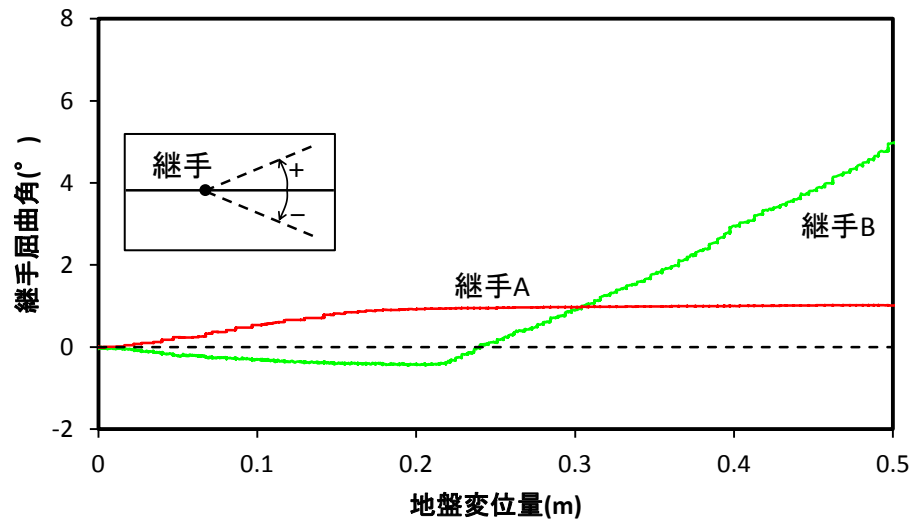


図-2.15 地盤変位に対する継手屈曲角の測定結果(断層の傾き 90° 、静的変位)

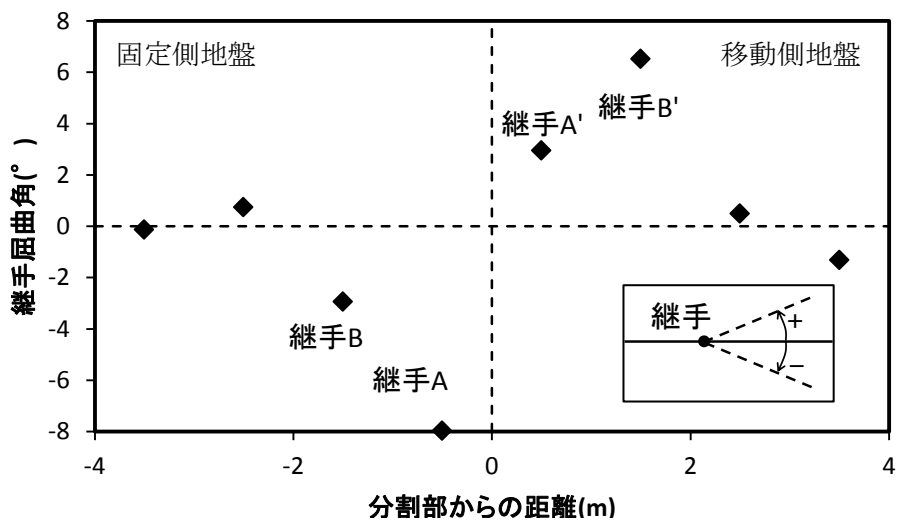


図-2.16 地盤変位後の継手屈曲角の測定結果(断層の傾き 60° 、動的変位)

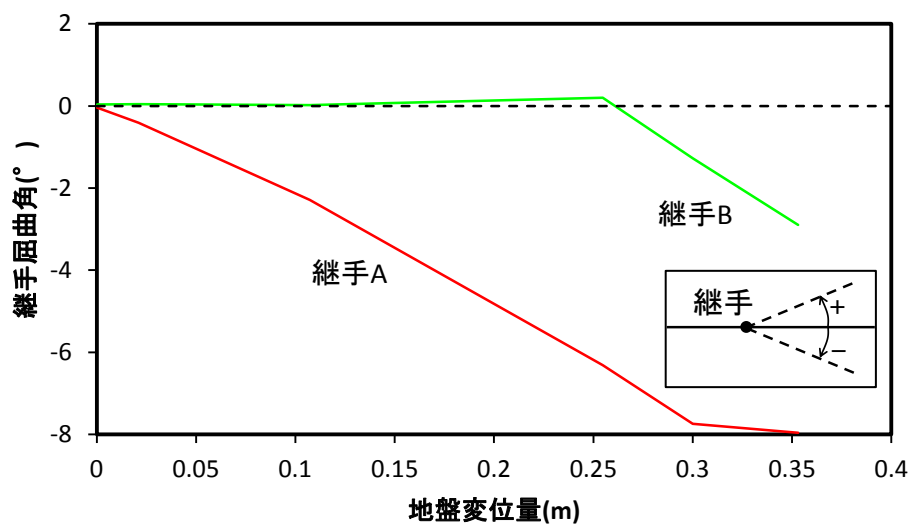


図-2.17 地盤変位に対する継手屈曲角の測定結果(断層の傾き 60° 、動的変位)

2.3.5 管体曲げモーメント

最終変位時の管体発生歪から管体発生応力を算出すると、弾性範囲内であれば式(2-2)のようになり、管体発生応力から管体曲げモーメントを算出すると、式(2-3)のようになる。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2-2)$$

$$M = \sigma \cdot Z \quad (2-3)$$

ここで、

- σ : 管体発生応力(MPa)
- M : 管体曲げモーメント(MNm)
- E : ヤング率(MPa)
- ε : 管体発生ひずみ
- Z : 断面係数(m³)

断層の傾き 90° の場合の、式(2-2)および式(2-3)で算出した管体曲げモーメントを図-2.18 に示す。断層の傾き 60° の場合を図-2.19 に示す。最大値はそれぞれ約 2kN・m、約 3kN・m と小さく、管体発生ひずみから算出される管体発生曲げ応力もそれぞれ約 50MPa、約 80MPa とダクタイル鉄管の曲げ強度 600MPa⁷⁾に対しても十分に小さく、弾性範囲内であることが確認できた。

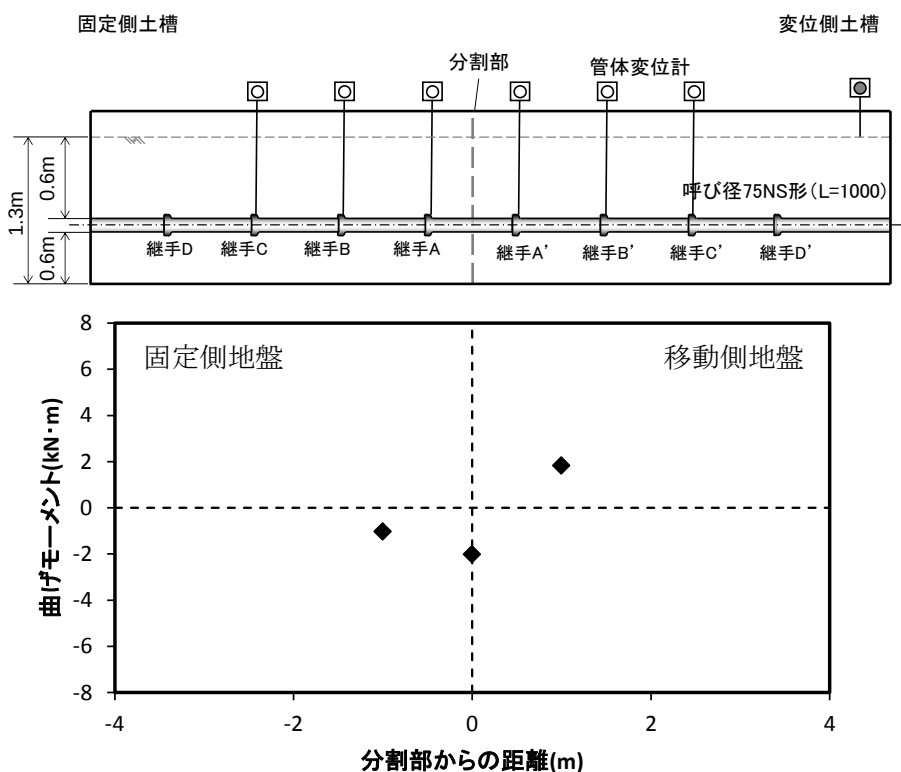


図-2.18 管体曲げモーメントの算出結果(断層の傾き 90°、静的変位)

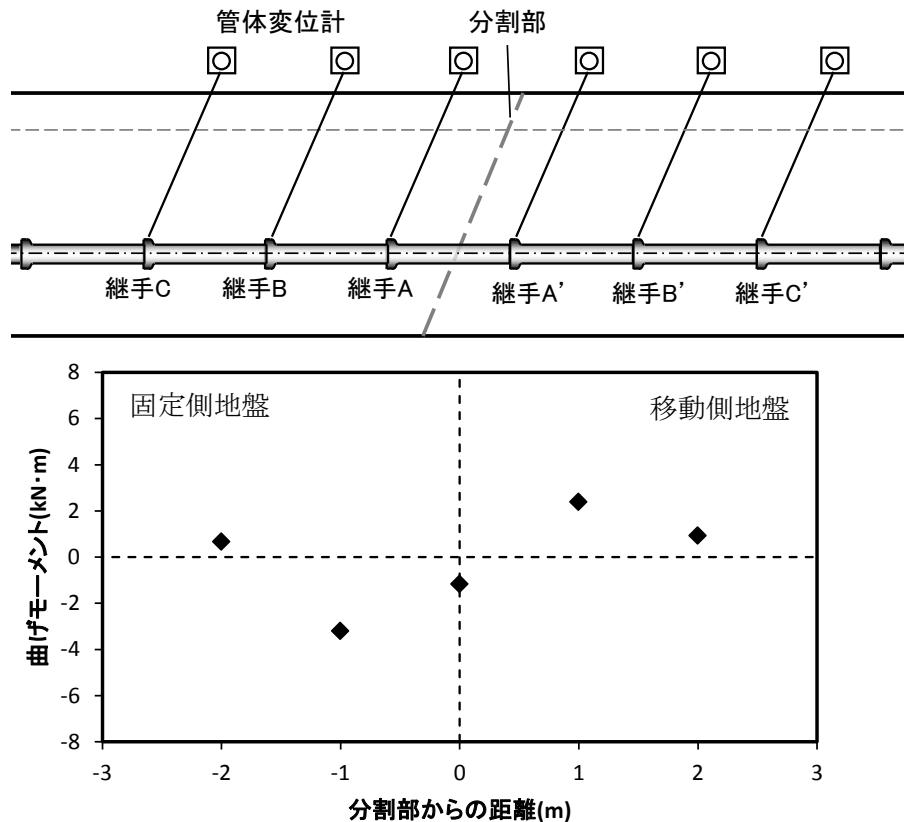


図-2.19 管体曲げモーメントの算出結果(断層の傾き 60° 、動的変位)

2. 4 まとめ

以上、土槽内に実管路を埋設し、断層を模して土槽を変位させたときの管路挙動を調査した結果、以下のことが分かった。

- ①断層の動きによる地表面の断層影響範囲は、鬼塚ら⁵⁾の既存の研究事例と整合していた。
- ②静的実験、動的实验のいずれにおいても、断層を挟む継手変位は地盤変位と一致していなかった。
これは管体強度が抵抗として働き地盤変位との間に相対変位が生じたためであると考えられる。
- ③静的実験、動的实验いずれにおいても、管下地盤から反力を受ける場合と管上地盤から反力を受ける場合とで管路変位の傾向が異なり、管上地盤から反力を受ける場合は分割部近傍の隣の継手が大きく屈曲する傾向は同じであった。
- ④動的实验では、固定側地盤の分割部近傍継手 A は 8° 近くまで屈曲が進行した。これは、実験条件により管下地盤からの反力が増大したためであると考えられる。
- ⑤管体曲げモーメントから算出される管体曲げ応力は十分小さく弾性範囲内であり、十分な管体強度を有していた。

以上から、動的小よび静的の変位条件に関係なく、管路挙動の傾向は同じであると考えられることが分かった。

【第2章の参考文献】

- 1) 理研機器株式会社 HP : (<http://www.rikenkiki.co.jp/>).
- 2) 株式会社東京測器研究所 HP : (<http://www.tml.jp/use/index.html>).
- 3) 平松良浩：地震発生メカニズム，防災市民講座 金沢大学サテライトプラザ，2002
(http://hakusan.s.kanazawa-u.ac.jp/~yoshizo/official/japanese/shiryou_pdf/text20020831.pdf).
- 4) 株式会社共和電業 HP : (<http://www.kyowa-ei.com/jpn/>).
- 5) 鬼塚信弘他 3 名：基盤の逆断層変位に伴う地盤の変形と応力について，応用力学論文集，Vol.2, pp.533-542, 1998.
- 6) 金子正吾, 宮島昌克：逆断層を横断する耐震継手ダクタイル鉄管の挙動に関する研究，構造工学論文集，Vol.60A, pp.945-952, 2014.
- 7) (社)日本水道協会：「水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版」, 2009.

第 3 章 既存断層横断部の管路挙動の シミュレーション解析

第3章 既存断層横断部の管路挙動のシミュレーション解析

3.1 はじめに

先に行った実管路を用いた土層実験では、断層の傾き 60° および 90° における断層横断部の耐震継手ダクトイル鉄管の管路挙動を確認することができた。しかし、日本には断層の傾きをはじめ断層変位量など様々な条件の断層が数多く存在し、それらすべての断層挙動を実験により把握することは現実的に不可能である。そこで、シミュレーション解析により断層挙動を検証することとした。シミュレーション解析のフローを図-3.1 に示す。

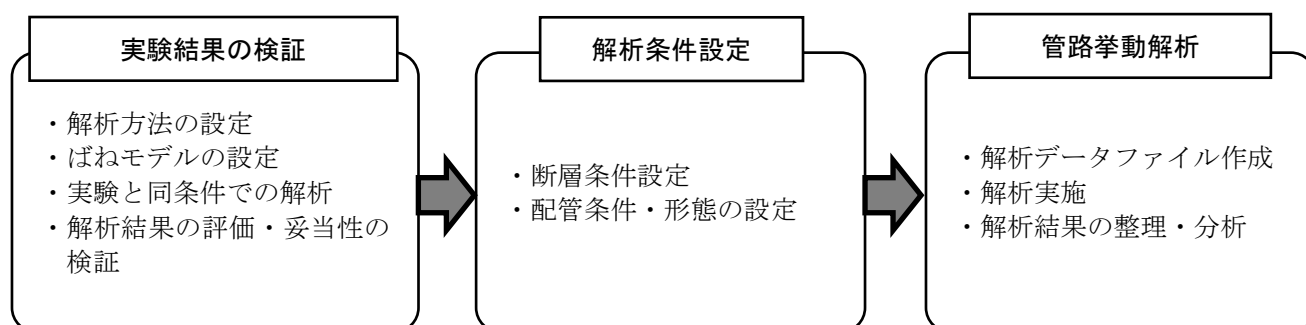


図-3.1 シミュレーション解析のフロー

3.2 解析手法

3.2.1 解析モデル

埋設管路の挙動解析においては、管路を弾性床上的の梁(剛体)と見なし、継手および地盤をばねでモデル化して FEM 解析を実施した。また、一般に埋設管路は周辺地盤に対し重量が軽く、管は地盤と一緒に挙動することが分かっており、第2章の実管路を用いた挙動実験においても動的変位と静的変位とで挙動の傾向は同じであったことから、ここでは静的解析手法を採用した。なお、今回は断層変位のような変形量の大きな解析も可能な大変形解析手法を導入した(使用ソフト: DYNA2E¹⁾ 伊藤忠テクノソリューションズ製)。解析モデルを図-3.2 に示す。

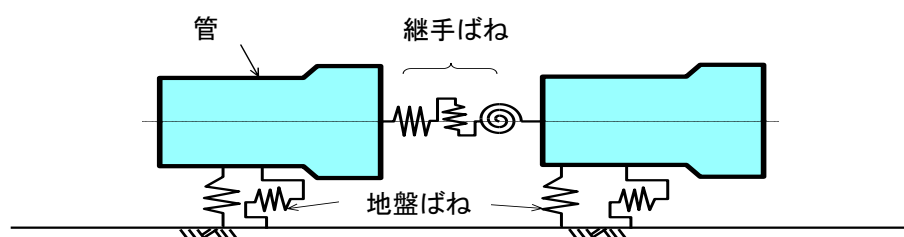


図-3.2 解析モデル

3.2.2 ばねモデル

(1) 継手ばね

継手ばねは、実験に基づいて設定した²⁾。図-3.3 に例として呼び径 75 の回転ばねを求める実験方法を示す。同図のように 2 本の定尺長さの直管を接合した状態で試験機（2000kN 載荷試験機 UH-C2000kNI, (株)島津製作所製³⁾）により継手部に荷重を負荷し、継手部の上下に取り付けた変位計（SDP-100C, 定格容量 100mm, (株)東京測器研究所製⁴⁾）から継手屈曲角を算出し、載荷荷重から曲げモーメントを算出した。図-3.4 に継手屈曲角と曲げモーメントの測定結果およびこの測定結果に基づいて設定した継手ばね定数を併せて示す。

呼び径 75 の場合、継手内部で管が接触する約 4.9° (0.085rad) の屈曲角を超えると曲がりにくくなるように回転ばねを設定した。なお、呼び径 250 以下の NS 形ダクタイル鉄管においては、地震時に曲がりうる最大屈曲角として 8° と規定されており⁵⁾、継手屈曲角 8° 以内では継手性能が保持されることが保障されている。

継手ばねの概要図を図-3.5 に、継手ばねの一覧を表-3.1 に示す。軸方向ばねは、継手部のゴム輪の静摩擦力で引張り力に耐える領域（変位量： $0 \sim \delta_a$ ）、管とゴム輪が滑り継手部が伸びる領域（変位量： $\delta_a \sim \delta_b$ ）、継手の抜け出し防止機構が働き継手の伸縮が止まる領域（変位量： $\delta_b \sim$ ）でそれぞれ異なるばね定数を設定した。軸直角方向ばねは、継手内部で受口と挿し口の鉄部同士が接触する状態となるため、非常に大きな値による線形ばねで設定した。

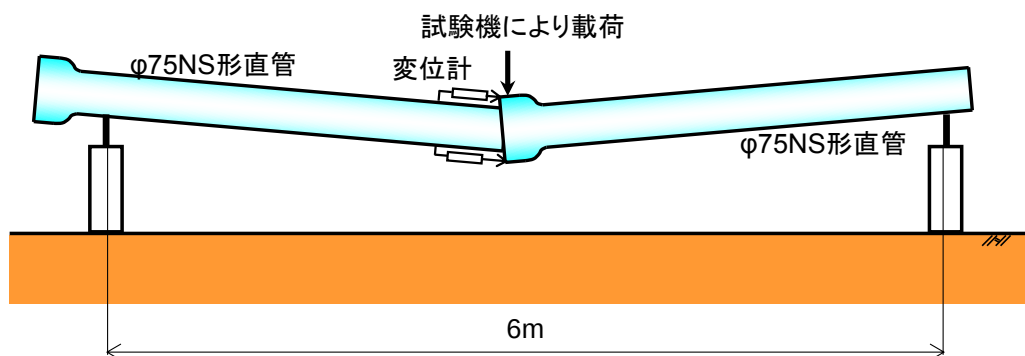


図-3.3 継手ばね(回転ばね)設定の実験方法

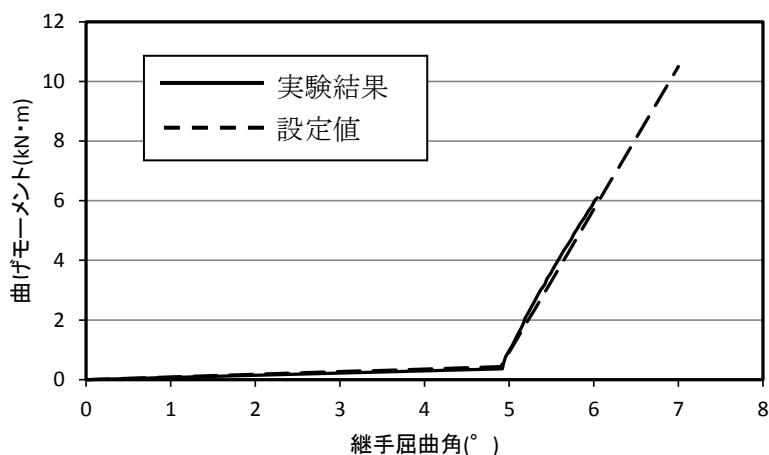


図-3.4 継手ばね(回転ばね)の測定結果および設定

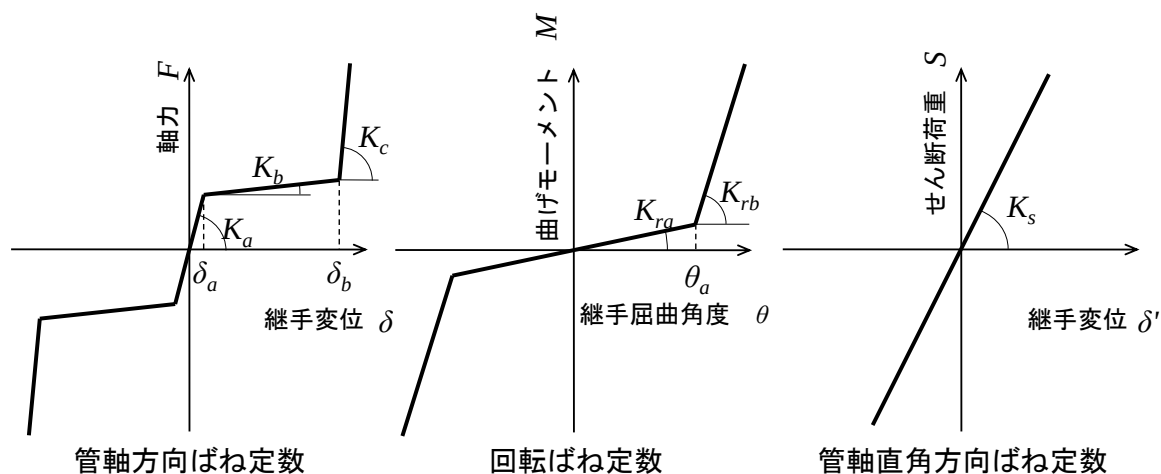


図-3.5 継手ばねの概要

表-3.1 継手ばね一覧

呼び径	軸方向ばね		回転ばね		軸直角方向ばね	
75	K_a	980 (kN/m)	K_{ra}	5.13 (kN・m/rad)	K_s	196,000 (kN/m)
	K_b	9.8 (kN/m)	K_{rb}	273.6 (kN・m/rad)		
	K_c	259,700 (kN/m)	θ_a	0.0848 (rad)		
	δ_a	0.001 (m)		= 4.9 (°)		
	δ_b	0.04 (m)				
100	K_a	980 (kN/m)	K_{ra}	5.85 (kN・m/rad)	K_s	196,000 (kN/m)
	K_b	9.8 (kN/m)	K_{rb}	344.2 (kN・m/rad)		
	K_c	259,700 (kN/m)	θ_a	0.0855 (rad)		
	δ_a	0.001 (m)		= 4.9 (°)		
	δ_b	0.04 (m)				
150	K_a	980 (kN/m)	K_{ra}	6.79 (kN・m/rad)	K_s	196,000 (kN/m)
	K_b	9.8 (kN/m)	K_{rb}	652.0 (kN・m/rad)		
	K_c	259,700 (kN/m)	θ_a	0.0925 (rad)		
	δ_a	0.001 (m)		= 5.3 (°)		
	δ_b	0.05 (m)				
200	K_a	980 (kN/m)	K_{ra}	16.22 (kN・m/rad)	K_s	196,000 (kN/m)
	K_b	9.8 (kN/m)	K_{rb}	760.3 (kN・m/rad)		
	K_c	245,000 (kN/m)	θ_a	0.0925 (rad)		
	δ_a	0.001 (m)		= 5.3 (°)		
	δ_b	0.05 (m)				
250	K_a	980 (kN/m)	K_{ra}	16.43 (kN・m/rad)	K_s	196,000 (kN/m)
	K_b	9.8 (kN/m)	K_{rb}	2268.0 (kN・m/rad)		
	K_c	225,400 (kN/m)	θ_a	0.0925 (rad)		
	δ_a	0.001 (m)		= 5.3 (°)		
	δ_b	0.05 (m)				

(2) 地盤ばね

管軸方向ばねは、管と地盤の滑りを考慮し、管と地盤の相対変位が限界値（管と地盤の滑り開始点：2mm と設定）を超えるとばね定数が小さくなるバイリニアモデルで式(3-1a)および式(3-1b)のように設定した。管と地盤の摩擦係数については、文献 5)に記載の「軟弱地盤・ポリエチレンスリーブあり」の場合の、0.2 と設定した。

管軸直角方向地盤ばねも、管と地盤の相対変位が限界値（地盤崩壊開始点）を超えるとばね定数が小さくなるバイリニアモデルで設定した。また、本研究対象管路は埋設深度が浅いことから、管が地盤に対し相対的に上方へ移動する場合は土砂が崩壊し、動きやすくなると考えられる、それは第 2 章の実験でも確認されているため、上方へ移動する場合と下方へ移動する場合とでは異なるばね定数を設定した。管が下方へ移動する場合は、地盤反力を基に式(3-2a)および式(3-2b)のように設定した。一方管が上方へ移動する場合は、地盤の崩壊を考慮し、文献 6)を参考に式(3-3a)および式(3-3b)のように設定した。この地盤崩壊開始点は、管が下方へ移動する場合のばねについては一律に 2mm と設定し、管が上方へ移動する場合については、文献 6)を参考に呼び径により 16～17mm と設定した。図-3.6 に地盤ばねの概要図を、表-3.2 に地盤ばね定数の一覧を示す。

$$k_1 = \pi \cdot D \cdot \gamma \cdot \left(h + \frac{D}{2} \right) \cdot \mu \cdot \frac{1}{\delta_1} \cdot \ell \quad (3-1a)$$

$$k_2 = 0.001 \cdot k_1 \quad (3-1b)$$

$$k_{t1} = K \cdot D \cdot \ell \quad (3-2a)$$

$$k_{t2} = 0.02 \cdot k_{t1} \quad (3-2b)$$

$$k_{t1} = \gamma \cdot \left(h + \frac{D}{2} \right) \cdot q \cdot D \cdot \ell / \delta_{t1} \quad (3-3a)$$

$$k_{t2} = 0.002 \cdot k_{t1} \quad (3-3b)$$

ここで、

- k_1, k_2 : 管軸方向地盤ばね定数(kN/m)
- k_{t1}, k_{t2} : 管軸直角方向地盤ばね定数(kN/m)
- δ_1 : 管と地盤の滑り開始点(=0.002m)
- δ_{t1} : 地盤崩壊開始点
(管が下方へ移動する場合：0.002m、管が上方へ移動する場合：0.016m～0.017m)
- D : 管の直径
 $\left[\begin{array}{l} \text{呼び径75 : 0.093m、呼び径100 : 0.118m、呼び径150 : 0.169m} \\ \text{呼び径200 : 0.22m、呼び径250 : 0.2716m} \end{array} \right]$
- γ : 土の単位体積重量(=16kN/m³)
- h : 土被り(=1.2m)
- μ : 管と地盤の摩擦係数⁵⁾(=0.2)
- K : 地盤反力係数(=20,700kN/m³)
- ℓ : 管の単位長さ(m)
- q : 上方移動時の係数(=2.2)⁶⁾

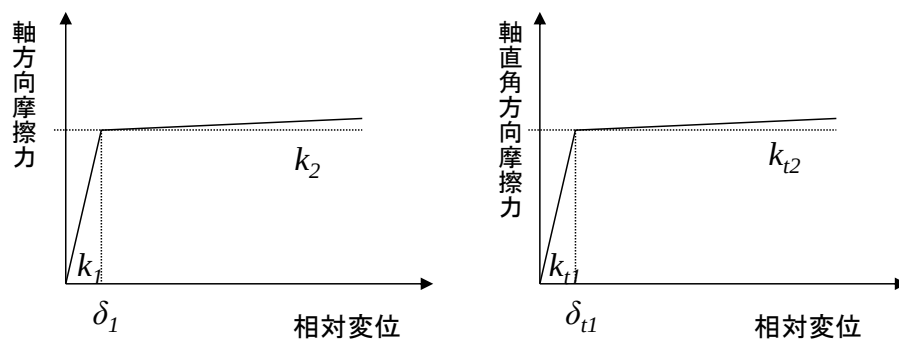


図-3.6 地盤ばねの概要図

表-3.2 地盤ばね一覧

呼び径	管軸方向		管軸直角方向		
				下方向移動	上方向移動
75	k_1	583 (kN/m)	k_{t1}	1930 (kN/m)	262 (kN/m)
	k_2	0.58 (kN/m)	k_{t2}	39 (kN/m)	0.52 (kN/m)
	δ_1	0.002 (m)	δ_{t1}	0.002 (m)	0.016 (m)
100	k_1	747 (kN/m)	k_{t1}	2450 (kN/m)	332 (kN/m)
	k_2	0.75 (kN/m)	k_{t2}	49 (kN/m)	0.66 (kN/m)
	δ_1	0.002 (m)	δ_{t1}	0.002 (m)	0.016 (m)
150	k_1	1090 (kN/m)	k_{t1}	3510 (kN/m)	476 (kN/m)
	k_2	1.09 (kN/m)	k_{t2}	70 (kN/m)	0.95 (kN/m)
	δ_1	0.002 (m)	δ_{t1}	0.002 (m)	0.016 (m)
200	k_1	1450 (kN/m)	k_{t1}	4570 (kN/m)	620 (kN/m)
	k_2	1.45 (kN/m)	k_{t2}	91 (kN/m)	1.24 (kN/m)
	δ_1	0.002 (m)	δ_{t1}	0.002 (m)	0.016 (m)
250	k_1	1820 (kN/m)	k_{t1}	5640 (kN/m)	765 (kN/m)
	k_2	1.82 (kN/m)	k_{t2}	113 (kN/m)	1.53 (kN/m)
	δ_1	0.002 (m)	δ_{t1}	0.002 (m)	0.017 (m)

3. 3 実験結果の検証

本解析が実験結果を再現できるかどうか確認するため、実験と同じ条件にて解析を実施した。解析条件を表-3.3 に示す。固定側土槽の管端部を完全固定とし、変位側土槽の管端部は地盤と同じ動きをするものとした。

表-3.3 解析条件

	断層の傾き 90°	断層の傾き 60°
供試管	呼び径75NS形ダクタイル鉄管	
管路長さ	$L=1\text{m}\times 9$ (全長9m)	$L=1\text{m}\times 15$ (全長15m)
断層変位量： V	500mm 〔鉛直方向：500mm 水平方向：0mm〕	346mm 〔鉛直方向：300mm 水平方向：173mm〕
変位の向き	上向き	下向き
断層の傾き	90°	60°
地盤種類	砂質地盤	
土層厚さ： H	1.3m	1.1m
土被り	0.6m	
締固め	N値15 地盤反力係数 $K=20,700\text{ kN/m}^3$ 相当 ^{5), 7)}	

3.3.1 管路挙動

(1)断層の傾き 90°

地盤変位後の管路挙動の測定結果と解析結果を併せて図-3.7 に示す。継手 A' の位置において、実験結果と解析結果との間に 5cm 程度の乖離が認められたが、その他の位置では実験結果と解析結果は比較的良好に一致していた。なお、5cm の乖離については、断層変位 50cm に対し約 1 割と小さく、地盤締固めのばらつきによるものと推定される。

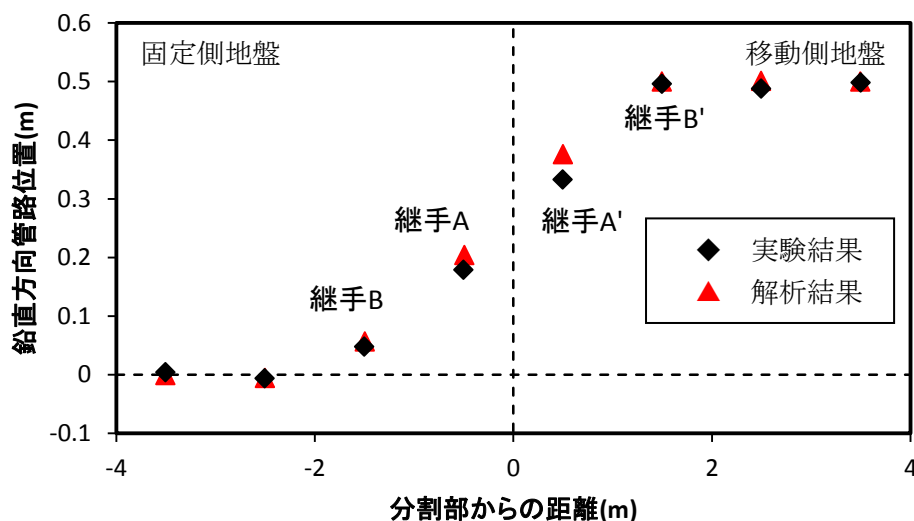


図-3.7 管路挙動の測定結果と解析結果

(2)断層の傾き 60°

地盤変位後の管路挙動の測定結果と解析結果を併せて図-3.8 に示す。継手 A の位置において、実験結果と解析結果との間に 4cm 程度の乖離が認められたが、その他の位置では実験結果と解析結果は比較的よく一致していた。4cm の乖離も断層変位 346mm の約 1 割程度であり、地盤締固めのばらつきによるものと推定される。

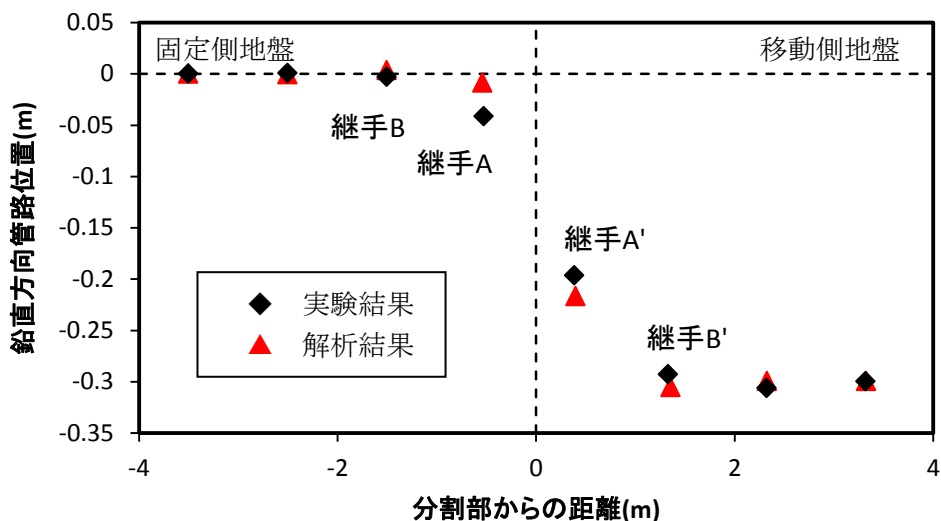


図-3.8 管路挙動の測定結果と解析結果

3.3.2 継手屈曲角

(1)断層の傾き 90°

継手屈曲角の測定結果と解析結果を図-3.9 に示す。分割部近傍の継手 A および継手 B の地盤変位に対する継手屈曲角の測定結果と解析結果を図-3.10 に示す。図-3.7 に示したように継手 A'の鉛直方向変位において、実験結果と解析結果とでやや乖離していたため継手 A の屈曲角にやや差があるものの、実験結果は解析結果と比較的によく一致していると考えられる。地盤変位に対する継手屈曲挙動も、継手 A の屈曲の進行が止まるタイミングと、継手 B の屈曲が進行するタイミングは、解析結果と実験結果とで一致しており、同じ傾向を示していた。

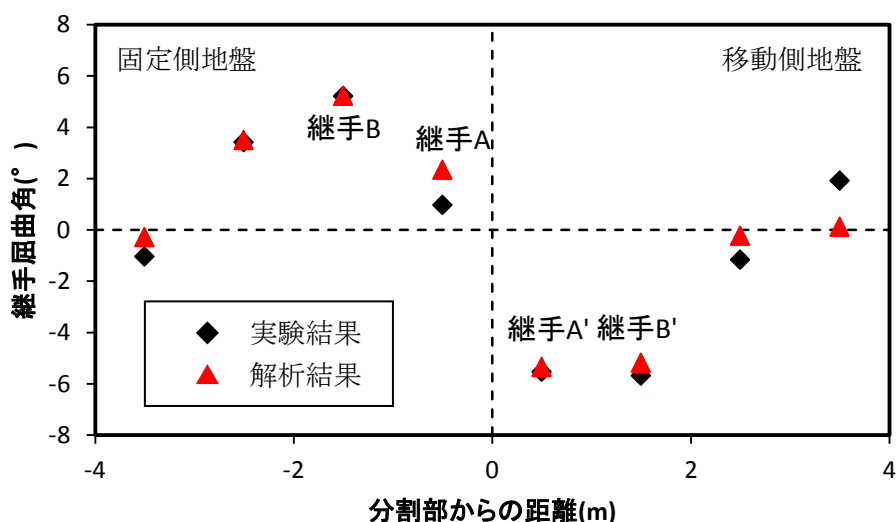


図-3.9 継手屈曲角の測定結果と解析結果

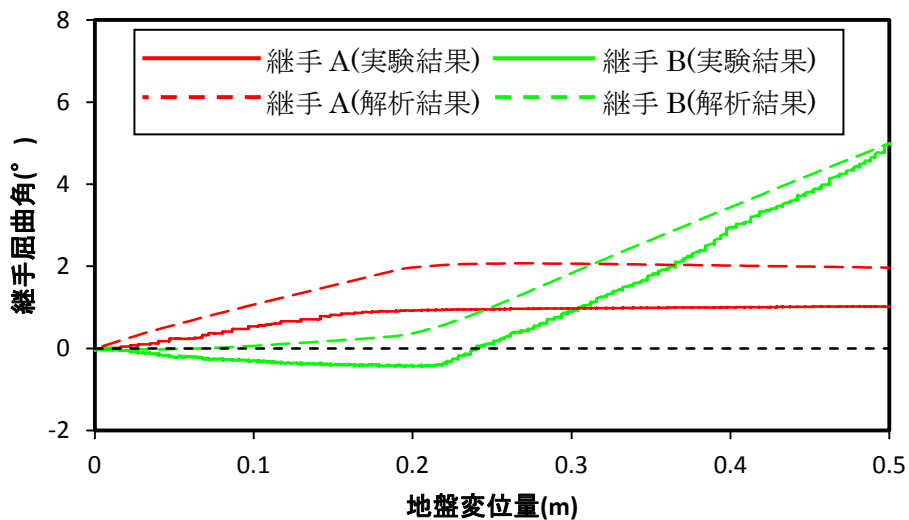


図-3.10 地盤変位に対する継手屈曲角の測定結果と解析結果

(2)断層の傾き 60°

継手屈曲角の測定結果と解析結果を図-3.11 に示す。分割部近傍の継手 A および継手 B の地盤変位に対する継手屈曲角の測定結果と解析結果を図-3.12 に示す。図-3.8 に示したように継手 A の鉛直方向変位において、実験結果と解析結果とでやや乖離していたため、継手 B の屈曲角にやや差が生じていた。また、地盤変位に対する継手屈曲挙動についても、実験結果と解析結果とでは傾向は似ているものの両者のかい離がやや大きかった。断層の傾き 90° の結果である図-3.10 と比較すると、図-3.10 の方が実験結果と解析結果との相関がよかった。これは、断層の傾き 60° の実験では土槽を動的に変位させており、データサンプリング周期が 10Hz とやや長く精度が粗くなったためと推定される。

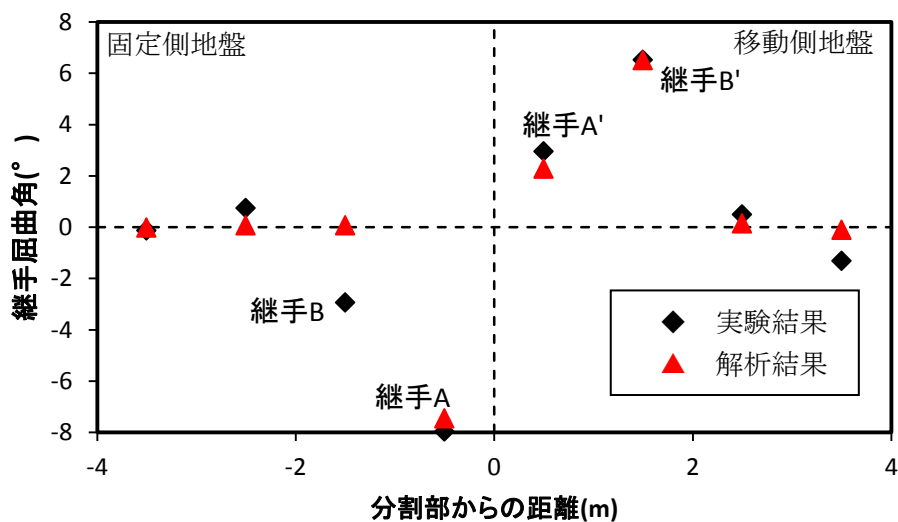


図-3.11 継手屈曲角の測定結果と解析結果

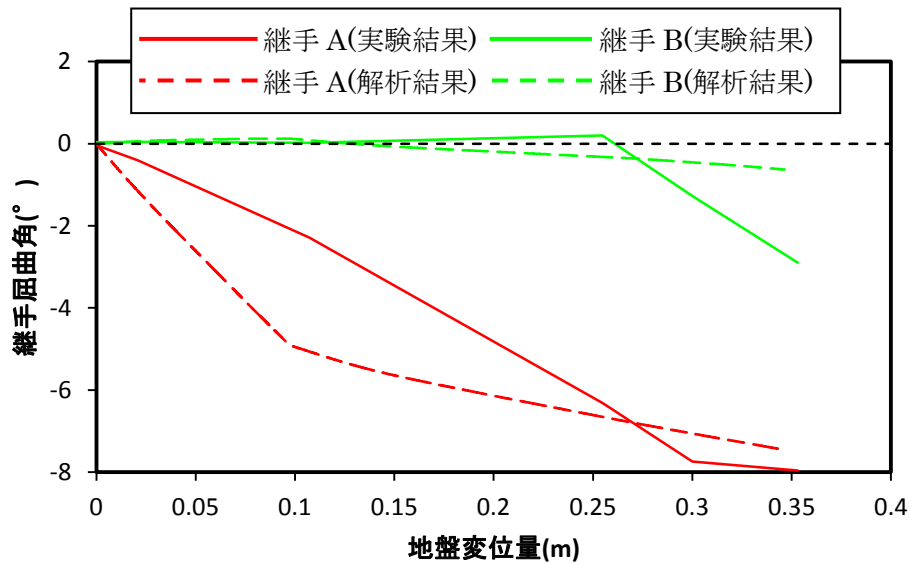


図-3.12 地盤変位に対する継手屈曲角の測定結果と解析結果

3.3.3 管体曲げモーメント

(1)断層の傾き 90°

最終変位時の管体発生歪から算出した管体曲げモーメントを、解析結果と併せて図-3.13 に示す。実験結果と解析結果とで発生曲げモーメントの大小に多少の違いはあるもののその差は小さく、これは歪ゲージ貼付位置の管厚のばらつきの範囲内と考えられ、両者は比較的良好に一致していると考えられる。

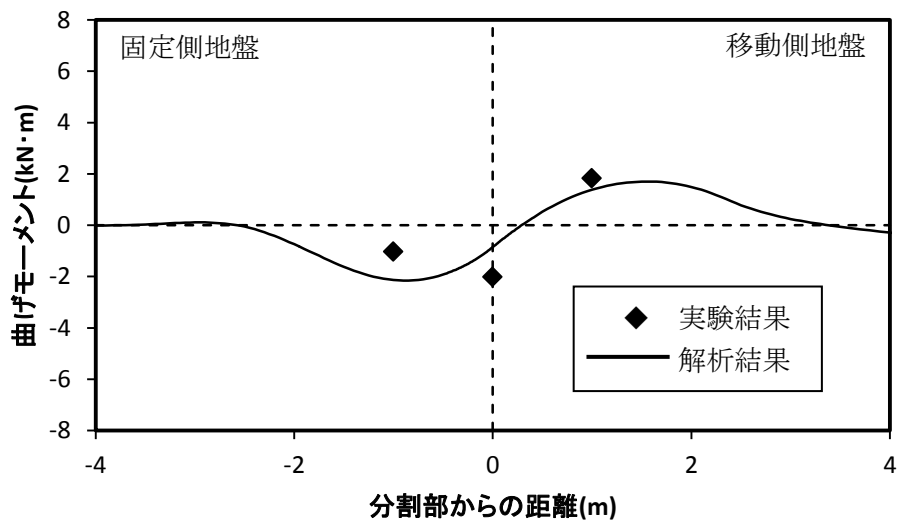


図 3.13 管体曲げモーメントの測定結果と解析結果

(2)断層の傾き 60°

最終変位時の管体発生歪から算出した管体曲げモーメントを、解析結果と併せて図-3.14 に示す。断層の傾き 60° においても、両者は比較的良好一致していると考えられる。

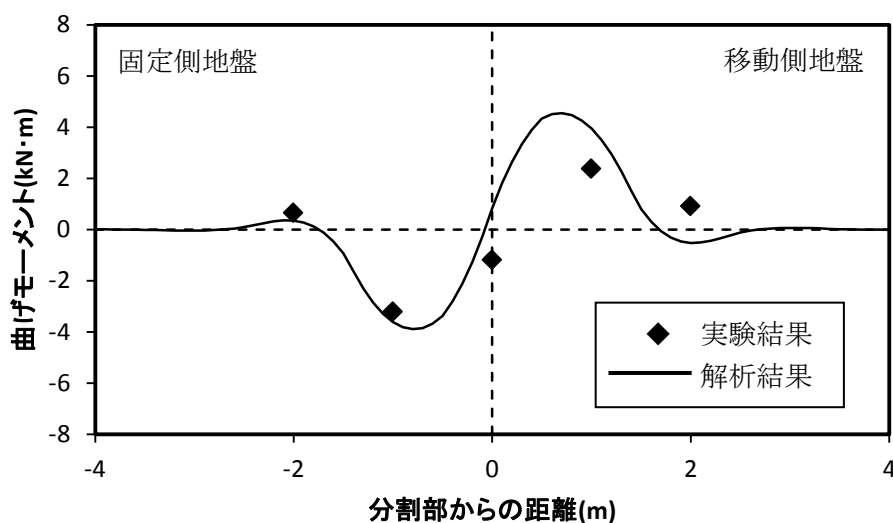


図 3.14 管体曲げモーメントの測定結果と解析結果

以上、土槽実験と同じ条件で解析した結果、実験結果と比較的良好一致しており、断層横断部の管路挙動の解析手法がほぼ妥当であることを確認した。

3. 4 解析条件設定

3.4.1 断層条件

(1) 既存断層の調査

まず、対象とする断層モデルについて検討する。独立行政法人産業技術総合研究所の活断層・地震研究センターでは、2005 年より活断層データベース⁸⁾を公開している。2014 年 12 月 1 日現在、559 件の活動セグメントデータが登録されており、そのうち 389 件が活断層データである。断層の型別の登録件数を表-3.4 に示す。約半数が逆断層、4 割が横ずれ断層、1 割が正断層であった。断層の傾き別の集計を表-3.5 に示す。断層の傾き 45°、60°、90° で約 9 割を占めていた。登録断層の断層変位量のヒストグラムおよび累積度数を図-3.15 に示す。ここでの断層変位量とは、断層が 1 回の地震で変位する量のこと、断層長さなどの調査結果から算出された値を表す。最大変位量は 9.2m であり、全データの約半数が 2m 以下、3/4 が 3m 以下であった。以上から、今回解析対象とする断層モデルは、断層変位量 3m で傾き 45°、60°、90° の逆断層とした。

表-3.4 断層の型別の集計

逆断層	正断層	横ずれ断層	合計
196 (50.4%)	28 (7.2%)	165 (42.4%)	389

表-3.5 活断層の傾き別の集計

断層の傾き	件数	比率(%)
20°	3	0.8
30°	13	3.3
35°	1	0.3
40°	2	0.5
45°	138	35.5
50°	3	0.8
60°	87	22.4
70°	7	1.8
80°	6	1.5
90°	129	33.2
合計	389	

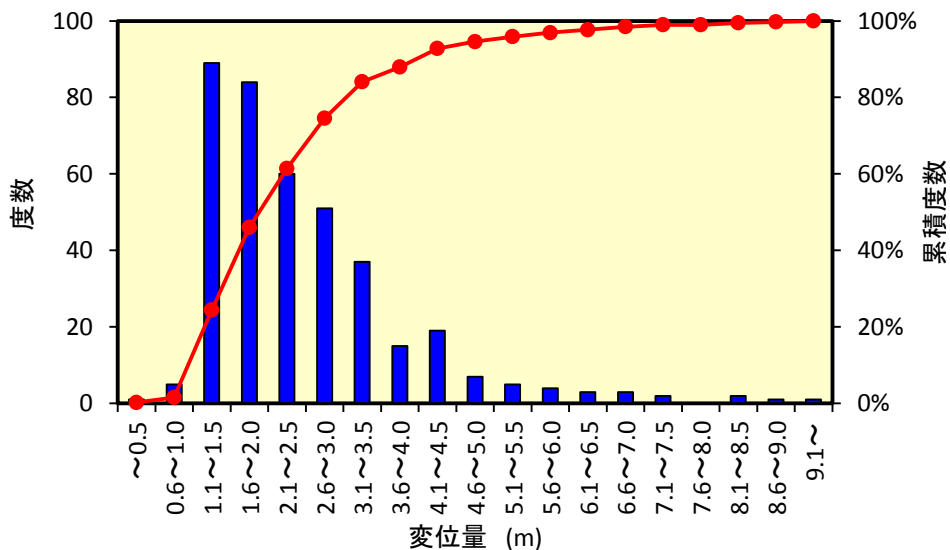
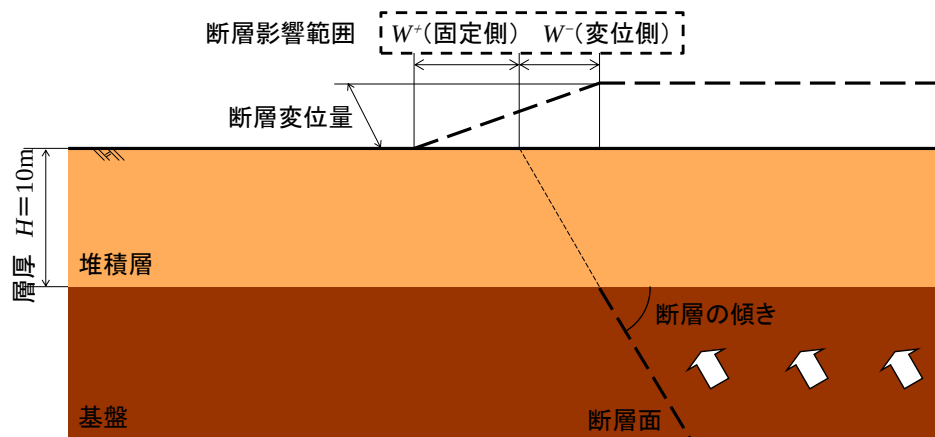


図-3.15 活断層の変位量分布

(2) 断層影響範囲

日本では、河川の堆積作用によって形成された平野（沖積平野）が、土地生産性に優れた平坦地として我々の活動の土台をなしてきた。このような場所に存在する活断層は、沖積層などの堆積物で覆われている場合が多く、断層の動きに伴い堆積物がどのように変形するかは、管路の挙動を考える上で重要な問題である。第2章でも示した通り、鬼塚ら⁹⁾が行った、模型実験における基盤断層の傾斜角や堆積層の層厚を変えた場合の断層影響範囲の調査結果を参考にした。鬼塚らの報告では、堆積層の層厚が厚くなると断層影響範囲に対する断層変位量の影響は見られないことから、図-3.16のように堆積層の層厚から断層影響範囲を算出した。堆積層の層厚に関しては、本多、須貝¹⁰⁾が日本全国の33河川を対象に、河口付近の沖積層の層厚分布を調査している。河口付近の層厚は、33河川中32河川で10m以上と報告されている。日本の人口の多くは低地の平野部に集中することから、今回沖積層厚さ $H=10\text{m}$ と設定し、地表面への影響は、鬼塚らの実験結果をもとに図-3.16から算出した。以上を踏まえ、基盤の断層が動いた時、堆積層は図-3.16の点線のように挙動するものとした。



断層の傾き	45°	60°	90°
W^+ (固定側)	$0.3 \cdot H = 3\text{m}$	$0.4 \cdot H = 4\text{m}$	$0.4 \cdot H = 4\text{m}$
W^- (変位側)	$0.4 \cdot H = 4\text{m}$	$0.1 \cdot H = 1\text{m}$	$0.2 \cdot H = 2\text{m}$

H : 堆積層の層厚

図-3.16 断層影響範囲の算出

3.4.2 管路モデル

管路モデルを図-3.17 に、解析条件を表-3.6 に示す。対象管路は、断表的な耐震継手ダクタイトイル鉄管である NS 形ダクタイトイル鉄管 (呼び径 75～250) の直線状管路とし、断層位置や管長を変えて解析を行った。対象管長は定尺 (呼び径 75 および 100 は 4m、呼び径 150～250 は 5m) のほか、仮に定尺管長で管路の安全性が保たれない場合でも設計変更が比較的容易となるよう、定尺の半分および 1m と設定した。

埋設地盤に関しては、水道管路は一般に良質な山砂で均等に締め固めて埋め戻されるため、地盤条件は N 値 15 相当の砂質地盤とした。N 値より地盤反力係数を算出し、 $20,700\text{kN/m}^3$ と設定した^{5),7)}。このクラスの口径範囲では一般に埋設深度は約 1m 程度と浅いことから土被りの影響は無視し、管路周辺地盤の挙動は地表面の挙動と同じとした。また、管両端が断層横断部の管路挙動に影響を与えないような管路長を対象としていることを確認し、固定側地盤中の管端部を完全拘束した。

断層の位置による影響を把握するため、図-3.18 のように、①断層影響範囲と固定側地盤または変位側地盤との境界部に継手がある場合、②断層影響範囲との境界部に継手がない場合、のように断層の位置をずらして解析を行った。境界部に継手がない場合の境界部と継手部間の距離は、管長が定尺管及び定尺 $\times 1/2$ の管路の場合は、管長 L に対し $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 、管長が 1m の管路の場合は $L/2$ とした。

解析の全体の傾向を把握するため、対象管路の最小呼び径と最大呼び径である 75 および 250 の解析を最初に行った。解析結果から傾向を把握し、解析条件を整理して他の呼び径での解析を行った。

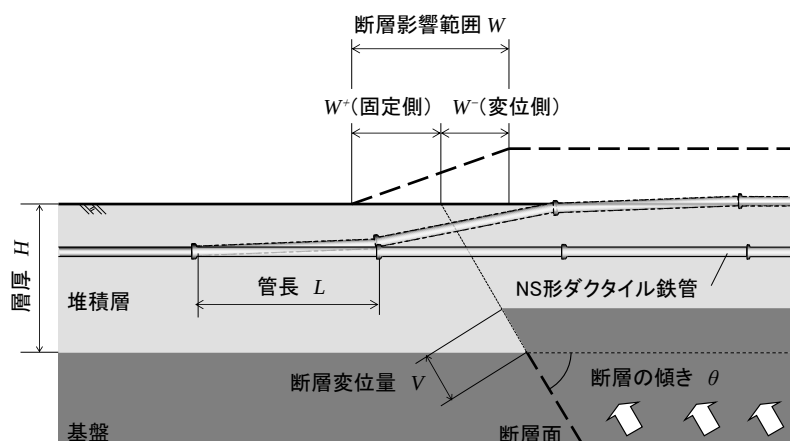
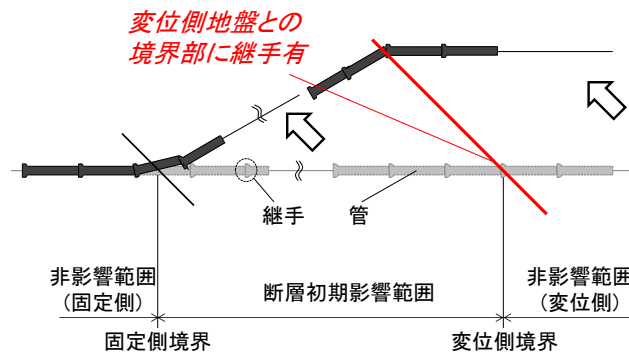
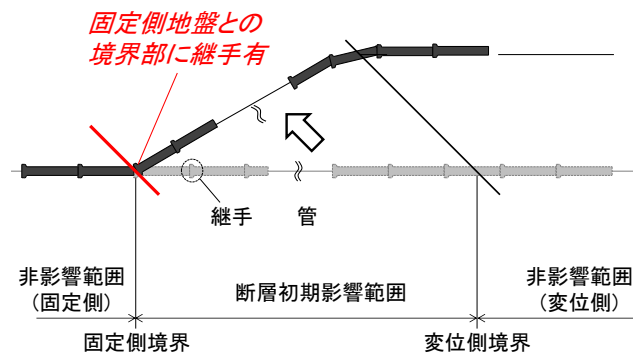


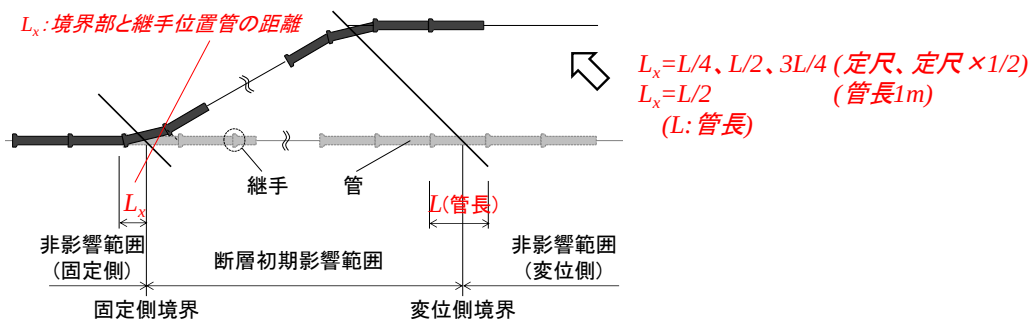
図-3.17 管路モデル

表-3.6 解析条件

断層の型	逆断層
断層変位量： V	3.0m
断層の傾き： θ	45° 、 60° 、 90°
管路	NS 形ダクタイル鉄管
呼び径	75、100、150、200、250
管長： L	定尺(5m または 4m)、定尺 $\times 1/2$ 、1m
堆積層の地盤条件	沖積層砂質地盤 (N 値 15 相当) 地盤反力係数 $K=20,700\text{kN/m}^3$
堆積層の層厚： H	10m
断層影響範囲： W (W^+ 、 W^-)	図-3.16 参照



(①断層影響範囲と固定側地盤または変位側地盤との境界部に継手がある場合)



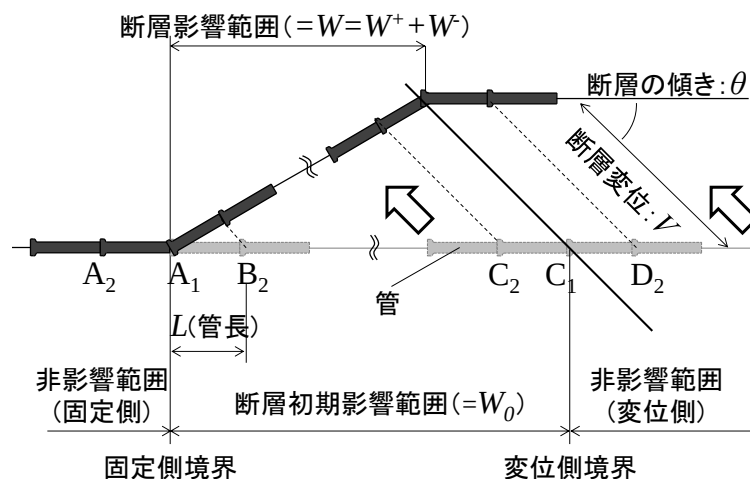
(②断層影響範囲との境界部に継手がない場合)

図-3.18 断層交差位置の設定

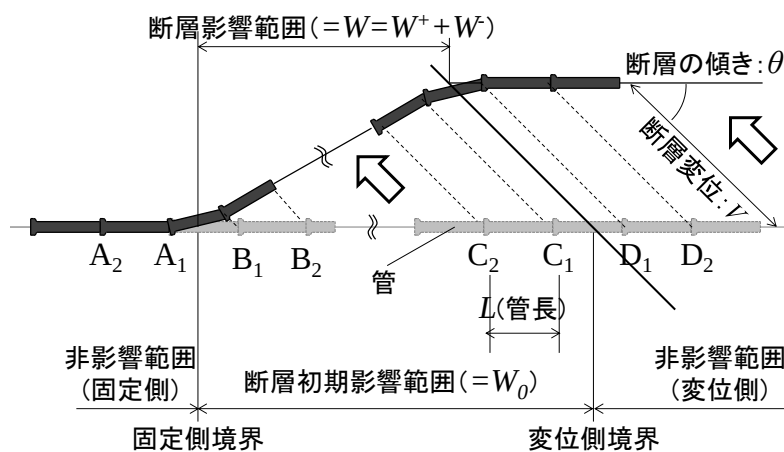
3. 5 解析結果（管路挙動の全体的な傾向）

解析の全体的な傾向を把握するため、解析対象口径範囲中最小と最大の、呼び径 75 と 250 についてまず解析を実施した。管路挙動、継手屈曲角、管体発生応力、軸力の解析結果を以下に示す。

解析結果の評価に当たり、断層変位に対する継手の位置関係から、図-3.19 に示すように各継手部の位置を定義した。断層影響範囲と非影響範囲の境界部に継手がある場合は、固定側地盤との境界部の継手を A_1 とし、順に A_2 、 A_3 …、反対側は順に B_2 、 B_3 …と定義した。変位側地盤との境界部の継手は C_1 とし、順に C_2 、 C_3 …、反対側は順に D_2 、 D_3 …と定義した。断層影響範囲と非影響範囲との境界部に継手がない場合は、固定側地盤との境界に最も近い継手から順に A_1 、 A_2 、 A_3 …、反対側は B_1 、 B_2 、 B_3 …と定義し、変位側地盤との境界に最も近い継手から順に C_1 、 C_2 、 C_3 …、反対側は D_1 、 D_2 、 D_3 …と定義した。



(①断層影響範囲と固定側地盤または変位側地盤との境界部に継手がある場合)



(②断層影響範囲との境界部に継手がない場合)

図-3.19 各継手位置の定義

3.5.1 管路挙動

管路挙動の解析結果の一例として、呼び径 75、管長 2m（定尺×1/2）、断層の傾き 60°、変位側地盤の境界部に継手がある場合について図-3.20 に示す。継手 A₂～D₃までの、断層変位に対する継手屈曲挙動を図-3.21 に示す。すべての条件の解析結果を、呼び径 75 は付図-1 に、呼び径 250 は付図-2 に示す。管路挙動の特徴をまとめると、以下ようになる。

- ①断層変位が小さい領域では、概ね管路は地盤と一緒に動いており、断層影響範囲と非影響範囲との境界部付近の継手 B₁および C₁がまず屈曲する傾向が認められた。
- ②断層変位量が大きくなり、継手屈曲挙動が限界に達すると隣の継手 A₁、A₂、B₂、C₂、D₂、D₃が動いており、耐震継手ダクティル鉄管の特徴的な挙動である鎖構造管路挙動が認められた。
- ③呼び径や管長、断層の傾き、断層の位置が変わっても、概ね同様の傾向が認められた。

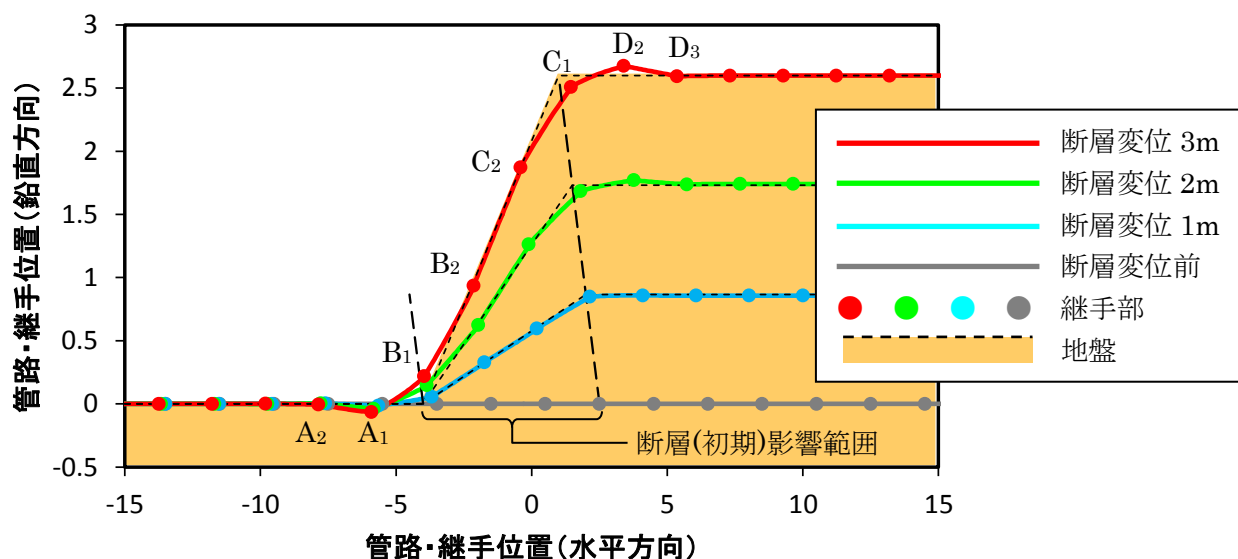


図-3.20 管路挙動の解析結果の例

(呼び径 75、管長 2m、断層の傾き 60°、変位側地盤との境界部に継手あり)

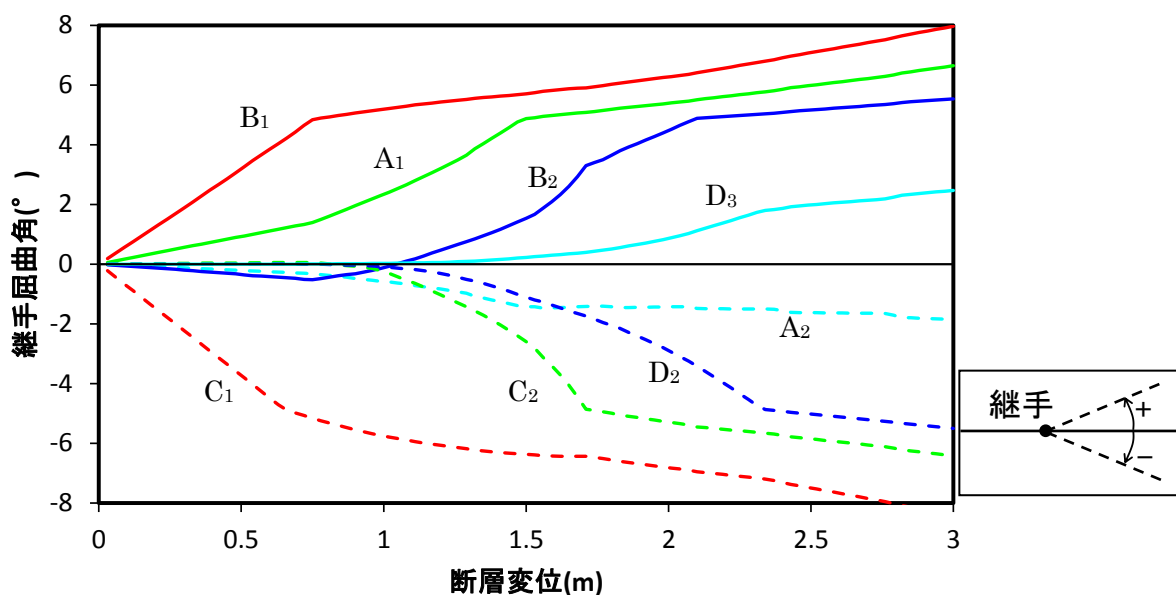


図-3.21 断層変位に対する継手屈曲挙動

(呼び径 75、管長 2m、断層の傾き 60°、変位側地盤との境界部に継手あり)

3.5.2 継手屈曲角

継手屈曲角の解析結果の評価にあたっては、呼び径 250 以下の NS 形ダクティル鉄管においては地震時に曲がりうる最大屈曲角として 8° と規定されている⁵⁾ため、継手屈曲角 8° を評価基準値とし、 8° 屈曲するときの断層変位量を継手屈曲角から算出される「許容断層変位量」と定義する。前述の通り、断層の動きに伴い、断層影響範囲と非影響範囲との境界部の継手から屈曲挙動を開始していることから、この位置にある継手に着目した。継手が境界部にある場合は当該継手の、継手が境界部でない場合は固定側と変位側の境界部に近い継手の、断層変位に対する屈曲角の解析結果を、呼び径 75 における代表例について図-3.22~図-3.29 に示す。解析条件は、表-3.7 の通りである。すべての条件の解析結果を、呼び径 75 は付図-3 に、呼び径 250 は付図-4 に示す。

いずれの解析結果においても、継手屈曲角がある一定値（呼び径 75 では約 4.9° 、呼び径 250 では約 5.3° ）を超えると継手屈曲挙動が鈍化していた。これは、図-3.5 に示す継手の曲げ特性によるものと考えられる。

管長は定尺、断層の傾きは 60° とし、継手の位置を変えた場合を比較すると、固定側の境界部の継手 A_1 (図-3.22)および変位側の境界部の継手 C_1 (図-3.25)の屈曲時の許容断層変位量が 1.89m であるのに対し、境界部に継手がない場合(図-3.23、図-3.24)の許容断層変位量は、1.89m よりも大きかった。このことから、境界部の継手が最も大きく、早く屈曲することが分かる。

管長は定尺、継手の位置は変位側の境界部とし、断層の傾きを変えた場合を比較すると、断層の傾き 60° の場合(図-3.25)の許容断層変位量が 1.89m であり、断層の傾き 45° の場合(図-3.25)の 2.79m、断層の傾き 90° の場合(図-3.26)の 2.25m に比べ、最も小さくなった。これは、図-3.16 から分かるように断層の傾き 60° の時の断層影響範囲が最も短く、狭い範囲に変位が集中するためであると思われる。

断層の傾きは 60° 、継手の位置は変位側の境界部とし、管長を変えた場合を比較すると、定尺の場合(図-3.25)の許容断層変位量が 1.89m と最も小さく、定尺の半分の場合(図-3.28)は 2.76m、管長 1m の場合(図-3.29)の場合は 8° 屈曲する継手はなかった。このように管長を短くすると許容断層変位量は長くなり、より大きな断層変位を吸収できることが分かった。

以上から、次のような解析条件の時、継手屈曲から算出される許容断層変位量が小さくなり、管路にとっては厳しくなると考えられる。また、この傾向は呼び径 250 でも同様に確認された。

- ①継手位置は断層影響範囲の境界部と一致
- ②断層の傾きは 60°
- ③管長は定尺

表-3.7 断層変位に対する継手屈曲角の解析結果例および解析条件の一覧

図番	呼び径	管長	断層の傾き	継手位置
図-3.22	75	定尺	60°	固定側境界部
図-3.23	75	定尺	60°	境界位置より $L(\text{管長})/4$ ずれ
図-3.24	75	定尺	60°	境界位置より $L(\text{管長})/2$ ずれ
図-3.25	75	定尺	60°	変位側境界部
図-3.26	75	定尺	45°	変位側境界部
図-3.27	75	定尺	90°	変位側境界部
図-3.28	75	定尺×1/2	60°	変位側境界部
図-3.29	75	1m	60°	変位側境界部

※ハッチングは他の解析と異なる条件を示す。

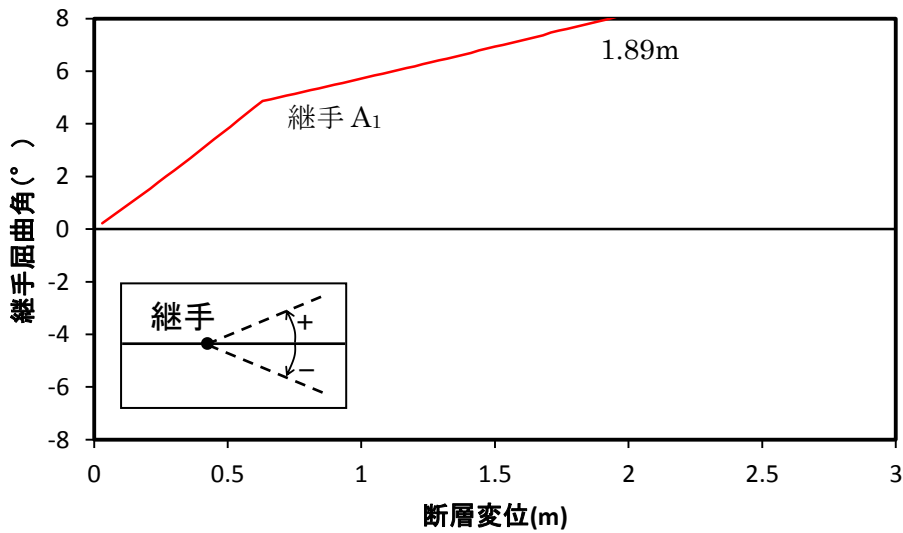


図-3.22 継手屈曲角の解析結果例(1)

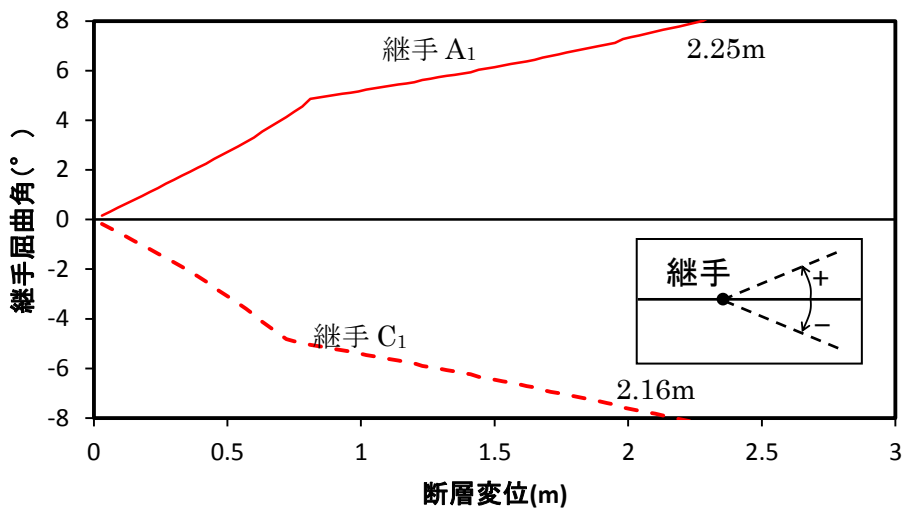


図-3.23 継手屈曲角の解析結果例(2)

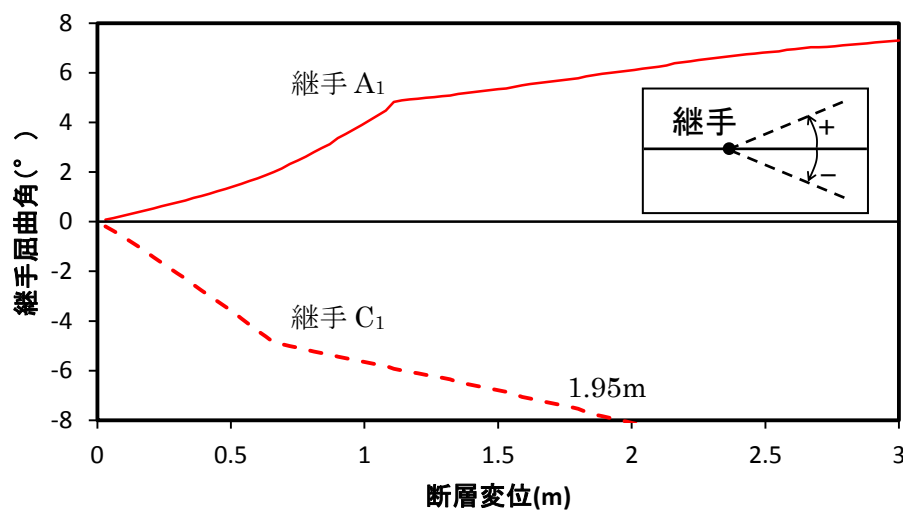


図-3.24 継手屈曲角の解析結果例(3)

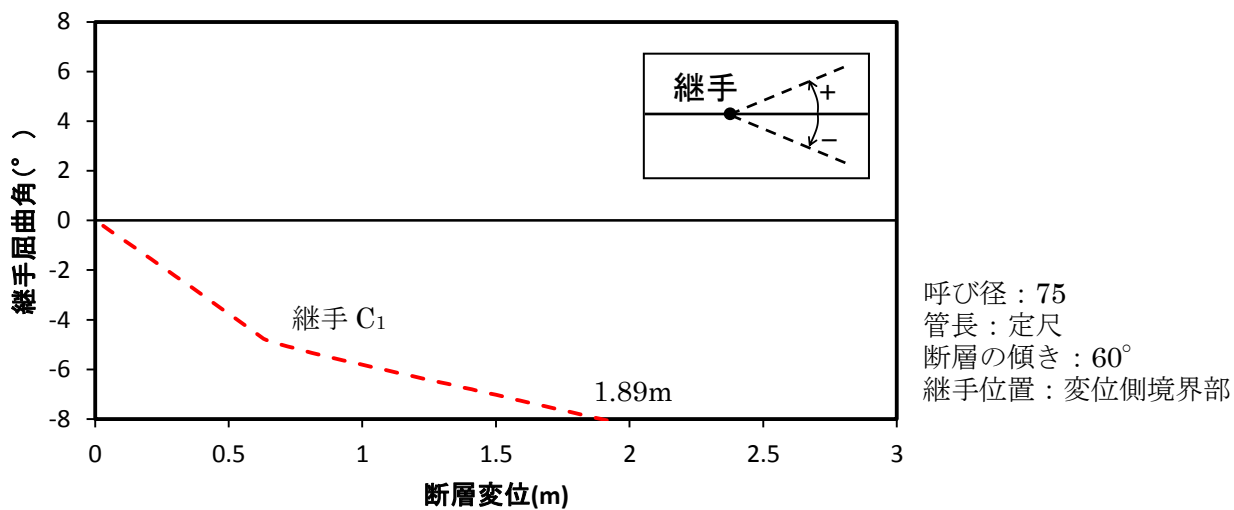


図-3.25 継手屈曲角の解析結果例(4)

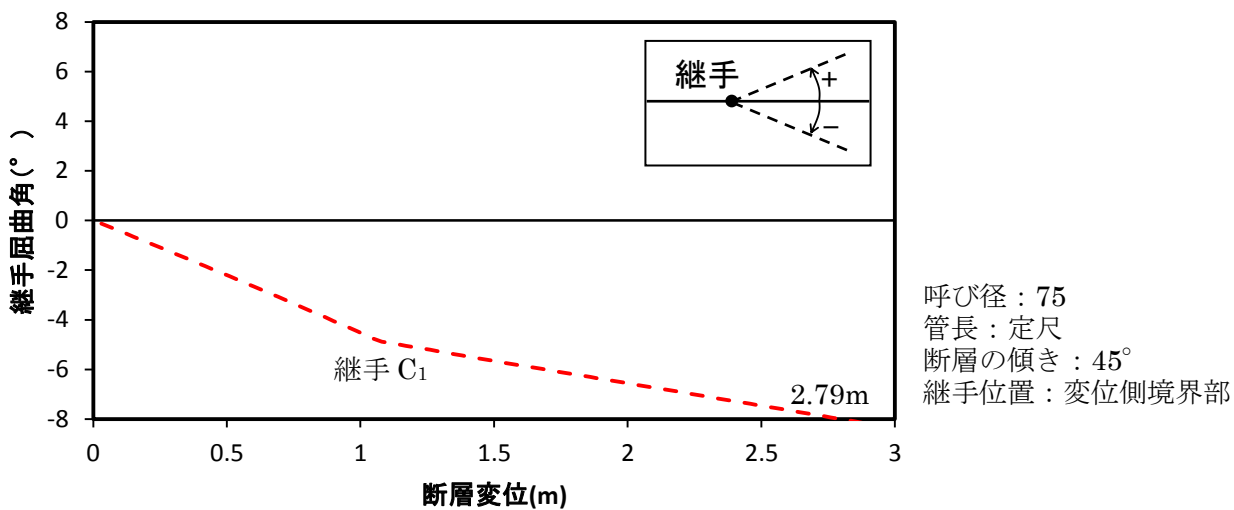


図-3.26 継手屈曲角の解析結果例(5)

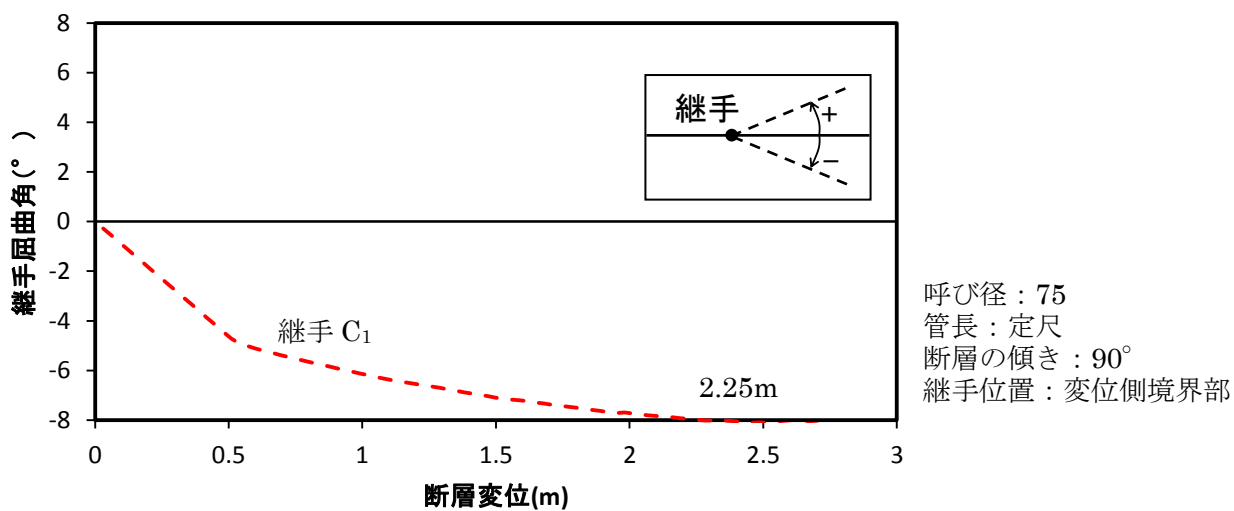


図-3.27 継手屈曲角の解析結果例(6)

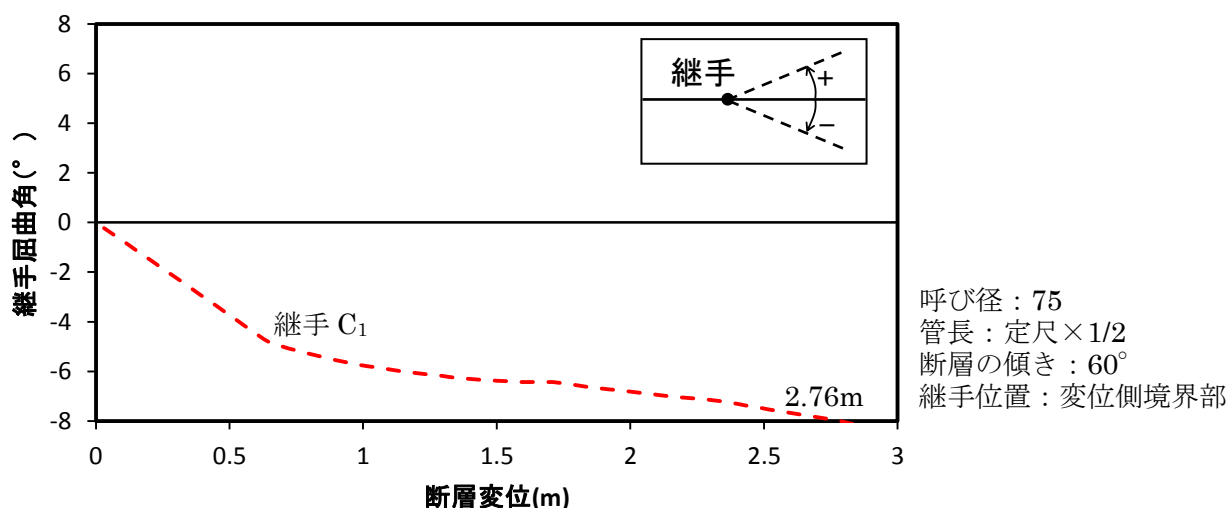


図-3.28 継手屈曲角の解析結果例(7)

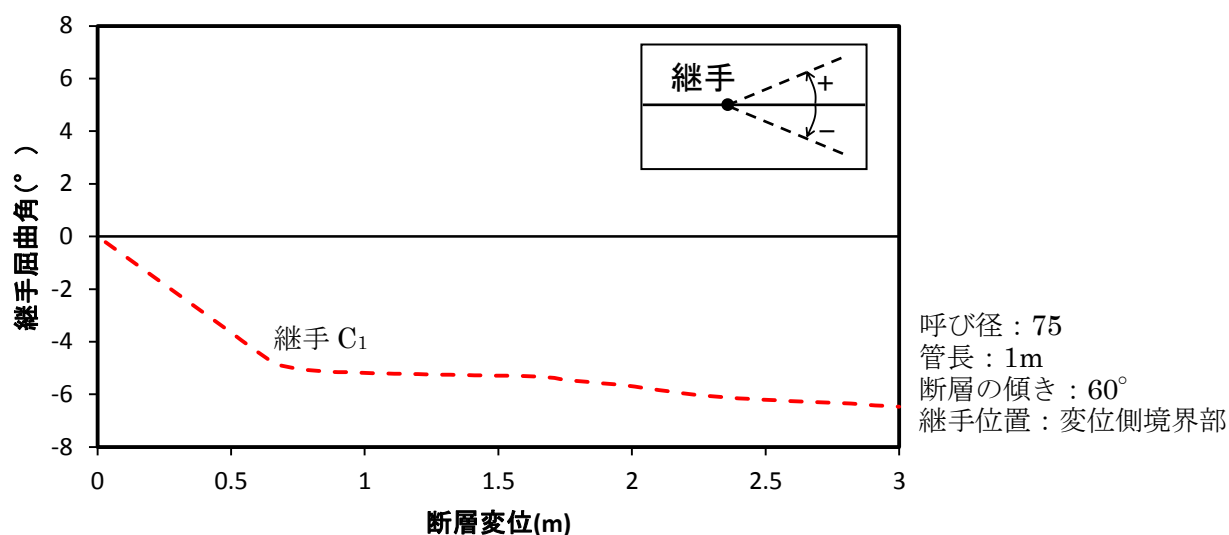


図-3.29 継手屈曲角の解析結果例(8)

3.5.3 管体発生応力

断層変位を受ける管路に発生する応力は、曲げ成分が卓越すると考えられ、本解析でも同様の傾向が確認された。ダクタイル鉄管は、600MPa 以上の曲げ強さを有している¹⁾。そこで管体発生応力の評価基準は、曲げ強さの 7 割程度が耐力相当であることから、400MPa とした。400MPa 発生時の断層変位量を管体発生応力から算出される「許容断層変位量」と定義する。

断層変位 0.3m 毎の管体発生応力の解析結果の呼び径 75 の例を図-3.30～図 3.37 に示す。管体発生応力の正負の符号は、屈曲の向きの違いによるものである。解析条件は、表-3.8 の通りである。すべての条件の解析結果を、呼び径 75 は付図-5 に、呼び径 250 は付図-6 に示す。

いずれの解析結果においても、固定側地盤と変位側地盤に 1 カ所ずつ逆符号のピークが認められ、断層変位の増加に従ってピークの高さは大きくなっていった。

管長は定尺、断層の傾きは 60° とし、継手の位置を変えた場合を比較すると、固定側の境界部に継手がある場合(図-3.30)および変位側の境界部に継手がある場合(図-3.33)、許容断層変位量は約 1.9m であるのに対し、境界部に継手がない場合(図-3.31、図-3.32)は約 2.1m であった。

管長は定尺、継手の位置は変位側の境界部とし、断層の傾きを変えた場合を比較すると、断層の傾き 60° の場合(図-3.33)の許容断層変位量は約 1.9m であるのに対し、断層の傾き 45° の場合(図-3.34)は約 2.8m、断層の傾き 90° の場合(図-3.35)は 3m 以上であった。このことから、管体発生応力の面からも、

断層の傾き 60° の場合が最も管路にとって厳しくなることが分かった。

断層の傾きは 60° 、継手の位置は変位側の境界部とし、管長を変えた場合を比較すると、3m の断層変位では、定尺の場合(図-3.33)弾性域を超える約 700MPa の応力が発生しているのに対し、定尺の半分の場合(図-3.36)は約 300MPa、管長 1m の場合(図-3.37)の場合は約 200MPa といずれも弾性範囲内であった。管体発生応力の面からも、管長を短くすると応力は小さくなり、より大きな断層変位を吸収できることが分かった。

以上から、次のような解析条件の時、管体発生応力から算出される許容断層変位量が小さくなり、管路にとっては厳しくなると考えられる。また、この傾向は呼び径 250 でも同様に確認された。

- ①継手位置は断層影響範囲の境界部と一致
- ②断層の傾きは 60°
- ③管長は定尺

なお、同じ条件で継手屈曲角と管体発生応力の解析結果を比較すると、例えば呼び径 75、管長が定尺 $\times 1/2$ 、断層の傾き 60° 、変位側境界部に継手がある場合では、継手屈曲から算出される許容断層変位量は図-3.28 から 2.76m であるのに対し、管体発生応力から算出される許容断層変位量は 3m 以上となり、いずれの条件においても継手屈曲から算出される許容断層変位量の方が小さかった。

表-3.8 断層変位に対する継手屈曲角の解析結果例および解析条件の一覧

図番	呼び径	管長	断層の傾き	継手位置
図-3.30	75	定尺	60°	固定側境界部
図-3.31	75	定尺	60°	境界位置より L(管長)/4 ずれ
図-3.32	75	定尺	60°	境界位置より L(管長)/2 ずれ
図-3.33	75	定尺	60°	変位側境界部
図-3.34	75	定尺	45°	変位側境界部
図-3.35	75	定尺	90°	変位側境界部
図-3.36	75	定尺 $\times 1/2$	60°	変位側境界部
図-3.37	75	1m	60°	変位側境界部

※ハッチングは他の解析と異なる条件を示す。

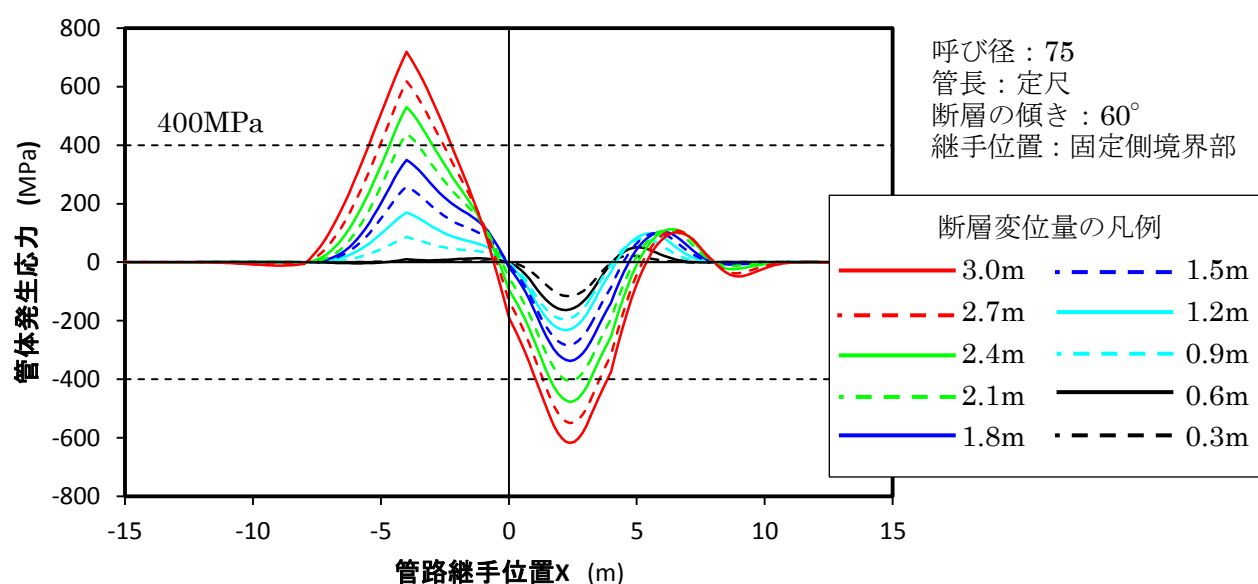


図-3.30 管体発生応力の解析結果例(1)

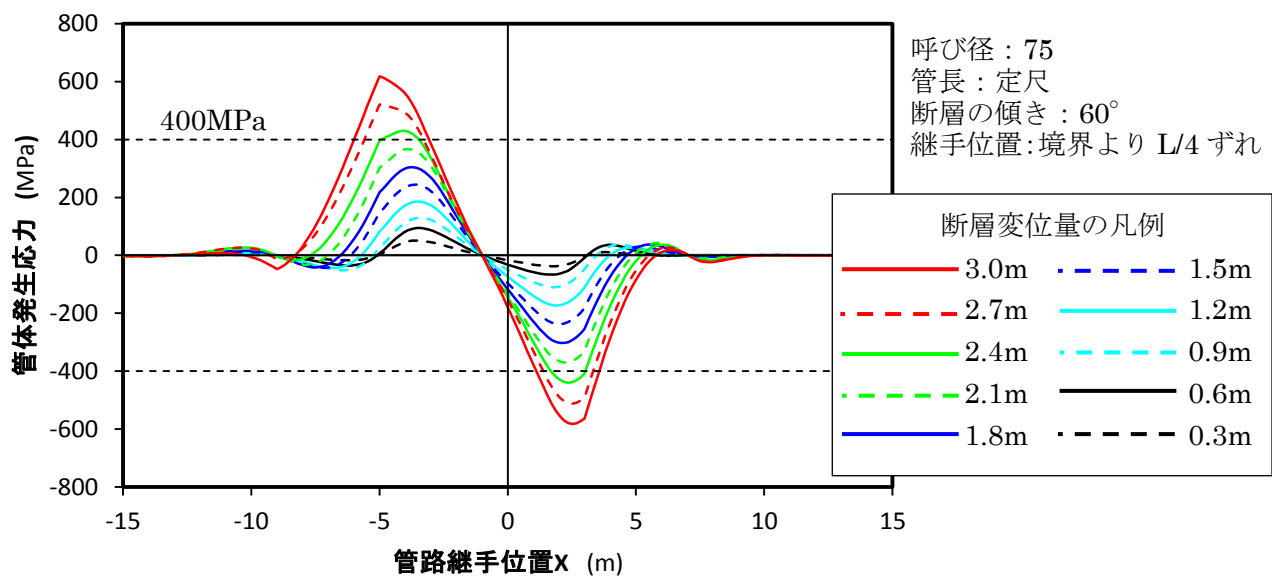


図-3.31 管体発生応力の解析結果例(2)

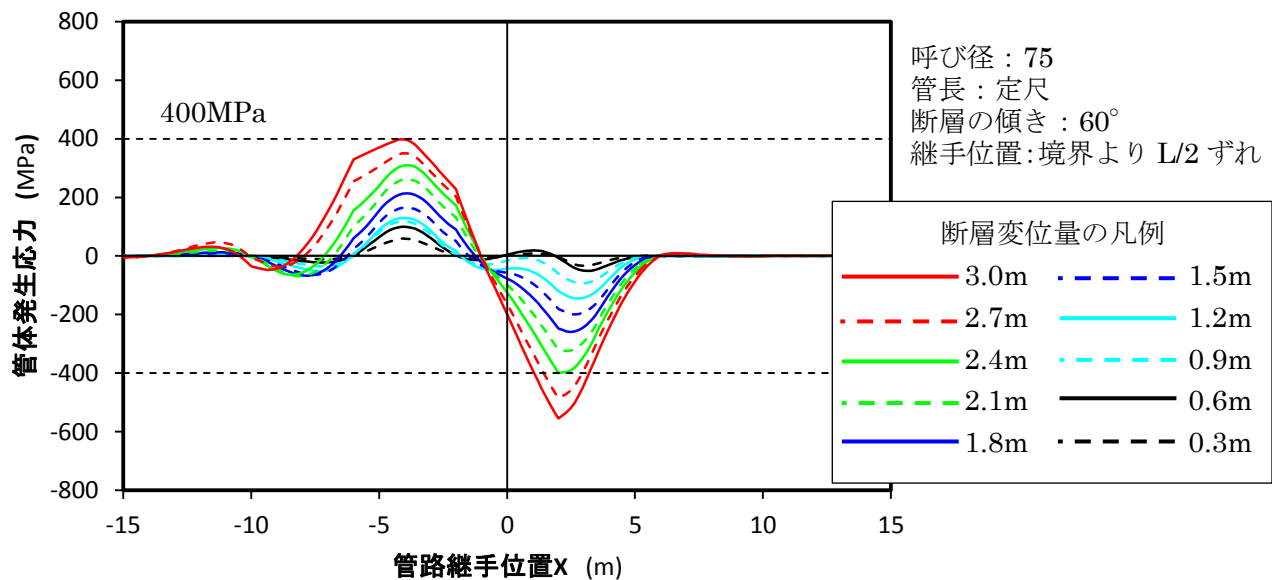


図-3.32 管体発生応力の解析結果例(3)

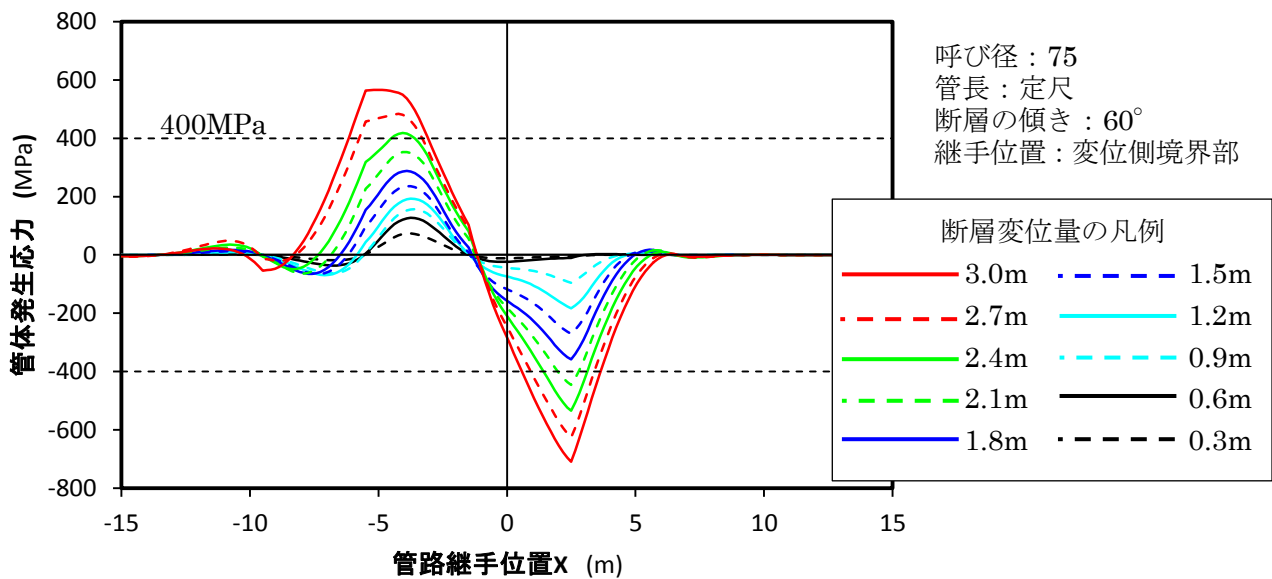


図-3.33 管体発生応力の解析結果例(4)

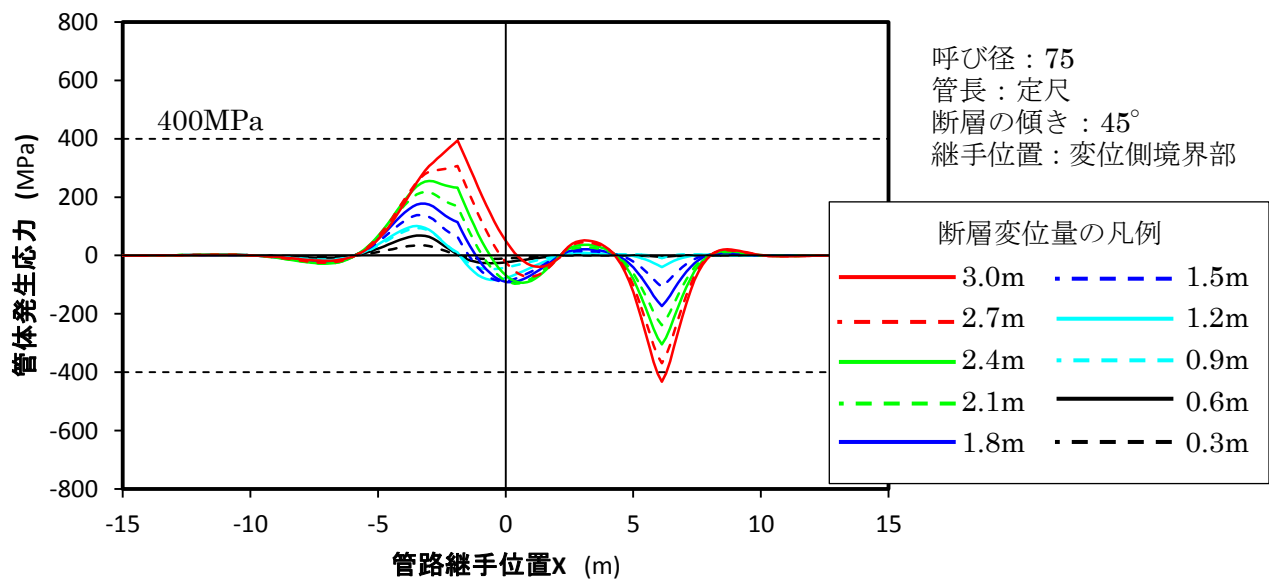


図-3.34 管体発生応力の解析結果例(5)

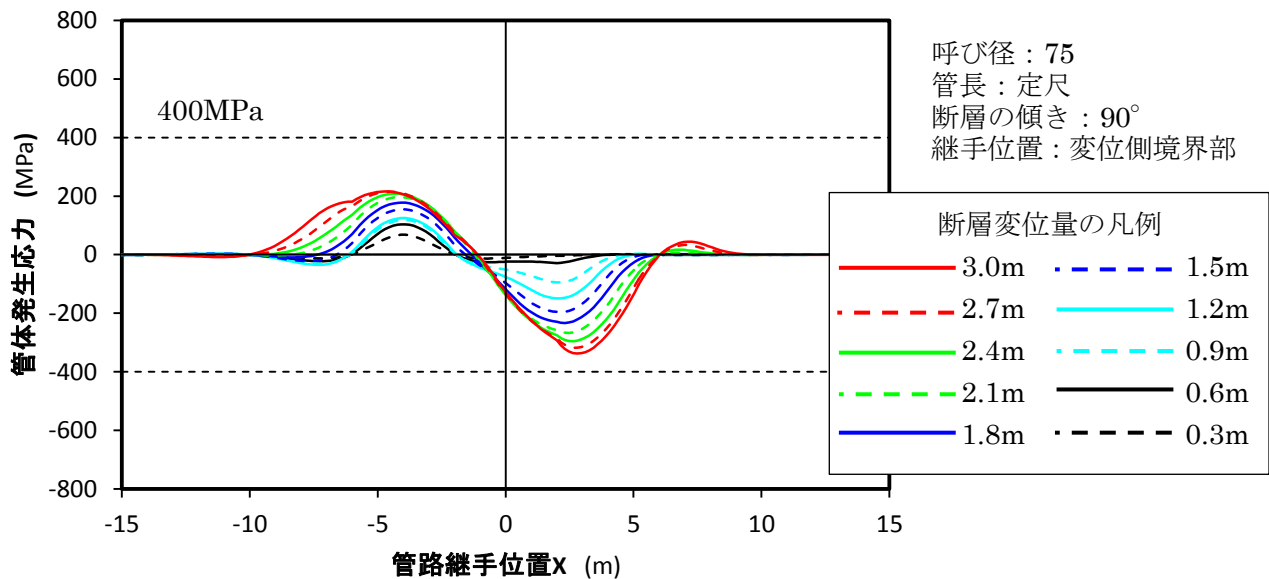


図-3.35 管体発生応力の解析結果例(6)

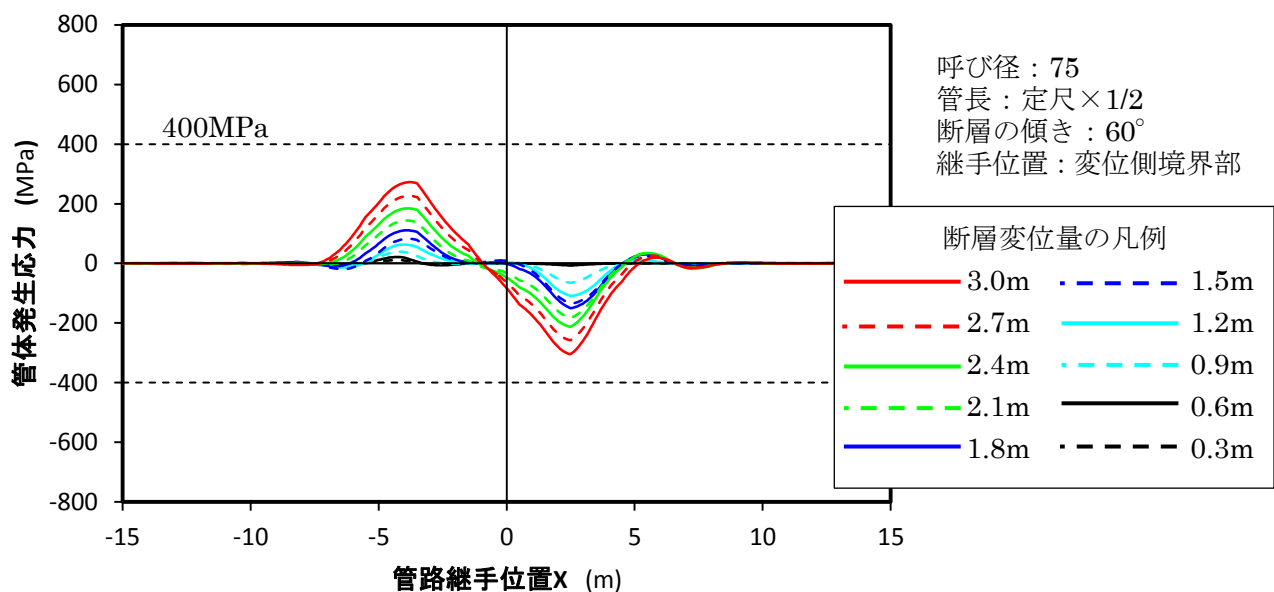


図-3.36 管体発生応力の解析結果例(7)

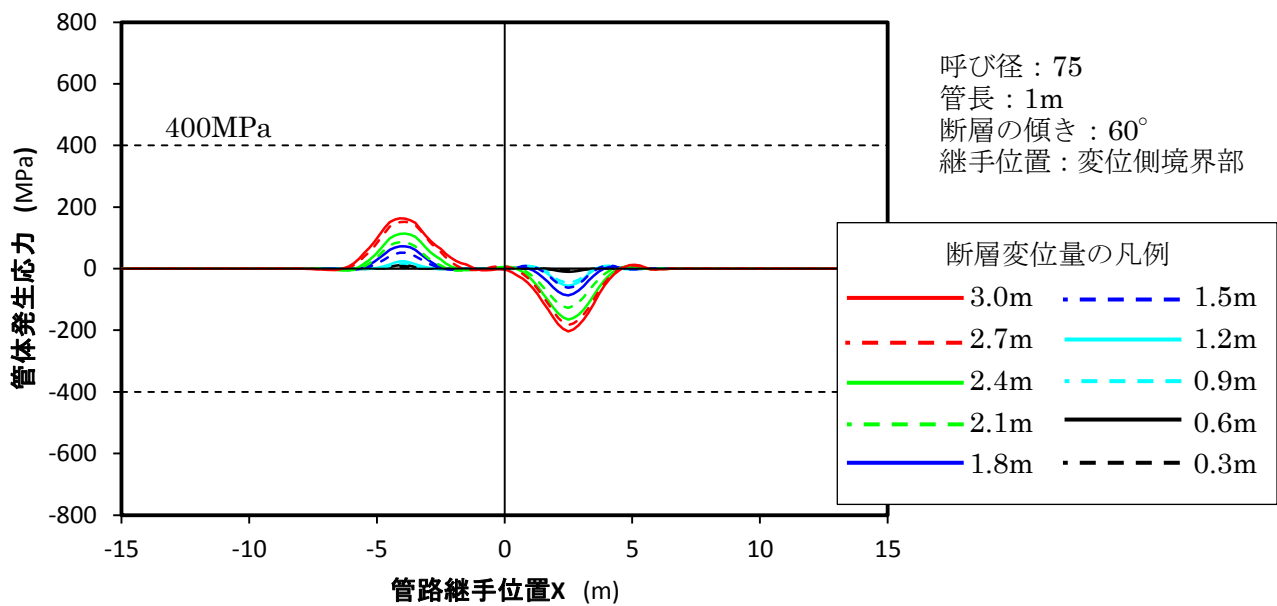


図-3.37 管体発生応力の解析結果例(8)

3.5.4 軸力

耐震継手ダクティル鉄管の管軸方向の離脱防止性能として、 $3DkN(D$ ：呼び径)と規定されている⁶⁾。圧縮方向についても同等以上の性能を有するため、これを評価基準とした。つまり、呼び径 75 では 225kN、呼び径 250 では 750kN が評価基準値となる。軸力が $3DkN$ に達するときの断層変位量を、軸力から算出される「許容断層変位量」と定義する。

断層変位 0.3m 毎の軸力の解析結果について、呼び径 75 の場合の一例として、継手屈曲角 8° 時の断層変位量が最も小さかったケースである、管長 4m(定尺)、断層の傾き 60° で継手が固定側及び変位側境界部にある場合を、図-3.38 および図 3.39 に示す。軸力の正負の符号は、荷重の向きの違いによるものであり、プラス側が引張り方向、マイナス側が圧縮方向を示す。すべての条件の解析結果を、呼び径 75 は付図-7 に、呼び径 250 は付図-8 に示す。

いずれも、軸力は断層変位の増加とともに増大しているが、管体発生応力と異なりピークは見られず、管軸方向に大きな軸力の差は認められなかった。また、いずれの条件においても評価基準値である $3DkN$ を大きく下回っており、問題ないことが分かった。この傾向は呼び径 250 でも同様であった。

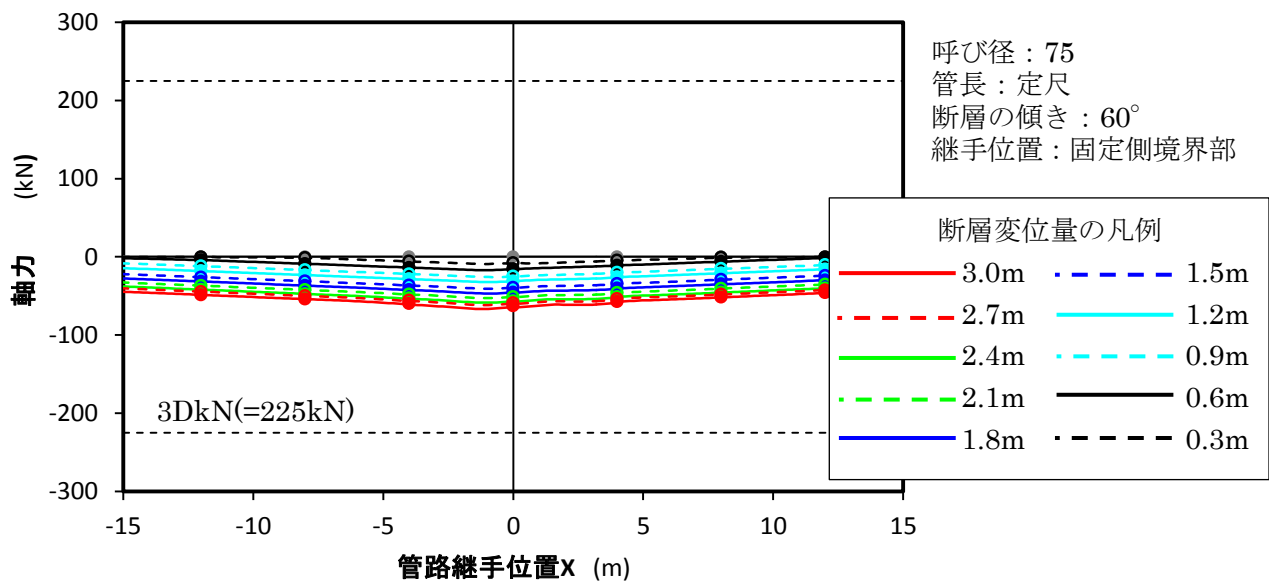


図-3.38 軸力の解析結果例(1)

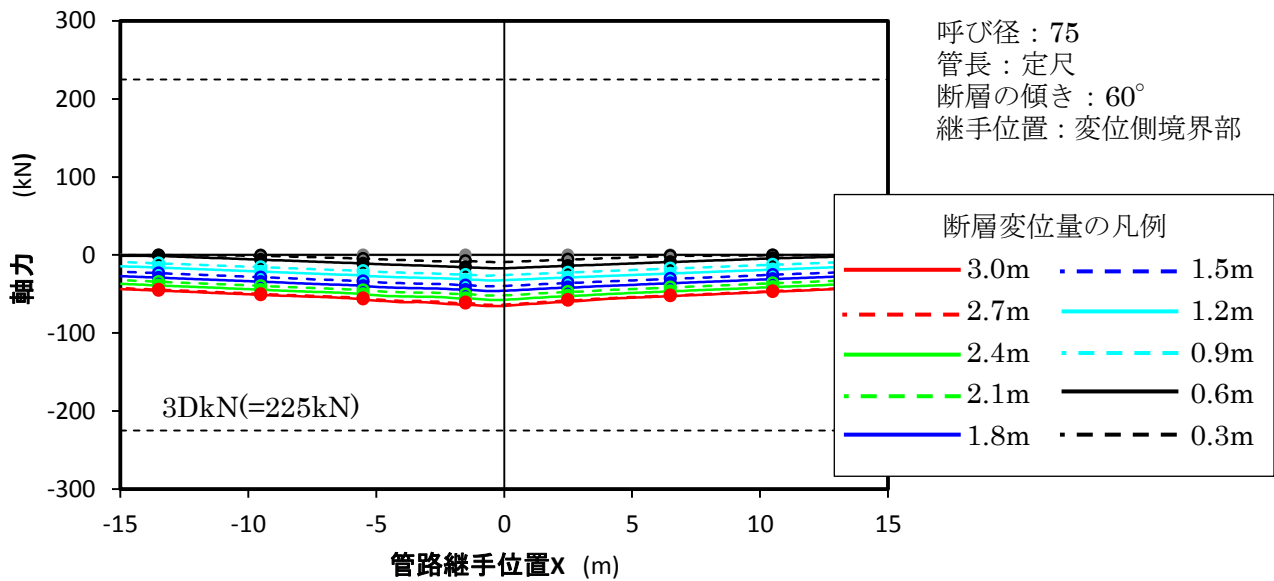


図-3.39 軸力の解析結果例(2)

解析結果の一覧を表-3.9、表-3.10 に示す。

呼び径 75、250 いずれにおいても、継手屈曲角、管体発生応力、軸力がそれぞれの評価基準値に達するときの断層変位量である許容断層変位量が最も小さくなるのは、継手屈曲角で評価した場合であり、さらに継手が固定側または変位側地盤との境界にある場合であった。また、管長 1m では 3m の断層変位を吸収できることも分かった。

そこで、他の呼び径(100、150、200)については、継手が断層影響範囲との境界部にあるときの継手屈曲角で評価することとした。また管長 1m の管路は安全であることが判明したため解析を省略した。

3. 6 解析結果 (断層位置の条件を固定)

呼び径 100、150 および 200 について、断層影響範囲の境界部に継手がある場合の解析を行った。解析結果を以下に示す。解析結果の一覧を表-3.11 に示す。

3.6.1 管路挙動

管路挙動の解析結果の一例として、呼び径 150、管長 2.5m (定尺×1/2)、断層の傾き 60°、変位側地盤の境界部に継手がある場合について図-3.40 に示す。継手 A₂～D₃ までの、断層変位に対する継手屈曲挙動を図-3.41 に示す。すべての条件の解析結果を、呼び径 100 は付図-9 に、呼び径 150 は付図-10 に、呼び径 200 は付図-11 に示す。

管路挙動の特徴は、呼び径 75 および 250 と同様、以下のことが確認できた。

- ①断層変位が小さい領域では、概ね管路は地盤と一緒に動いており、断層影響範囲と非影響範囲との境界部付近の継手 A₁、B₁ および C₁ がまず屈曲する傾向が認められた。
- ②断層変位量が大きくなり、継手屈曲挙動が限界に達すると隣の継手 A₂、C₂、D₂、D₃ が動いており、耐震継手ダクタイル鉄管の特徴的な挙動である鎖構造管路挙動が認められた。
- ③他の呼び径や管長、断層の傾き、断層の位置でも、概ね同様の傾向が認められた。

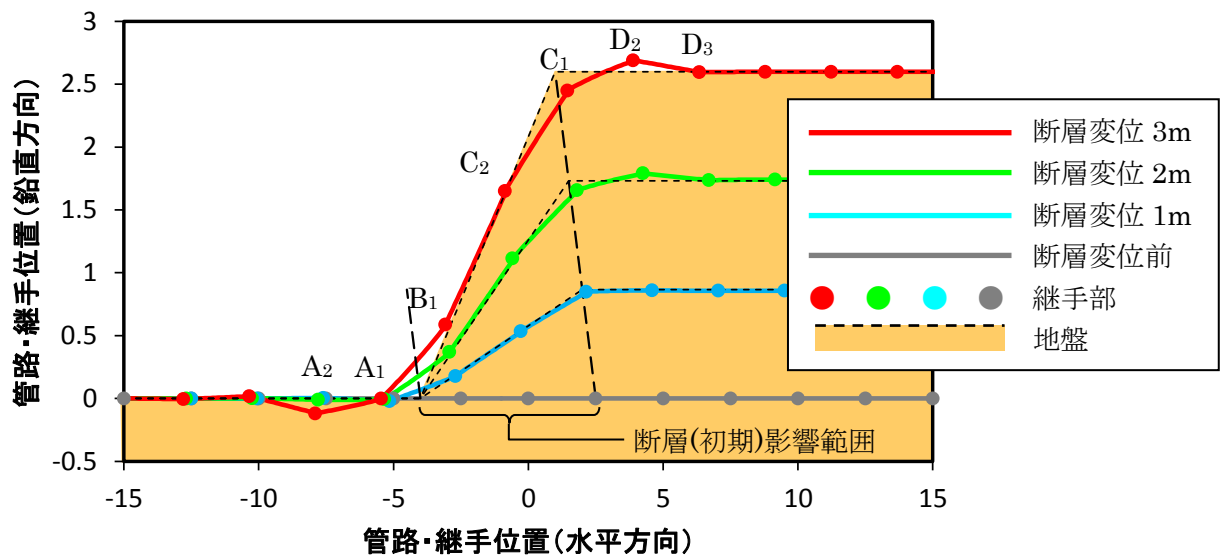


図-3.40 管路挙動の解析結果の例
(呼び径 150、管長 2.5m、断層の傾き 60°、変位側地盤との境界部に継手あり)

表-3.9 解析結果一覧(呼び径 75)

呼び径	管長	断層の傾き	継手位置	断層変位3m時の※1			(A) 継手屈曲角 8° 時の 断層変位量 (m)	(B) 管体発生応力 400MPa時の 断層変位量 (m)	(C) 軸力 3DkN時の 断層変位量 (m)	許容断層 変位量※2 (m) ※(A),(B),(C) の 最小値
				継手 屈曲角 (°) 評価基準:8	管体発 生応力 (MPa) 評価基準:400	軸力 (kN) 評価基準:225				
75	定尺 (4m)	45°	固定側	8.27	322	90	2.85	3m以上	3m以上	2.79
			L/4	8.26	337	88	2.85	3m以上	3m以上	
			L/2	8.18	361	93	2.94	3m以上	3m以上	
			3L/4	8.16	314	73	2.88	3m以上	3m以上	
			変位側	8.37	432	66	2.79	2.85	3m以上	
		60°	固定側	10.77	719	67	1.89	1.95	3m以上	1.89
			L/4	10.51	619	67	2.16	2.22	3m以上	
			L/2	10.95	556	64	1.95	2.37	3m以上	
			3L/4	9.82	477	65	2.1	2.58	3m以上	
			変位側	10.69	710	65	1.89	1.92	3m以上	
		90°	固定側	7.85	352	35	3m以上	3m以上	3m以上	2.25
			L/4	7.83	307	36	3m以上	3m以上	3m以上	
			L/2	変位側境界部に継手がある場合と同じ						
			3L/4	7.36	347	37	3m以上	3m以上	3m以上	
			変位側	8.25	338	38	2.25	3m以上	3m以上	
	定尺× 1/2 (2m)	45°	固定側	7.11	272	83	3m以上	3m以上	3m以上	2.82
			L/4	6.78	243	76	3m以上	3m以上	3m以上	
			L/2	6.98	268	75	3m以上	3m以上	3m以上	
			3L/4	6.96	265	78	3m以上	3m以上	3m以上	
			変位側	8.26	420	80	2.82	2.88	3m以上	
		60°	固定側	8.16	336	35	2.88	3m以上	3m以上	2.76
			L/4	7.73	326	36	3m以上	3m以上	3m以上	
			L/2	8.07	302	36	2.88	3m以上	3m以上	
			3L/4	変位側境界部に継手がある場合と同じ						
			変位側	8.41	305	36	2.76	3m以上	3m以上	
		90°	固定側	8.15	307	24	2.85	3m以上	3m以上	2.85
			L/4	7.71	316	23	3m以上	3m以上	3m以上	
			L/2	7.71	310	24	3m以上	3m以上	3m以上	
			3L/4	8.02	317	24	2.97	3m以上	3m以上	
			変位側	固定側境界部に継手がある場合と同じ						
	1m	45°	固定側	5.65	107	35	3m以上	3m以上	3m以上	3m以上
			L/2	5.53	103	34	3m以上	3m以上	3m以上	
			変位側	固定側境界部に継手がある場合と同じ						
		60°	固定側	6.37	212	19	3m以上	3m以上	3m以上	3m以上
			L/2	変位側境界部に継手がある場合と同じ						
			変位側	6.47	204	19	3m以上	3m以上	3m以上	
		90°	固定側	6.77	240	13	3m以上	3m以上	3m以上	3m以上
			L/2	6.74	256	13	3m以上	3m以上	3m以上	
			変位側	固定側境界部に継手がある場合と同じ						

※1 太字は基準値を超えていることを示す。

※2 呼び径、管長、断層の傾きが同じ場合で最も小さい断層変位量を示す。該当する条件をハッチングで示す。

表-3.10 解析結果一覧(呼び径 250)

呼び径	管長	断層の傾き	継手位置	断層変位3m時の※1			(A) 継手屈曲角 8° 時の 断層変位量 (m)	(B) 管体発生応力 400MPa時の 断層変位量 (m)	(C) 軸力 3DkN時の 断層変位量 (m)	許容断層 変位量※2 (m) ※(A),(B),(C) の 最小値
				継手 屈曲角 (°) 評価基準:8	管体発 生応力 (MPa) 評価基準:400	軸力 (kN) 評価基準:750				
250	定尺 (5m)	45°	固定側	9.54	426	333	2.34	2.88	3m以上	2.31
			L/4	9.41	414	325	2.34	2.91	3m以上	
			L/2	8.68	344	320	2.52	3m以上	3m以上	
			3L/4	7.80	292	341	3m以上	3m以上	3m以上	
			変位側	9.51	423	323	2.31	2.88	3m以上	
		60°	固定側	10.26	503	211	1.47	2.46	3m以上	1.44
			L/4	10.28	499	218	1.68	2.13	3m以上	
			L/2	11.10	580	240	1.86	2.34	3m以上	
			3L/4	変位側境界部に継手がある場合と同じ						
			変位側	10.95	564	212	1.44	1.98	3m以上	
		90°	固定側	8.30	436	85	2.73	2.76	3m以上	1.74
			L/4	8.04	422	82	1.77	2.82	3m以上	
			L/2	8.93	370	83	1.95	3m以上	3m以上	
			3L/4	8.84	420	91	1.83	2.76	3m以上	
			変位側	9.13	434	90	1.74	2.76	3m以上	
	定尺× 1/2 (2.5m)	45°	固定側	6.63	167	275	3m以上	3m以上	3m以上	3m以上
			L/2	6.58	138	269	3m以上	3m以上	3m以上	
			変位側	7.67	243	274	3m以上	3m以上	3m以上	
		60°	固定側	8.23	339	101	2.85	3m以上	3m以上	2.64
			L/2	8.17	327	105	2.82	3m以上	3m以上	
			変位側	8.64	335	103	2.64	3m以上	3m以上	
		90°	固定側	7.85	316	62	3m以上	3m以上	3m以上	3m以上
			L/2	7.79	283	58	3m以上	3m以上	3m以上	
			変位側	7.74	275	59	3m以上	3m以上	3m以上	
	1m	45°	固定側	5.60	36	83	3m以上	3m以上	3m以上	3m以上
			L/2	5.54	33	84	3m以上	3m以上	3m以上	
			変位側	固定側境界部に継手がある場合と同じ						
		60°	固定側	6.06	86	45	3m以上	3m以上	3m以上	3m以上
			L/2	変位側境界部に継手がある場合と同じ						
			変位側	6.02	75	45	3m以上	3m以上	3m以上	
		90°	固定側	6.55	128	36	3m以上	3m以上	3m以上	3m以上
			L/2	6.32	113	37	3m以上	3m以上	3m以上	
			変位側	固定側境界部に継手がある場合と同じ						

※1 太字は基準値を超えていることを示す。

※2 呼び径、管長、断層の傾きが同じ場合で最も小さい断層変位量を示す。該当する条件をハッチングで示す。

表-3.11 解析結果一覧(呼び径 100,150,200)

呼び径	管長	断層の傾き	継手位置	断層変位3m時の継手屈曲角 ^{※1} (°) 評価基準:8	継手屈曲角8°時の断層変位量(m) ^{※2}
100	定尺 (4m)	45°	固定側	8.68	2.61
			変位側	8.55	2.64
		60°	固定側	12.74	1.62
			変位側	12.84	1.59
		90°	固定側	8.38	1.65
			変位側	9.45	1.56
	定尺 × 1/2 (2m)	45°	固定側	6.32	3m以上
			変位側	9.16	2.49
		60°	固定側	9.00	2.55
			変位側	9.28	2.43
		90°	固定側	変位側境界部に継手がある場合と同じ	
			変位側	8.91	2.34
150	定尺 (5m)	45°	固定側	9.79	2.25
			変位側	9.75	2.22
		60°	固定側	14.03	1.38
			変位側	13.95	1.35
		90°	固定側	8.53	1.29
			変位側	10.26	1.23
	定尺 × 1/2 (2.5m)	45°	固定側	8.88	2.91
			変位側	8.03	2.97
		60°	固定側	9.51	2.31
			変位側	10.02	2.13
		90°	固定側	7.74	3m以上
			変位側	9.03	2.10
200	定尺 (5m)	45°	固定側	11.05	2.01
			変位側	10.93	2.01
		60°	固定側	16.60	1.23
			変位側	16.53	1.20
		90°	固定側	9.35	1.11
			変位側	11.61	1.08
	定尺 × 1/2 (2.5m)	45°	固定側	8.15	2.91
			変位側	8.32	2.19
		60°	固定側	10.28	2.10
			変位側	10.98	1.80
		90°	固定側	8.14	2.64
			変位側	9.75	1.86

※1 太字は基準値を超えていることを示す。

※2 ハッチングは断層変位量の小さい方を示す。

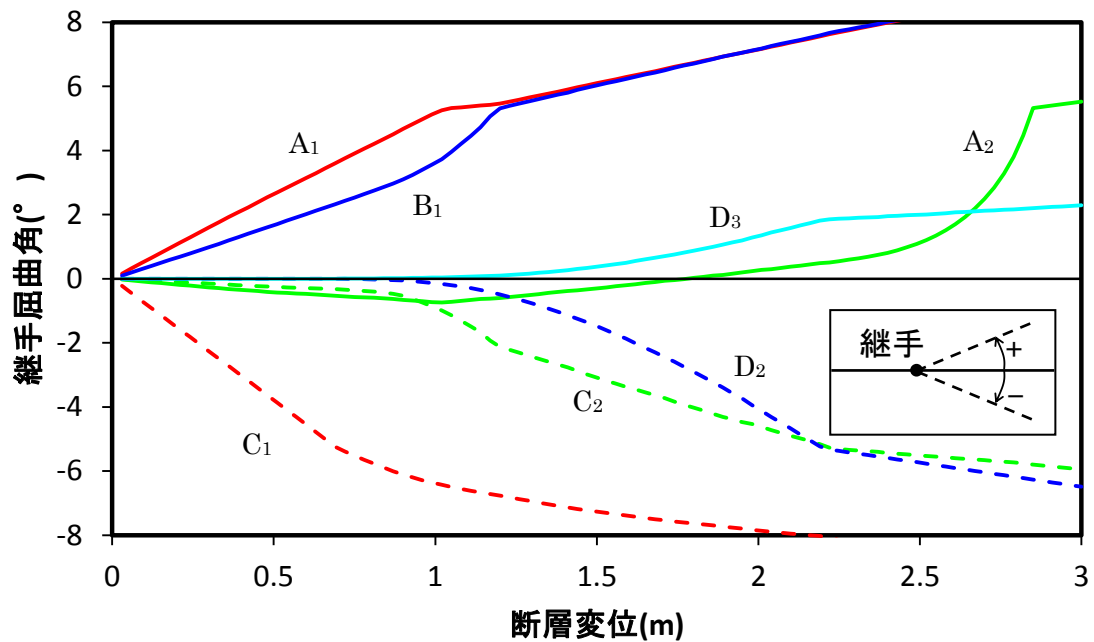


図-3.41 断層変位に対する継手屈曲挙動
(呼び径 75、管長 2m、断層の傾き 60° 、変位側地盤との境界部に継手あり)

3.6.2 継手屈曲角

断層変位に対する継手屈曲角の解析結果の一例として、呼び径 150、管長 2.5m (定尺 $\times$ 1/2)、断層の傾き 60° 、変位側地盤の境界部に継手がある場合について図-3.42 に示す。すべての条件の解析結果を、呼び径 100 は付図-12 に、呼び径 150 は付図-13 に、呼び径 250 は付図-14 に示す。

呼び径 75、250 と同様、以下の傾向が認められた。

- ①いずれの条件においても、継手屈曲角がある一定値（呼び径 100 では約 4.9° 、呼び径 150 および 200 では約 5.3° ）を超えると継手屈曲挙動が鈍化していた。
- ②断層の傾き別にみると、断層の傾き 60° の場合がやや許容断層変位量が小さい傾向が見られたが明確な相関はなかった。
- ③管長別にみると、管長が短いほど許容断層変位量は長くなり、より大きな断層変位を吸収できることが分かった。

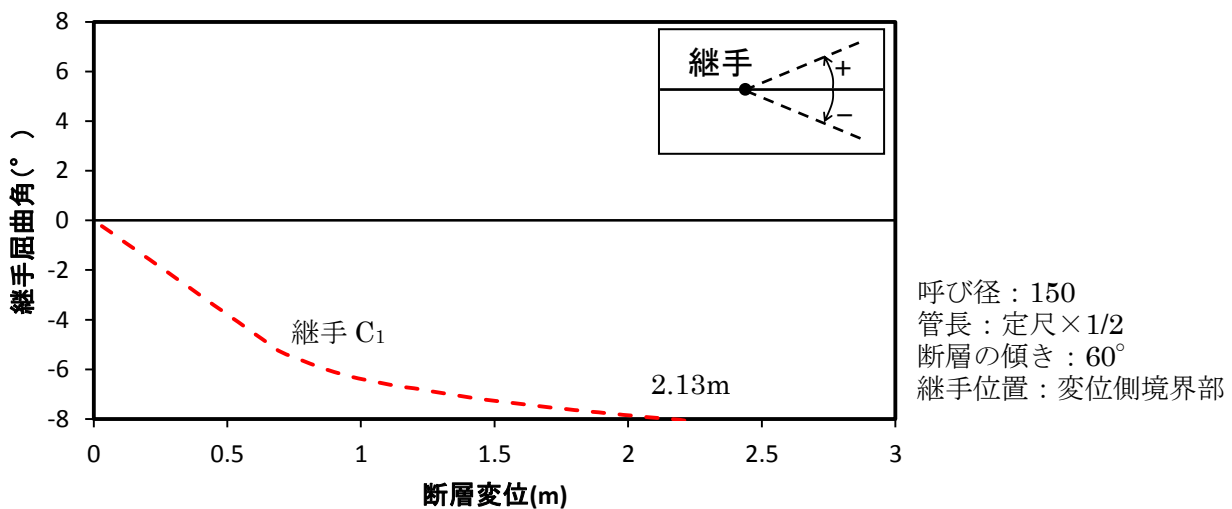


図-3.42 断層変位に対する継手屈曲角の解析結果の例
(呼び径 150、管長 2.5m、断層の傾き 60° 、変位側地盤との境界部に継手あり)

3. 7 解析結果のまとめ

断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動のシミュレーション解析結果をまとめると、以下のようになる。

- ①解析結果は実験結果と比較的よく一致しており、本解析手法の妥当性が確認された。
- ②断層の動きに伴い、管路は地盤に追随して挙動する。
- ③断層影響範囲と非影響範囲との境界部付近の継手からまず挙動し、その動きが限界に達すると隣の継手が挙動しており、耐震継手ダクタイル鉄管の特徴的な挙動である鎖構造管路挙動を示していた。
- ④断層変位後の管路の安全性を、継手屈曲角、管体発生応力、軸力で評価した場合、継手屈曲角による評価が管路にとって最も厳しくなった。
- ⑤断層影響範囲と非影響範囲の境界部に継手がある条件の時は、基準値まで屈曲するときの断層変位量が最も小さくなり、管路にとって最も厳しい条件であった。
- ⑥管長 1m では、継手屈曲角、管体発生応力、軸力のいずれも基準値を超えることはなかった。

【第3章の参考文献】

- 1) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 HP : (<http://www.etc-g.co.jp/>).
- 2) 金子正吾, 宮島昌克 : 逆断層を横断する耐震継手ダクトイル鉄管の挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.945-952, 2014.
- 3) 株式会社島津製作所 HP : (<http://www.shimadzu.co.jp/>).
- 4) 株式会社東京測器研究所 HP : (<http://www.tml.jp/use/index.html>).
- 5) 日本ダクトイル鉄管協会 : 「NS 形・SII 形・S 形ダクトイル鉄管管路の設計, 2007.
- 6) Kennedy R.P. , Chow A.W. and William R.A. : Fault movement effects on buried oil pipeline, Transportation Engineering J. , ASCE, Vol.103, pp.617-633, 1977.
- 7) 福岡正巳, 宇都一馬 : ボーリング孔を利用した基礎地盤の横方向 k 値測定について, 土と基礎, 特集号-I , pp.3-8, 1959.
- 8) 独立行政法人 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センターHP : (<https://unit.aist.go.jp/actfault-eq/>).
- 9) 鬼塚信弘他 3 名 : 基盤の逆断層変位に伴う地盤の変形と応力について, 応用力学論文集, Vol.2, pp.533-542, 1998.
- 10) 本多啓太, 須貝俊彦 : 日本列島における沖積層の層厚分布特性, 地学雑誌, 119, pp.924-933, 2010.
- 11) (社)日本水道協会 : 「水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版」, 2009.

第 4 章 断層横断部の配管設計方法の提案

第4章 断層横断部の配管設計方法の提案

4. 1 はじめに

断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動シミュレーション解析結果をもとに、断層横断部の管路挙動を推定し、配管設計方法を確立できないか検討した。検討のフローを図-4.1 に示す。

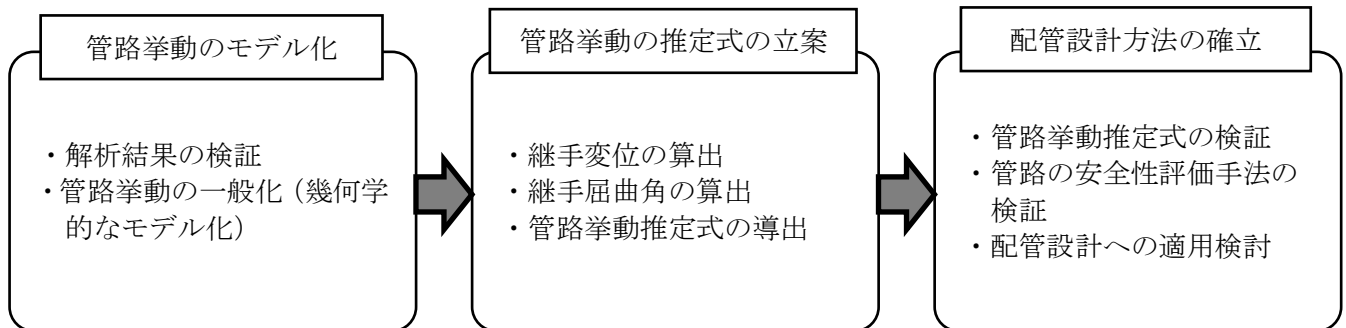


図-4.1 管路挙動推定～配管設計方法確立のフロー

4. 2 管路挙動の検証

4.2.1 管路挙動のモデル化

断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管において、断層変位により最も大きく屈曲するのは、断層影響範囲と非影響範囲との境界部にある継手であることがシミュレーション解析により確認された。そこでこの境界部の継手の屈曲挙動について考える。

今、図-4.2、図-4.3 のように断層が V だけ変位することにより、断層影響範囲と非影響範囲との境界部の継手 A_1 (または C_1) と、隣の継手 A_2 (または C_2) および B_2 (または D_2) は断層変位に追従して幾何学的に挙動すると仮定し、継手 A_1 (または C_1) の屈曲角 β_{A1} (または β_{C1}) を考える。耐震継手ダクタイル鉄管の継手挙動は、図-3.5 に示すように屈曲角がある一定値(呼び径 75 の場合 4.9°)に達すると継手部内部で管が接触し曲がりにくくなる。このため、例えば呼び径 75 の場合図-4.2、図-4.3 に示すように、 β_{A1} (または β_{C1}) が 4.9° に達するまでは管と地盤は同じ動きをするが、 4.9° を超えると継手 A_1 (または C_1) は地盤の動きに追従せず相対変位が生じ、隣の継手 A_2 や B_2 (または C_2 や D_2) が屈曲し始めると考えられる。地盤との相対変位量については、 4.9° 以降の断層変位量と比例するものとし、比例定数を用いて式(4-1a)、(4-1b)のように算出した。この比例定数は、境界部の継手の動きやすさを表しており、ここでは「変位影響度」と呼ぶことにする。

$$\delta_{A1} = k_{A1} \cdot \delta \quad (4-1a)$$

$$\delta_{C1} = k_{C1} \cdot \delta \quad (4-1b)$$

ここで、

- δ_{A1} : 継手 A_1 の地盤との相対変位量
- δ_{C1} : 継手 C_1 の地盤との相対変位量
- δ : 継手屈曲角 4.9° 以降の断層変位
- k_{A1} 、 k_{C1} : 比例定数 (変位影響度)

● 継手位置

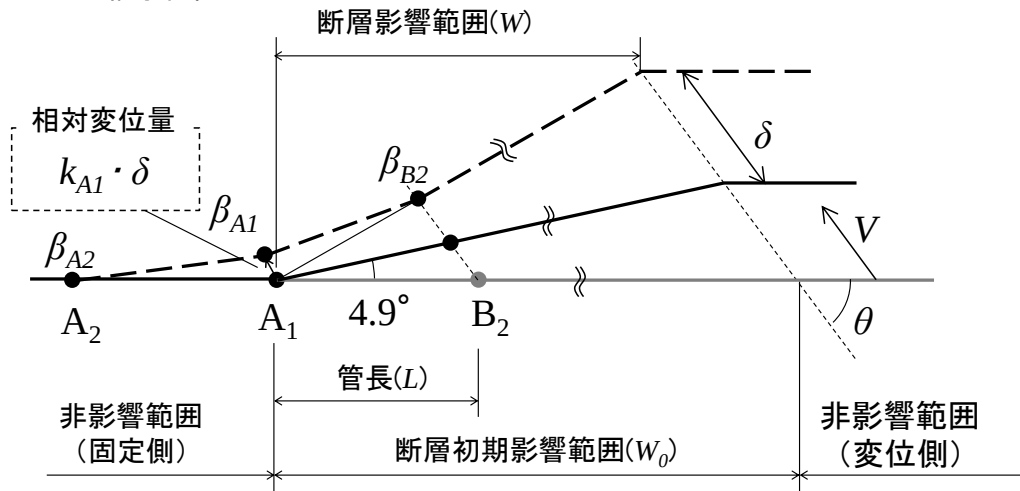


図-4.2 検討モデル(固定側境界部に継手がある場合)

● 継手位置

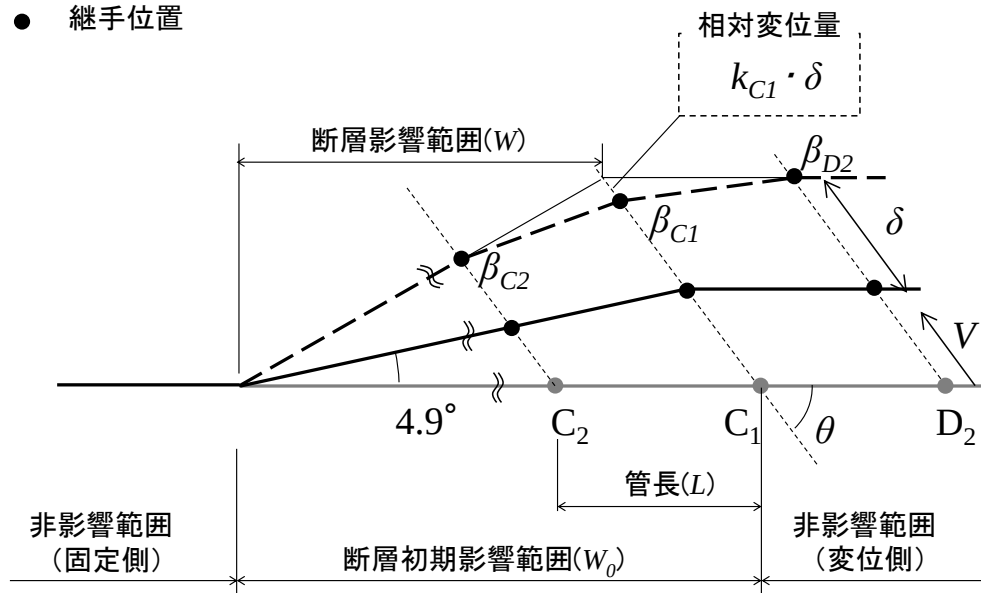


図-4.3 検討モデル(変位側境界部に継手がある場合)

4.2.2 継手屈曲角の算出

呼び径 75 を例に考える。断層の傾きや管長などのパラメータは既知であり、継手屈曲角が 4.9° よりも小さい領域では、管と地盤は同じ動きをすることから、管路挙動すなわち継手の位置座標は幾何学的に算出できる。継手屈曲角が 4.9° を超える領域では、継手 A_1 （または C_1 ）と地盤との相対変位量、すなわち変位影響度 k 値が求まると、各継手の位置座標を算出できる。

継手 A_1 および隣の継手 A_2 、 B_2 の位置座標が求まると、式(4-2)より継手 A_1 の屈曲角 β_{A1} が算出できる。断層変位前後の継手 A_2 、 A_1 、 B_2 の位置座標をまとめると、表-4.1 および図-4.4 のようになる。同様の方法にて、変位側地盤との境界部の継手 C_1 および隣の継手 C_2 、 D_2 の位置座標も求めることができ、継手 C_1 の屈曲角 β_{C1} も算出できる。

$$\beta_{A1} = \tan^{-1} \frac{y_{B2} - y_{A1}}{x_{B2} - x_{A1}} - \tan^{-1} \frac{y_{A1} - y_{A2}}{x_{A1} - x_{A2}} \quad (4-2)$$

ここで、

x_j : 継手 j の x 座標
 y_j : 継手 j の y 座標

表-4.1 各継手位置の座標

		A_2	A_1	B_2
変位前	x_1	$x_{1A2} = -L$	$x_{1A1} = 0$	$x_{1B2} = L$
	y_1	$y_{1A2} = 0$	$y_{1A1} = 0$	$y_{1B2} = 0$
4.9° 屈曲時	x_2	$x_{2A2} = -L$	$x_{2A1} = 0$	$x_{2B2} = L - \frac{L \cdot d}{W_0} \cdot \cos \theta$
	y_2	$y_{2A2} = 0$	$y_{2A1} = 0$	$y_{2B2} = \frac{L \cdot d}{W_0} \cdot \sin \theta$
4.9° 以上 屈曲時	x_3	$x_{3A3} = -L$	$x_{3A1} = \frac{-k \cdot L \cdot \delta}{W_0} \cdot \cos \theta$	$x_{3B2} = x_{2B2} - \frac{L \cdot \delta}{W_0} \cdot \cos \theta$
	y_3	$y_{3A2} = 0$	$y_{3A1} = \frac{k \cdot L \cdot \delta}{W_0} \cdot \sin \theta$	$y_{3B2} = y_{2B2} + \frac{L \cdot \delta}{W_0} \cdot \sin \theta$

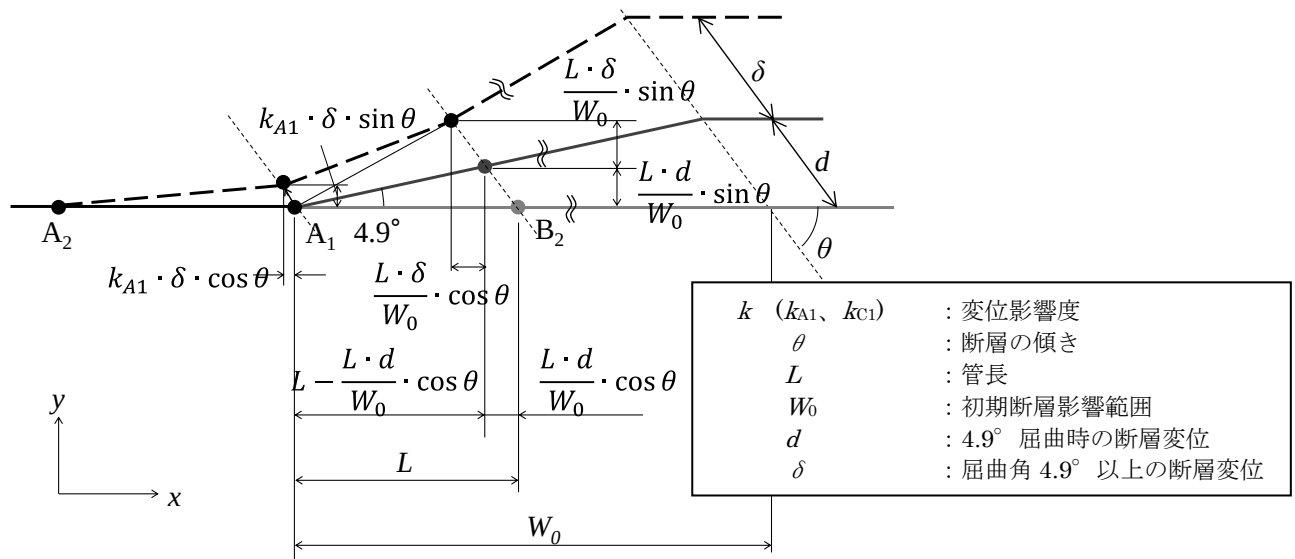


図-4.4 各継手位置の座標

4.2.3 管路挙動の解析結果との比較

図-4.5 の黒で示す線は、呼び径 75、管長 2m、断層の傾き 60° 、変位側地盤との境界にある継手 C_1 における、断層変位量に対する屈曲角の解析結果を示す。データ数は、断層変位 0.03m 毎の 100 点である。

変位影響度 k 値が定まると、式(4-2)および表-4.1 より、断層変位に対する継手屈曲角を推定することができる。断層変位量 0.03m 毎の 100 点の継手屈曲角の解析結果と推定結果との残差から算出される決定係数 R^2 が最大になるよう、変位影響度 k 値を算出した。この時、変位影響度は $k=0.133$ であり、決定係数は $R^2=0.986$ であった。この k 値から算出した断層変位に対する継手屈曲角の推定結果を、図-4.5 の赤線で示している。両者はよく一致しており、本モデルによる推定が妥当であることが分かる。

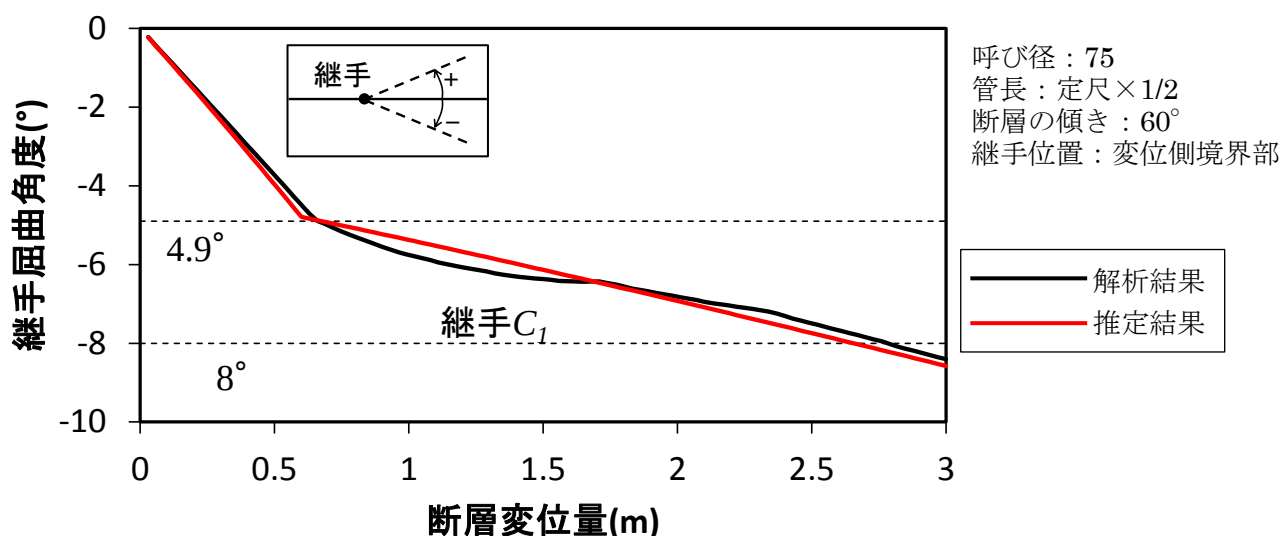


図-4.5 継手屈曲角の推定結果例

4. 3 管路挙動推定式の立案

4.3.1 変位影響度 k 値の推定

変位影響度 k 値は断層影響範囲と非影響範囲との境界部にある継手の動きやすさを意味し、継手の屈曲特性と地盤特性との間に相関があると考えられる。継手の屈曲特性は管の呼び径(5 条件: 呼び径 75 ~ 250)を、地盤特性は管長(2 条件: 定尺と定尺 $\times 1/2$)、断層の傾き(3 条件: 45° 、 60° 、 90°)および継手部の位置(2 条件: 固定側境界と変位側境界)を代表値とし、全 60 条件について k 値を算出した。いずれも k 値は、断層変位量 0.03m 毎の継手屈曲角の解析結果と推定結果との残差から算出される決定係数 R^2 が最大になるよう算出した。なお、本研究では主に沖積地盤を対象としており、 k 値の算出に当たり地盤種別や N 値等は考慮していない。 k 値の算出結果をもとに、表-4.2 に示す各項目を目的変数およびそのカテゴリーとし、数量化理論 I 類¹⁾により式(4-3)のように k 値の推定式を導出した。表-4.2 には導出結果を一部補正した各目的変数のカテゴリースコアを併せて示す。

$$k = P_{1i} \cdot x_{1i} + P_{2i} \cdot x_{2i} + P_{3i} \cdot x_{3i} + P_{4i} \cdot x_{4i} \quad (4-3)$$

ここで、

- k : 推定変位影響度
 P_{ni} : 目的変量 n カテゴリー i の係数
 x_{ni} : 0 または 1

表-4.2 目的変量およびカテゴリースコア

呼び径 P_1		管長 P_2		断層の傾き P_3		継手部の位置 P_4	
75	0.070	定尺	0.070	45°	0.015	固定側	0.010
100	0.050	定尺×1/2	-0.005	60°	0.060	変位側	0.000
150	0.080			90°	0.075		
200	0.040						
250	0.095						

4.3.2 管路挙動および継手屈曲角の推定

図-4.5 と同じ条件(呼び径 75、管長 2m、断層の傾き 60°、変位側地盤との境界にある継手)において、式(4-3)で推定した k 値により算出した継手屈曲角を図-4.6 に示す。解析結果では、8° 屈曲時の断層変位量である許容断層変位量は 2.76m であるのに対し、推定式による推定では 2.19m とやや短かった。解析結果との間にやや乖離があるが、これは解析結果よりも安全側の推定となるように k 値の推定におけるカテゴリースコアを丸めたためであり、管路の安全上は問題ないと考えられる。なお、今回の推定式による推定 k 値は 0.125 で、決定係数は 0.972 であった。

許容断層変位量の解析結果と推定結果の相関を図-4.7 に示す。推定結果の一覧を付表-1 に示す。いずれも解析結果よりも推定結果の方が小さくなっており、管路にとっては安全側の推定であるため、実用上問題はない。

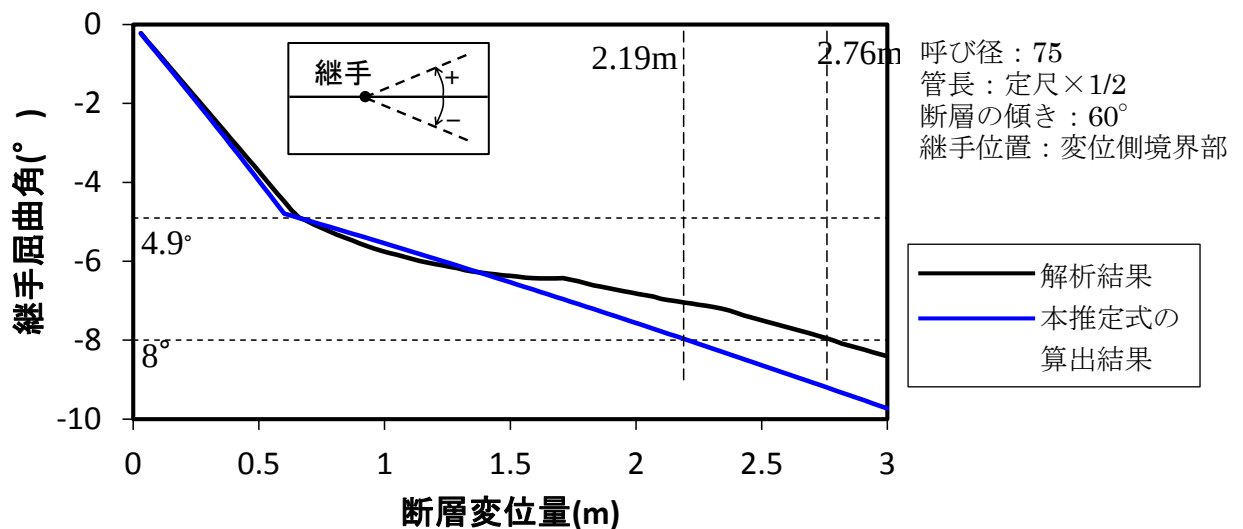


図-4.6 断層変位に対する継手屈曲角

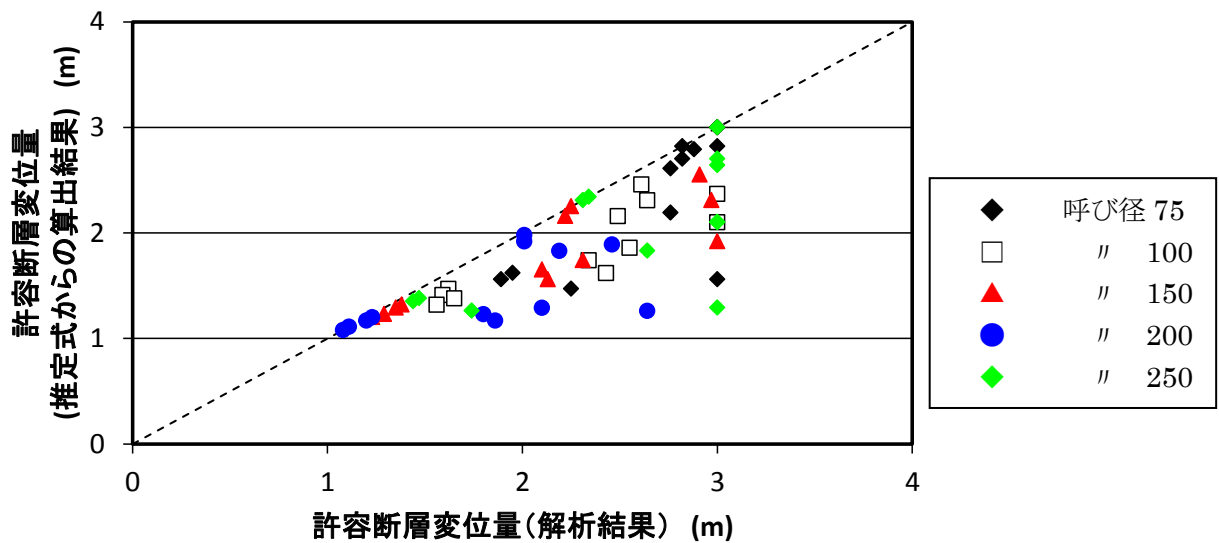


図-4.7 許容断層変位量の解析結果と推定結果

4.3.3 地盤条件の影響

本研究では主に沖積地盤を対象としており、 k 値の算出に当たり地盤種別やN値等は考慮していない。一般に埋設地盤が軟らかいと、継手部が曲がりやすくなり、鎖構造管路挙動が起こりやすくなるため、管路にとっては有利に働く。しかし、地盤が硬い場合、継手は曲がりにくくなって鎖構造管路挙動も起こりにくいため、屈曲が局部的に集中し、管路にとっては厳しい条件となる。

そこで、地盤が硬い場合でも本推定手法に問題がないかどうか確認するため、呼び径 75 と 250 において、断層影響範囲が最も小さい断層の傾き 60° の場合の N 値 50 での解析を行い、本推定手法により算出した許容断層変位量と比較・検証を行った。図-4.8 に一例として、呼び径 75、管長 2m、変位側地盤との境界にある継手の場合の結果を示す。許容断層変位量は、N 値 50 での解析結果では 2.4m であるのに対し、本推定式の算出結果では 2.19m と短く、管路にとっては安全側の推定であった。

すべての条件での N 値 50 の解析結果と推定結果の一覧を表-4.3 に示す。地盤が N 値 50 と硬い場合でも本推定手法での算出結果はさらに安全側の推定となるため、本推定手法に問題ないことが確認できた。

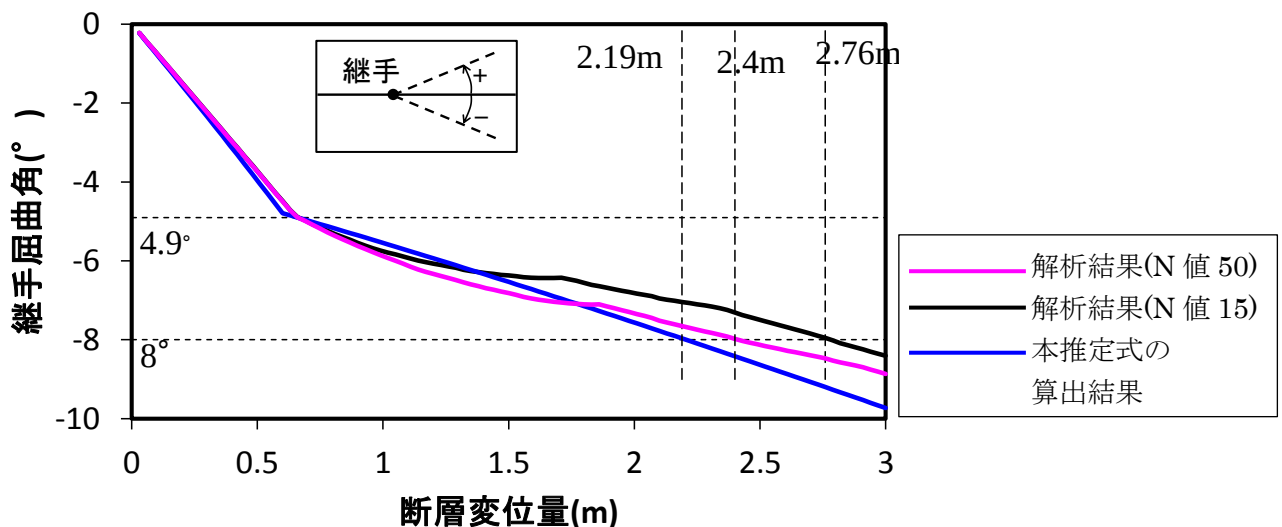


図-4.8 8° 屈曲時の断層変位量の解析結果(N 値 50 および 15)と推定結果

表-4.3 N 値 50 の解析結果と推定結果

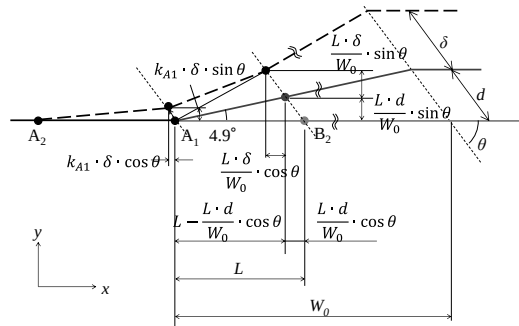
呼び径	管長	断層の傾き	継手位置	【N値15】 許容断層 変位量 (m)	【N値50】 許容断層 変位量 (m)	【推定値】 許容断層 変位量 (m)
75	定尺 (4m)	60°	固定側	1.89	1.83	1.56
	定尺×1/2 (2m)	60°	固定側	2.76	2.40	2.19
250	定尺 (5m)	60°	固定側	1.44	1.41	1.35
	定尺×1/2 (2.5m)	60°	固定側	2.64	2.40	1.83

4. 4 配管設計方法

管路配管設計の手順を表-4.4 に示す。断層横断部での耐震継手ダクタイル鉄管の配管設計は以下のようになる。

断層条件（断層変位量、断層の傾き）および管路条件（呼び径、管長）から、式(4-3)および表-4.2 により変位影響度 k 値を推定する。 k 値が推定されると表-4.1 より各継手の位置座標が算出できるため、式(4-2)より断層影響範囲の境界部の継手屈曲角が算出できる。こうして推定された継手屈曲角が、継手の安全性の評価基準値である 8° を下回っているかどうかで管路の安全性を評価する。管路の安全性が確保できない場合は、管長を短くして再度 k 値の推定～安全性の評価を実施する。安全性が確保できる場合は、当該の管路条件（呼び径、管長）にて断層横断部に配管できることになる。

表-4.4 管路配管設計の手順

手順	内容	参照																																				
① 解析条件の 設定	<table><tr><th colspan="2">断層条件</th><th colspan="2">管路条件</th></tr><tr><th>断層変位量</th><th>断層の傾き</th><th>呼び径</th><th>管長</th></tr><tr><td rowspan="5">3m 以下</td><td>45°</td><td>75</td><td>定尺</td></tr><tr><td>60°</td><td>100</td><td>定尺×1/2</td></tr><tr><td>90°</td><td>150</td><td></td></tr><tr><td></td><td>200</td><td></td></tr><tr><td></td><td>250</td><td></td></tr></table>	断層条件		管路条件		断層変位量	断層の傾き	呼び径	管長	3m 以下	45°	75	定尺	60°	100	定尺×1/2	90°	150			200			250														
断層条件		管路条件																																				
断層変位量	断層の傾き	呼び径	管長																																			
3m 以下	45°	75	定尺																																			
	60°	100	定尺×1/2																																			
	90°	150																																				
		200																																				
		250																																				
② 変位影響度 k 値の推定	$k = P_{1i} \cdot x_{1i} + P_{2i} \cdot x_{2i} + P_{3i} \cdot x_{3i} + P_{4i} \cdot x_{4i}$ <table><tr><th>呼び径 P₁</th><th>管長 P₂</th><th colspan="2">断層の傾き P₃</th><th colspan="2">継手部の位置 P₄</th></tr><tr><td>75</td><td>定尺</td><td>0.070</td><td>45°</td><td>0.015</td><td>固定側 0.010</td></tr><tr><td>100</td><td>定尺×1/2</td><td>-0.005</td><td>60°</td><td>0.060</td><td>変位側 0.000</td></tr><tr><td>150</td><td></td><td></td><td>90°</td><td>0.075</td><td></td></tr><tr><td>200</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>250</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table> ※継手部の位置が不明の時は「変位側」で対応する	呼び径 P ₁	管長 P ₂	断層の傾き P ₃		継手部の位置 P ₄		75	定尺	0.070	45°	0.015	固定側 0.010	100	定尺×1/2	-0.005	60°	0.060	変位側 0.000	150			90°	0.075		200						250						式(4-3) 表-4.2
呼び径 P ₁	管長 P ₂	断層の傾き P ₃		継手部の位置 P ₄																																		
75	定尺	0.070	45°	0.015	固定側 0.010																																	
100	定尺×1/2	-0.005	60°	0.060	変位側 0.000																																	
150			90°	0.075																																		
200																																						
250																																						
③ 各継手 位置座標の 算出	<table><tr><th colspan="2"></th><th>A₂</th><th>A₁</th><th>B₂</th></tr><tr><td rowspan="2">変位前</td><td>x₁</td><td>x_{1A2} = -L</td><td>x_{1A1} = 0</td><td>x_{1B2} = L</td></tr><tr><td>y₁</td><td>y_{1A2} = 0</td><td>y_{1A1} = 0</td><td>y_{1B2} = 0</td></tr><tr><td rowspan="2">4.9° 屈曲時</td><td>x₂</td><td>x_{2A2} = -L</td><td>x_{2A1} = 0</td><td>x_{2B2} = L - $\frac{L \cdot d}{W_0} \cdot \cos \theta$</td></tr><tr><td>y₂</td><td>y_{2A2} = 0</td><td>y_{2A1} = 0</td><td>y_{2B2} = $\frac{L \cdot d}{W_0} \cdot \sin \theta$</td></tr><tr><td rowspan="2">4.9°以上 屈曲時</td><td>x₃</td><td>x_{3A2} = -L</td><td>x_{3A1} = $-\frac{k \cdot L \cdot \delta}{W_0} \cdot \cos \theta$</td><td>x_{3B2} = x_{2B2} - $\frac{L \cdot \delta}{W_0} \cdot \cos \theta$</td></tr><tr><td>y₃</td><td>y_{3A2} = 0</td><td>y_{3A1} = $\frac{k \cdot L \cdot \delta}{W_0} \cdot \sin \theta$</td><td>y_{3B2} = y_{2B2} + $\frac{L \cdot \delta}{W_0} \cdot \sin \theta$</td></tr></table>			A ₂	A ₁	B ₂	変位前	x ₁	x _{1A2} = -L	x _{1A1} = 0	x _{1B2} = L	y ₁	y _{1A2} = 0	y _{1A1} = 0	y _{1B2} = 0	4.9° 屈曲時	x ₂	x _{2A2} = -L	x _{2A1} = 0	x _{2B2} = L - $\frac{L \cdot d}{W_0} \cdot \cos \theta$	y ₂	y _{2A2} = 0	y _{2A1} = 0	y _{2B2} = $\frac{L \cdot d}{W_0} \cdot \sin \theta$	4.9°以上 屈曲時	x ₃	x _{3A2} = -L	x _{3A1} = $-\frac{k \cdot L \cdot \delta}{W_0} \cdot \cos \theta$	x _{3B2} = x _{2B2} - $\frac{L \cdot \delta}{W_0} \cdot \cos \theta$	y ₃	y _{3A2} = 0	y _{3A1} = $\frac{k \cdot L \cdot \delta}{W_0} \cdot \sin \theta$	y _{3B2} = y _{2B2} + $\frac{L \cdot \delta}{W_0} \cdot \sin \theta$	表-4.1 図-4.4				
		A ₂	A ₁	B ₂																																		
変位前	x ₁	x _{1A2} = -L	x _{1A1} = 0	x _{1B2} = L																																		
	y ₁	y _{1A2} = 0	y _{1A1} = 0	y _{1B2} = 0																																		
4.9° 屈曲時	x ₂	x _{2A2} = -L	x _{2A1} = 0	x _{2B2} = L - $\frac{L \cdot d}{W_0} \cdot \cos \theta$																																		
	y ₂	y _{2A2} = 0	y _{2A1} = 0	y _{2B2} = $\frac{L \cdot d}{W_0} \cdot \sin \theta$																																		
4.9°以上 屈曲時	x ₃	x _{3A2} = -L	x _{3A1} = $-\frac{k \cdot L \cdot \delta}{W_0} \cdot \cos \theta$	x _{3B2} = x _{2B2} - $\frac{L \cdot \delta}{W_0} \cdot \cos \theta$																																		
	y ₃	y _{3A2} = 0	y _{3A1} = $\frac{k \cdot L \cdot \delta}{W_0} \cdot \sin \theta$	y _{3B2} = y _{2B2} + $\frac{L \cdot \delta}{W_0} \cdot \sin \theta$																																		
④ 継手屈曲角 の算出	 $\beta_{A1} = \tan^{-1} \frac{y_{B2} - y_{A1}}{x_{B2} - x_{A1}} - \tan^{-1} \frac{y_{A1} - y_{A2}}{x_{A1} - x_{A2}}$	式(4-2)																																				
⑤ 管路安全性 の評価	β_{A1} (または β_{C1})が8° 以上の場合は、 管長を「定尺×1/2」にして②へ戻るか、 管長を「1m」にして⑥へ進む																																					
⑥ 配管設計へ の適用	配管する管路条件（呼び径、管長）の決定																																					

【第 4 章の参考文献】

- 1) (株)技術評論社：「実習 多変量解析入門」, 2011.

第 5 章 結論

第 5 章 結論

5. 1 はじめに

本研究は、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管において、断層が動いた時どのように挙動するかを解明し、どのように配管すれば管路の安全性が保たれるか、配管設計の提案を行った。本研究のまとめを以下に示す。

5. 2 本研究から得られた知見

(1)実管路を用いた土槽実験による断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動調査

断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管がどのように挙動するかについて研究した事例は少ないため、実管路を用いた土槽実験により管路挙動を調査した。その結果、以下のことが分かった。

- ①断層の傾き 90° および 60° の実験において、断層影響範囲は、既存の研究事例との整合性があった。
- ②静的実験、動的实验のいずれも断層を挟む継手変位は地盤変位と一致していなかった。これは管体強度が抵抗として働き地盤変位との間に相対変位が生じたためであると考えられる。
- ③静的実験、動的实验いずれにおいても、管下地盤から反力を受ける場合と管上地盤から反力を受ける場合とで管路変位の傾向が異なり、管上地盤から反力を受ける場合は分割部近傍の隣の継手が大きく屈曲する傾向は同じであった。
- ④動的实验では、固定側地盤の分割部近傍継手 A は 8° 近くまで屈曲が進行した。これは、実験条件により管下地盤からの反力が増大したためであると考えられる。
- ⑤管体曲げモーメントから算出される管体曲げ応力は十分小さく弾性範囲内であり、十分な管体強度を有していた。

以上から、断層の傾き 90° および 60° の実験において、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動が確認するとともに、動的小よび静的の変位条件に関係なく、管路挙動の傾向は同じであると考えることができた。

(2)断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の管路挙動のシミュレーション解析

日本に無数に存在すると言われる断層横断部の管路挙動を確認するため、既存の断層データや管路データなどをもとに、断層モデル、管路モデル、継手や地盤のばねモデルを設定し、断層が動いた時の管路挙動の FEM 解析を実施した。その結果、以下のことが分かった。

- ①解析結果は実験結果と比較的よく一致しており、本解析手法の妥当性が確認された。
- ②断層の動きに伴い、管路は地盤に追従して挙動する。
- ③断層影響範囲と非影響範囲との境界部付近の継手からまず挙動し、その動きが限界に達すると隣の継手が挙動しており、耐震継手ダクタイル鉄管の特徴的な挙動である鎖構造管路挙動を示していた。
- ④断層変位後の管路の安全性を、継手屈曲角、管体発生応力、軸力で評価した場合、継手屈曲角による評価が管路にとって最も厳しくなった。
- ⑤断層影響範囲と非影響範囲の境界部に継手がある条件の 때가、基準値まで屈曲するときの断層変位量が最も小さくなり、管路にとって最も厳しい条件であった。
- ⑥管長 1m では、継手屈曲角、管体発生応力、軸力のいずれも基準値を超えることはなかった。

以上から、断層横断部の管路挙動においては、最も大きく屈曲する継手の特定が可能であり、その屈曲角で管路の安全性の評価が可能となる。

3)断層横断部の管路配管設計

管路挙動の実験結果および解析結果を踏まえ、以下に示すように、断層横断部の管路挙動の推定手法及び管路の安全性の評価手法を立案し、管路配管設計方法を提案できた。

- ①管路挙動は幾何学的に推定できる。
 - ・断層変位量が小さい領域では管路地盤は同じ動きをする。
 - ・断層変位が大きい時の管と地盤の相対変位量は、断層変位量に比例すると仮定できる。
- ②管路挙動が推定できると、最も大きく屈曲する継手屈曲角が算出でき、管路の安全性の評価が可能となる。
- ③管路の安全性が確保できない場合は管長を短くし、管路の安全性が確保できる最終的な管路条件を決定できる。

5. 3 今後の課題

これまで、断層横断部の耐震継手ダクタイル鉄管の挙動を研究し、配管方法を提案してきた。今後、実用上の汎用性を持たせるため、以下の課題が残っていると考えている。

(1)異形管部の検討

本研究は直管管路を対象としているが、水道管路は直管だけでなく、曲管、分岐管、弁栓類などの異形管も含めて構成されている。特に他企業管（ガス、下水、農水、工水など）の多い人口密集地などでは異形管の構成比率が高くなるので、異形管部の検討が必要とな

る。

(2)管長以外の対応の検討

本研究では管路の安全性が確保されない場合の対策として、管長を短くすることを挙げている。しかし、例えば定尺 5m の管を 1m で配管する場合、5 倍の本数の管が必要となり、経済的ではない。このような場合、屈曲性能の大きい継ぎ輪を使用するなど、管長を短くすること以外の対策の検討が必要となる。

謝 辭

謝辞

本研究を進めるに当たり、多くの方々からご指導、ご助言、励ましをいただきました。ここに厚く御礼を申し上げ、心より深く感謝いたします。

本研究の遂行に当たっては、ご多忙にもかかわらず、終始ご丁寧なご指導をいただきました、金沢大学理工学研究域環境デザイン学系 宮島昌克教授には、心より厚く御礼申し上げます。どうもありがとうございました。先生より頂戴いたしました、研究や調査などの貴重なアドバイスは、私の今後の研究生活においても重要な財産となると確信しております。

金沢大学理工学研究域環境デザイン学系 池本良子教授、小林俊一准教授、池本敏和講師におかれましては、ご多忙の中論文審査をお引き受け頂き、予備審査会におきましても多数の貴重なご意見を頂戴いたしました。岐阜大学工学部社会基盤工学科 能島暢呂教授におかれましては、交通機関の影響で金沢大学にはお越し頂けなかったものの、後日出張先の国際会議場にてお時間を取っていただき、貴重なご意見をいただきました。ここに厚く御礼を申し上げます。

研究を進めるに当たり、金沢大学理工学研究域環境デザイン学系 村田晶助教、研究室の先輩であります、イランから留学で来られた M. H. Erami 氏、神戸市水道局 熊木芳弘課長、株式会社国土開発センター 七郎丸一孝氏、大阪市危機管理室 水野智雄氏、独立行政法人土木研究所 武澤永純氏、日本海コンサルタント 野村尚樹氏、金沢大学地震防災研究会の方々には、懇切なご指導や多くの激励を賜りました。深く感謝いたします。

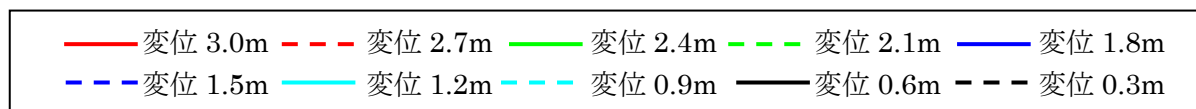
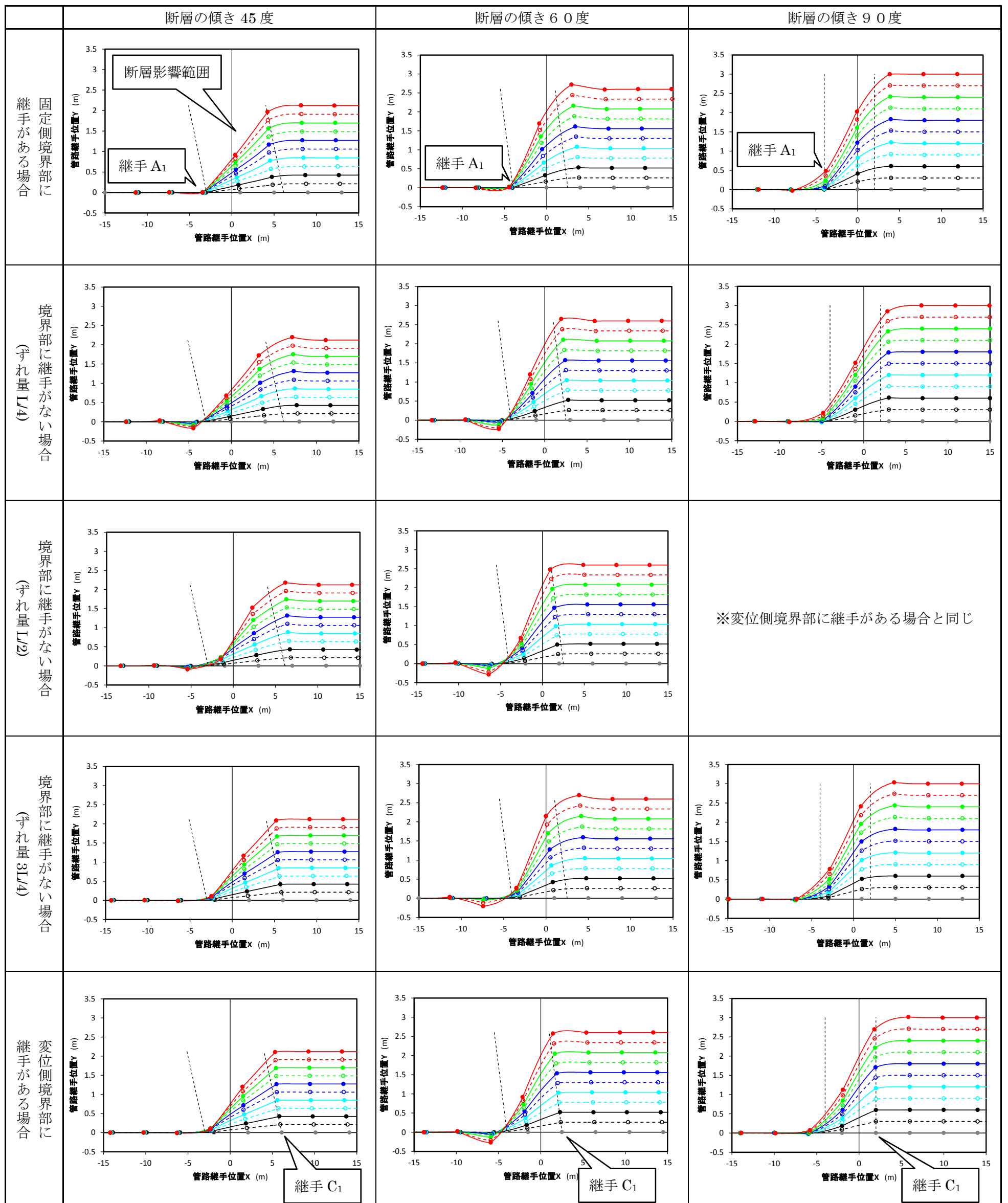
金沢大学大学院博士後期課程の同じ社会人学生である、株式会社東洋設計 石塚久幸氏、には、多くの助言をいただくとともに、相談にものっていただき、研究の支えとなりました。どうもありがとうございました。

私が本研究を遂行することができたのは、株式会社クボタの多くの方々のお力添えによるものです。本研究の機会を与えていただきました、内田睦夫パイプシステム事業ユニット長、戸島敏雄理事、二宮一理事、稲田均鉄管研究部長、岸正蔵グループ長をはじめとする、鉄管研究部の皆様には、多くのご意見、ご助言、ご理解をいただきました。ここに深く御礼申し上げます。

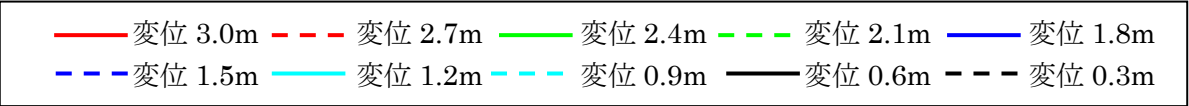
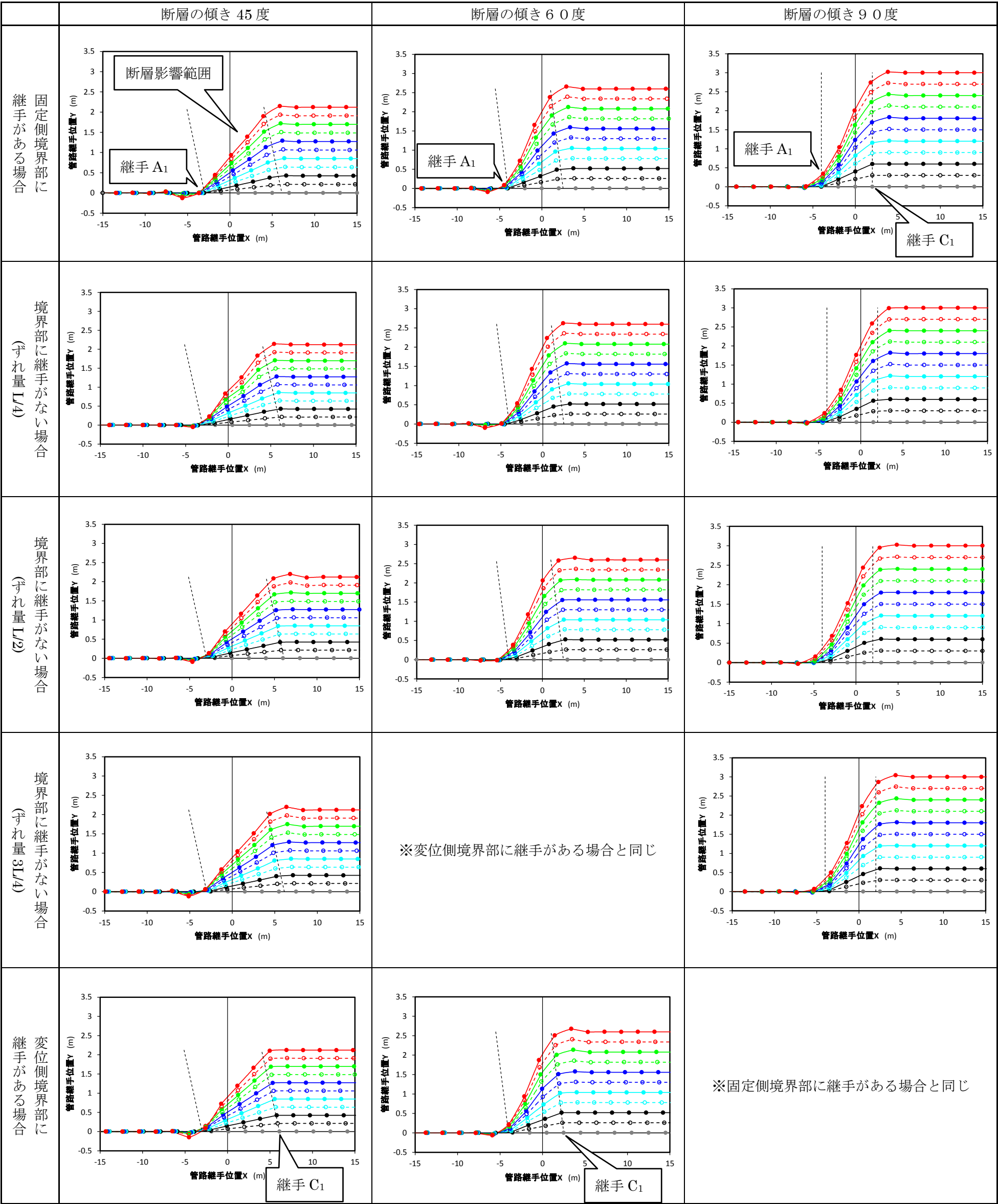
最後に、3年間にわたる仕事と研究という多忙な生活に理解を示し、陰ながら支えてくれた妻の薫と長男 聡、二男 崇に心から感謝いたします。

付 録

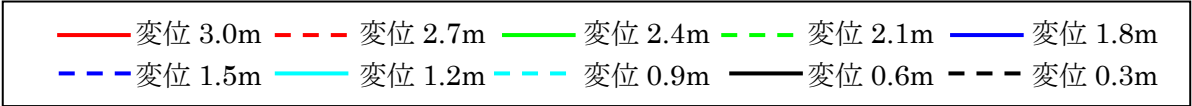
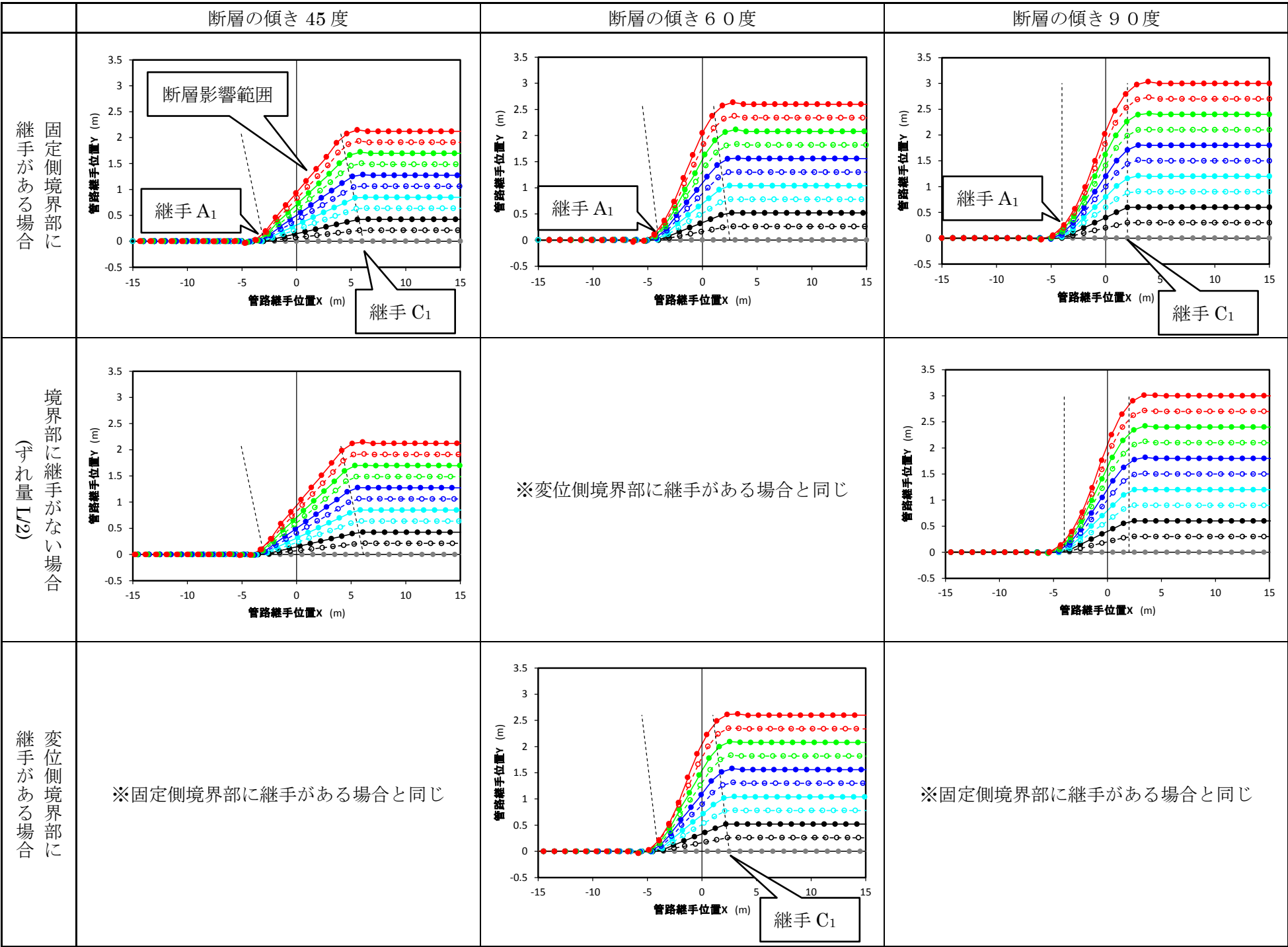
付図-1 (1) 管路挙動の解析結果（呼び径 75、管長 4m（定尺））



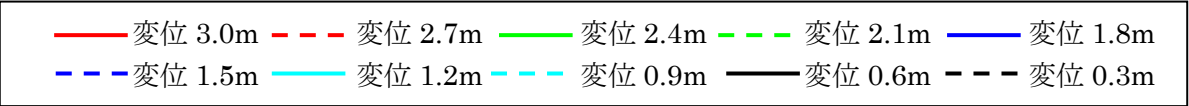
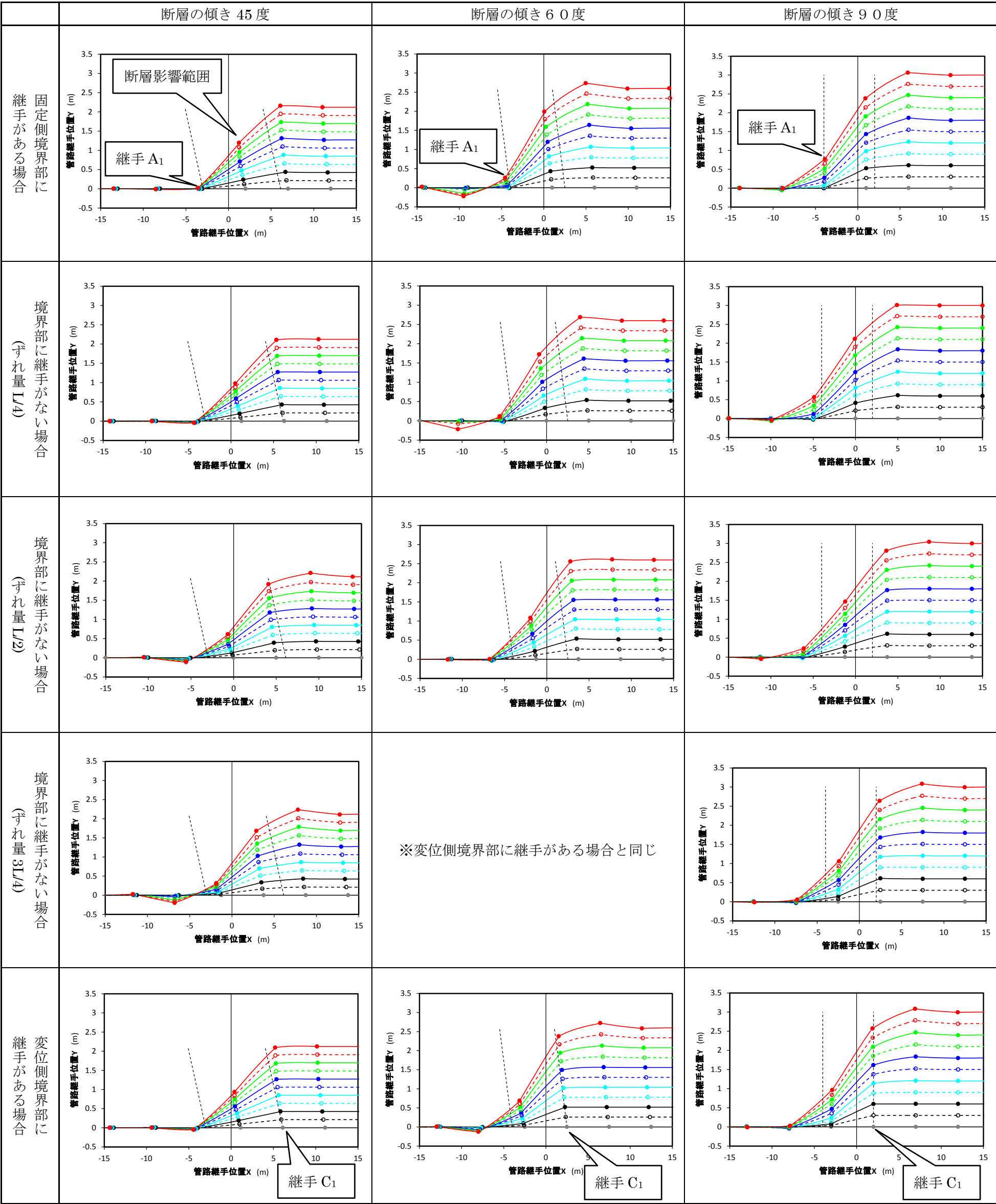
付図-1 (2) 管路挙動の解析結果（呼び径 75、管長 2m（定尺×1/2））



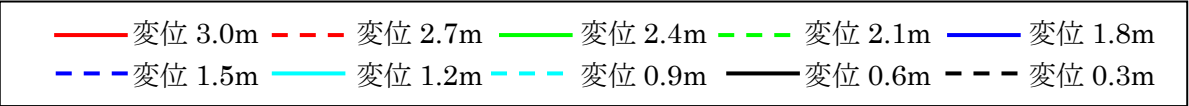
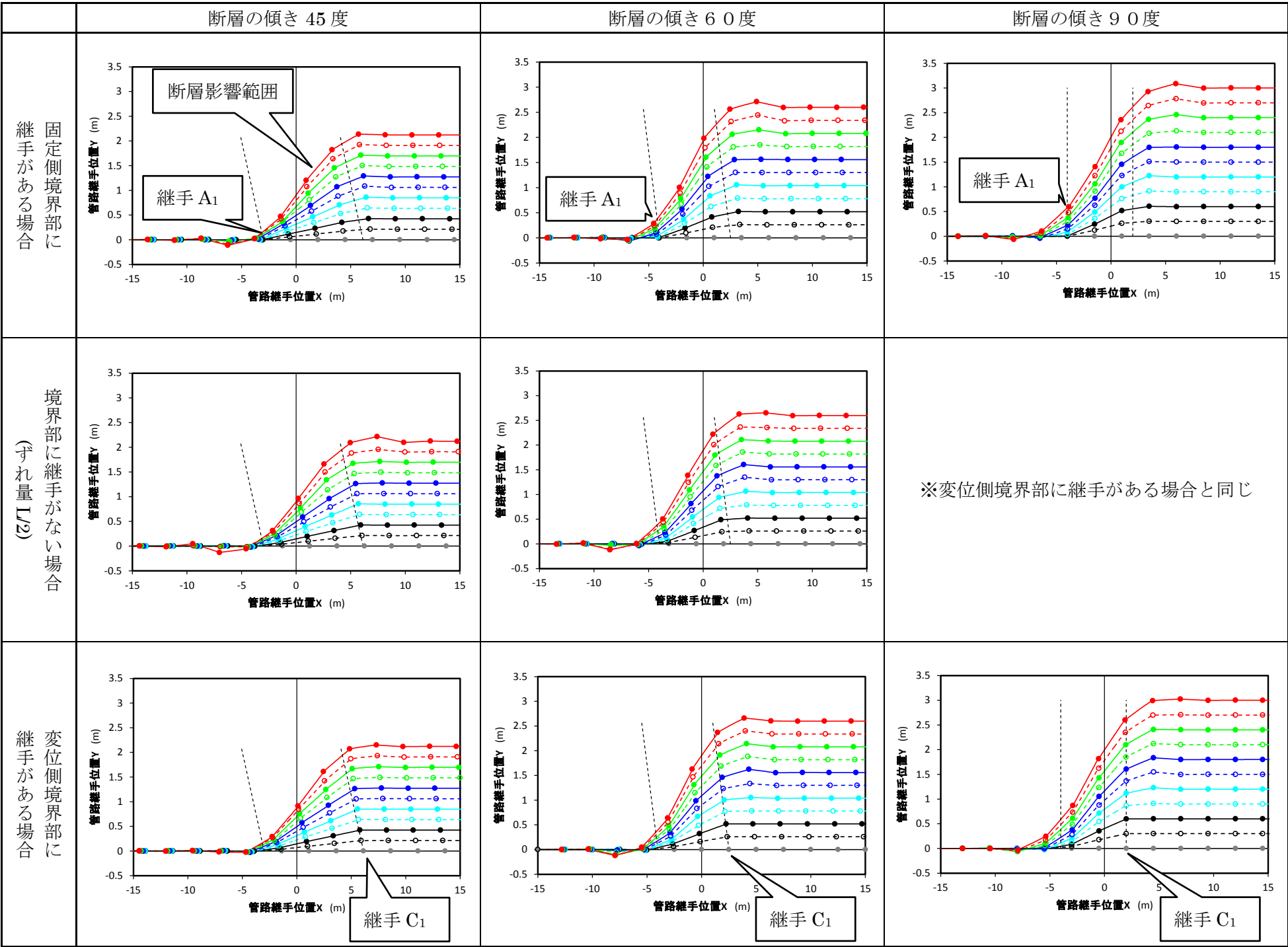
付図-1 (3) 管路挙動の解析結果（呼び径 75、管長 1m）



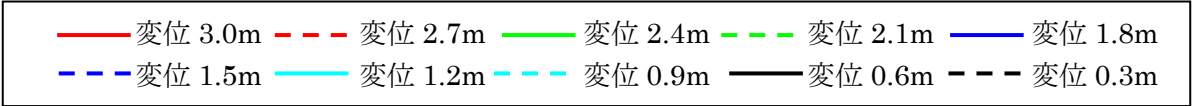
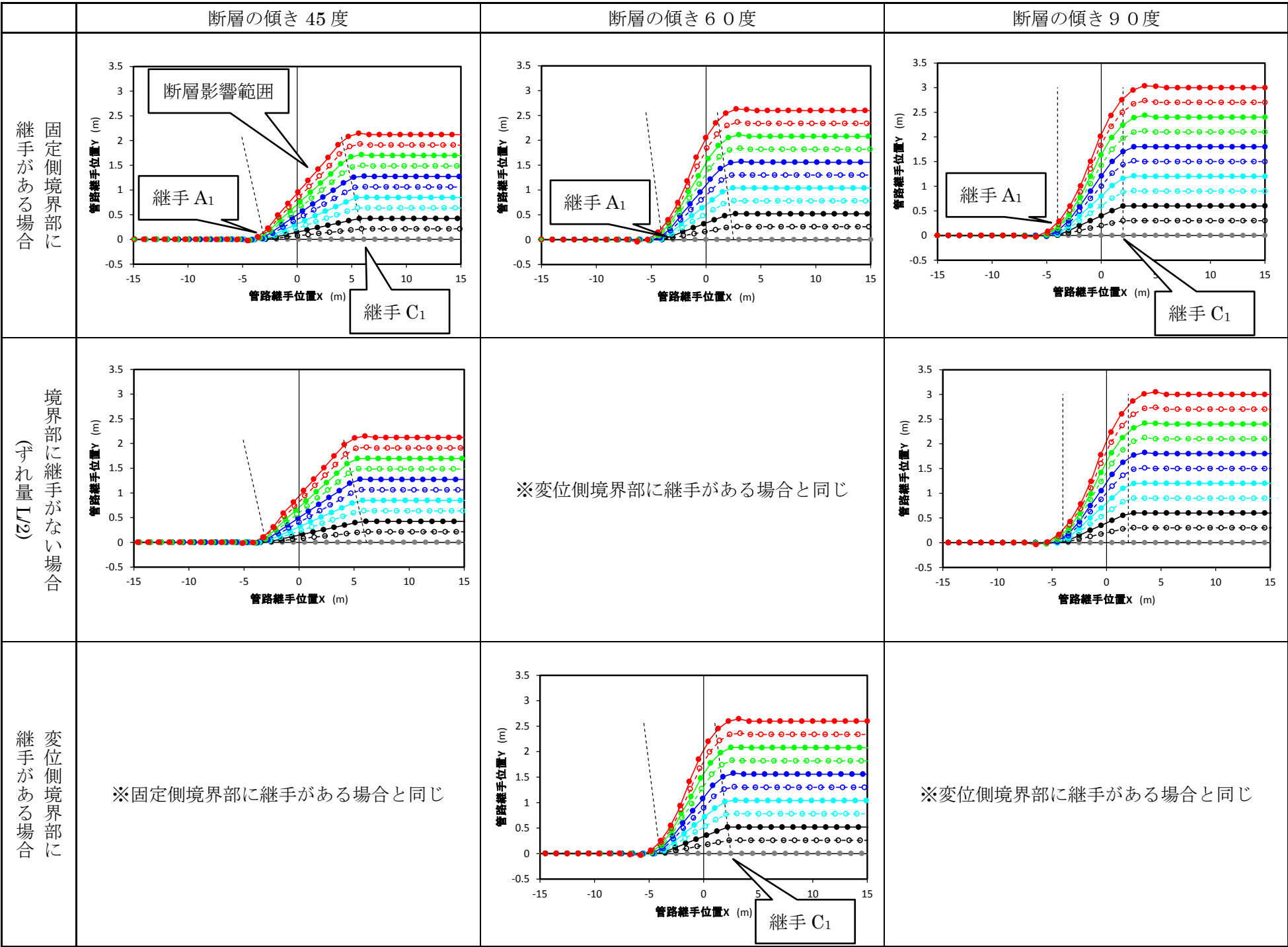
付図-2 (1) 管路挙動の解析結果 (呼び径 250、管長 5m (定尺))



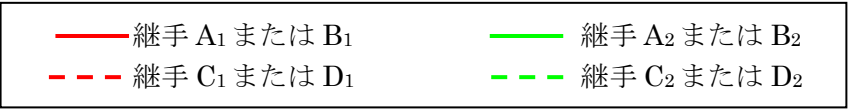
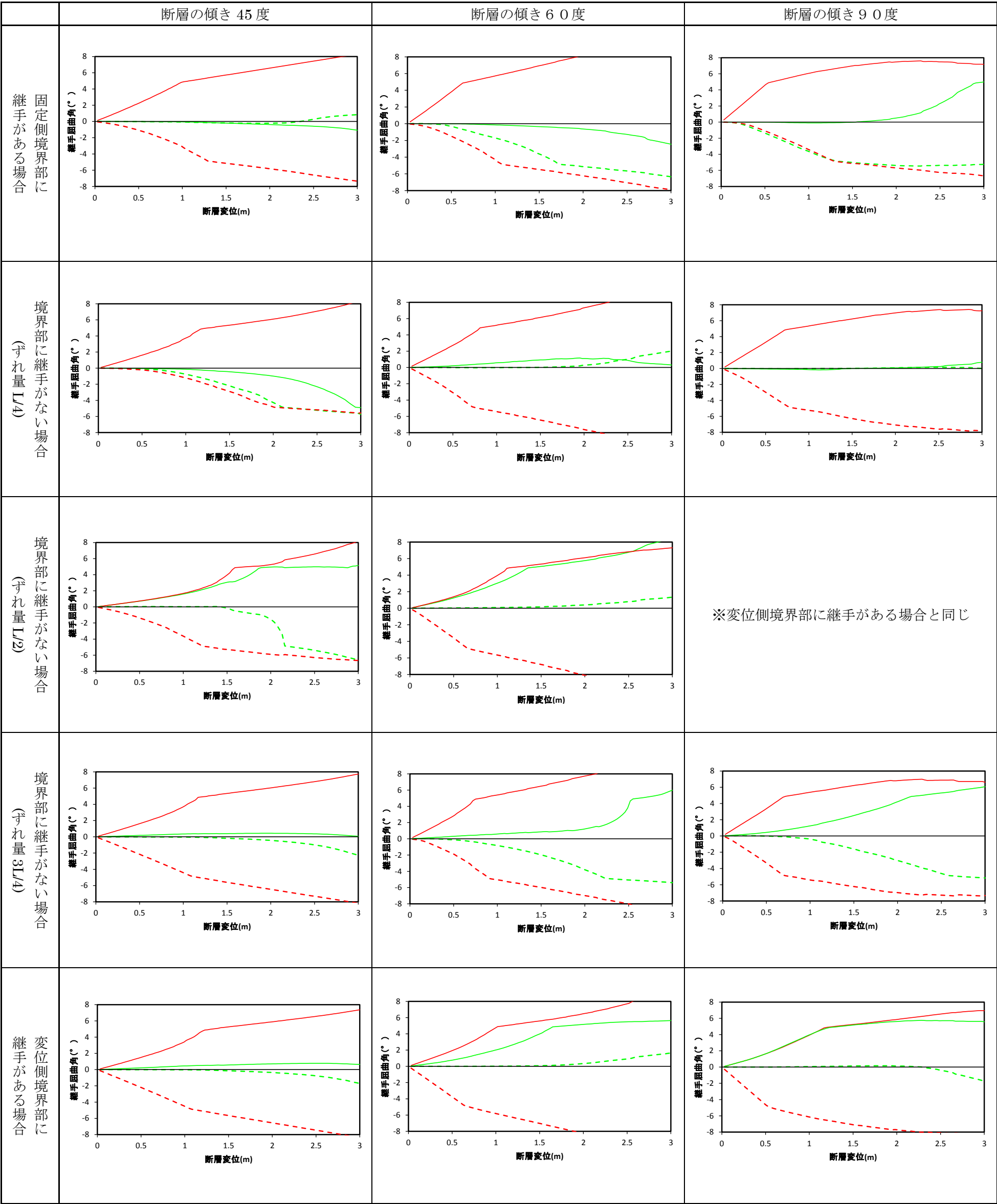
付図-2 (2) 管路挙動の解析結果（呼び径 250、管長 2.5m（定尺×1/2））



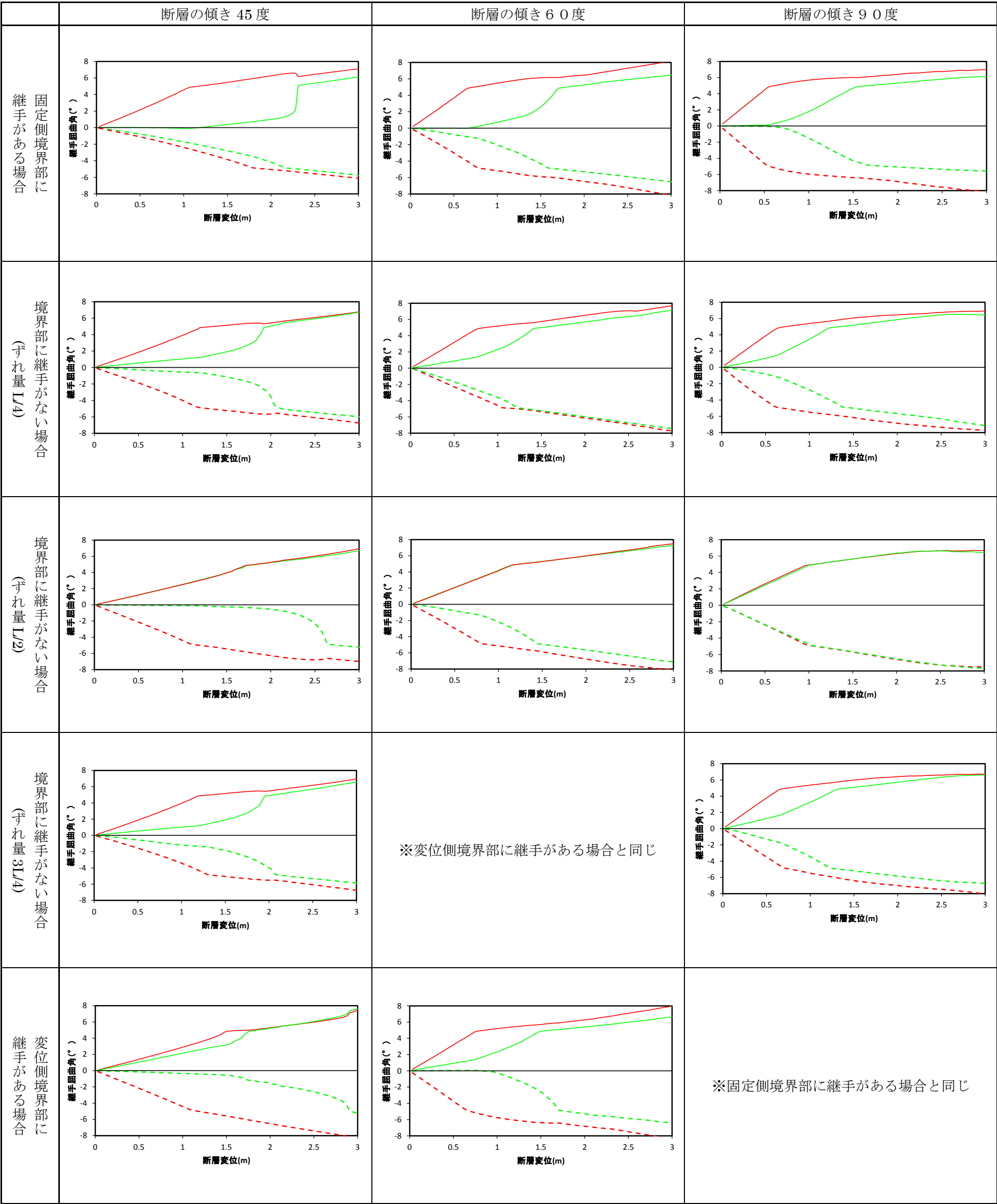
付図-2 (3) 管路挙動の解析結果（呼び径 250、管長 1m）



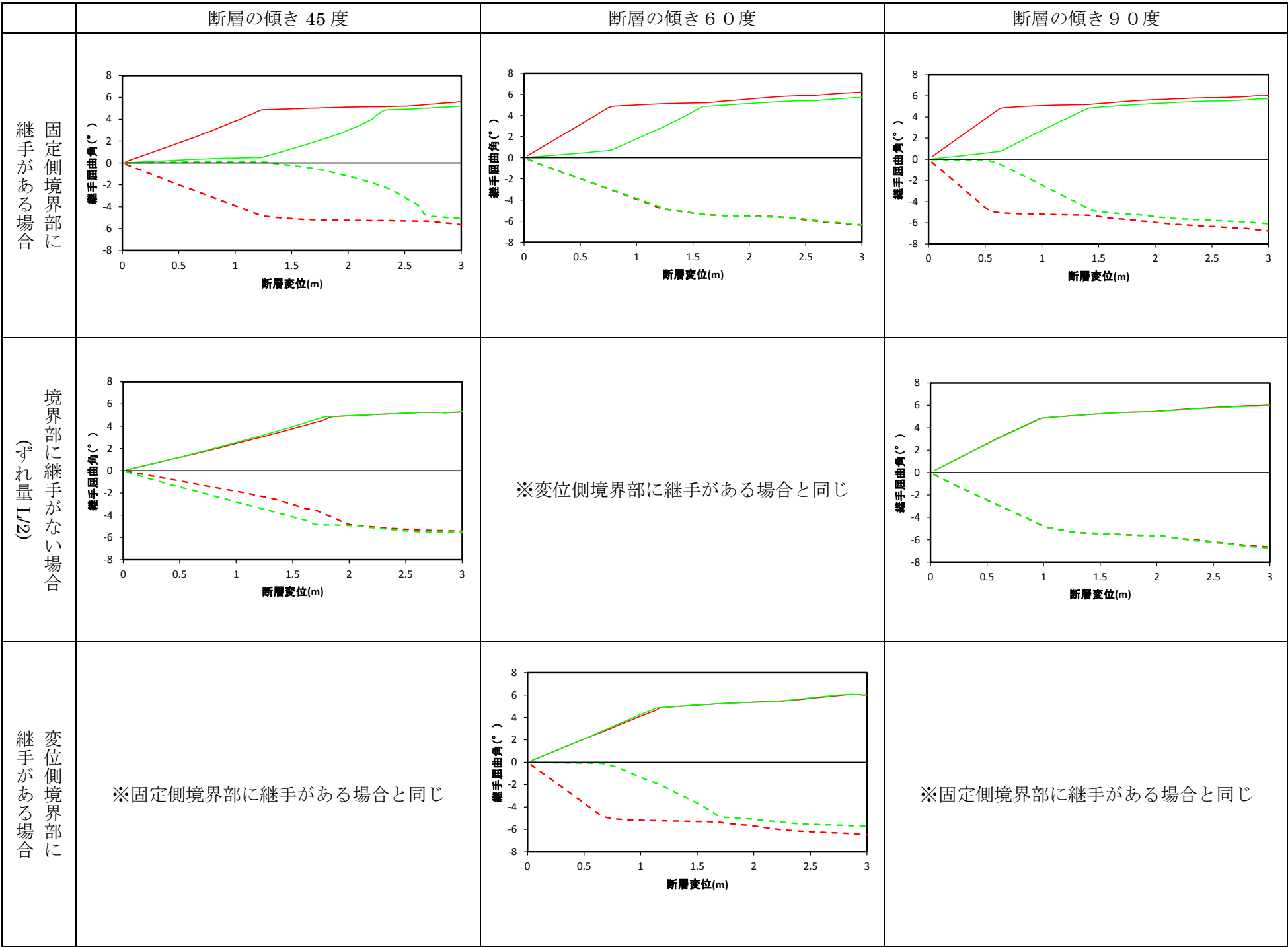
付図-3 (1) 継手屈曲角の解析結果（呼び径 75、管長 4m（定尺））



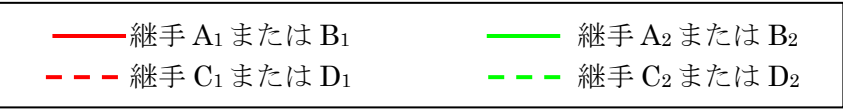
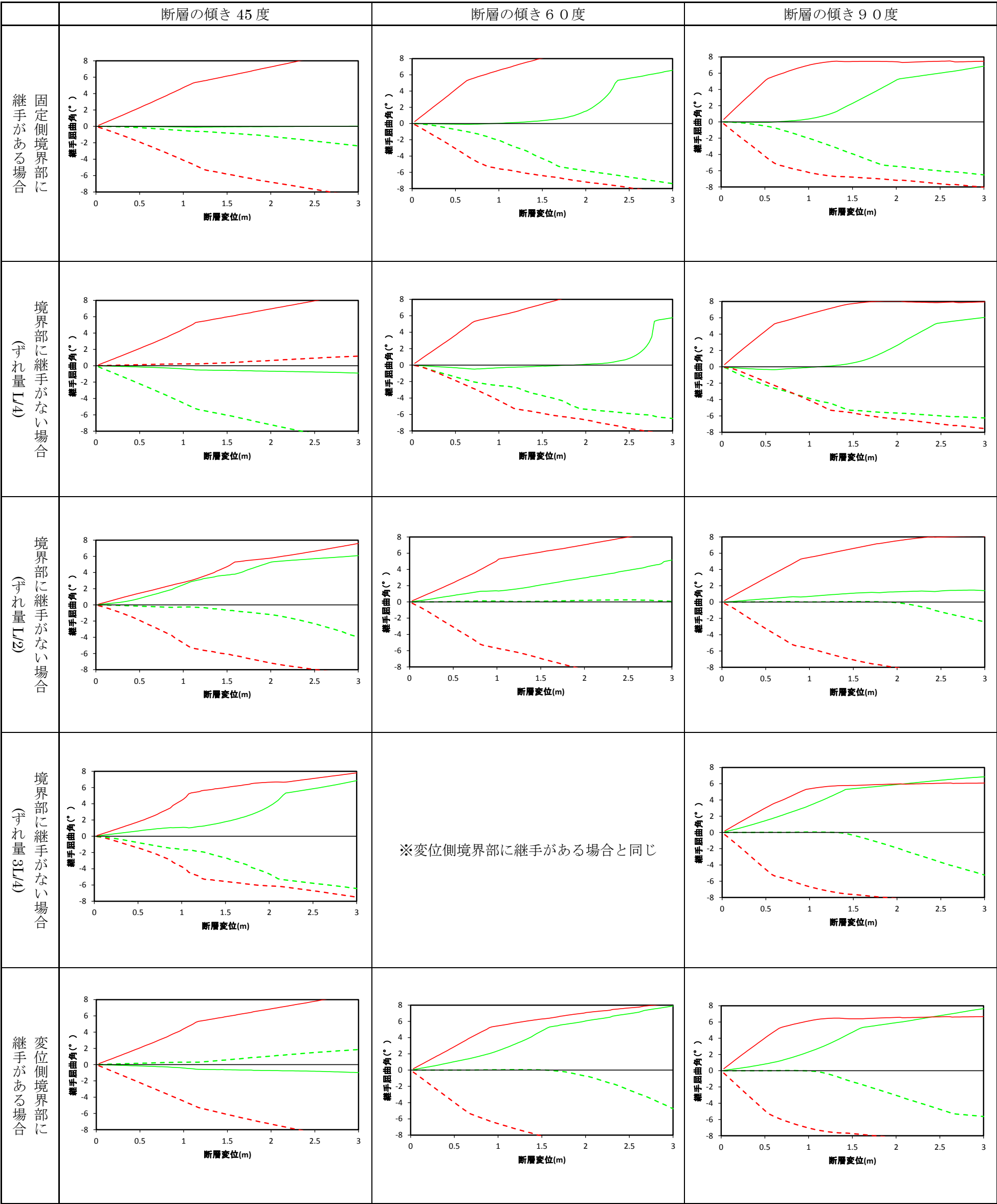
付図-3 (2) 継手屈曲角の解析結果（呼び径 75、管長 2m（定尺×1/2））



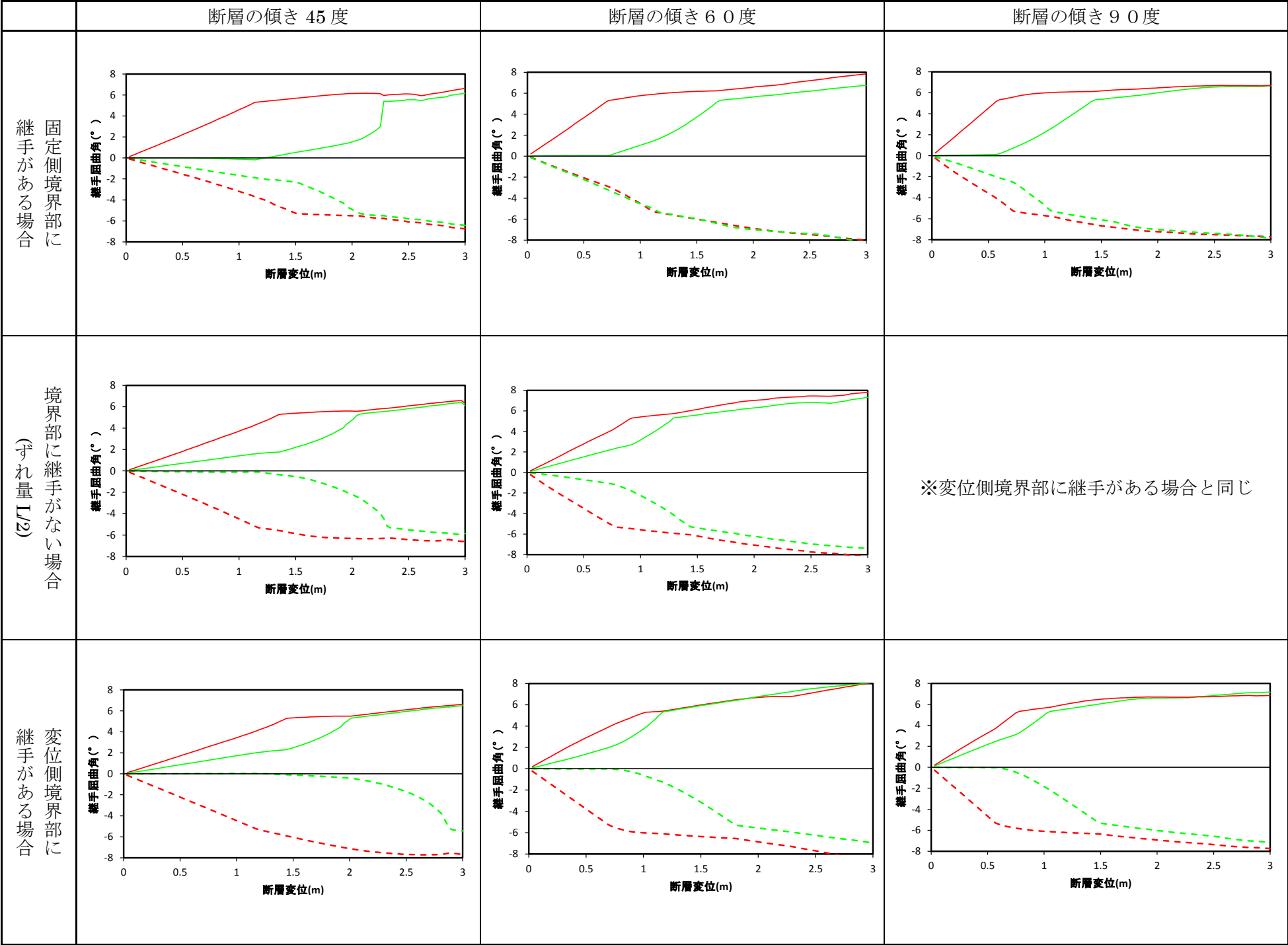
付図-3 (3) 継手屈曲角の解析結果（呼び径 75、管長 1m）



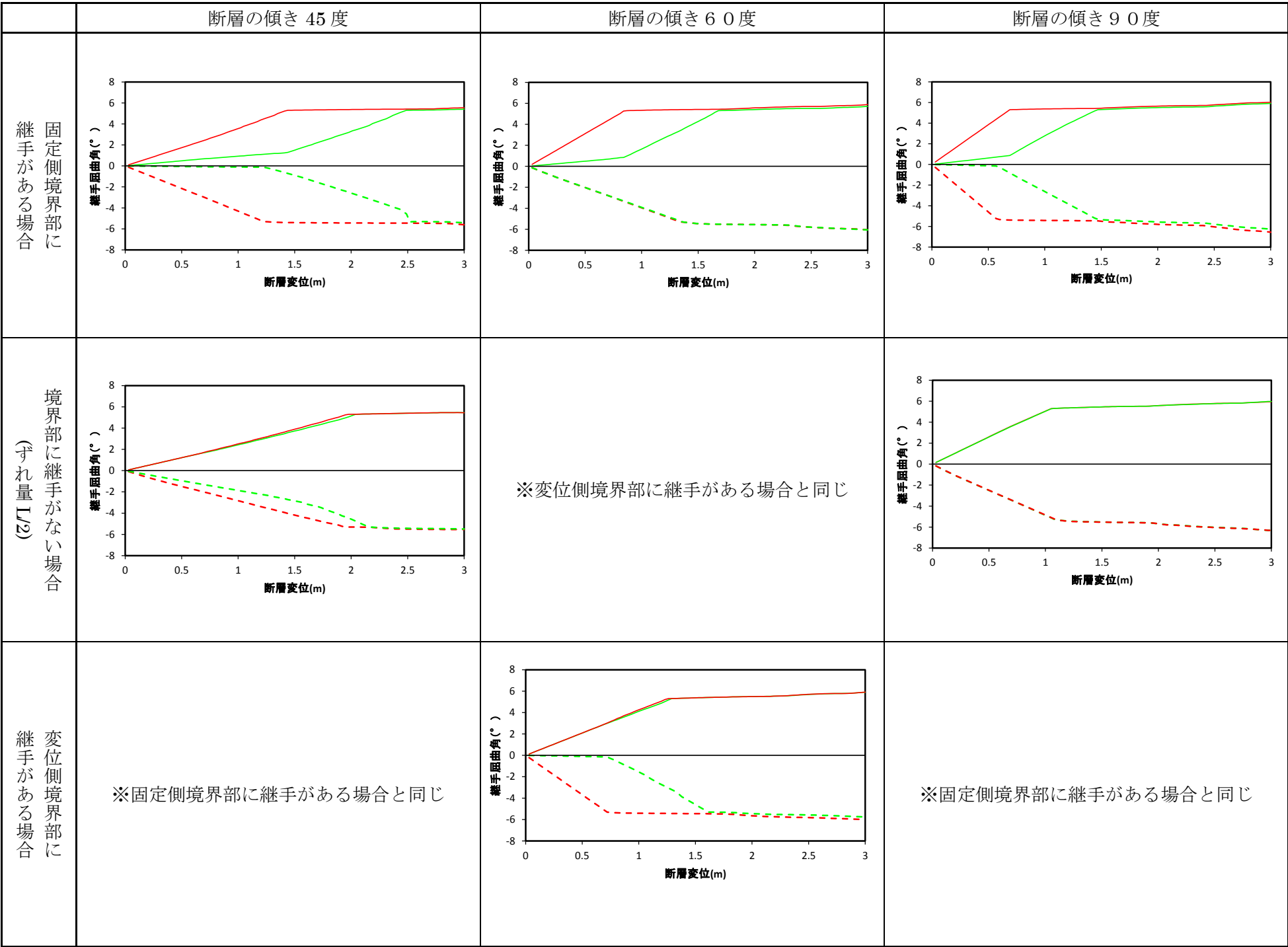
付図-4 (1) 継手屈曲角の解析結果（呼び径 250、管長 5m（定尺））



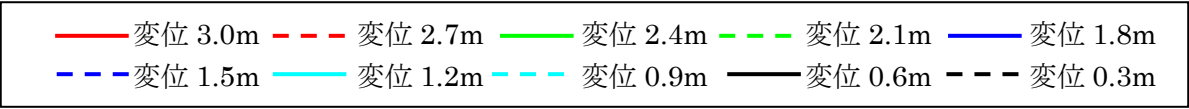
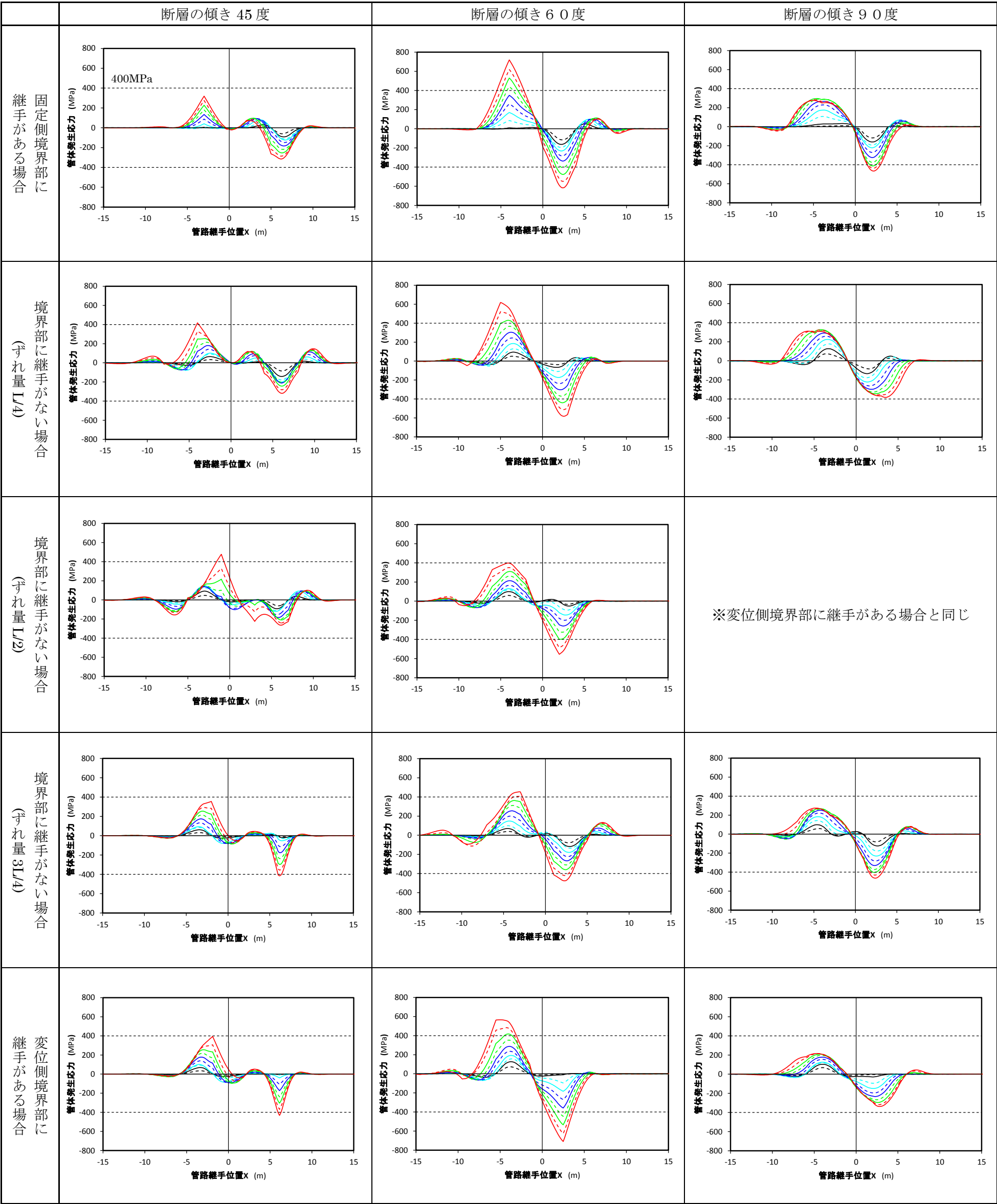
付図-4 (2) 継手屈曲角の解析結果（呼び径 250、管長 2.5m（定尺×1/2））



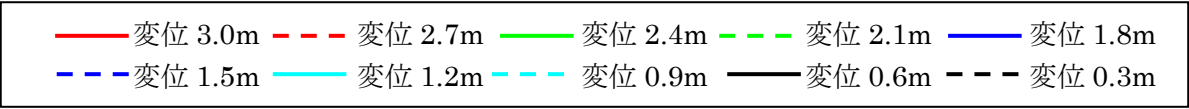
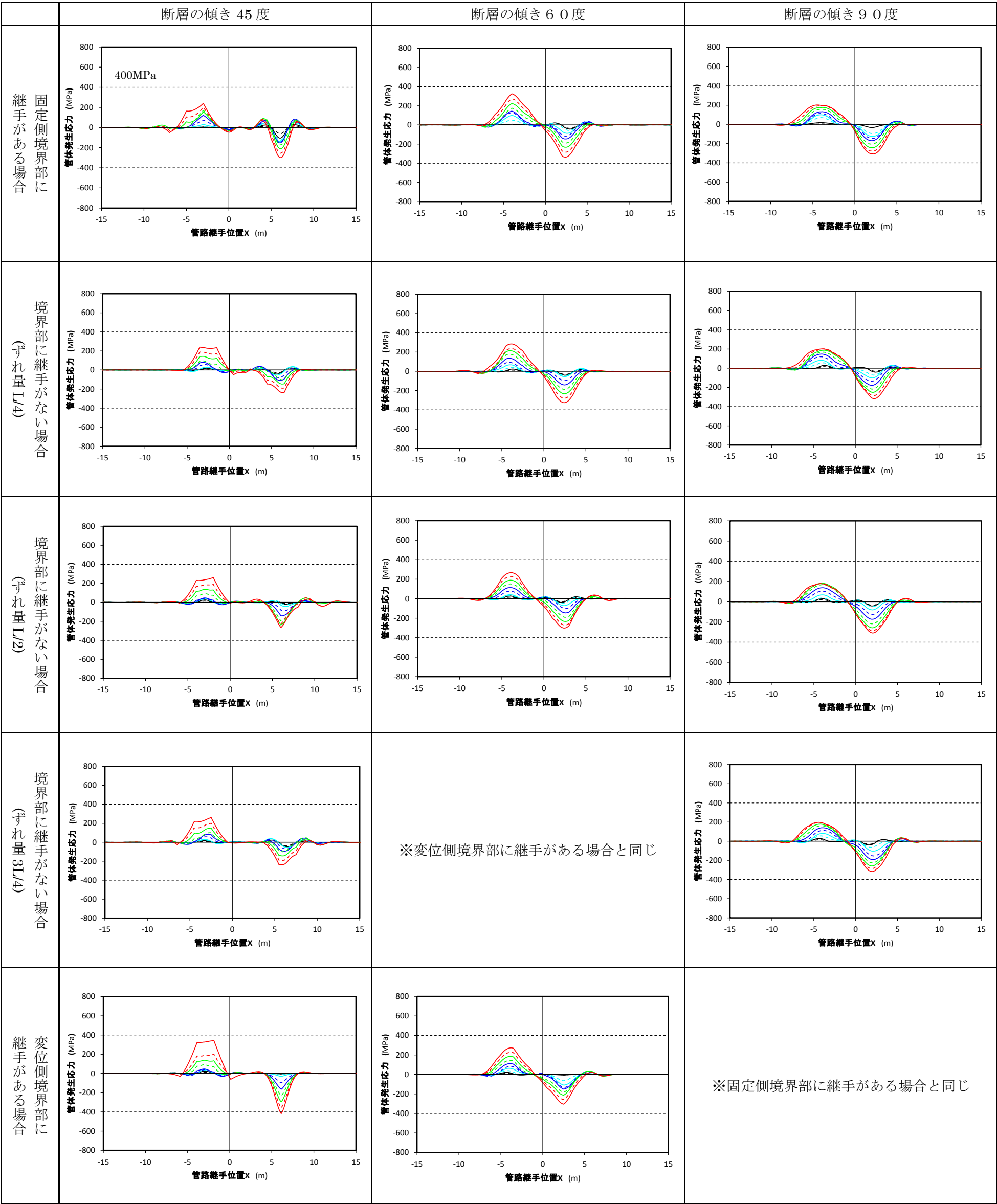
付図-4 (3) 継手屈曲角の解析結果（呼び径 250、管長 1m）



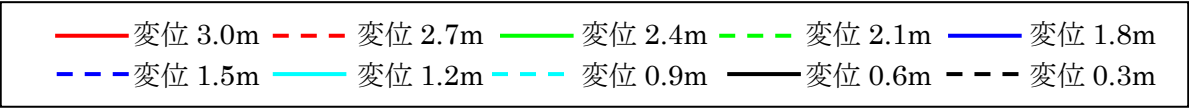
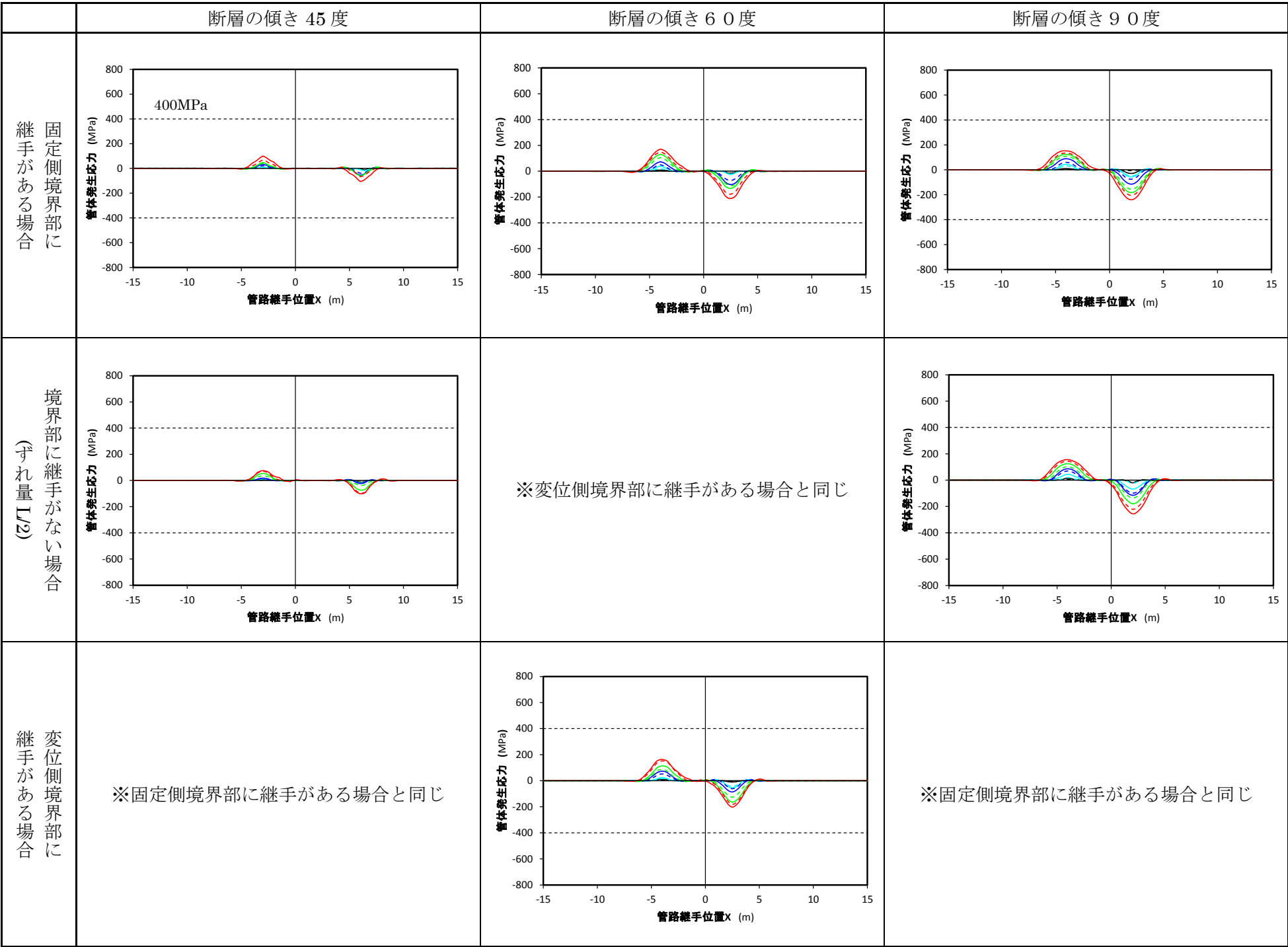
付図-5 (1) 管体発生応力の解析結果（呼び径 75、管長 4m（定尺））



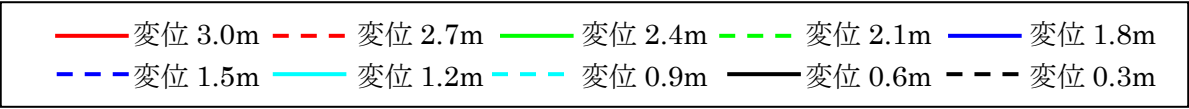
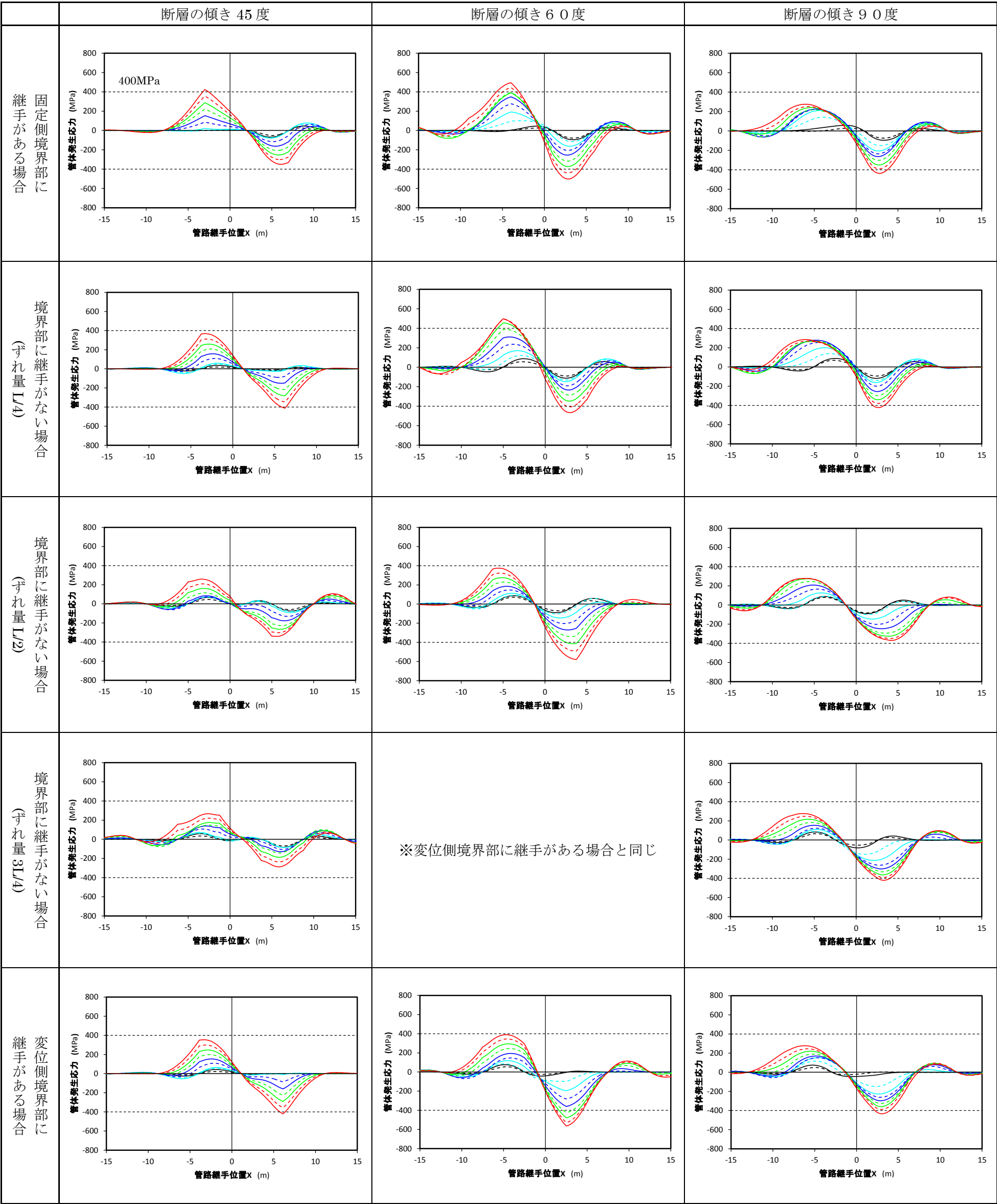
付図-5 (2) 管体発生応力の解析結果（呼び径 75、管長 2m（定尺×1/2））



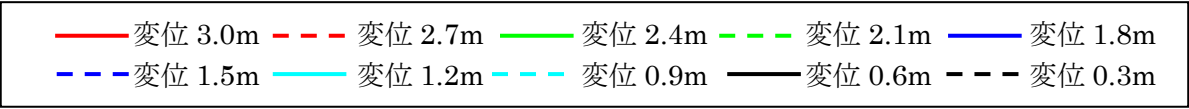
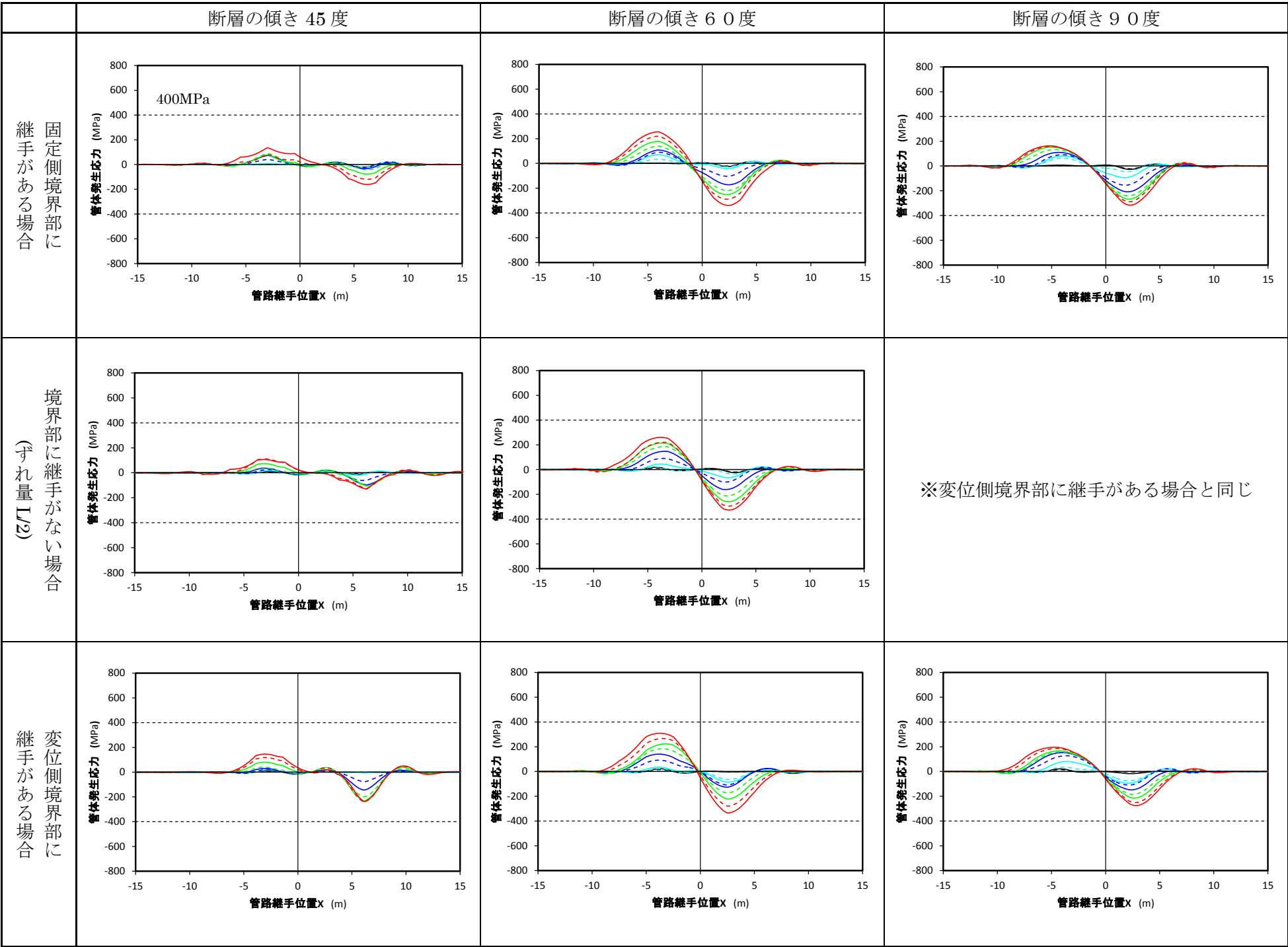
付図-5 (3) 管体発生応力の解析結果（呼び径 75、管長 1m）



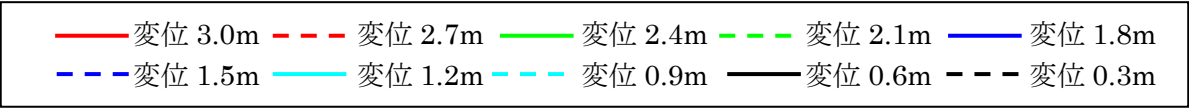
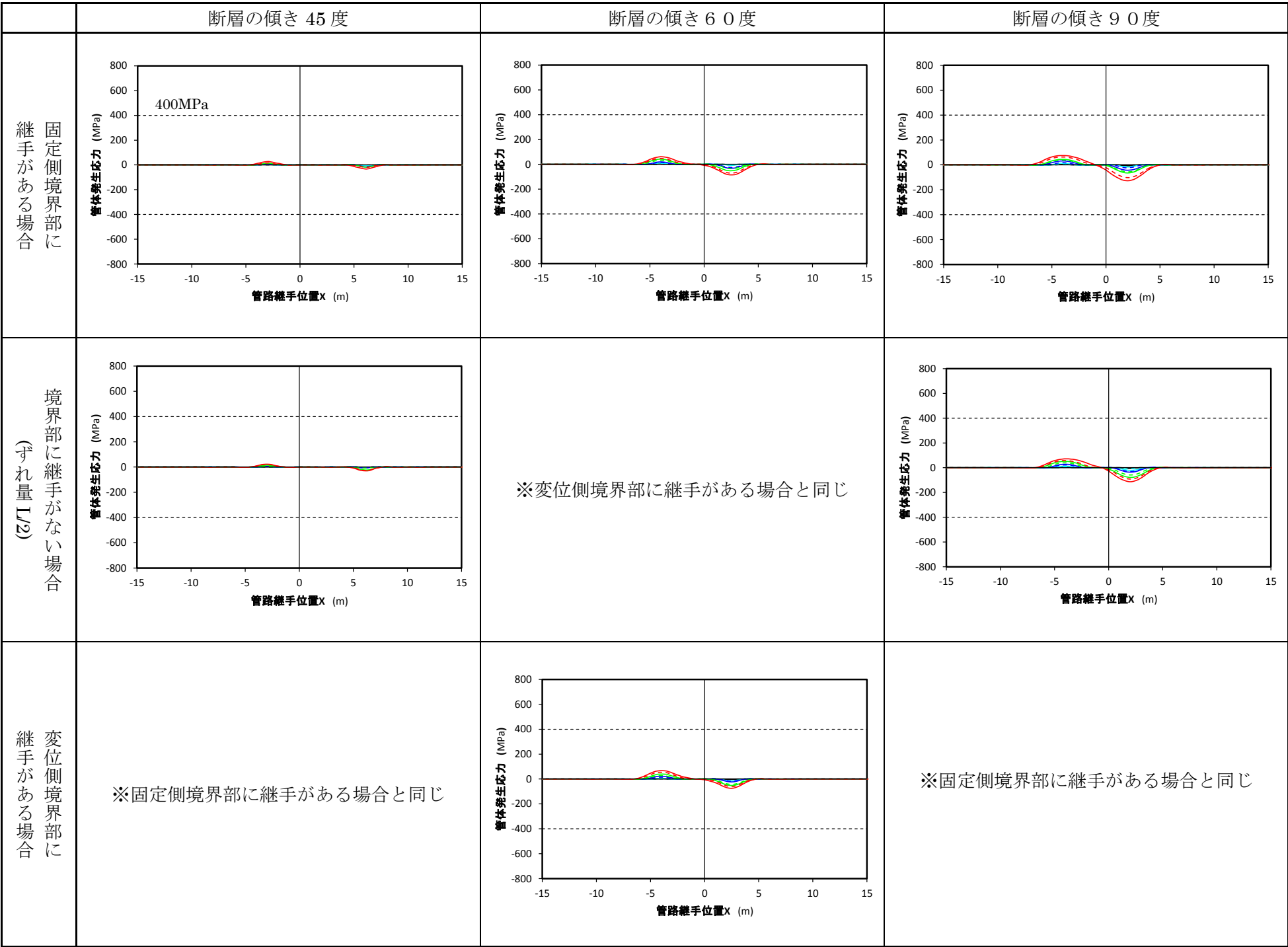
付図-6 (1) 管体発生応力の解析結果（呼び径 250、管長 5m（定尺））



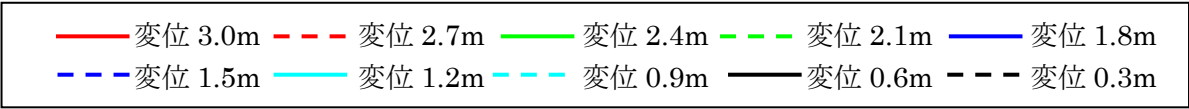
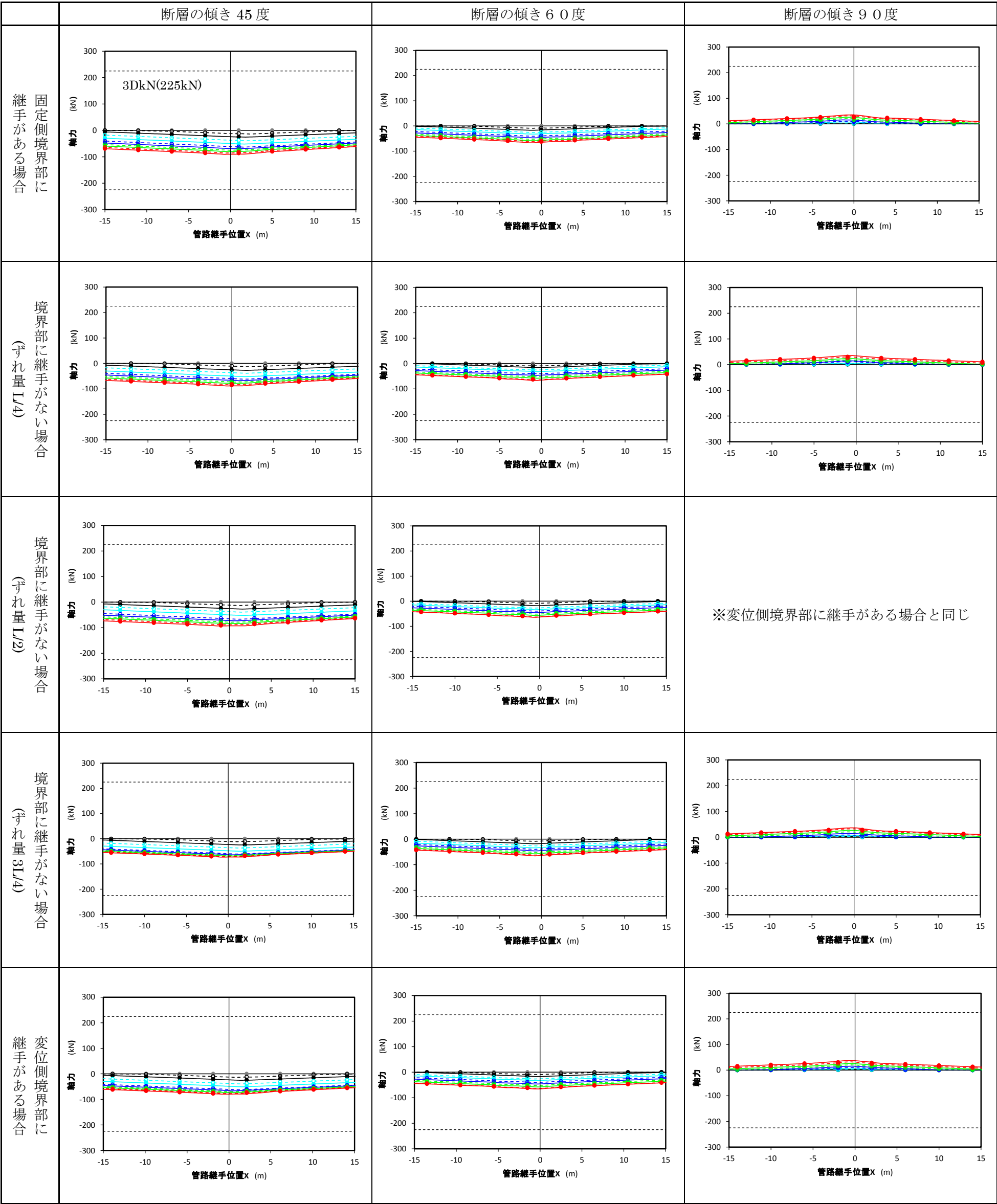
付図-6 (2) 管体発生応力の解析結果（呼び径 250、管長 2.5m（定尺×1/2））



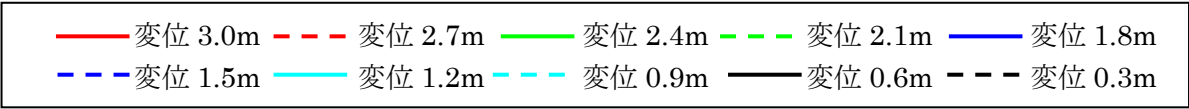
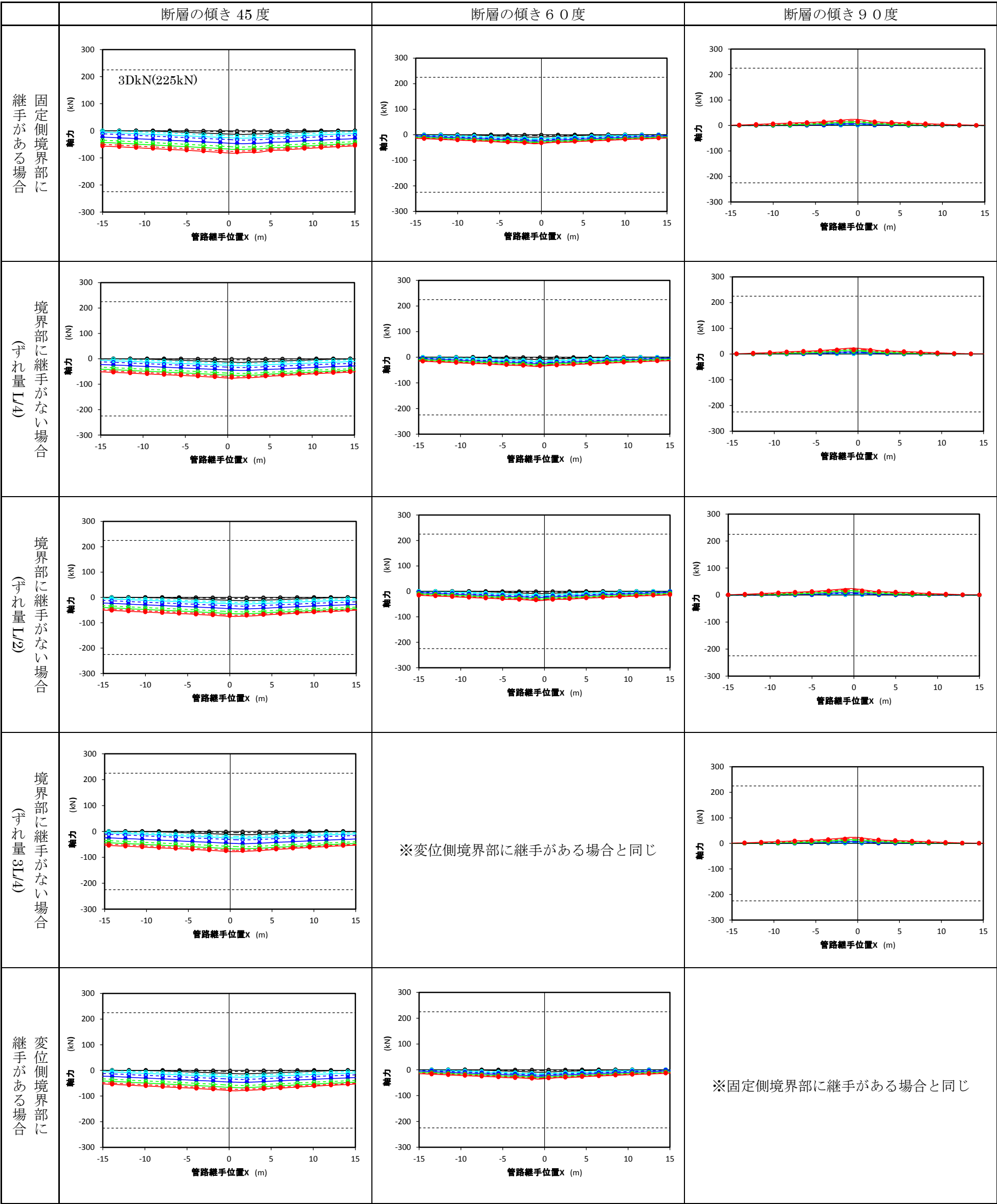
付図-6 (3) 管体発生応力の解析結果（呼び径 250、管長 1m）



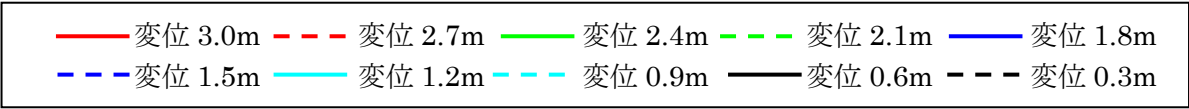
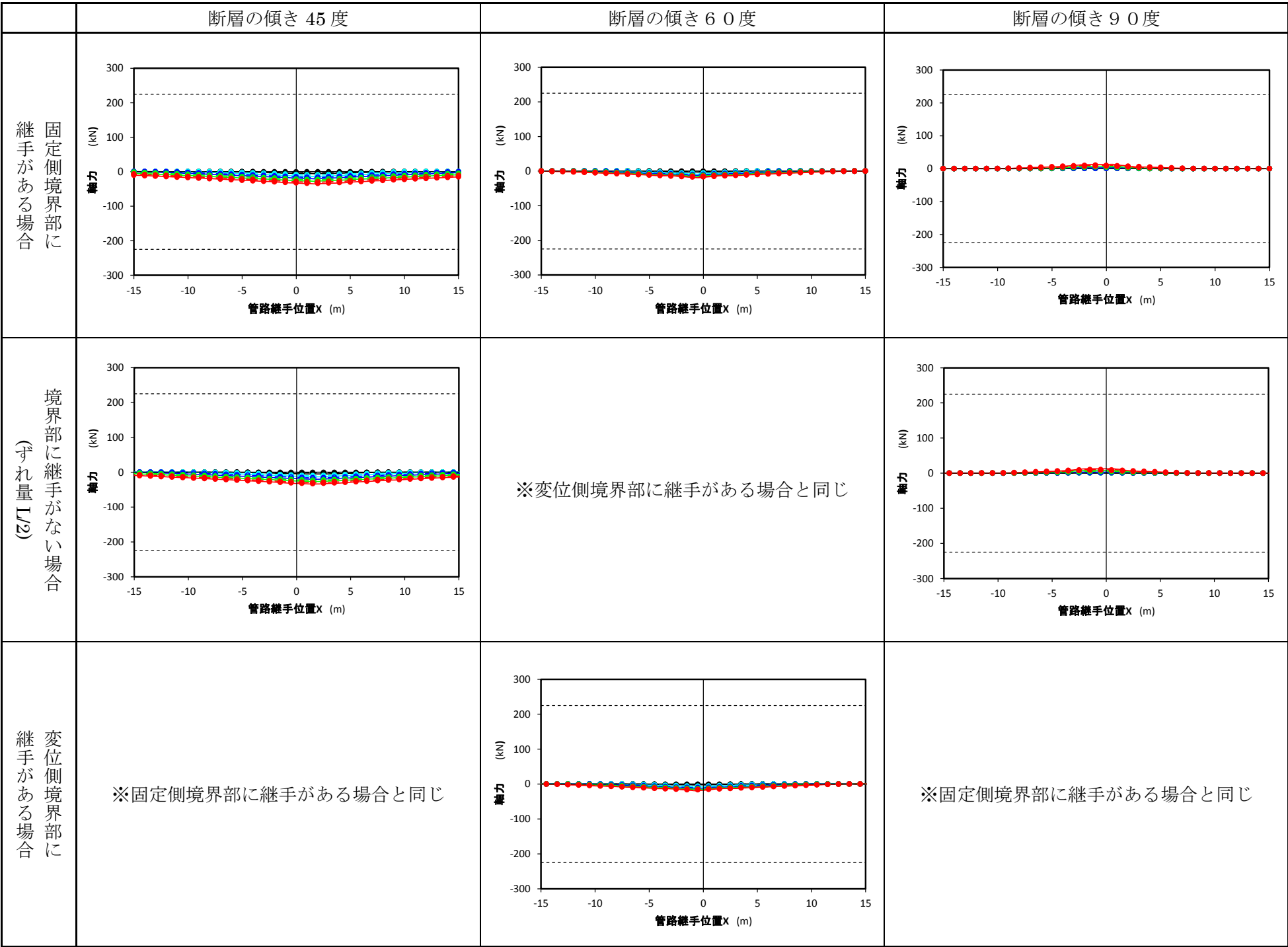
付図-7 (1) 軸力の解析結果（呼び径 75、管長 4m（定尺））



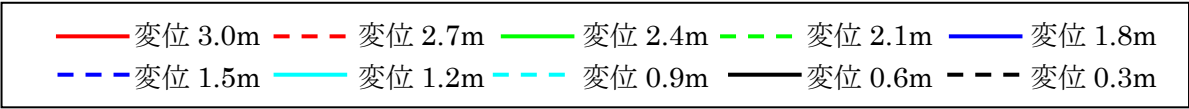
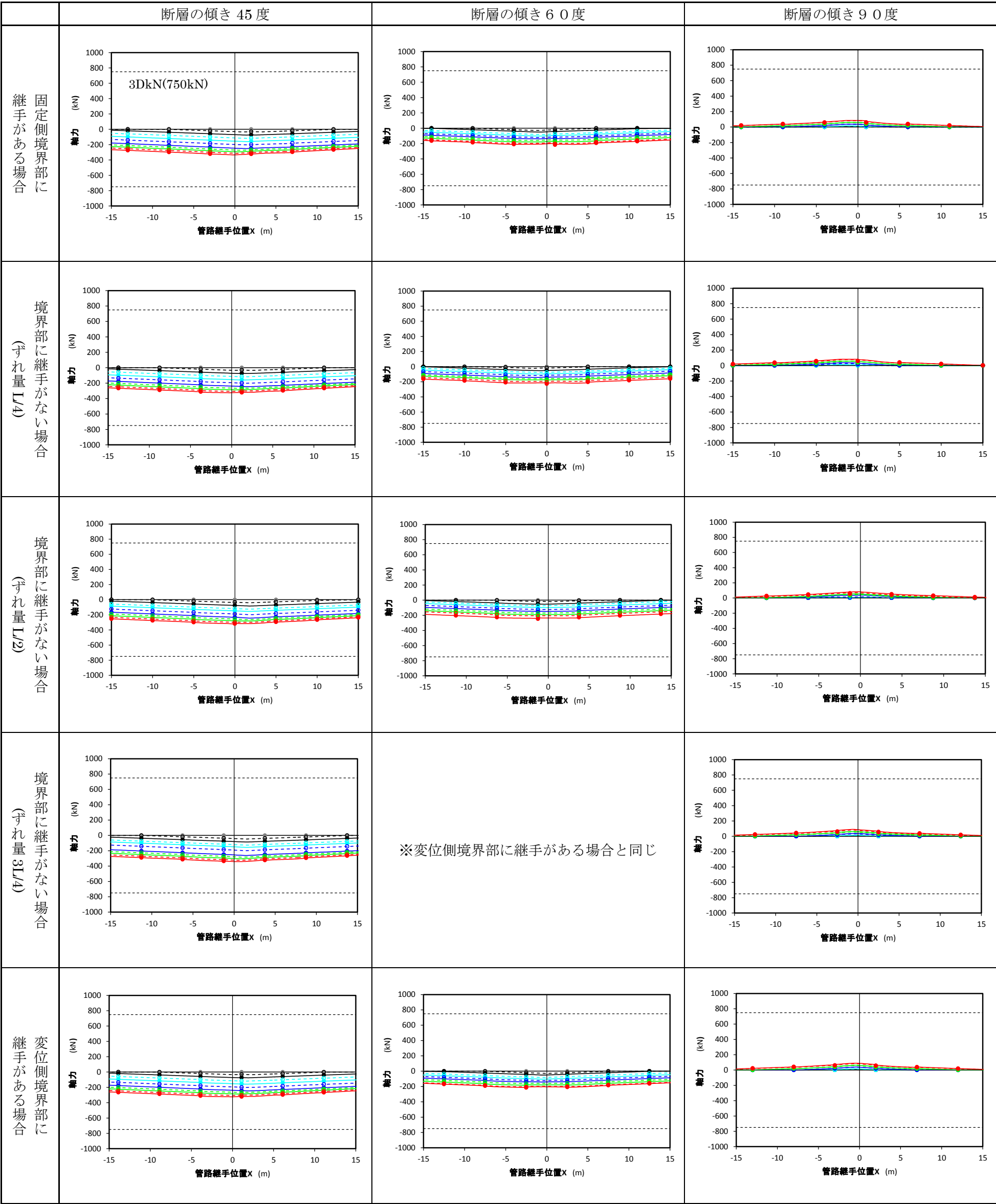
付図-7 (2) 軸力の解析結果（呼び径 75、管長 2m（定尺×1/2））



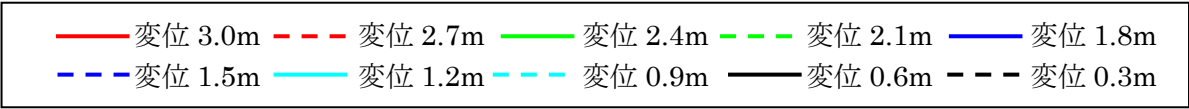
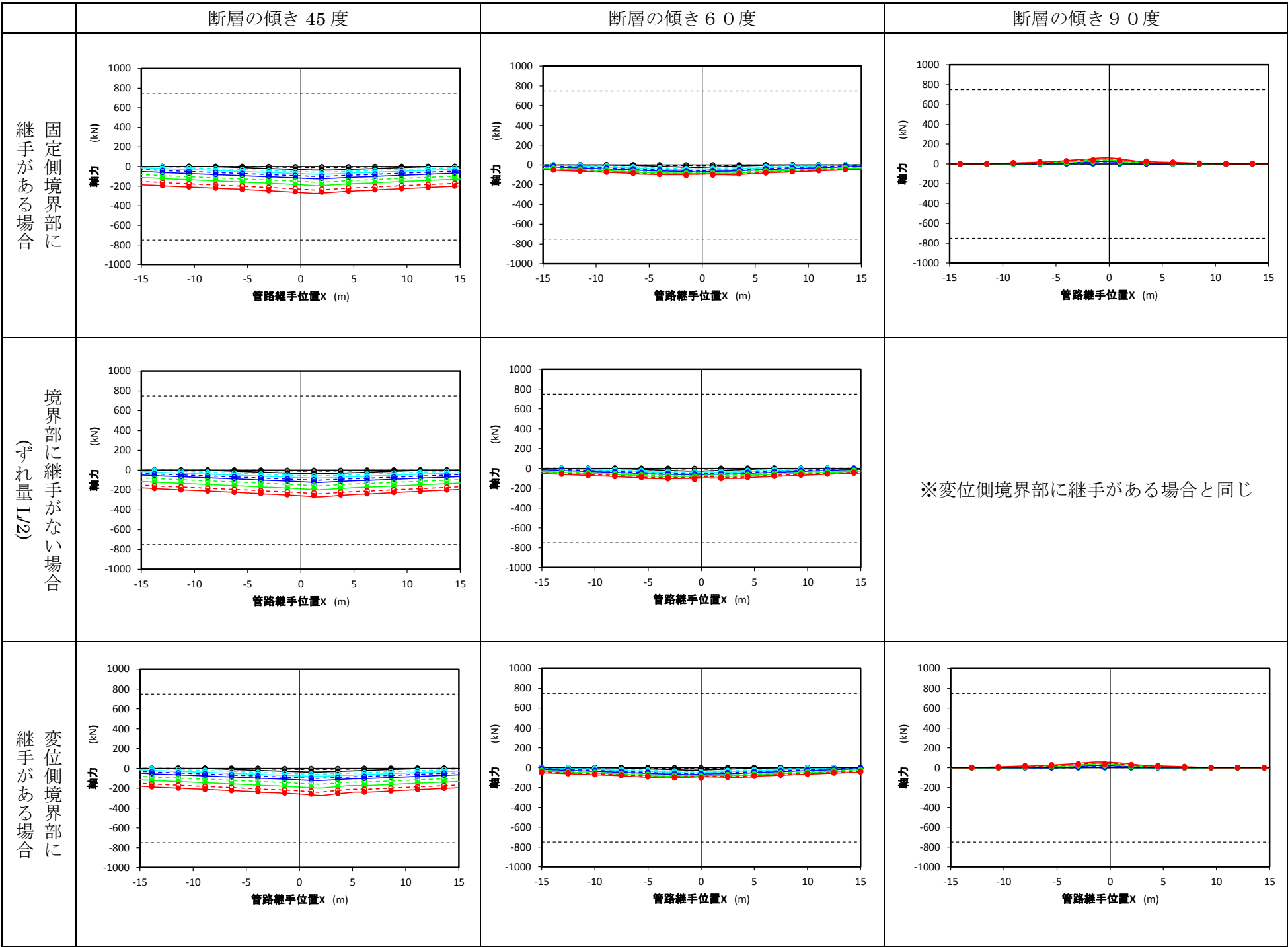
付図-7 (3) 軸力の解析結果（呼び径 75、管長 1m）



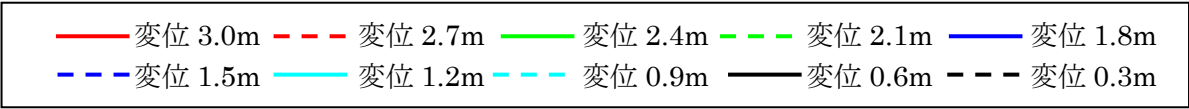
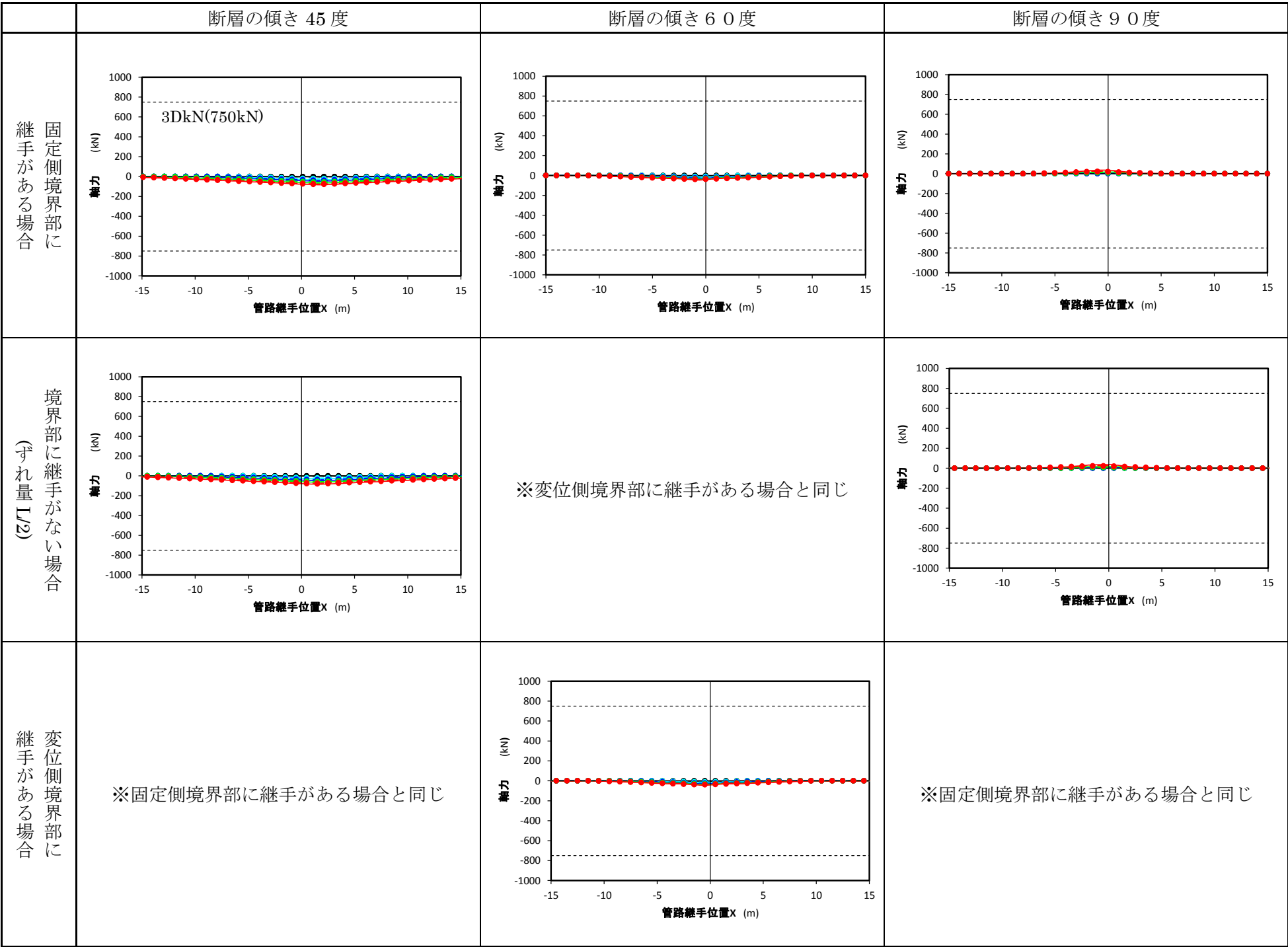
付図-8 (1) 軸力の解析結果（呼び径 250、管長 5m（定尺））



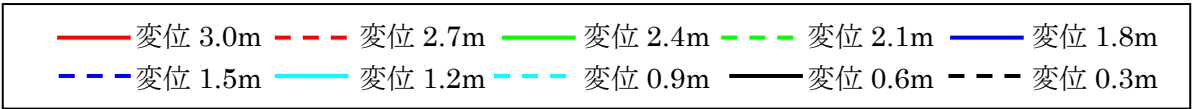
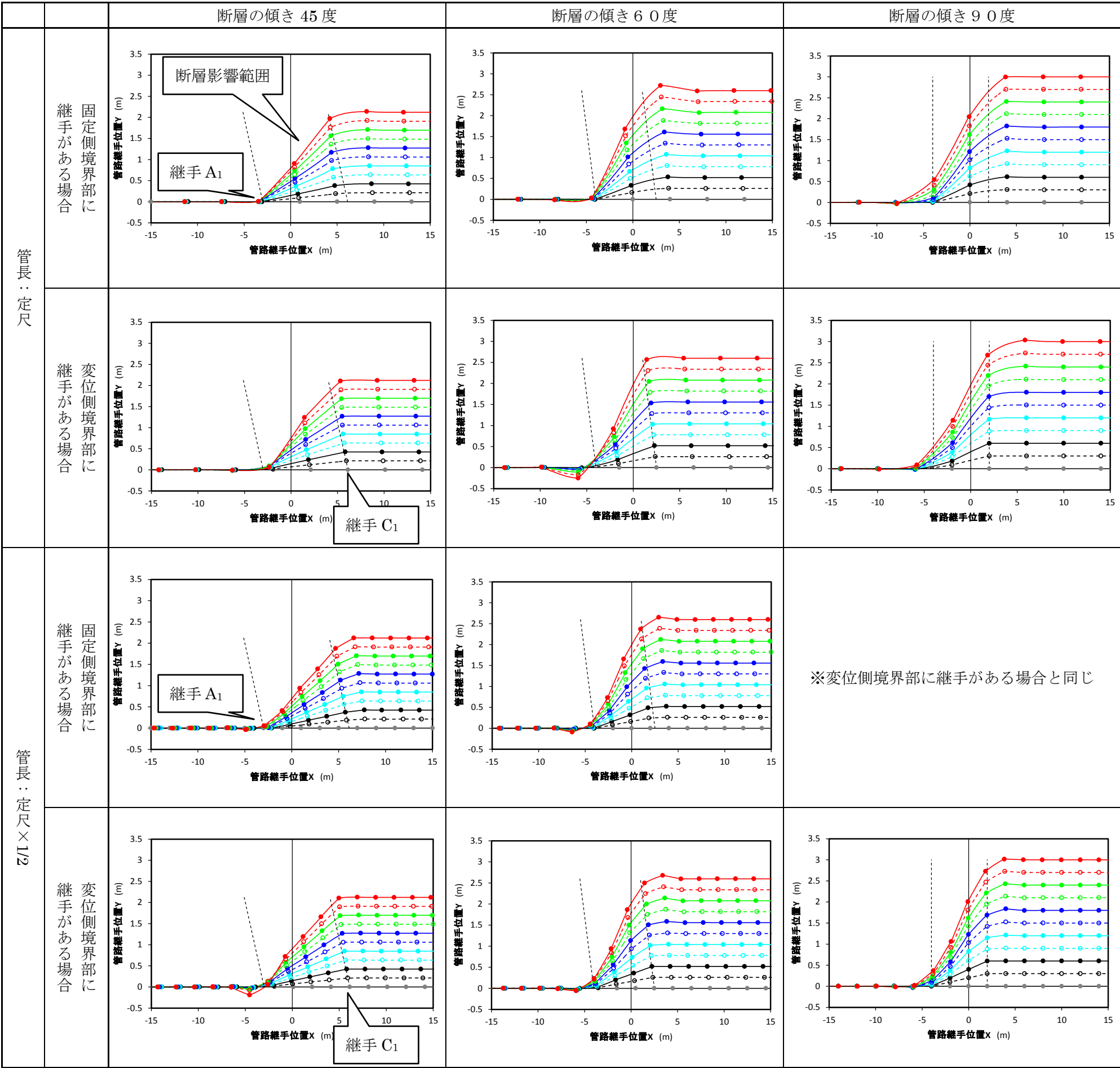
付図-8 (2) 軸力の解析結果（呼び径 250、管長 2.5m（定尺×1/2））



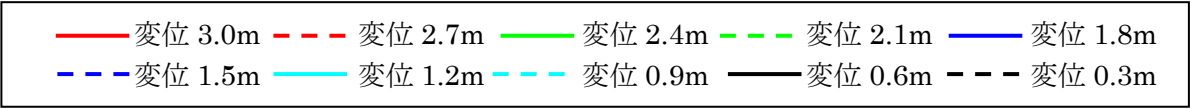
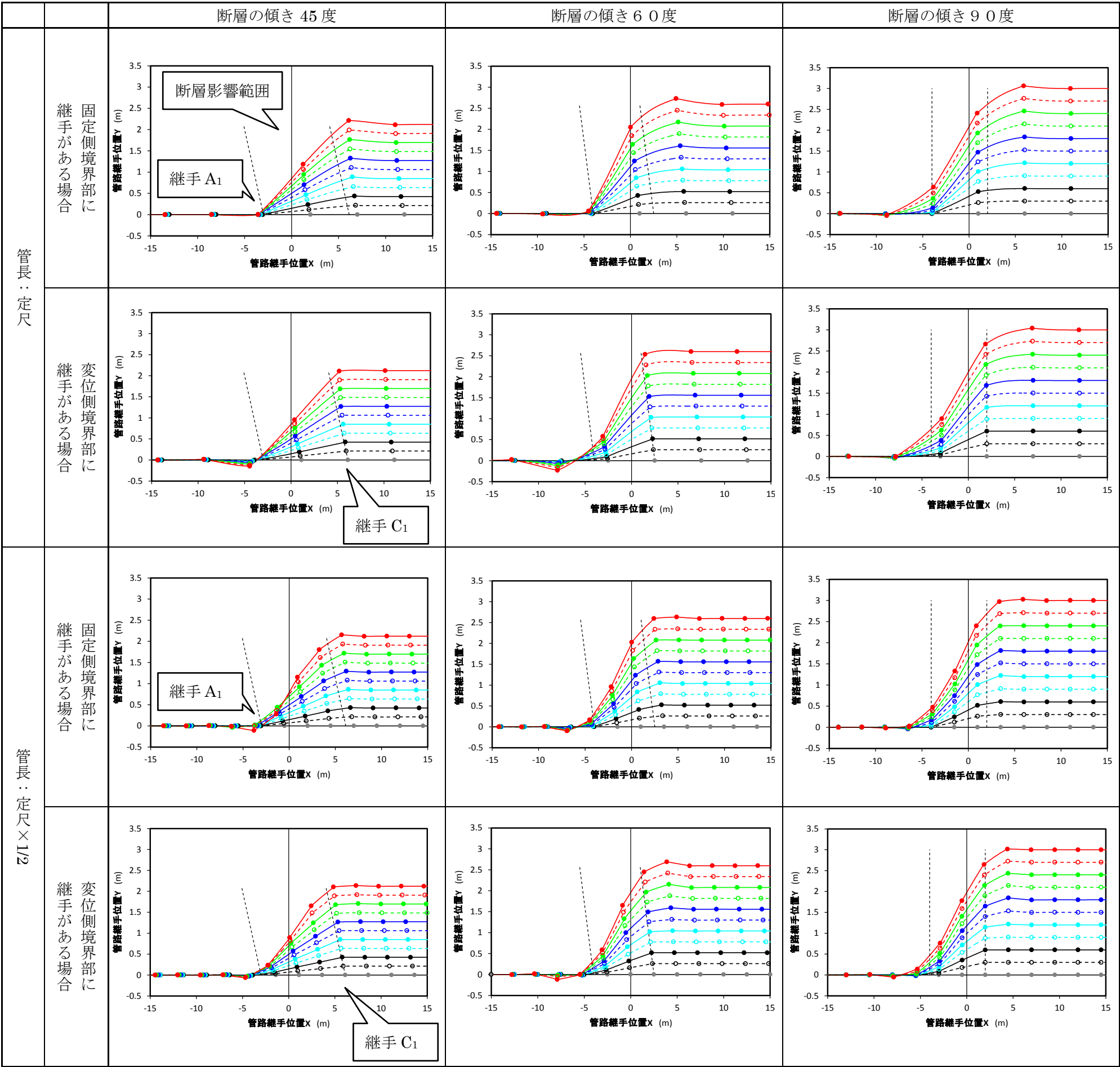
付図-8 (3) 軸力の解析結果（呼び径 250、管長 1m）



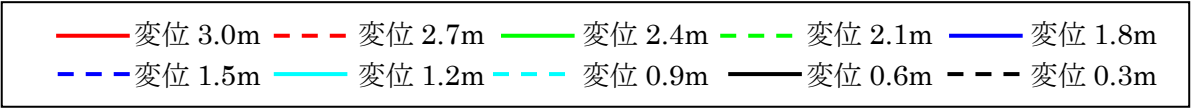
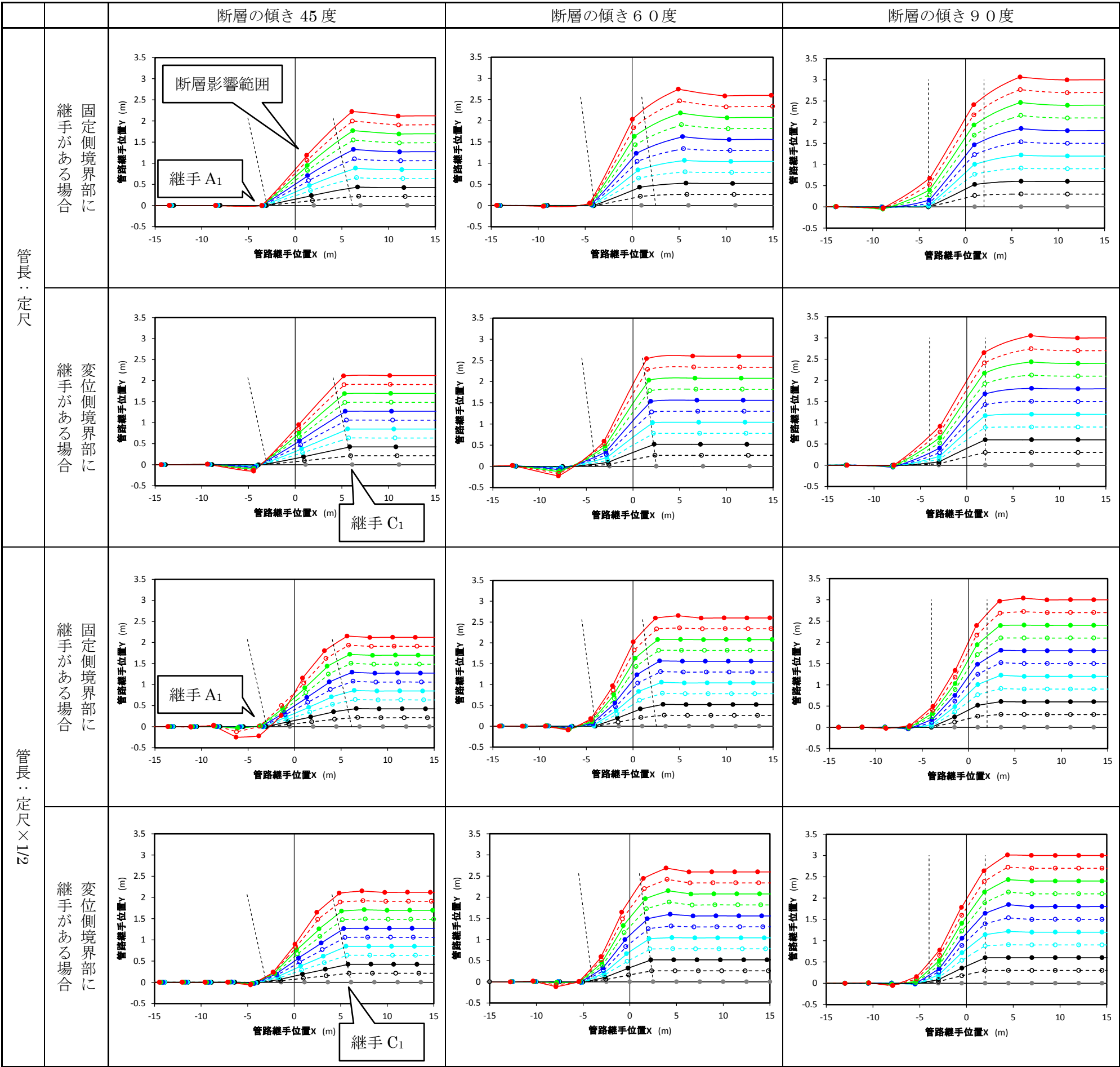
付図-9 管路挙動の解析結果（呼び径 100）



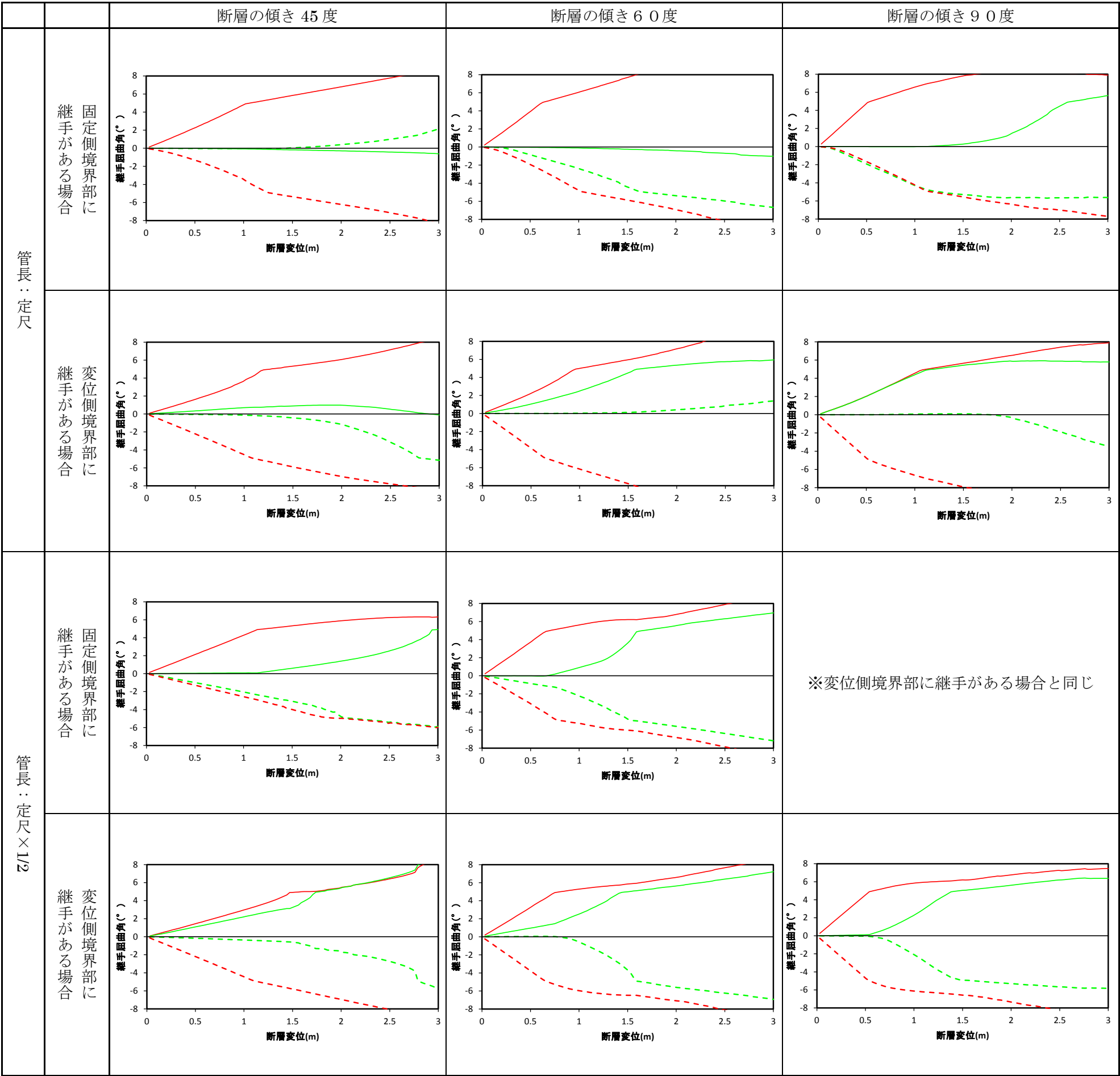
付図-10 管路挙動の解析結果（呼び径 150）



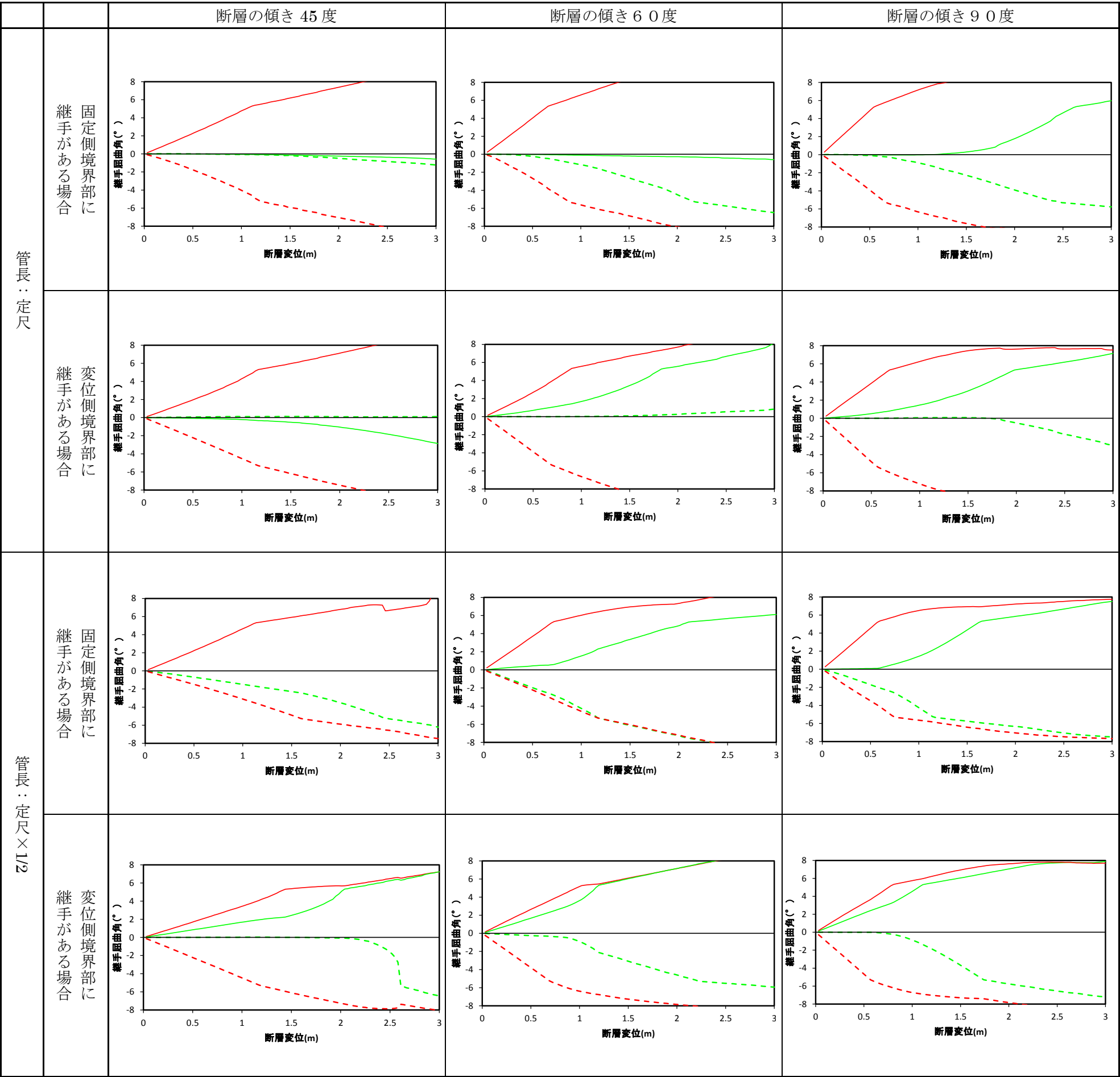
付図-11 管路挙動の解析結果（呼び径 200）



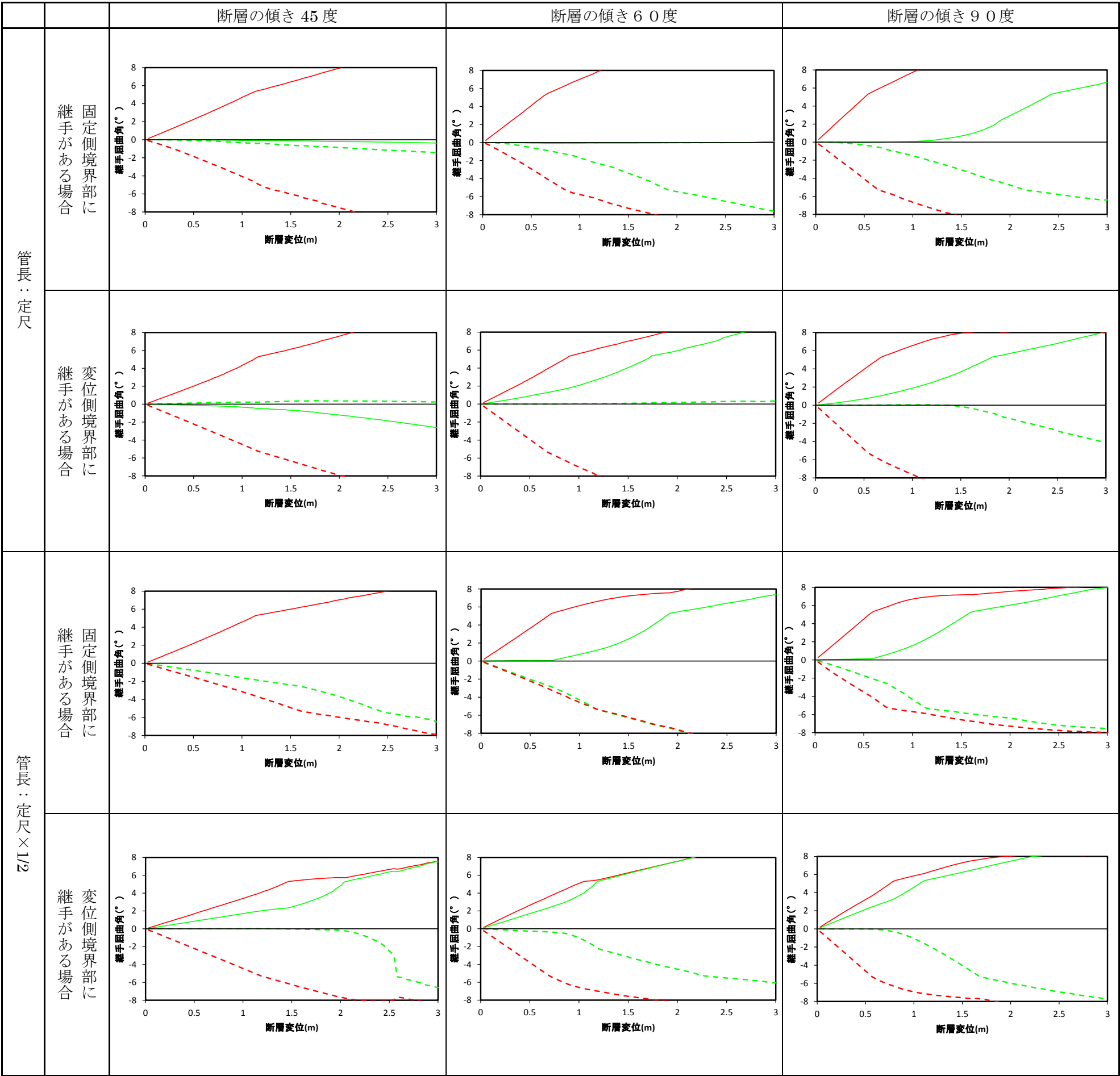
付図-12 継手屈曲角の解析結果（呼び径 100）



付図-13 継手屈曲角の解析結果（呼び径 150）



付図-14 継手屈曲角の解析結果（呼び径 200）



付表-1 継手屈曲角の推定結果一覧

呼び径	管長 (m)	断層傾き (°)	沖積層 厚さ (m)	影響範囲 W (m)	管路影響 範囲W ₀ (m)	境界部	断層変位3m時の 継手屈曲角		8° 屈曲時の 断層変位		推定 k値
							【解析値】 (°)	【推定値】 (°)	【解析値】 (m)	【推定値】 (m)	
75	4	45	10	7	9.12	固定	7.90	8.33	3.0以上	2.82	0.165
						変位	8.38	8.84	2.76	2.61	0.155
		60	10	5	6.5	固定	10.77	12.60	1.95	1.62	0.210
						変位	10.69	13.32	1.89	1.56	0.200
		90	10	6	6	固定	7.18	11.82	3.0以上	1.56	0.225
						変位	8.25	12.49	2.25	1.47	0.215
	2	45	10	7	9.12	固定	6.77	7.56	3.0以上	3.0以上	0.090
						変位	8.26	8.58	2.82	2.70	0.080
		60	10	5	6.5	固定	8.16	8.29	2.88	2.79	0.135
						変位	8.41	9.73	2.76	2.19	0.125
		90	10	6	6	固定	6.96	6.82	3.0以上	3.0以上	0.150
						変位	8.15	8.15	2.82	2.82	0.140
100	4	45	10	7	9.12	固定	8.68	9.36	2.61	2.46	0.145
						変位	8.55	9.87	2.64	2.31	0.135
		60	10	5	6.5	固定	12.74	14.04	1.62	1.47	0.190
						変位	12.84	14.76	1.59	1.41	0.180
		90	10	6	6	固定	8.38	13.15	1.65	1.38	0.205
						変位	9.45	13.82	1.56	1.32	0.195
	2	45	10	7	9.12	固定	6.32	9.61	3.0以上	2.37	0.070
						変位	9.16	10.65	2.49	2.16	0.060
		60	10	5	6.5	固定	9.00	11.17	2.55	1.86	0.115
						変位	9.28	12.61	2.43	1.62	0.105
		90	10	6	6	固定	7.47	9.49	3.0以上	2.10	0.130
						変位	8.91	10.82	2.34	1.74	0.120
150	5	45	10	7	9.12	固定	9.79	9.94	2.25	2.25	0.175
						変位	9.75	10.33	2.22	2.16	0.165
		60	10	5	6.5	固定	14.03	15.36	1.38	1.32	0.220
						変位	13.95	15.91	1.35	1.29	0.210
		90	10	6	6	固定	9.03	14.43	1.32	1.23	0.235
						変位	10.26	14.95	1.23	1.20	0.225
	2.5	45	10	7	9.12	固定	8.88	8.95	2.91	2.55	0.100
						変位	8.03	9.74	2.97	2.31	0.090
		60	10	5	6.5	固定	9.51	11.44	2.31	1.74	0.145
						変位	10.02	12.56	2.13	1.56	0.135
		90	10	6	6	固定	7.74	9.96	3.0以上	1.92	0.160
						変位	9.03	11.02	2.10	1.65	0.150
200	5	45	10	7	9.12	固定	11.05	11.51	2.01	1.98	0.135
						変位	10.93	11.91	2.01	1.92	0.125
		60	10	5	6.5	固定	16.60	17.58	1.23	1.20	0.180
						変位	16.53	18.14	1.20	1.17	0.170
		90	10	6	6	固定	9.35	16.52	1.11	1.11	0.195
						変位	11.61	17.04	1.08	1.08	0.185
	2.5	45	10	7	9.12	固定	9.16	12.11	2.91	1.89	0.060
						変位	8.32	12.90	2.19	1.83	0.050
		60	10	5	6.5	固定	10.28	15.91	2.10	1.29	0.105
						変位	10.98	17.03	1.80	1.23	0.095
		90	10	6	6	固定	8.14	14.17	2.64	1.26	0.120
						変位	9.75	15.22	1.86	1.17	0.110
250	5	45	10	7	9.12	固定	9.54	9.54	2.34	2.34	0.190
						変位	9.51	9.74	2.31	2.31	0.180
		60	10	5	6.5	固定	10.26	14.52	1.47	1.38	0.235
						変位	10.95	15.08	1.44	1.35	0.225
		90	10	6	6	固定	7.47	13.64	3.0以上	1.29	0.250
						変位	9.13	14.17	1.74	1.26	0.240
	2.5	45	10	7	9.12	固定	6.63	7.77	3.0以上	3.0以上	0.115
						変位	7.67	8.56	3.0以上	2.70	0.105
		60	10	5	6.5	固定	7.84	9.76	3.0以上	2.10	0.160
						変位	8.64	10.88	2.64	1.83	0.150
		90	10	6	6	固定	6.69	8.38	3.0以上	2.64	0.175
						変位	7.74	9.43	3.0以上	2.10	0.165