

国内で発生した地盤変状が耐震継手ダクタイトイル鉄管の挙動に及ぼす影響分析

森本 皓一¹・宮島 昌克²・今川 暢人³

¹ 正会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail: k_morimoto@kurimoto.co.jp

² 正会員 金沢大学教授 理工研究域 地球社会基盤学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

³ 学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail: masato8623@stu.kanazawa-u.ac.jp

国内では、地震や大規模降雨に起因して大規模な地盤変状が発生し、埋設された水道管にも大きな被害を及ぼしてきた。耐震継手ダクタイトイル鉄管は継手部に伸縮、屈曲、離脱防止性能を有するため、大規模な地盤変状を受けても管路が損傷せず通水機能を維持した実績があるが、その事例数は限られる。地盤変状は液状化や盛土崩壊といったタイプ別に分類され、埋設物の地盤変状対策もタイプ別に異なる対策が実施されてきた。耐震継手管であれば複数の継手が伸縮、屈曲して地盤変状に追従するため、異なるタイプの地盤変状を受けても管路挙動は同様の傾向となる可能性がある。ただし、地盤変状をタイプ別に分類せずに耐震継手管の挙動から比較検討した研究は数少ない。本研究では、数値解析により地盤変状を受けた管路挙動を予測し、それらの結果を基に異なるタイプの地盤変状事例を総合的に扱うことが可能か検討した。

Key Words : *ground deformation, ductile iron pipe, pipeline behavior analysis, liquefaction, fault, embankment failure*

1. はじめに

日本国内では、地震や台風による大規模降雨に起因して地盤変状が数多く発生し、家屋の倒壊やライフラインの寸断等、生活に甚大な影響を及ぼしてきた。近年、地震や大規模降雨の頻度が高まってきており、それに伴い大規模な地盤変状の発生リスクも高まっている。

埋設された水道管は管路周辺地盤の挙動に大きな影響を受けるため、大規模な地盤変状により管体の破断や漏水が多く発生してきた。一方で、耐震継手ダクタイトイル鉄管は外力を継手部の伸縮または屈曲で吸収し、さらには離脱防止性能を有することから、大規模な地盤変状を受けても管路機能を維持した実績がある¹⁾²⁾。ただし、地盤変状が発生した地点に耐震継手管が埋設されていた事例は限られるため、大規模な地盤変状を受けた耐震継手管の挙動に関して、明らかでない点も数多い。

地盤変状は発生要因や発生地点の地形的特徴により液状化や盛土崩壊といったタイプ別に分類され、埋設物の地盤変状対策も地盤変状のタイプ別に異なる対策が実施されてきた³⁾。耐震継手管であればどういった外力を受

けても複数の継手が伸縮、屈曲して外力を吸収することには変わりはないため、異なるタイプの地盤変状を受けても管路挙動は同様の傾向となる可能性がある。このように、地盤変状をタイプ別に分類せずに、埋設された耐震継手管の挙動から比較検討した研究は数少ない。

異なるタイプの地盤変状を比較検討するにあたり、過去に発生した地盤変状事例であれば、多くの事例で地盤変位等の地盤変状に関する数値データが記録されている。また、管路の挙動検証のための一つの有効な方法である数値解析であれば、管路モデルに地盤変状データを与えることで、地盤変状を受けた管路の挙動を推測することが可能となる。

そこで本研究では、地盤変状発生地点に耐震継手管が埋設されていたものと想定して、地盤変状を受けた管路挙動を数値解析により予測し、それらの結果を分析することで、異なるタイプの地盤変状事例を総合的に扱うことが可能か検討した。さらに、特別な地盤変状対策が必要な場合を対象に、得られた知見に基づく検討方法の有効性を確認した。

表-1 分析対象とする地盤変状事例

(a) 液状化に起因する管軸地盤ひずみが最大となる事例⁴⁾

地震	液状化発生エリア	微地形区分	管軸方向		ケース名
			地盤ひずみ (%)	相対地盤変位 (m)	
新潟地震	海老ヶ瀬・大潟地区	旧河道	25.2	3.1	A1
日本海中部地震	能代市南部	砂丘	21.9	1.2	A2
新潟地震	松浜・下山・新川地区	自然堤防	20.3	5.1	A3
新潟地震	新潟駅	三角州・海岸低地	9.5	2.1	A4
日本海中部地震	能代市北部	砂丘	4.9	1.7	A5
新潟地震	新潟港	砂州・砂灘洲	4.7	1.3	A6
兵庫県南部地震	六甲アイランド	埋立地	3.8	1.3	A7
兵庫県南部地震	深江浜	埋立地	3.7	1.4	A8
兵庫県南部地震	西宮浜	埋立地	3.6	1.2	A9
兵庫県南部地震	ポートアイランド	埋立地	3.1	1.5	A10
兵庫県南部地震	芦屋浜	埋立地	2.9	1.2	A11
兵庫県南部地震	住吉浜・御影浜	埋立地	2.5	1.3	A12
新潟地震	信濃川下流	砂丘	2.0	2.1	A13
兵庫県南部地震	魚崎浜	埋立地	1.7	1.6	A14

(b) 液状化に起因する管軸直交地盤ひずみが最大となる事例

地震	液状化発生エリア	微地形区分	管軸直交方向		ケース名
			地盤ひずみ (%)	相対地盤変位 (m)	
日本海中部地震	能代市南部	砂丘	33.0	4.7	B1
新潟地震	海老ヶ瀬・大潟地区	旧河道	11.9	4.9	B2
新潟地震	松浜・下山・新川地区	自然堤防	9.8	2.5	B3
新潟地震	信濃川上流	三角州・海岸低地	8.5	3.4	B4
新潟地震	新潟駅	三角州・海岸低地	8.3	1.2	B5
新潟地震	新潟港	三角州・海岸低地	5.1	0.9	B6
新潟地震	信濃川下流	砂丘	4.2	4.5	B7
兵庫県南部地震	芦屋浜	埋立地	4.1	0.9	B8
兵庫県南部地震	深江浜	埋立地	3.2	1.8	B9
兵庫県南部地震	六甲アイランド	埋立地	2.8	1.0	B10
兵庫県南部地震	ポートアイランド	埋立地	2.7	1.3	B11
兵庫県南部地震	西宮浜	埋立地	2.5	2.0	B12
日本海中部地震	能代市北部	砂丘	1.7	0.2	B13
兵庫県南部地震	住吉浜・御影浜	埋立地	1.7	1.0	B14
兵庫県南部地震	魚崎浜	埋立地	1.2	1.4	B15

(c) 断層に起因する事例^{9)~11)}

地震	地震断層	微地形区分	合成地盤変位 (m)	交差角90°		交差角45° 正断層タイプ			交差角45° 逆断層タイプ		
				管軸直交方向地盤変位 (m)	ケース名	管軸方向地盤変位 (m)	管軸直交方向地盤変位 (m)	ケース名	管軸方向地盤変位 (m)	管軸直交方向地盤変位 (m)	ケース名
濃尾地震	根尾谷断層	山地	8.00	8.00	C1	5.66	5.66	D1	-	-	-
濃尾地震	水島断層	砂礫質台地	7.21	7.21	C2	5.10	5.10	D2	-	-	-
濃尾地震	梅原断層	谷底低地	5.28	5.28	C3	3.73	3.73	D3	-	-	-
隆羽地震	千屋断層	丘陵	4.00	4.00	C4	-	-	-	-2.83	2.83	E1
北丹後地震	高橋断層	谷底低地	3.25	3.25	C5	2.30	2.30	D4	-2.30	2.30	E2
濃尾地震	温見断層	山地	3.24	3.24	C6	2.29	2.29	D5	-2.29	2.29	E3
濃尾地震	黒津断層	谷底低地	3.00	3.00	C7	2.12	2.12	D6	-2.12	2.12	E4
隆羽地震	川舟断層	扇状地	2.80	2.80	C8	-	-	-	-1.98	1.98	E5
三河地震	横須賀断層	山地	2.79	2.79	C9	-	-	-	-1.97	1.97	E6
隆羽地震	太田断層	扇状地	2.47	2.47	C10	-	-	-	-1.75	1.75	E7
隆羽地震	白岩断層	扇状地	2.45	2.45	C11	-	-	-	-1.73	1.73	E8
三河地震	深溝断層	砂礫質台地	2.42	2.42	C12	-	-	-	-1.71	1.71	E9
北丹後地震	生野内断層	丘陵	2.29	2.29	C13	1.62	1.62	D7	-1.62	1.62	E10
福島県浜通り地震	井戸沢断層	山地	2.27	2.27	C14	1.60	1.60	D8	-	-	-
熊本地震	布田川断層	火山地	2.20	2.20	C15	1.56	1.56	D9	-1.56	1.56	E11
北丹後地震	下岡断層	山地	2.19	2.19	C16	1.55	1.55	D10	-1.55	1.55	E12
兵庫県南部地震	野島断層	砂礫質台地	2.14	2.14	C17	-	-	-	-1.51	1.51	E13
隆羽地震	生保内断層	山地	1.90	1.90	C18	-	-	-	-1.34	1.34	E14
北丹後地震	杉谷断層	丘陵	1.57	1.57	C19	1.11	1.11	D11	-1.11	1.11	E15
鳥取地震	鹿野断層	扇状地	1.54	1.54	C20	1.09	1.09	D12	-1.09	1.09	E16
北丹後地震	安断層	谷底低地	1.48	1.48	C21	1.04	1.04	D13	-1.04	1.04	E17
伊豆大島近海地震	稲取断層	山麓地	1.17	1.17	C22	0.83	0.83	D14	-0.83	0.83	E18
鳥取地震	吉岡断層	谷底低地	1.03	1.03	C23	0.73	0.73	D15	-0.73	0.73	E19
長野県神城断層地震	神城断層	砂礫質台地	0.95	0.95	C24	-	-	-	-0.67	0.67	E20
北丹後地震	新治断層	丘陵	0.90	0.90	C25	0.64	0.64	D16	-0.64	0.64	E21
北丹後地震	長岡断層	丘陵	0.82	0.82	C26	0.58	0.58	D17	-0.58	0.58	E22
福島県浜通り地震	湯ノ岳断層	丘陵	0.76	0.76	C27	0.54	0.54	D18	-	-	-
熊本地震	日奈久断層	ローム台地	0.75	0.75	C28	0.53	0.53	D19	-0.53	0.53	E23
北丹後地震	山田断層	扇状地	0.73	0.73	C29	0.52	0.52	D20	-0.52	0.52	E24
伊豆半島沖地震	石廊崎断層	山地	0.43	0.43	C30	0.30	0.30	D21	-0.30	0.30	E25
岩手県内陸北部の地震	篠崎地震断層	火山山麓地	0.38	0.38	C31	-	-	-	-0.27	0.27	E26
新潟県中越地震	小平尾断層	砂礫質台地	0.30	0.30	C32	-	-	-	-0.21	0.21	E27
新潟県中越地震	六日町盆地西縁断層	谷底低地	0.20	0.20	C33	-	-	-	-0.14	0.14	E28

(d) 盛土崩壊に起因する事例¹²⁾¹³⁾

地震	地盤変状発生位置	微地形区分	崩壊区間長さ (m)	盛土崩壊量 (m ³)	土荷重 (kN)	ケース名
東北地方太平洋沖地震	いわき市内郷内町	丘陵	40	31.2	386	F1
釧路沖地震	厚岸町糸魚沢町	ローム台地	9	7.0	83	F2
釧路沖地震	白糠町馬主来	砂礫質台地	5	3.9	48	F3

する地盤変状事例のうち、管軸圧縮方向に地盤変位が生じる事例はケース名を赤色で示した。本報では、管路に大きな負荷がかかる条件で管路挙動を予測することとしたため、記録された地盤変状事例のうち規模の大きな事例を、地盤変状のタイプ別にそれぞれ以下の方法で抽出した。

2. 管路挙動解析手法

(1) 対象とする地盤変状事例

表-1に、分析対象とする地盤変状事例を示す^{4)~13)}。本報では、液状化、断層、盛土崩壊に起因する地盤変状事例を対象とした。表-1に示す液状化および断層に起因

a) 液状化に起因する地盤変状事例

液状化が発生したエリアでは、複数の水平地盤変位が計測されている。液状化地盤に埋設された管路は地盤ひ

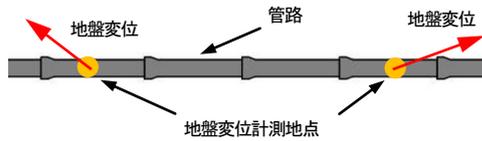


図-1 液状化事例における地盤変位と管路との位置関係

ずみの影響を大きく受けると考えられるため⁹⁾、液状化に起因する地盤変状は液状化発生エリアごとに最も地盤ひずみ大きい事例を管軸方向、管軸直交方向それぞれで抽出し、ケース A,B とした。抽出にあたり、図-1 の通り地盤変位が計測された2地点間に管路が埋設されているものと想定して、各地点の地盤変位を管軸方向、管軸直交方向に分解した。その上で、2地点間の距離 L および管軸、管軸直交方向の相対地盤変位 D_w, D_t を用いて、以下の式(1),(2)より管軸方向地盤ひずみ ε_a 、および管軸直交方向地盤ひずみ ε_t を求めた。

$$\varepsilon_a = D_w / L \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = D_t / L \quad (2)$$

b) 断層に起因する地盤変状事例

断層が地表に出現した場合には、地震断層ごとに複数の断層出現地点で水平方向、鉛直方向の地盤変位が計測されている。断層に起因する地盤変状は、地震断層ごとに最も合成地盤変位が大きい事例を抽出した。合成地盤変位 D_s の算出式を、式(3)で示す。

$$D_s = \sqrt{D_h^2 + D_v^2} \quad (3)$$

D_h は水平方向の地盤変位、 D_v は鉛直方向の地盤変位である。

断層と管路との交差角によって、管路の挙動は大きく異なることが確認されている¹⁴⁾。本報では、断層と管路との交差角を 90° (ケース C) および 45° として、異なるタイプとして扱った。さらに、交差角を 45° とした場合は、記録を基に管軸方向に管路が引張られる正断層タイプ、または管路が圧縮される逆断層タイプに分類し、それぞれケース D,E とした。横ずれタイプの事例については、断層と管路との位置関係により引張力または圧縮力いずれも作用する可能性があるため、正断層、逆断層両タイプを分析対象とした。各事例における管軸方向、管軸直交方向地盤変位 D_w, D_t は、 D_s および断層と管路との交差角 θ_c を用いて、以下の式(4),(5)より求めた。

$$D_w = D_s \cos \theta_c \quad (4)$$

$$D_t = D_s \sin \theta_c \quad (5)$$

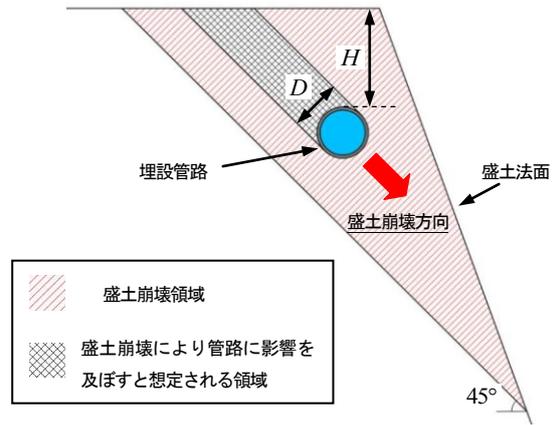


図-2 管路に影響を及ぼす領域

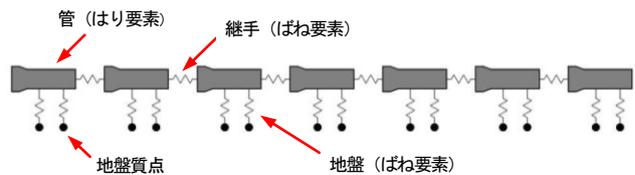


図-3 解析モデル

c) 盛土崩壊に起因する地盤変状事例

盛土崩壊時には、管路は土荷重により管軸直交方向に大きく変位すると考えられるため¹⁵⁾、盛土崩壊に起因する地盤変状については、土荷重を地盤変状の規模を表す指標とした。図-2 に盛土崩壊時に管路に影響を及ぼすと想定される領域を示し、式(6)に盛土崩壊区間での土荷重 F_s の算出式を示す。

$$F_s = CV\gamma_t s i \theta \quad (6)$$

$$V = BS \quad (7)$$

$$S = \frac{\left(H + \frac{D}{2}\right)}{\sin \theta} D - \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{2} \pi \quad (8)$$

C は衝撃係数、 γ_t は単位体積重量、 θ は盛土崩壊面の角度、 V は盛土崩壊量、 B は盛土崩壊区間の長さ、 S は管路影響領域の面積、 H は土被り、 D は管外径である。本報では、 H を 1.2m とした。また、既往の研究¹⁵⁾より、 C を 2、 θ を 45° とした。

以上の方法より抽出した各事例を、ケースごとに地盤変状の規模が大きなものから順に並べ、表-1 に示した。

(2) 解析モデル

図-3 に解析モデルを示す。解析モデルは埋設された耐震継手管路の挙動解析で実績がある^{14)~16)}はり-ばねモデルとした。解析は、汎用構造解析ソフト ANSYS Mechanical を用いて実施した。管体は、はり要素でモデル

表-2 管体寸法と材料特性¹⁷⁾¹⁸⁾

管体寸法		管体の材料特性	
管外径 D	管厚 t	ヤング率 E	ポアソン比 ν
425.6mm	8.5mm	$1.6 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$	0.28

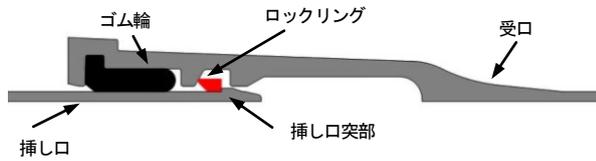


図-4 NS形継手の構造

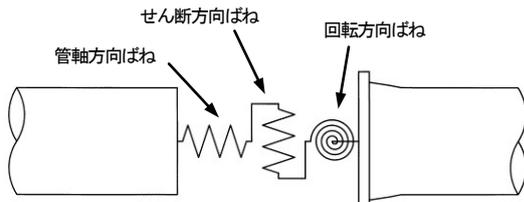


図-5 継手モデル

化した。管同士を継手ばね要素で接続し、管と地盤質点とを地盤ばね要素で接続した。なお、継手ばね、地盤ばねの詳細設定は後述する。

(3) 管路モデル

本報では、対象とする継手形式を NS 形とした。NS 形は、主に開削工法で埋設される耐震継手管である。NS 形は呼び径 75~1000 まで 15 の口径区分で規格化されているため、本報では対象呼び径を中央の口径区分である 400 として検討を進めた。

a) 管体部

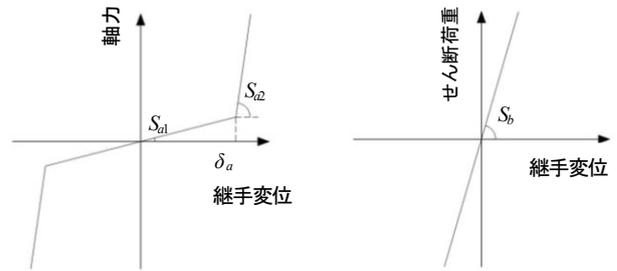
表-2 に管体部の寸法および材料特性を示す¹⁷⁾¹⁸⁾。今回の検討では、管体の材料特性を線形材料とした。

b) 継手部

解析対象とする呼び径 400 NS 形の継手構造を、図-4 に示す。NS 形継手は継手の伸縮や屈曲で管路に作用する外力を吸収する構造を有する。さらに大きな引抜き力や曲げモーメントが継手に作用した場合、ロックリングと挿し口突部がかかりあい、継手の離脱を防止するため、 $3D \text{ kN}$ (D : 呼び径 (mm))¹⁹⁾の引抜き力や大きな曲げモーメントに耐えることが可能となる。

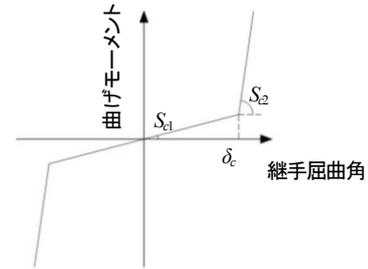
図-5 に、継手モデルの概要を示す。継手の挙動を表現するために、ばね要素を管軸方向、せん断方向、回転方向にそれぞれモデル化した。

図-6 に継手ばね特性を示す²⁰⁾。管軸方向、回転方向において、小さな力で継手が伸縮、屈曲する領域の継手ばね定数を、それぞれ S_{a1} 、 S_{c1} とした。一方で、管軸方向、せん断方向、回転方向において、金属同士が接触して大きな力を負荷しても継手の伸縮やせん断、屈曲が困難な



管軸方向継手ばね特性

せん断方向継手ばね特性



回転方向継手ばね特性

管軸方向ばね	せん断方向ばね		回転方向ばね	
S_{a1}	1,095 (kN/m)	S_b	3,488,000 (kN/m)	
S_{a2}	370,848 (kN/m)		S_{c1}	2.13 (kN・m/°)
δ_a	60 (mm)		S_{c2}	40.37 (kN・m/°)
			δ_c	5.1 (°)

図-6 継手ばね特性

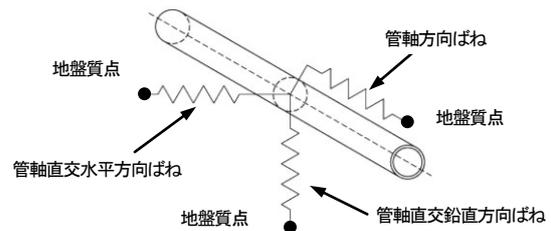


図-7 地盤モデル

領域の継手ばね定数を、それぞれ S_{a2} 、 S_b 、 S_{c2} とした。管軸方向、回転方向においては、2つの領域の境界となる継手変位や継手屈曲角を、それぞれ δ_a 、 δ_c とした。

(4) 地盤モデル

図-7 に、地盤モデルの概要を示す。管路周辺地盤をばね要素でモデル化し、管路に対して管軸方向および管軸直交方向に接続した。

a) 解析対象位置の地盤特性

解析対象位置は砂地盤であると想定すると、後述する地盤ばね特性の設定では、土の単位体積重量、土の内部摩擦角、砂の相対密度が必要となる。本研究では、解析対象位置での N 値を求めた上で、 N 値から単位体積重量、内部摩擦角、相対密度へ換算した¹⁵⁾。

N 値は対象となる地盤変状発生地点で計測することが望ましいが、全ての地点で地盤の N 値を計測することは困難である。そこで、沖縄県を除く 46 都道府県を対

表-3 微地形区分ごとの地盤特性

微地形区分	N値	単位体積重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (°)	相対密度 (%)
山地	16	17.9	36.5	46
山麓地	17	18.1	36.8	47
丘陵	13	17.5	35.8	43
火山地	21	18.7	37.8	51
火山山麓地	15	17.8	36.3	45
火山性丘陵	10	17.0	35.0	40
砂礫質台地	14	17.6	36.0	44
ローム台地	8	16.7	33.3	33
谷底低地	13	17.5	35.8	43
扇状地	15	17.8	36.3	45
自然堤防	9	17.3	34.2	37
後背湿地	8	16.7	33.3	33
旧河道	9	17.3	34.2	37
三角洲・海岸低地	7	16.0	32.5	30
砂州・砂礫洲	12	17.3	35.5	42
砂丘	11	17.2	35.3	41
砂州・砂丘間低地	24	19.1	38.5	54
干拓地	8	16.7	33.3	33
埋立地	12	17.3	35.5	42

象にボーリングデータから土被り 1.2m の位置での N 値を抽出し、微地形区分ごとに N 値を分類した上で、統計処理により N 値を推定した¹⁵⁾。表-3 に、微地形区分ごとの地盤特性を示す。

b) 地盤ばね特性

地盤ばね特性は、アメリカライフライン協定 (ALA)²¹⁾²²⁾ の提案式より、地盤変状事例ごとに設定した。図-8 に、地盤ばね特性を示す。管軸方向の単位長さあたりの地盤ばね定数 K_{g1} を式(9)で、管軸直交方向の単位長さあたりの地盤ばね定数 K_{g2} を式(12)で算出した。

$$K_{g1} = F_1 / \delta_1 \quad (9)$$

$$F_1 = \left(H + \frac{D}{2} \right) \pi D \gamma_t' \frac{K_0 + 1}{2} \tan f \phi \quad (10)$$

$$\gamma_t' = \frac{G_s - 1}{G_s (1 + w)} \gamma_t \quad (11)$$

$$K_{g2} = F_2 / \delta_2 \quad (12)$$

$$F_2 = \left(H + \frac{D}{2} \right) N_{qh} D \gamma_t' \quad (13)$$

$$\delta_2 = 0.085(H + D) \quad (N \text{ 値 } 10 \text{ 未満}) \quad (14)$$

$$\delta_2 = 0.04(H + D) \quad (N \text{ 値 } 10 \text{ 以上}) \quad (15)$$

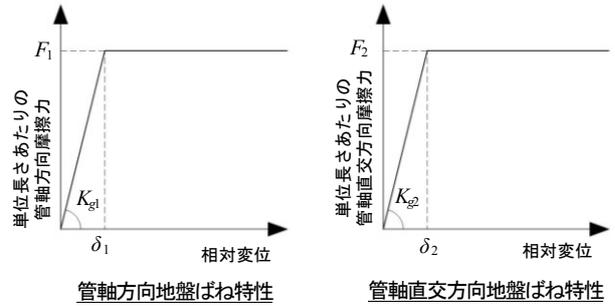


図-8 地盤ばね特性

F_1, F_2 は管軸方向、管軸直交方向における単位長さあたりの摩擦力最大値であり、 δ_1, δ_2 は管軸方向、管軸直交方向における地盤に対して管路が滑り出す相対変位である。解析対象地点の N 値が 10 未満ならば $\delta_1 = 5.08\text{mm}$ 、10 以上ならば $\delta_1 = 3.81\text{mm}^{21)}$ とした。H は土被り、D は管外径である。管路の埋設状況より、 $H = 1.2\text{m}$ 、 $D = 425.6\text{mm}$ とした。 γ_t は土の有効単位体積重量、 K_0 は静止土圧係数である。参考文献²²⁾より、 K_0 を 1 とした。 f は管の外面塗装に関する係数、 ϕ は土の内部摩擦角である。 f は 0.6~1 の範囲で設定されているが²²⁾、本報では管路に大きな負荷がかかる場合を想定して、 f を 1 とした。 G_s は土粒子の比重、 w は土の含水比、 γ_t は土の単位体積重量である。 G_s は代表値として用いられる 2.65²³⁾、 w は砂質土の代表値として用いられる 20%²⁴⁾ とした。また、 N_{qh} は土被りや管外径、土の内部摩擦角から決定される係数であり、本報では 12.5 とした。

c) 盛土崩壊時の地盤剛性低下を考慮した地盤ばね特性

盛土崩壊時には地盤の大変形に伴い、地盤の剛性が低下するものと想定されるため、盛土崩壊区間では土質試験結果および地盤変状発生地点の地盤特性より、地点ごとに地盤の剛性低下を考慮した地盤ばね特性を設定した¹⁵⁾。また、盛土崩壊を受けた耐震継手管の挙動解析手法を検討した研究¹⁵⁾より、盛土崩壊区間外側でも一定の区間で地盤の剛性低下を考慮すれば実現象の再現性が高まることが確認されているため、そのような区間を崩壊危険区間として地盤の剛性低下を考慮した。図-9 に盛土崩壊区間における地盤ばね特性を示す。ここで、崩壊危険区間での地盤ばね特性設定に必要な単位長さあたりの最大荷重 F_D 、および相対変位 δ_D は、従来の地盤ばね特性で用いる F, δ と崩壊危険区間の地盤ばね特性で用いる F_D, δ_D を 2:1 に内分する点とした。

(5) 解析条件

図-10 に、地盤変状のタイプ別での管路挙動解析条件を示す。液状化、断層変位に起因する地盤変状については、地盤質点に地盤変位を与えて解析を実施した。一方

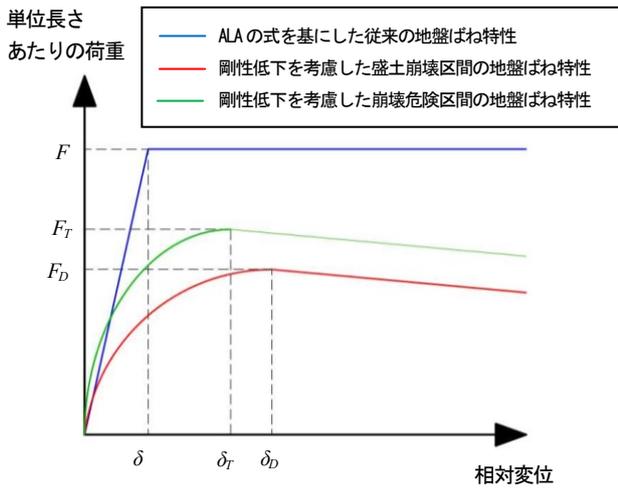


図-9 盛土崩壊時の地盤ばね特性

で、盛土崩壊に起因する地盤変状については、盛土崩壊区間の管路に土荷重、解析対象区間全域の管路に管自重を直接与えて解析を実施した。管路 1m あたりに負荷される管自重 F_e の算出式を、式(16)に示す。

$$F_e = F_p + F_w \quad (16)$$

$$F_p = \frac{W}{L_p} g \quad (17)$$

$$F_w = \frac{D_I^2}{4} \pi \gamma_w \quad (18)$$

F_p は管路 1m あたりの管体自重、 W は管 1 本あたりの質量、 L_p は管 1 本あたりの長さ、 g は重力加速度、 F_w は管路 1m あたりの管内水重、 D_I は管内径、 γ_w は水の単位体積重量である。

3. 管路挙動に基づく地盤変状事例分析

耐震継手管の挙動を示す項目として、軸力、継手屈曲角、軸方向応力が挙げられる。表-4 に解析対象とした呼び径 400 NS 形の軸力、継手屈曲角、軸方向応力の許容値をそれぞれ示す³⁾²⁵⁾。本報では、事例ごとに得られた管路挙動解析結果より、軸力、継手屈曲角、軸方向応力をそれぞれ抽出した上で、以下の分析を実施した。

(1) 事例比較に用いた物理量と管路挙動との関係

最初に、液状化、断層、盛土崩壊に起因する地盤変状事例の規模を比較するために用いた物理量である地盤ひずみ、合成地盤変位、土荷重と、軸力、継手屈曲角、軸

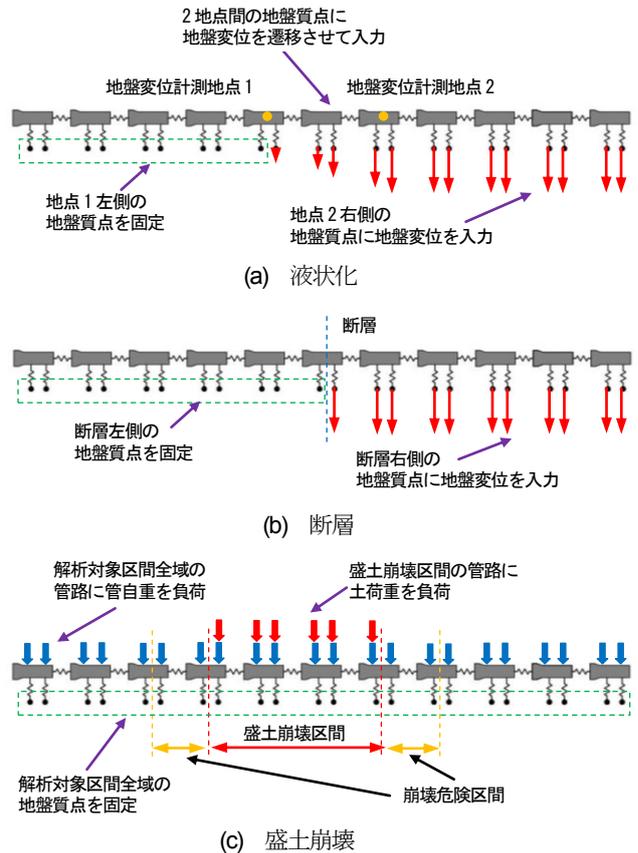


図-10 管路挙動解析条件

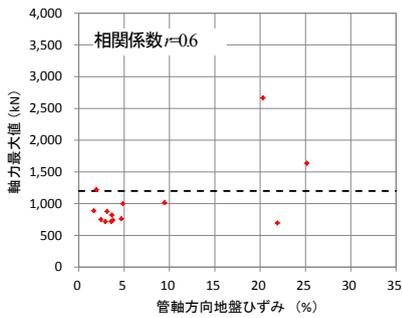
表-4 呼び径 400 NS 形継手の許容値

軸力 (kN)	1,200
継手屈曲角 (°)	6
軸方向応力 (N/mm ²)	270

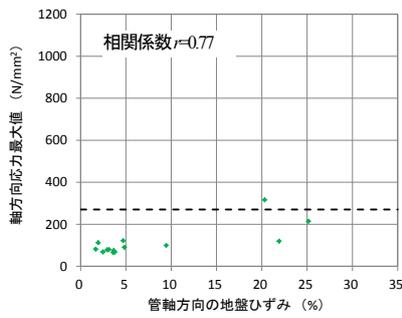
方向応力の最大値との関係を確認することで、各物理量が管路挙動にどのような影響を及ぼすか分析した。

a) 液状化に起因する地盤変状事例

図-11 に、管軸方向地盤ひずみを用いて抽出した事例であるケース A1～A14 を対象とした、管軸方向地盤ひずみと軸力最大値、軸方向応力最大値との関係を、相関係数と併せて示す。なお、許容値を図中の黒破線で示した。管軸方向地盤ひずみと軸方向応力最大値の間には正の相関は強いものの、軸力最大値との間には強い相関が見られない結果となった。一方で、図-12 に示す通り、管軸方向の相対地盤変位と軸力最大値の間には強い正の相関がある結果となった。耐震継手管であれば、管軸方向に局所的に大きな地盤ひずみが発生しても、複数の継手が伸縮して地盤変位を吸収する。ただし、管路と地盤との間に管軸方向摩擦力が作用することで、図-13 に示す通り軸力は管路全体に均一に作用せず、2つの地盤変位計測地点の中間位置である 0m の管路位置で最大値が発生することとなる。なお、図-13 中のケース A3, A2 は、図-12 で示した事例のうち、それぞれ管軸方向相対地盤



(a) 軸力最大値



(b) 軸方向応力最大値

図-11 液状化に起因する事例での管軸地盤ひずみと管路挙動分析項目との関係

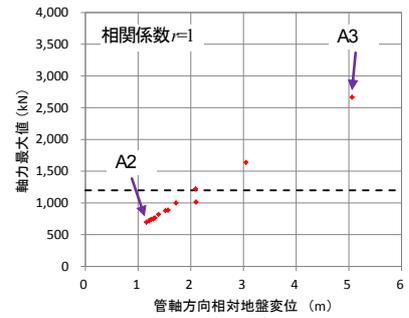


図-12 液状化に起因する事例での管軸相対地盤変位と軸力最大値との関係

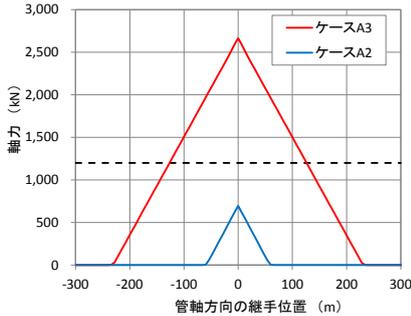
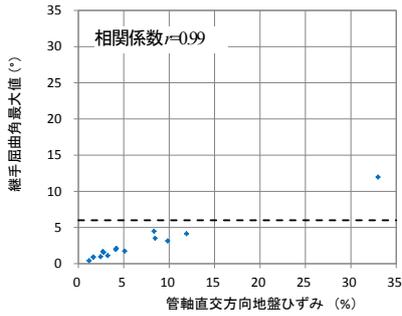
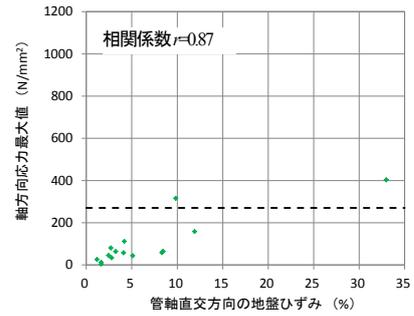


図-13 軸力の発生分布

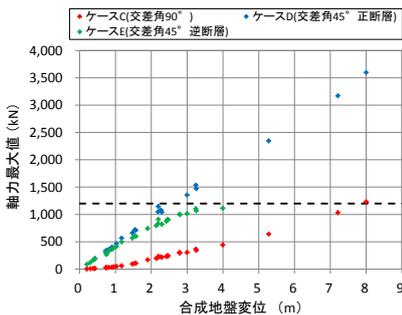


(a) 軸力最大値

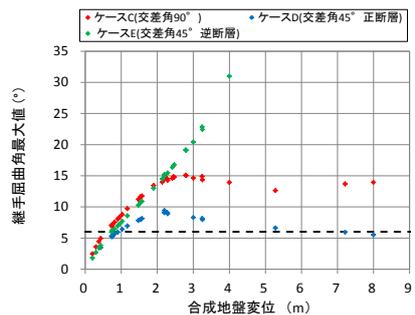


(b) 軸方向応力最大値

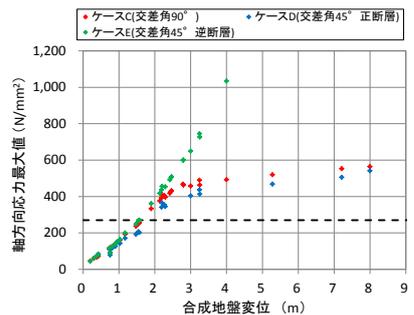
図-14 液状化に起因する事例での管軸直交地盤ひずみと管路挙動分析項目との関係



(a) 軸力



(b) 継手屈曲角



(c) 軸方向応力

図-15 断層に起因する事例における合成地盤変位と管路挙動分析項目との関係

変位が最大、最小の事例である。図-13 より、管軸方向の相対地盤変位が大きいほど伸縮する継手の数が増えて軸力が発生する範囲が広くなり軸力最大値が大きくなることが確認できることから、相対地盤変位と軸力最大値との間に強い正の相関が見られると考えられる。

図-14 に、管軸直交方向地盤ひずみを用いて抽出した事例であるケース B1～B15 を対象とした、管軸直交方向地盤ひずみと継手屈曲角最大値、軸方向応力最大値との関係を示す。両者共に、強い正の相関があることが確認できる。

b) 断層に起因する地盤変状事例

図-15 に、合成地盤変位を用いて抽出した事例であるケース C1～C33, D1～D21, E1～E28 を対象とした、合成地盤変位と軸力、継手屈曲角、軸方向応力の最大値と

の関係を示す。図-15 より、断層と管路との交差角が 45°で逆断層タイプを想定したケース E では、合成地盤変位が増加すればいずれの項目の最大値も単調に増加することがわかる。ケース C, D では、合成地盤変位の増加に伴い軸力最大値は単調に増加するものの、合成地盤変位が 3m を超えれば合成地盤変位が増加しても継手屈曲角最大値、軸方向応力最大値の増加量が小さくなる、または減少する結果となった。これは、両ケースでは一部の継手が大きく屈曲して一定値に達すれば、隣合う継手が屈曲して地盤変位に追従しているためと考えられる。一方で、ケース E では局所的に一部の継手のみ屈曲して地盤変位に追従しているものと考えられる。

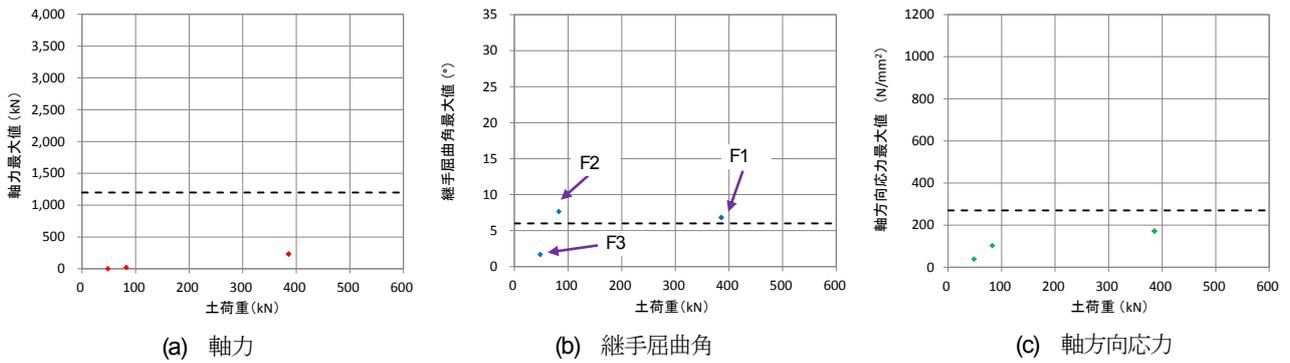


図-16 盛土崩壊に起因する事例における土荷重と管路挙動分析項目との関係

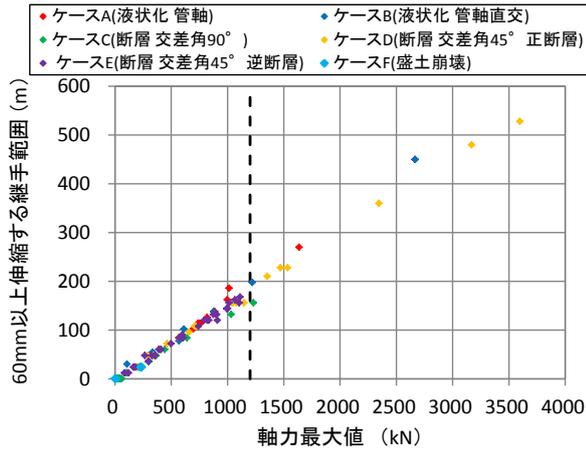


図-17 軸力最大値と継手が60mm以上伸縮する範囲との関係

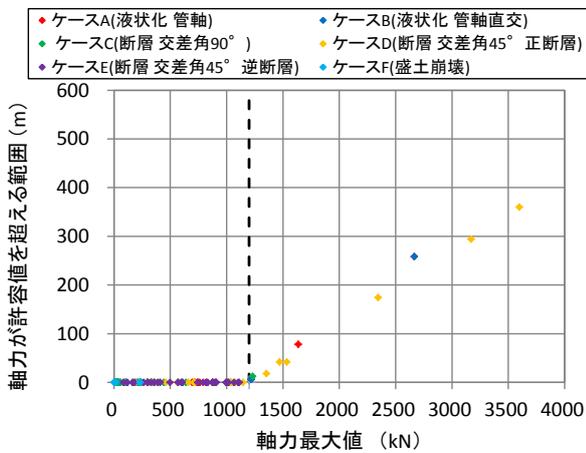


図-18 軸力最大値と軸力が許容値を超過する範囲との関係

c) 盛土崩壊に起因する地盤変状事例

図-16 に、土荷重を用いて抽出した事例であるケース F1～F3 を対象とした、土荷重と軸力、継手屈曲角、軸方向応力の最大値との関係を示す。図-16 より土荷重が増加すれば軸力最大値、軸方向応力最大値は単調に増加するものの、土荷重が 100kN を超えれば土荷重が増加しても継手屈曲角最大値は増加していないことが確認できる。また、ケース F2 とケース F3 との比較より、土荷重の増加量がわずかであっても継手屈曲角最大値が大幅に増加していることがわかる。ただし、現時点では分析対

象とした事例数が限られているため、今後は事例数を増やして両者の関係性を改めて分析する必要がある。

(2) 地盤変状タイプの違いが管路挙動に及ぼす影響

耐震継手管は複数の継手が伸縮または屈曲することにより地盤変状に追従するため、地盤変状事例ごとに継手がどの程度の範囲で大きく伸縮、屈曲するか分析することで、地盤変状と耐震継手管の挙動との関係が明確になるものと期待できる。そこで、全ての地盤変状事例を対象に、軸力、継手屈曲角、軸方向応力の最大値とそれらの項目が許容値を超える範囲との関係を確認して、地盤変状タイプの違いが管路挙動にどのような影響を及ぼすか分析した。なお、解析対象とした呼び径 400 NS 形継手は、1 つの継手が 60mm 以上伸縮すれば隣り合う継手が伸縮するため、管軸方向の管路挙動として、軸力最大値と 60mm 以上伸縮した継手の範囲との関係も分析対象とした。

a) 軸力

図-17 に軸力最大値と継手が 60mm 以上伸縮する範囲との関係を示し、図-18 に軸力最大値と軸力が許容値を超過する範囲との関係を示す。なお、継手の対象範囲 L_J は以下の式(19)より求めた。

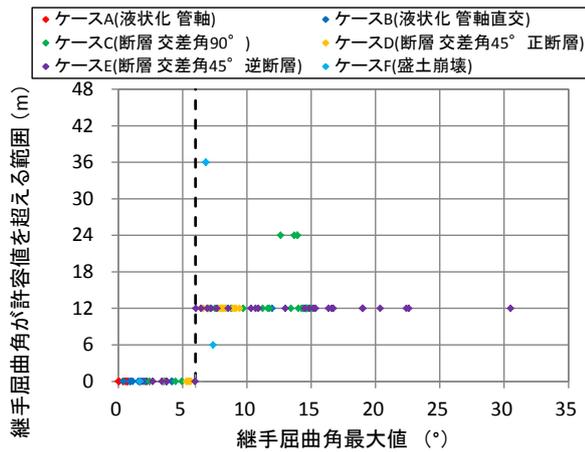
$$L_J = L_P N_J \quad (19)$$

L_P は管 1 本あたりの長さ、 N_J は対象継手数である。

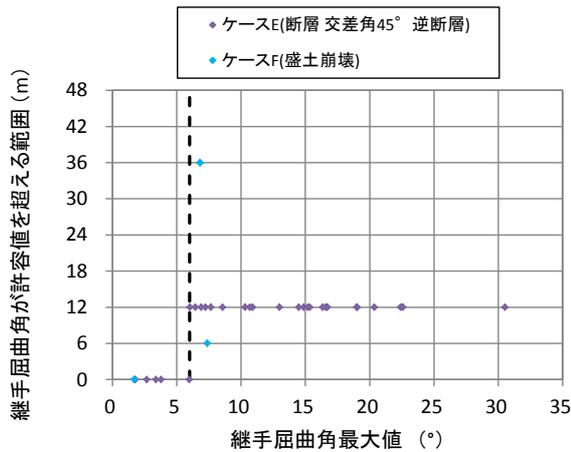
両図より、地盤変状のタイプに関わらず両者の関係は概ね一致していることが確認できる。

b) 継手屈曲角

図-19(a)に、継手屈曲角最大値と継手屈曲角が許容値を超過する範囲との関係を示す。図-19(a)より、ケースによって両者の関係が異なる結果となった。特に、図-19(b)に示す通りケース E とケース F は異なる傾向を示すことが明確である。断層に起因し断層と管路との交差角が 45° で逆断層タイプであるケース E では、継手屈曲角最大値が増加しても継手屈曲角が許容値を超える範囲



(a) 全事例を対象とした場合



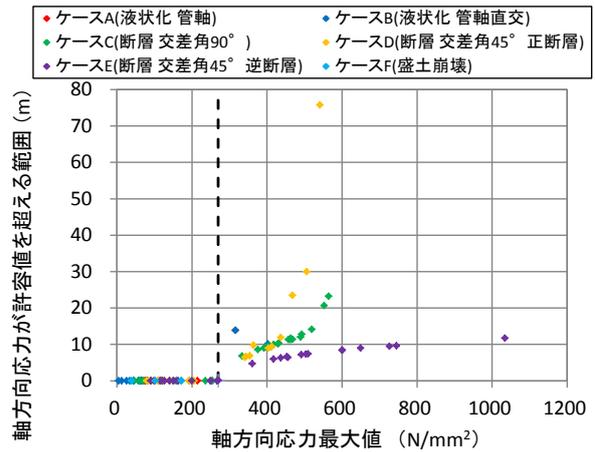
(b) ケース E とケース F を対象とした場合

図-19 継手屈曲角最大値と継手屈曲角が許容値を超過する範囲との関係

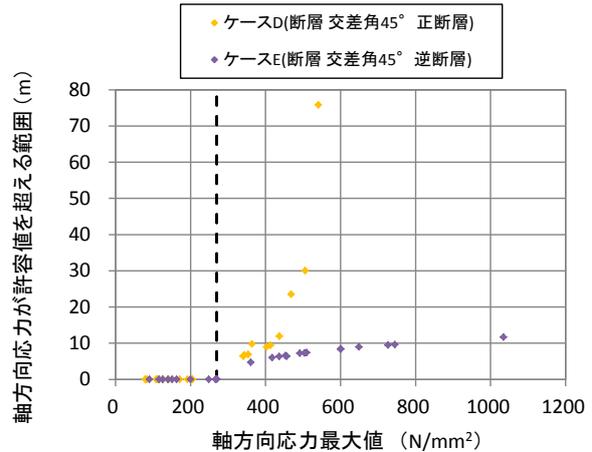
は 12m を超えないことが確認される。これは、このケースでは一部の継手のみが屈曲して地盤変状に追従していることを示しており、図-15(b)の結果と整合する。一方で、盛土崩壊に起因するケース F では、継手屈曲角が許容値を超過する範囲のみ大きく増加することがわかる。

c) 軸方向応力

図-20(a)に、軸方向応力最大値と軸方向応力が許容値を超過する範囲との関係を示す。継手屈曲角を分析対象とした場合と同様に、ケースによって両者の関係が異なる結果となった。特に、図-20(b)に示す通りケース D とケース E は異なる傾向を示すことが明確である。断層に起因し断層と管路との交差角が 45°で正断層タイプであるケース D では、軸方向応力最大値の増加に伴い軸方向応力が許容値を超過する範囲が大きく増加する結果となった。一方で、ケース E では、軸方向応力最大値が大きく増加しても、軸方向応力が許容値を超過する範囲はわずかに増加しない結果となった。



(a) 全事例を対象とした場合



(b) ケース D とケース E を対象とした場合

図-20 軸方向応力最大値と軸方向応力が許容値を超過する範囲との関係

4. 許容値超過範囲に基づく地盤変状対策の検討

前章より、管軸方向においては軸力最大値と軸力が許容値を超過する範囲との関係は地盤変状のタイプに関わらず一致することを確認した。そこで、本章ではこの関係を用いて、軸力が許容値を超えた地盤変状事例を対象に、特別な地盤変状対策が必要な範囲に着目した検討方法の有効性を確認した。

(1) 対策範囲の設定

最初に、図-21 に示す通り、軸力が許容値を超過する範囲に存在する事例を対象に、最小二乗法より 1 次近似直線を作成した。式(20)に、作成した 1 次近似式を示す。

$$R_F = 0.157F_{MAX} - 188 \quad (20)$$

R_F は軸力が許容値を超過する範囲、 F_{MAX} は軸力最大値である。

本報では一例として、ケース D3 の事例を対象に検討方法の有効性を確認することとした。ケース D3 の軸力

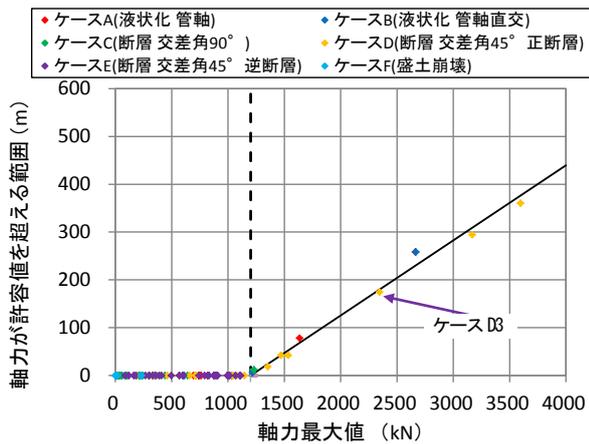


図-21 許容値超過領域での両者の関係を示す1次近似直線

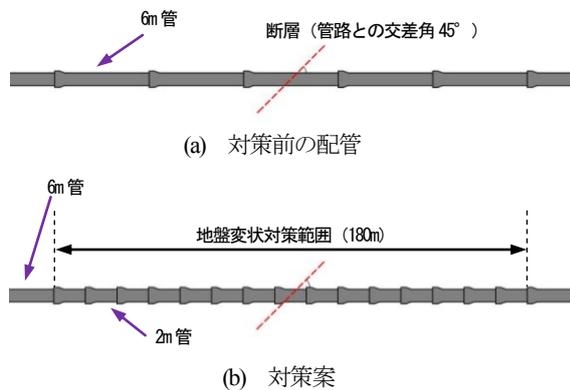


図-22 ケースD3を対象とした地盤変状対策案

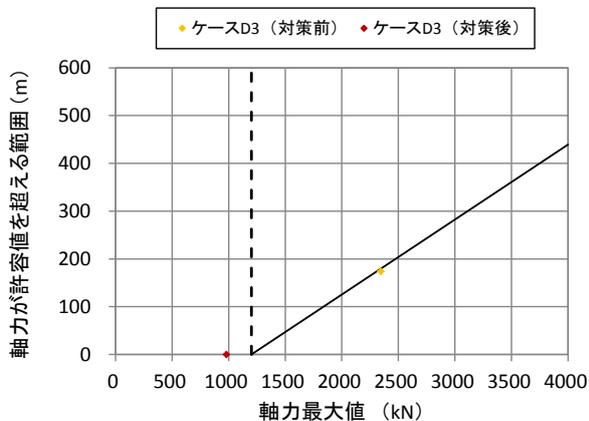


図-23 ケースD3における対策前後での両者の位置関係

最大値は 2346kN であり、1 次近似式より軸力が許容値を超える範囲は 180m と算出される。そこで、特別な対策が必要な範囲を 180m としして検討を進めることとした。

(2) 対策の有効性確認

軸力を低減させるためには一定距離当たりの継手数を増やすことが有効であるため、今回は図-22 の通り断層をはさんだ 180m の範囲で管 1 本の長さを 6m から 2m に変更して、管路挙動解析を実施した。

図-23 に、ケース D3 における対策前後での軸力最大値と軸力が許容値を超える範囲との関係を示す。対策により軸力最大値が 2346kN から 981kN と大幅に低減し、許容値を下回る結果となった。これより検討方法が有効であることが示唆されるが、1 事例のみ検討を実施した段階であるため、今後は検討数を増やす必要がある。

5. おわりに

記録された地盤変状データを用いて、地盤変状発生地点に耐震継手管が埋設されていたものと想定して、地盤変状を受けた管路挙動を数値解析により予測し、予測結果を分析して、異なるタイプの地盤変状事例を総合的に扱うことが可能か検討した。本研究の結果を、以下に列挙する。

- (1) 軸力に関しては、地盤変状のタイプに関わらず軸力最大値と軸力が許容値を超える範囲との関係は概ね一致するため、地盤変状を総合的に扱うことが可能であることが示唆された。
- (2) 継手屈曲角および軸方向応力に関しては、地盤変状のタイプによって両者の関係性が異なる結果となった。また、逆断層を想定したケースでは、地盤変状の規模が大きくなるに伴い継手屈曲角最大値、軸方向応力最大値共に局所的に増大する傾向となった。

継手屈曲角、軸方向応力については、最大値が許容値を超過した場合における特別な地盤変状対策を実施するための検討ができていないため、今後の課題として取り組む。また、本報で対象とした盛土崩壊に起因する地盤変状事例は限られるため、事例数を増やして分析の有効性を高める必要がある。

参考文献

- 1) 三浦久人：阪神・淡路大震災による耐震形ダクタイトイル管の挙動調査（ポートアイランド、六甲アイランド）、ダクタイトイル鉄管、第 61 号、pp. 41-48, 1996.
- 2) 三原正幸：豪雨による護岸道路崩壊で露出したダクタイトイル管の健全性の検証、日本水道協会水道研究発表会講演集、pp. 133-136, 2018.
- 3) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 I 総論 2009 年版、pp. 75-86, 2009.
- 4) Hamada, M. and O'Rourke, T. D. : Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Proceedings From the Sixth Japan-U.S. Workshop Technical Report, pp. 136-152, 1996.
- 5) 濱田政則、磯山龍二、若松加寿江：1995 年兵庫県南部地震 液状化、地盤変位及び地盤条件、pp. 134-135、地震予知総合研究振興会、1995.

- 6) 松田時彦：1891年濃尾地震の地震断層，地震研究所研究速報，第13号，pp.85-126, 1980.
- 7) 松田時彦，山崎晴雄，中田高，今泉俊文：1986年陸羽地震の地震断層，地震研究所彙報，Vol.55，pp.795-855，岩波書店，1980.
- 8) 森本皓一，小田圭太，西川源太郎，長谷川延広，小野祐輔：地表に出現した断層変位量の分布にかんする研究，第10回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集，pp. 212-216, 2020.
- 9) 松田磐余，田村俊和：1974年伊豆半島沖地震の地震断層とそれに伴う被害，地学雑誌 Vol.83，No.4，pp.66-72, 1974.
- 10) 越谷 信ら他 20名：1998年3月岩手県内陸北部の地震に伴う地震断層，活断層研究 Vol.17，pp.9-20, 1998.
- 11) 鈴木康弘，渡辺満久，廣内大助：2004年新潟県中越地震の地表地震断層，地学雑誌 Vol.113，No.6，pp.861-870, 2004.
- 12) 中村晋，仙頭紀明，梅村順，大塚悟，豊田浩史：2011年東北地方太平洋沖地震による福島県中通およびいわき地域における地盤災害，地盤工学ジャーナル Vol.7，No.1，pp.91-101, 2012.
- 13) 井口隆：1993年1月の釧路沖地震によって生じた地盤災害とその特徴，防災科学技術研究所 第59号，pp.31-56, 1999.
- 14) 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.
- 15) 森本皓一，宮島昌克，今川暢人：盛土崩壊に伴う地盤の剛性低下を考慮した耐震継手ダクタイル鉄管挙動解析手法の検討，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 76 (印刷中)
- 16) 森本皓一，宮島昌克：液状化地盤において複数回の地盤変状を受けた耐震継手ダクタイル鉄管の挙動検証，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 75，No. 4，pp. I_238-I_249, 2019.
- 17) 日本ダクタイル鉄管協会：便覧 第12版-1，pp. 188-189, 2011.
- 18) 日本ダクタイル鉄管協会：ダクタイル鉄管ガイドブック，pp. 238-248, 2018.
- 19) 日本ダクタイル鉄管協会：NS形・SII形・S形ダクタイル鉄管管路の設計，pp. 4-7, 2011.
- 20) 日本ダクタイル鉄管協会：NS形ダクタイル鉄管，pp. 1-21, 2005.
- 21) ASCE: American Lifelines Alliance Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, pp. 68-76, 2001.
- 22) O'Rourke, T. D., Grigoriu, M. D. and Khater, M. M.: A State of the Art Review: Seismic Response of Buried Pipelines, Decade of Progress in Pressure Vessel Technology, ASME, 1985.
- 23) 石原研而：第2版土質力学，pp. 4-6, 丸善，2001.
- 24) 地盤工学会：土質試験 基本と手引き，pp. 17-26, 2001.
- 25) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 II 各論 2009年版，pp. 35-39, 2009.

ANALYSIS ON BEHAVIOR OF SEISMIC TYPE DUCTILE IRON PIPES INFLUENCED BY GROUND DEFORMATION OCCURRED IN JAPAN

Koichi MORIMOTO, Masakatsu MIYAJIMA and Masato IMAGAWA

In Japan, earthquake or heavy rain have caused large-scale ground deformation. Therefore, buried water pipelines were damaged seriously. Seismic type ductile iron pipes have not been damaged and have passed water after large-scale ground deformation, because those joints have extension and contraction function, bend performance, and separation preventing performance. But such cases are limited. Ground deformation have been classified by type, such as liquefaction, embankment failure. And different type countermeasures of ground deformation have been implemented for buried objects. The pipeline behavior influenced by different type ground deformation may show similar trends, because some joints of seismic type pipeline extend, contract, or bend by following ground deformation. However, there are few study cases to compare ground deformation by using the behavior of seismic type pipeline, without classification by type. In this study, we analyze the behavior of seismic type pipeline influenced by ground deformation, and consider whether it is possible to deal with different type cases of ground deformation comprehensively.