

研究成果報告書

研究開発課題名	液状化地盤におけるパイプラインの耐震化向上技術に関する研究開発 (副題) 管路屈曲部の耐震工法
研究総括者	株式会社クボタ パイプシステム事業ユニット 藤田信夫
研究開発組合	株式会社クボタ 内外エンジニアリング株式会社
試験研究機関	農研機構 農村工学研究所 神戸大学大学院 農学研究科 茨城大学 農学部

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

(1) 事業の背景

東北地方太平洋沖地震により、東北・関東地方では広い範囲にわたって震度 5 強以上を観測した。農業用パイプラインでは、従来から地震時のウィークポイントとされてきた異形管部や構造物周辺、地形・地質の変化点などに加えて、地盤の液状化により直線部においても大規模な不陸、許容値を超える拔出しなど甚大な被害が発生している。

現行の土地改良事業計画設計基準「パイプライン」では、地盤変状に対する地震応答対策として「埋戻し土」、「現地盤」、「管路」に対して行う対策が各々記載されているが、対策を施す具体的な条件や範囲が明確でなく、設計実務に展開することが難しい。

(2) 事業の目的

本研究は、特に管路に対して行う対策に着目し、必要な条件やその範囲を定量的に明確化することにより農業用パイプラインの地震時安全性を向上させることを目的として、液状化地盤における耐震性向上技術の開発に取り組む。

離脱防止機構を有する鎖構造継手管路を配置すべき適切な範囲を示すことにより、高い耐震性を確保したパイプラインシステムを構築し、大規模地震発生時の被害軽減と復旧費用の低減に資する。

また、新設時だけでなく既設管路の部分的な改修にも適用が可能であり、適切な改修範囲を選定することで工事費を大幅に削減し、既存施設の耐震性を効率的に向上させることが可能になる。

1. 2 事業の内容及び実施方法

(1) 管路の地震被害事例の調査分析

①内容

既往の継手構造管路の地震被災データを収集し、地震前後における継手の挙動、管路の変位などについて調査分析した。

②実施方法

日本海中部地震、北海道南西沖地震、鳥取県西部地震、東北地方太平洋沖地震で被災した農業用パイプラインの観測記録を収集し、配管図と計測値を照合して被害傾向の分析を行った。管路内にある構造物や曲管の位置関係に着目し、継手離脱やジョイント間隔のバラツキ、管路変位の分布、周辺地盤状況等について評価した。

(2) 模型実験による管路挙動の解明

①内容

地盤内の過剰間隙水圧比(液状化程度)を一定に保持する実験装置を製作し、模型管路を構築、種々の条件を設定して管路屈曲部の挙動を解明した。

②実施方法

小型の実験土槽を製作し、上向き浸透流による模擬液状化の確認、過剰間隙水圧分布の確認、模型管横引き時の抵抗土圧等の基礎データを収集・分析した。

中型の実験土槽内に、曲管を中心に 12 箇所の継手を有する模型管路を構築した。上向き浸透流によって地盤の液状化程度を制御しつつ屈曲部に水平方向載荷し、継手構造管路の変形モードを把握した。

(3) 数値解析による管路挙動の検証

1) 継手構造管路屈曲部の挙動メカニズムの検証

①内容

曲管を中心とした継手構造管路をモデル化、背後地盤の強度を変化させ、曲管にスラスト力が作用する条件を解析的に再現し比較した。

②実施方法

継手特性を管軸、管軸直角、回転の 3 成分の非線形バネで、地盤特性を管軸方向、管軸直角方向の 2 成分の非線形バネでそれぞれ表現し、ハリ・バネ要素モデルでの解析結果と実験結果の比較検証を行い、曲管変位に伴う管路変形モードを特定した。

2) 内圧スラスト力による地震時曲管変位の検証

①内容

地震時の液状化過程に伴う地盤の強度・剛性低下を表現し、管路屈曲部の水平変位を算定する手法について検討した。

②実施方法

地震の繰返し荷重による地盤の強度・剛性低下の過程を考慮した変位解析手法により曲管の水平変位を計算した。

曲管背面に仮想的なすべり面を設定。応答加速度、せん断応力比を算定。次に入力地震動を設定、累積損傷理論に基づき、地盤の強度・剛性低下を逐次計算。

初期状態から受働土圧、水平方向地盤バネ定数の地震動による低下度合を求め、内圧スラスト力による水平変位を計算する。

(4) 管路構造の違いによる耐震効果の検証

①内容

砂地盤内に曲管を含む継手管路を布設し、実験土槽全体を加振して液状化させ、継手構造の違い、基礎の違いによる管路挙動を比較検証した。

②実施方法

長さ 6m、幅 4mの実規模振動実験装置を用いて、中央に曲管を配置した継手構造管路を構築した。液状化時の管路挙動を確認し、鎖構造管路と柔構造管路におけるスラスト対策の有効性を検証した。

(5) 各種対策工法の適用範囲の明確化

①内容

曲管変位に応じた鎖構造継手管路の適用範囲を示すとともに、耐震化（液状化対策）することによる費用対効果の算定例を提示した。

②実施方法

実験および解析から求めた管路変形モードにより、曲管部の地震時想定変位に追従できる鎖構造継手の適用範囲を示した。

大規模地震対策に係る土地改良事業の費用対効果分析に関する効果算定マニュアルに準じて、本工法を用いて部分的に耐震強化する管路施設の費用対効果を評価した。

(6) 設計・施工マニュアルの作成

①内容

研究成果をとりまとめ、設計施工マニュアルを作成した。

②実施方法

内圧スラスト力を受ける屈曲部の通常時ならびに地震時の合理的な設計手法を提示するとともに、施工上の留意点等もとりまとめたマニュアルを作成した。

(7) 実証試験

①内容

液状化の危険性が高い地盤に布設される管路の一部に鎖構造継手管路を適用し、センサーを設置して初期状態を計測し、大規模地震発生に備える。

②実施方法

下記 2 地区のパイプライン屈曲部を対象として、曲管を中心に前後 4～5 本を鎖構造継手管路に置き換える。各継手に変位計を設置して伸縮・屈曲量の変化を定期的に計測する。

印旛沼二期農業水利事業 宗吾北地区 $\phi 200 \times 47\text{m}$

愛知県海部農林水産事務所 松梅地区 $\phi 100 \times 40\text{m}$

(8) 機能監視

①内容

実証試験管路の布設後のモニタリング。

②実施内容

埋戻し完了時および 3 ヶ月後（または平成 27 年度末）に初期状態からの変化を計測し記録。5 年間をめどに経過観察する。対象地点で震度 5 弱以上の地震発生後、速やかに現地確認し、継手変位等の変化を観測する。

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
1)地震時における異形管部の挙動解明 2)液状化が発生する地盤でのスラスト対策 地震時に被害が集中する異形管部について、地盤の剛性が低下した条件でのスラスト力による発生変位や、曲管を含む管路としての挙動が明らかでない。	曲管が大きく変位するときの屈曲部前後での管路変形モードを模型実験・数値解析を通じて把握した。 地盤の液状化過程で剛性(地盤反力係数)は大きく低下するが、管路変形モードは地盤の状態に関わらず同様の挙動を示すことを確認した。 また既往文献による被災事例分析や数値解析により、地盤強度・剛性低下時の曲管変位量の概定を行った。
3)地盤性状の違いによる管路構造面での対策検討 4)耐震性向上対策の費用対効果の検証 地盤変状に対して、どの範囲まで管路の耐震対策を施すかが明確でない。	上記の成果を用いて、曲管変位に対して鎖構造継手管路をどの範囲に適用すれば耐震性が確保されるか、を見出した。 本工法により管路施設の耐震性を強化する場合の経済効果について、土地改良事業の費用対効果分析手法に準じて検証した。

1. 4 事業の実施体制

(1) 研究開発組合内の役割分担

個別研究テーマ	研究開発組合	
	(株)クボタ	内外エンジニアリング(株)
管路の地震被害事例の調査分析	◎	◎
模型実験による管路挙動の解明	◎	○
数値解析による管路挙動の検証	◎	○
管路構造の違いによる耐震効果の検証	◎	○
各種対策工法の適用範囲明確化	○	◎
設計・施工マニュアルの作成	◎	◎
実証試験	◎	○
まとめ	◎	◎

(2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

個別研究テーマ	試験研究機関			研究開発組合	
	農村工学 研究所	神戸大学	茨城大学	(株)クボタ	内外エ ンジニア リング(株)
管路の地震被害事例の調査分析	○	○	○	◎	◎
模型実験による管路挙動の解明	○	◎	○	◎	○
数値解析による管路挙動の検証	○	○	◎	◎	○
管路構造の違いによる耐震効果の検証	◎	◎	○	◎	○
各種対策工法の適用範囲明確化	◎	○	◎	○	◎
設計・施工マニュアルの作成	○	○	○	◎	◎
実証試験	○	○	○	◎	○
まとめ	◎	◎	◎	◎	◎

1. 5 事業の年度計画と実績

項 目	平成 25 年度		平成 26 年度		平成 27 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
管路の地震被害事例の調査分析						
模型実験による管路挙動の解明		 				
数値解析による管路挙動の検証		 				
管路構造の違いによる耐震効果の検証				 		
各種対策工法の適用範囲明確化				 		
設計・施工マニュアルの作成					 	
実証試験						 
まとめ						 

注)  は計画、 は実績。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

(1) 管路の地震被害事例の調査分析

1) 隈戸川地区幹線用水路の管路被災状況調査

①概要

対象とした国営隈戸川地区の幹線用水路は、平成 6 ～21 年度に大部分が FRPM 管（φ2600～1350）で改修された後、平成 23 年の東北地方太平洋沖地震により被災した。被災後、復旧計画を立案するため、平面測量、管内測量、管内調査等が実施された。それらの調査結果を利用して、①被災箇所・形態・原因、②地形・表層地質・地下水位・基盤層、③継手間隔・移動量、をそれぞれ整理し、特に構造物および異形管周辺の被害に着目してデータ分析を行った。

構造物・異形管別の被災件数を図-1（左）に示す。約半数にあたる 25 件（スラストブロック 10 件、スラストブロックなし 15 件）は屈曲部での被災であった。

被災形態は、管体のたわみや破損は少なく、構造物周辺や屈曲部の管体が移動することにより生じる継手の抜け出しや屈曲が大半であった。

被災原因を図-1（右）に示す。不同沈下が最も多く、次いで管路の水平変位や浮上が多かった。液状化時に生じた地盤剛性の低下等により、こうした被害が生じたと考えられる。

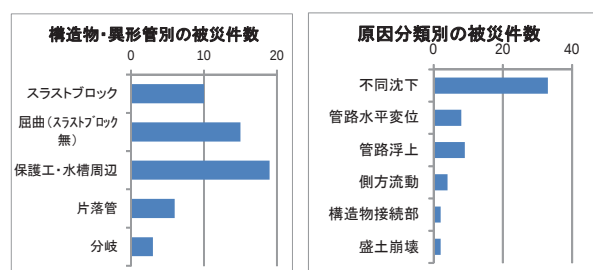


図-1 構造物別・原因別の被災件数

②地形・地質・地下水・基盤層の影響

幹線用水路の路線上の地形や地下水について、上流側（山間地）では地下水位は比較的低い。一方で、下流側（平野部）は地下水位が高く、盛土層に続いて、粘性土層、砂質土層、砂礫層の互層で構成され、全体的に軟弱である。なお、表層地質は大部分が「丘陵地」「ローム台地」であり、液状化危険度は低い。

図-2 は、路線近傍の 62 地点のボーリングデータより、N 値>50 の基盤層が確認された位置（◆）、削孔深さが浅く基盤層が確認できない位置（○）、管路に大きな被災が生じた位置（▲管の移動、■継手離脱）を示している。大きな被災は、基盤層の深い下流側で生じている。

以上より、路線の下流側では、地下水位が全体的に高いこと、基盤層が深く地震時の応答振幅も相対的に増大したことが影響し、液状化や継手抜け出しなどの被災が多かったと推察される。

③継手間隔・水平移動量

継手間隔・移動量は、図-3 に示す付帯工と異形管からの離隔本数で整理した。屈曲や分岐等の全ての異形管周辺の水平移動量を図-4 に示す。10 本目までにほぼ 0.4m に収束しているが、異形管に近いと大きな移動量が生じる場合があることが分かる。また、全体に 0.2m 程度のずれが生じている。

スラストブロック周辺の水平移動量を図-5 に示す。最大の移動量は、IP.55 で発生しており、上流側の 1 本目がスラスト力の作用方向に約 0.71m 移動している。最大の移動量は、下流側の 6 本目で、反対方向に 0.78m 移動しているが、IP.55 の約 90m 下流にある片落管の被災の影響を受けた可能性がある。

全ての異形管近傍の最大継手間隔(上下左右 4 箇所)の分布を図-6 に示す。異形管に近いほど抜け出しが大きく、5 本以内では規格値を上回るものも多いが、12 本目以降は規格値内に収まっている。

④まとめ

被災した管路の移動量や継手抜け出し量等の履歴は、対策範囲の検討の目安となる。調査した管路施設では、

- ・スラストブロックのある屈曲部での最大水平移動量は 0.78m、10 本程度で直線区間の変位量と同程度に収束した。
- ・スラストブロックなしの屈曲部での最大水平移動量は 0.57m、8 本程度で直線区間の変位量と同程度に収束した。
- ・構造物周辺で屈曲を伴う場合は、

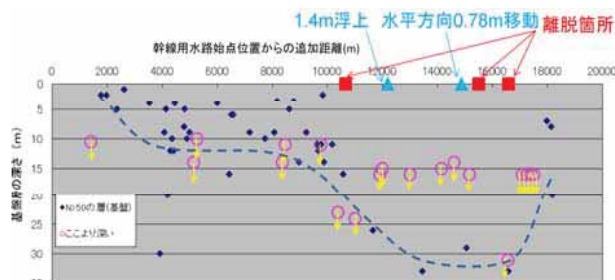
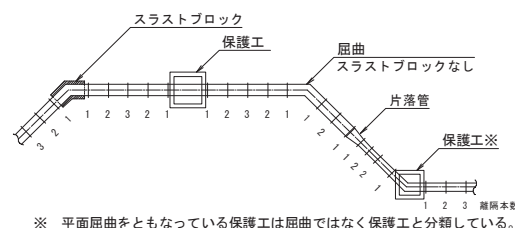


図-2 基盤層の深さと被災箇所



※ 平面屈曲をとまっている保護工は屈曲ではなく保護工と分類している。

図-3 付帯工と異形管からの離隔本数

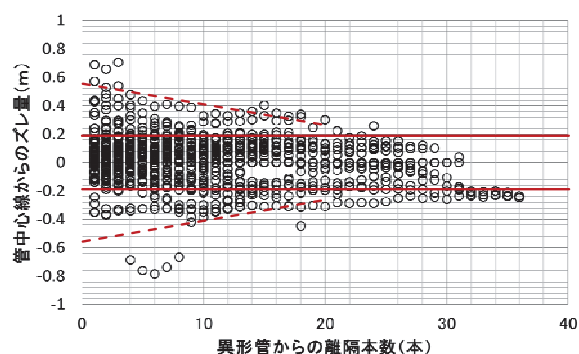


図-4 全ての異形管周辺の管路水平移動量

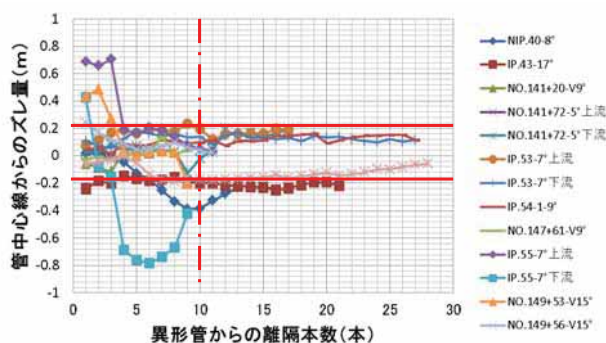


図-5 スラストブロック周辺の管路水平移動量

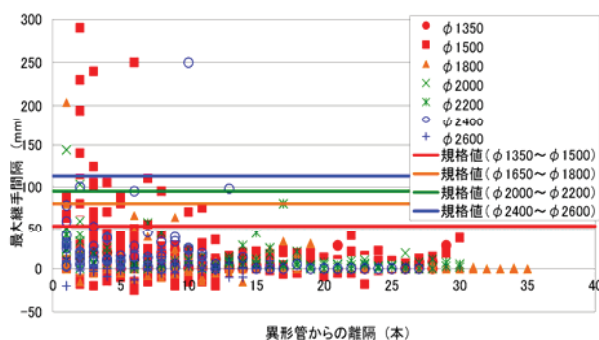


図-6 異形管からの離隔本数と継手抜け出し量

最大 **0.4m** の水平移動量を示した。

- ・規格値を超える継手抜出しは、離隔本数 **5** 本以内に多く分布している。

2) 既往文献による管路屈曲部の被害

①屈曲部の発生変位

近年、大規模地震で被害を受けた管路の事例分析により、弱点箇所などが明らかになってきているが、管路の変位に着目すると、地震前後のデータ比較が難しいこともあり、報告事例が非常に少ない。

その中で、継手離脱等により漏水に至った事例として、既往の文献に示された曲管部の水平変位を表-1 に示す。

液状化が確認された事例の曲管変位は最大 **600mm～800mm**、液状化しない場合は地盤の剛性低下等に伴う曲管変位として最大 **400mm** 程度が観測されている。

表-1 過去の被災データによる曲管変位

地震	管路名・対象	口径	屈曲角	水平変位	現地の状況等
日本海中部 (M7.7)	埴川支線用水路 第2号スラストブロック	800mm	52.975°	約 400mm	 洪積粘土 泥岩
	浅内支線用水路 第5号スラストブロック	1200mm	20.809°	350mm	 洪積粘土 腐植土
北海道南西沖 (M7.8)	真駒内第一幹線 第1号スラストブロック	1100mm	56.5°	600～800 mm (継手間隔の累積値)	 現地盤は砂を主体とする層 噴砂あり
東北地方太平洋沖 (M9.0)	矢吹北工区 IP.55 (スラストブロック有)	1500mm	17.3°	780mm	砂基礎 広範囲に液状化が発生
	矢吹北工区 IP.50 (スラストブロック無)	1500mm	4.79°	570mm	砂基礎 広範囲に液状化が発生

②屈曲部近傍のジョイント間隔の変化

管内面から 3970 箇所の継手間隔を測定し、配管図と照合して構造物や曲管との位置関係に着目し、被害の傾向を分析した結果を以下に示す。

地震：鳥取県西部地震（最大震度 6 弱）

路線名：D 事業 幹線用水路（延長 18.9km）

口径・管種：800～900mm ・T/K 形ダクトイル鉄管

地震時の状況：管内空虚（建設中）、液状化の発生なし。

管路被害：31 箇所の継手で離脱または重大な拔出し、2 箇所の管体で変形。

表-2 より、継手離脱または規格値の 1.5 倍を超える拔出し（継手離脱は規格値の約 2 倍）を示した継手は合計 31 箇所と、調査した 3970 箇所の 0.8%であるが、そのうちの 94%（29/31 箇所）が曲管・構造物から 2 本以内の継手で発生しており、その影響は明らかである。

表-2 被災箇所一覧

	区分	屈曲角度			ブロックの有無	異形管から 離隔(n本目)	継手拔出量 (mm)	備考
		°	'	"				
1	B	14	48	32	有	1	60	
2	A	弁室のきわ			有	1	段差30	継ぎ輪
3	B	7	29	47	無	1	52	
4	A	86	57	46	有	1	100	ゴム輪露出
5	B	23	26	13	有	2	46	
6	A	21	21	55	有	2	277	継手離脱（継ぎ輪）
7	A	傾斜配管部			有	1	管変形	32° 傾斜下端部
8	B	11	31	34	有	1	48	
9	A	8	2	44	有	1	21	ゴム輪露出
10	B	30	59	52	有	2	50	
11	A	1	25	27	無	1	22	ゴム輪露出
12	B	22	10	21	有	1	56	
13	A	傾斜配管部			有	2	管変形	36° 傾斜埋設部の支台
14	B	8	17	4	有	1	56	
15	B	26	9	20	有	1	47	
16	B	18	44	6	有	1	47	
17	B	18	17	36	有	1	58	
18	A	23	57	26	有	1	116	継手離脱
19	B	23	57	26	有	1	47	
20	A	24	21	39	有	1	65	ゴム輪露出
21	B	77	8	33	有	0	55	ブロック内の曲管同士
22	B	77	8	33	有	1	50	
23	B	77	8	33	有	2	50	
24	B	傾斜配管部			有	0	42	28° 傾斜上端部の曲管同士
25	A	傾斜配管部			有	1	69	28° 傾斜上端（継手離脱）
26	B	水平移行後			有	5	62	
27	B	15	46	12	無	1	55	
28	B	傾斜配管部			有	1	50	30° 傾斜下端部
29	B	5	2	19	無	1	49	
30	B	14	46	51	有	1	47	
31	A	11	18	0	無	3	12	ゴム輪露出
32	B	45	0	0	有	1	53	
33	B	44	48	50	有	1	48	
区分A) 「受口～挿し口の離脱」または「ゴム輪の露出」により水密性を確保できない状態								
区分B) 継手離脱には至らないものの「規格値の1.5倍を超える伸び出し」を示す状態								

(2) 模型実験による管路挙動の解明

1) 小型土槽による液状化地盤模擬試験

①概要

土槽は高さ 500 mm, 長さ 600 mm, 奥行き 200 mm で、水槽水位を上昇させ土槽底面に給水し、地盤内の過剰間隙水圧を高めることで液状化地盤を模擬した。地盤材料は 6・7 号混合珪砂を使用し、水中落下法により相対密度が 20~40% 程度の緩詰め地盤を作製した。実験は土槽内の動水勾配 ($i=H/L$) を変化させ、それを保持した状態で口径 50mm の模型管を重錘(一定荷重)または電動アクチュエータ(一定速度)により管軸直角方向に横引きする方法で行った。

②模擬液状化の確認

過剰間隙水圧は図-7 に示すとおり動水勾配の増加に伴い上昇し、 $i=1.0$ で計算上の有効上載圧にほぼ到達している。土粒子の密度および間隙比 ($=0.924$) から求めた計算上の限界動水勾配 i_{cr} は 0.85 であるが、壁面近傍に生じる水みち等の影響もあり、完全液状化状態とみなせるのは $i_{cr}'=1.0$ まで上昇させた時点と判断される。

③過剰間隙水圧分布

土槽内の過剰間隙水圧分布は、高さ方向に直線的に分布している。本方法により、土槽全体でほぼ均一な状態が確保できることを確認した。

④水平抵抗力

動水勾配 $i=0.0, 0.5, 1.0$ で保持した状態で、管を一定速度で 25mm 横引きした時の水平抵抗力を図-8 に示す。管の水平抵抗力は牽引速度よりも動水勾配の影響を大きく受け、 $i=0.0$ で 0.33~0.39 kN、 $i=0.5$ で 0.18~0.23 kN、 $i=1.0$ で 0.02~0.09 kN と液状化程度に応じて低下する。

⑤水平方向地盤反力係数の変化

実験から得られた地盤反力係数を図-9 に示す。地盤反力係数は管に作用する荷重を投影面積と水平変位量で除して算出した。なお、水平変位量は一定荷重を負荷した場合ではその動水勾配で安定するまでの変位蓄積値を、一定速度で牽引した場合では変位量 5 mm の時点で算出した。地盤反力係数は動水勾配が上昇するほど低下し、実験上の限界動水勾配である $i_{cr}'=1.0$ のときの地盤反力係数は 112~1,250 kN/m^3 (平均値 593 kN/m^3) とばらつきを含むが、 $i=0.0$ の時 (1,960~7,733 kN/m^3 , 平均値

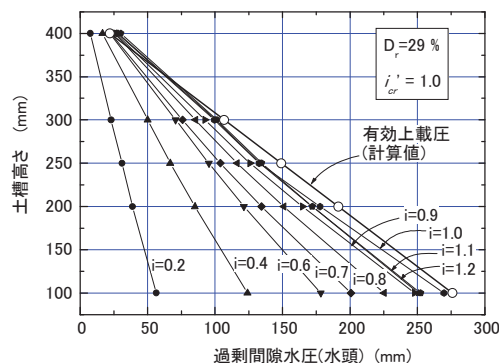


図-7 過剰間隙水圧の変化

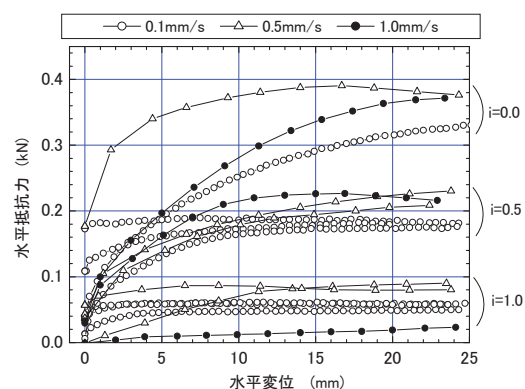


図-8 管の水平抵抗力 (一定速度)

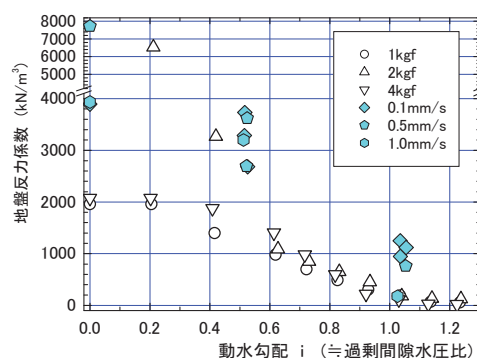


図-9 地盤反力係数

3,635 kN/m³) と比べて平均値で 1/6 程度、最小値で 1/17 程度に低下する。

2) 中型土槽による模型管路実験

①概要

液状化を模擬した地盤内で継手構造の埋設管路屈曲部を対象とした水平載荷実験を実施、管路挙動を確認した。

模型管は口径 50 mm、長さ 150 mm のアルミニウム製で、伸縮屈曲性と離脱防止機構を備えた鎖構造継手と、伸縮屈曲性のみを有した柔構造継手の 2 種類について曲管を中央に配置し合計 12 箇所（図 1）の継手を有する模型管路を構築した。スラスト対策として鎖構造継手では曲管とその両隣の管を一体化し、柔構造継手ではそれと同等の受働土圧が得られるコンクリートブロックを曲管部に設置した。土槽（幅 1600 mm、奥行き 800 mm、高さ 500 mm）底部には有孔板で仕切られた高さ 50 mm の水だけの層を設け、連結した外部水槽の水位を上げて地盤内に上向きの浸透を発生させることで、過剰間隙水圧を高めて液状化を模擬した。地盤は 6・7 号混合珪砂を使用し、水中落下法により相対密度が 30% 程度の緩詰め地盤を作製した。

実験は土槽内の動水勾配を変化させ、それを保持した状態で曲管部に水平載荷する方法で実施した。

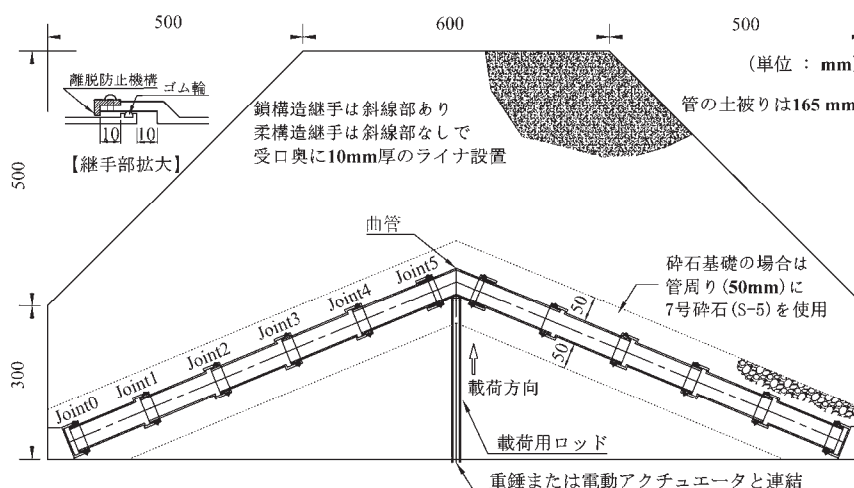


図-10 実験装置

②曲管の水平変位

重錘 117.6 N を曲管部に負荷し、過剰間隙水圧比を変化させたときの曲管の水平変位の変化を図-11 に示す。鎖構造継手(No.1-a)では継手離脱は生じないが、柔構造継手(No.1-b)では曲管の水平変位が約 33mm で継手離脱が発生した。いずれも過剰間隙水圧比が 0.6 を超えたあたりから水平変位が急増している。

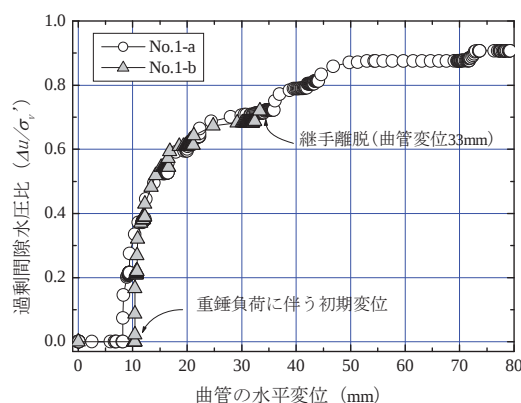


図-11 曲管の水平変位 (No.1-a,b)

③管路の水平抵抗力

過剰間隙水圧比を 0.5 に設定し、0.1 mm/s の一定速度で曲管を背面側に移動させたときの水平抵抗力と曲管の水平変位の関係を図-12 に示す。鎖構造継手 (No.2-a,b) の水平抵抗力は柔構造継手 (No.2-c,d) より若干大きく、いずれも管周囲の砂基礎と碎石基礎の違いによる差異はほとんど認められなかった。また、柔構造継手 (No.2-c,d) では②と同じく継手離脱が発生した。

④継手伸び量および継手屈曲角

No.2-a (鎖構造継手, 砂基礎) の実験結果を例として継手伸び量の推移を図-13 に、継手屈曲角の推移を図-14 に示す。なお、継手伸び量は模型管内面 (左右) に設置した 2 つの変位計の計測値の平均から、継手屈曲角はその差から算出した。継手部の挙動は、曲管に近い移動可能な継手 (鎖構造継手の場合は Joint4) から順に動き出す傾向が認められた。また、曲管変位が小さいときは Joint4 のみが背面側に凸に屈曲し、Joint3 や Joint2 が逆方向に屈曲しているが、変位が 40 mm を超えると Joint4 は離脱防止状態となって一定値をとり、Joint3 の屈曲方向逆転に応じて joint1 が屈曲し、曲管変位を吸収していることがわかる。

⑤変形モード

今回の実験結果より、鎖構造管路の変形モードは、基礎材の違いや過剰間隙水圧の違いに関わらず、曲管に近い継手から屈曲・伸長し、順次、外側に波及していくことがわかった。

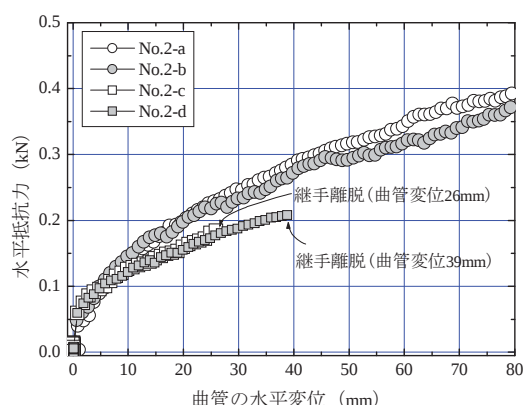


図-12 管路の水平抵抗力 (No.2-a,b,c,d)

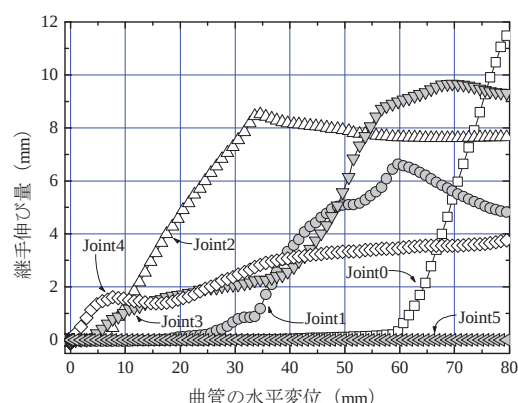


図-13 継手伸び量 (No.2-a)

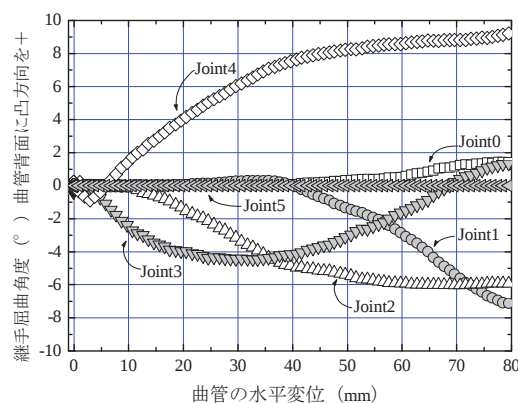


図-14 継手屈曲角 (No.2-a)

(3) 数値解析による管路挙動の検証

1) 継手構造管路屈曲部の挙動メカニズムの検証

①概要

過剰間隙水圧や液状化が表現可能な解析手法を検討し、大変形解析(**FLAC**)を試行実施した。継手構造のモデル化、管路と地盤との相互作用が解析上の課題となり、これを再現する手法としてハリ・バネ要素が適していることを確認した。

パイプラインを弾性床上的の梁とみなし、継手および地盤をバネで表現したハリ・バネ要素モデルによる非線形弾性解析を行い、継手の伸縮屈曲および離脱防止機能に伴う管路挙動を再現できるかどうか検証した。

実験管路は左右対称であるため、解析では図-15 に示すように片側のみをモデル化し、継手バネおよび地盤バネは模型管の実験結果および既往文献を参考に図-16 に示す非線形のバネ要素とした。

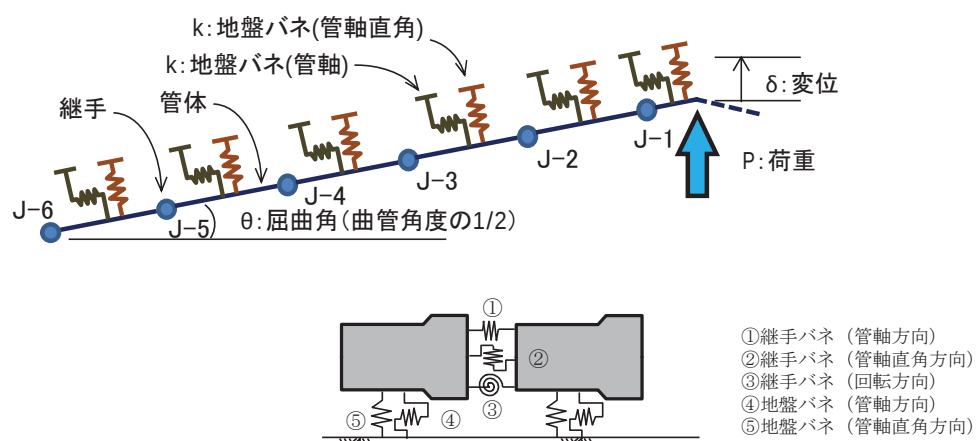


図-15 バネ・ハリ要素解析モデル

②継手伸び量および屈曲角度

実験および解析から得られた継手伸び量を図-17 に、継手屈曲角度を図-18 に示す。

図-17 より、大きな伸びが生じる継手の順序に差異が認められる。これは継手の屈曲により伸び出しが拘束される効果が解析では表現できないためであるが、初期に J-2→J-3→J-4 と曲管に近い継手から順に動き出す傾向や例えば J-3 が伸び切る前に J-4 が動き始める挙動、曲管変位が小さい段階から J-5 や J-6 が動き始めることなどの点で実験結果と符合している。

図-18 より、J-2 のみが曲管背面に凸方向に大きく屈曲すること、J-3 から J-6 は逆方向に屈曲すること、J-3 は曲管変位 30 mm 程度から屈曲方向が反転し、J-4 は曲

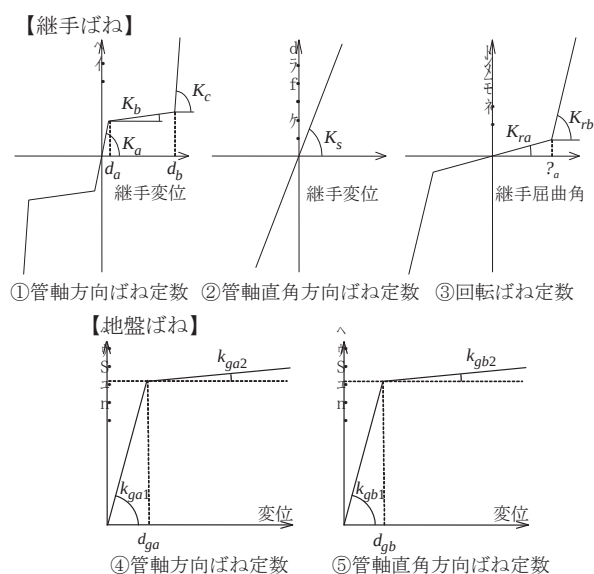


図-16 継手ばね・地盤ばねの特性

管変位 50 mm 以上では角度がほぼ一定となっていることなど、変化の傾向が非常によく合致している。屈曲角度の大きさも同程度であり、実験結果を定量的に再現する結果が得られている。

③管路変形モード

管路の片側について、変形前の曲管中心を原点、管軸方向を X 軸、管軸直角方向を Y 軸とし、曲管が 40 mm および 80 mm 変位したときの各継手の位置を実験および解析からそれぞれ算出してプロットした結果を図-19 に示す。曲管変位 40 mm のときの J-3 および J-4 の位置に若干の相違はあるものの、実験結果と解析結果の管路挙動はよく合致し、管路変形モードを概ね捉えている。

④挙動メカニズム

管路の挙動は、継手構造の違いによらず曲管変位に伴って曲管に最も近く移動可能な継手から順に動き始める。曲管変位が小さいときは曲管から最も近い継手（鎖構造管路では J-2、柔構造管路では J-1）のみが曲管背面に凸方向に屈曲し、それに隣接する継手（鎖構造管路では J-3、柔構造管路では J-2）は逆方向に屈曲する。

さらに曲管の変位が大きくなると、鎖構造管路では J-2 が拘束され、その影響で J-3 の屈曲方向が反転し、それが順に曲管から遠い方向へと波及して管路全体で曲管変位に追従する挙動を示す。一方、柔構造管路では、曲管変位が大きくなると近傍の継手で離脱を生じる。

バネ定数の設定に改良すべき点はあるが、地盤バネを液状化を想定した値に設定し、バネ・ハリ要素モデルによる非線形弾性解析を行うことで、鎖構造管路の特徴的な挙動を概ね再現でき、曲管の許容変位を求めることができる。

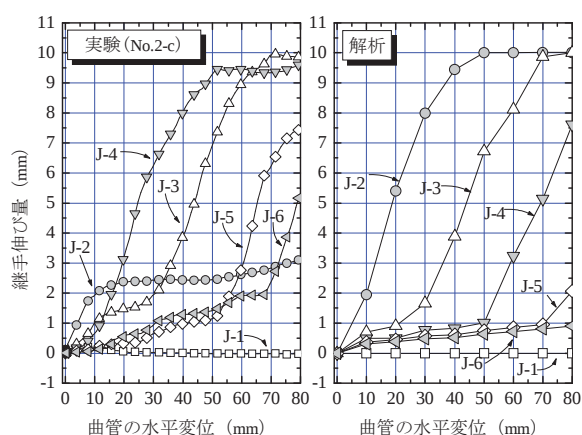


図-17 継手伸び量の比較

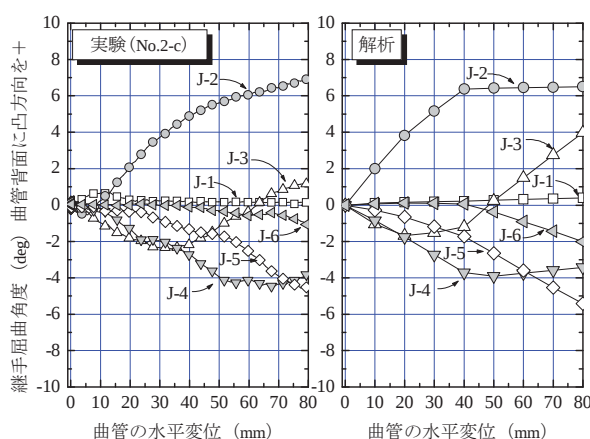


図-18 継手屈曲角度の比較

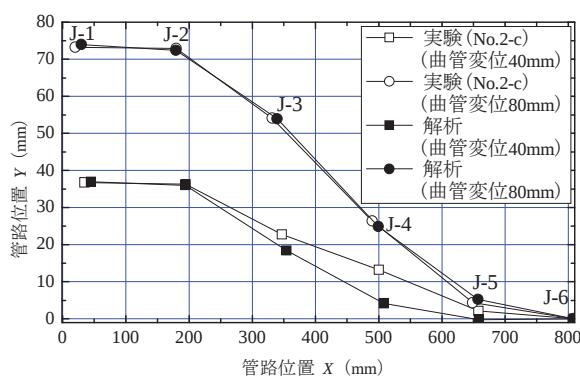


図-19 管路変形モードの比較

2) 内圧スラスト力による地震時曲管変位の検証

①概要

曲管部の背面地盤（砂基礎および現地盤）が地震の繰返し荷重を受けて強度・剛性低下する過程を考慮した変位解析手法により、スラスト力の作用する曲管部の水平変位予測手法を検証した。

②解析手法

曲管背面に仮想的なすべり面を設定し、応答加速度、せん断応力比を算定する。次に入力地震動を設定し、累積損傷理論に基づくひずみ振幅の増加に伴う地盤の強度・剛性低下を逐次計算する。これをもとに初期状態から受働土圧、水平方向地盤バネ定数の地震動による低下度合を求め、図-21 のように内圧スラスト力による水平変位を計算する。

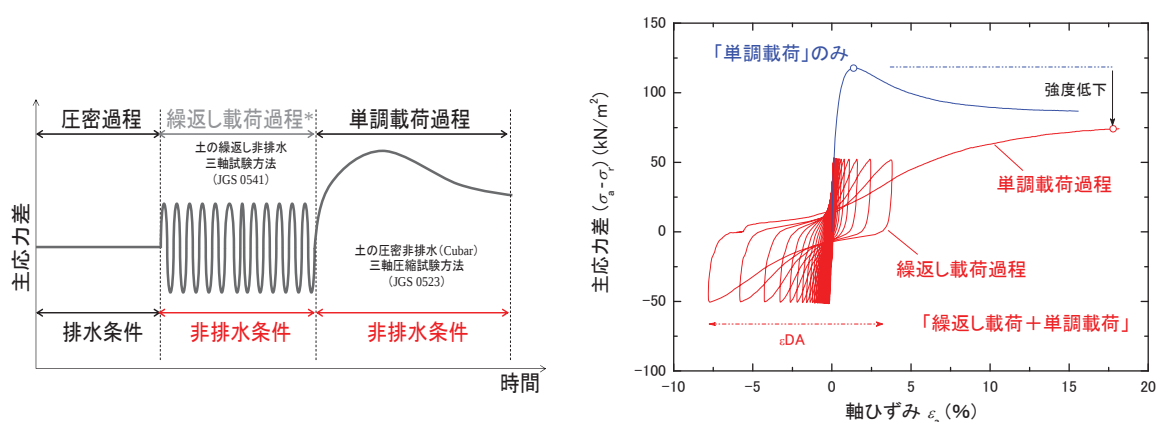


図-20 非排水繰返し載荷後単調載荷試験による強度低下の例

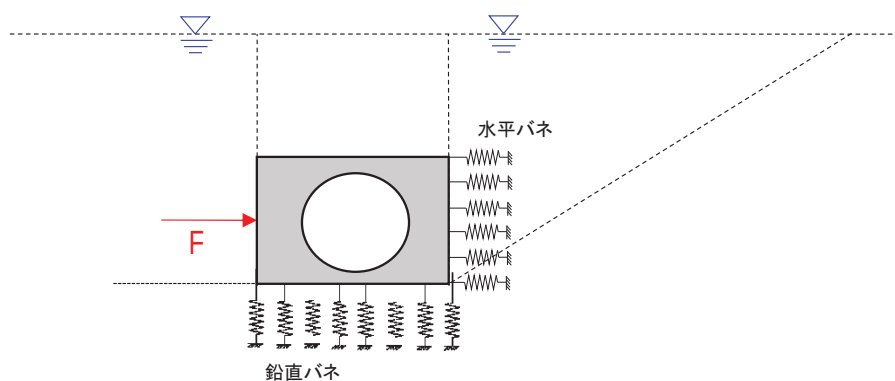


図-21 スラストブロックと地盤バネ

解析断面は図-22 に示すモデルとし、45°曲管に設計内圧 0.5MPa が作用するときの安全率が 1.5 を満足するよう寸法を決定した。

入力地震動は「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」を参照し、2つの標準的なレベル 2 地震動を用いた。

地盤材料特性（液状化強度特性、せん断強度低下特性、剛性低下特性）は多くのため池堤体材料の解析結果を整理したデータベースを用い、代表的な材料特性から求めた。

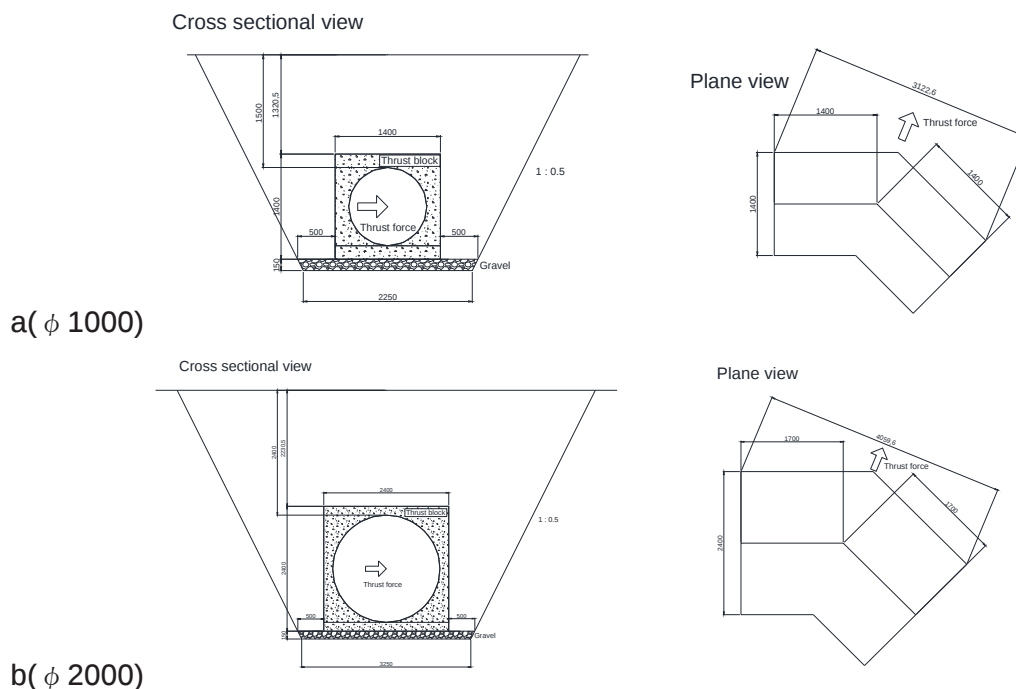


図-22 解析モデル a(φ 1000)および解析モデル b(φ 2000)

③解析結果

図-22 の解析モデル a および b について、入力地震動、現地盤の液状化強度、砂基礎の液状化強度を変化させて得られた曲管変位の解析結果を表-3 に示す。

現地盤が液状化せず、また砂基礎の液状化強度も高い条件では 10mm 程度の曲管変位にとどまっているが、現地盤ならびに砂基礎の液状化強度が低いほど変位量は増大し、最大 300mm を超える変位を示す結果となっている。

表-3 数値解析による曲管変位の想定

想定地震動	地震継続時間	最大加速度 (Gal)	現地盤の液状化強度	砂基礎の液状化強度	曲管水平変位 (mm)	
					φ 1000	φ 2000
海溝型 (プレート境界) Mw8.0 程度	約 80 秒	700	液状化しない	高	10	11
			液状化しない	中	60	97
			高(粘土)	低	137	283
			高(砂)	低	137	317
			中(砂)	低	144 以上	327 以上
内陸活断層型 (直下型) Mw7.0 程度	約 25 秒	800	液状化しない	高	8	12
			液状化しない	中	48	93
			高(粘土)	低	101	204
			高(砂)	低	108	267
			中(砂)	低	112 以上	274 以上

(4) 管路構造の違いによる耐震効果の検証

①概要

屈曲部には内圧によるスラスト力が常時作用し、曲管背面の受働土圧などで安定するように設計されているが、液状化によって地盤剛性が低下したときの管路挙動については未解明な部分が多い。

継手構造の埋設管路屈曲部を対象とした実規模振動実験を実施し、その動的挙動を確認した。実験装置は図-23 に示すとおり長さ 6 m、幅 4 m の振動台に、高さ 1.3 m の土槽を設置して砂地盤を作製した。地盤

内には口径 150 mm、長さ 400 mm のダクタイル鉄管 8 本と管路中央に配した 45° 曲管で構成した対向する 2 組の管路を構築し、同じ入力波で 2 ケースの挙動比較を実施した。CASE_A は伸縮屈曲性のみを有する柔構造継手を想定し、屈曲部にはスラスト対策としてコンクリートブロックを設置した。管の基礎材は液状化対策として単粒の 7 号砕石(S-5)とした。CASE_B は伸縮屈曲性と離脱防止機構を備えた鎖構造継手を想定し、スラスト力には管路の一体化で対応する構造とした。管の基礎材は地盤と同じ砂とした。全ての継手内面(左右)には図-24 に示すように変位計を配置し、伸縮・屈曲量を計測した。さらに CASE_B は継手の離脱防止機構を連結ボルトで再現した。

地盤材料は表-4 に示す霞ヶ浦砂を使用し、D 値 90%を目標に締め固めて土被り 400 mm まで埋戻した後、飽和させた。スラスト力を模擬するため、管路中央の曲管にワイヤを介して水平方向に 1.72 kN の重錘を負荷した。この荷重は 45° 曲管への 100 kPa の内圧負荷によって発生するスラスト力に相当し、CASE_A、CASE_B とも滑動に対する設計上の安全率が 1.0 となるように寸法を決定した。入力波は慣性力の影響を避けるためスラスト力と直交する方向への正弦波とし、重錘を負荷した状態で 200 Gal×5 Hz で 30 秒加振した後、400 Gal×5 Hz でさらに 30 秒加振した。

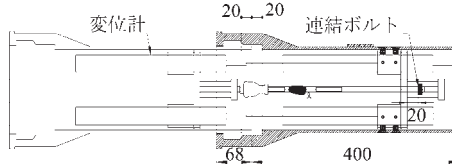


図-24 供試管の継手部

土粒子の密度	ρ_s	g/cm^3	2.719
最大乾燥密度	ρ_{dmax}	g/cm^3	1.510
目標乾燥密度	$\rho_d(90\%)$	g/cm^3	1.359
目標間隙比	e	-	0.998

②入力加速度と過剰間隙水圧

振動台の加速度応答と管中心深さでの背面地盤の過剰間隙水圧を図-25 に示す。過剰間隙水圧は 1 回目の加振開始 5 秒で有効上載圧に近い値まで上昇し、加振中は

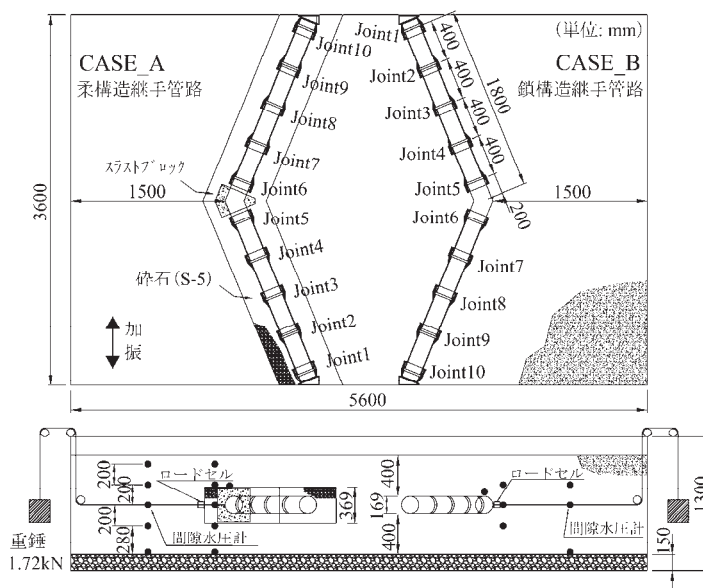


図-23 実験装置

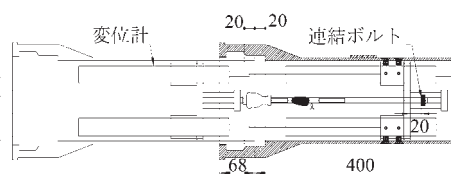


図-24 供試管の継手部

表-4 砂の物性値

土粒子の密度	ρ_s	g/cm ³	2.719
最大乾燥密度	ρ_{dmax}	g/cm ³	1.510
目標乾燥密度	$\rho_{d(90\%)}$	g/cm ³	1.359
目標間隙比	e	-	0.998

それが継続している。

③曲管変位と載荷荷重の変化

2 回の加振に伴う曲管の水平変位とロードセルで測定した載荷荷重の変化を図-26 に示す。CASE_A の変位は最大 340 mm に達し、2 回目の加振中に載荷荷重が急減していることから、このとき継手が離脱したと判断される。柔構造管路の場合、周辺地盤全体が液状化すると管周囲が砕石基礎であっても変位を抑止できず、加振継続時間が長ければ継手離脱に至る。

CASE_B では2 回目の加振中に 250 mm に達した後は一定値となり、全継手が離脱防止状態まで伸びたことを示している。

④鎖構造と柔構造の違い

各継手に設置した左右 2 箇所の変位計の平均から継手伸び量を、左右の差から継手屈曲角を求めた結果を図-27 に示す。CASE_A では曲管の継手が 11° 以上背面側に大きく屈曲し、曲管から 2 本目の継手が集中的に 120 mm 以上伸びて離脱している。その外側の継手は伸び量、屈曲角ともに小さい。一方、CASE_B では2 回の加振後に全ての継手が離脱防止状態まで伸び出している。曲管を中心に 6 箇所の継手が背面側に屈曲し、広い範囲で変位を吸収していることがわかる。

⑤まとめ

地盤全体が液状化する条件では、管周囲を砕石基礎としても変位を十分に抑制できず、柔構造継手を使用した場合には曲管近傍の継手に屈曲や伸び出しが集中する。大変位発生時には継手構造の違いが管路の変形モードに大きく影響することがわかった。

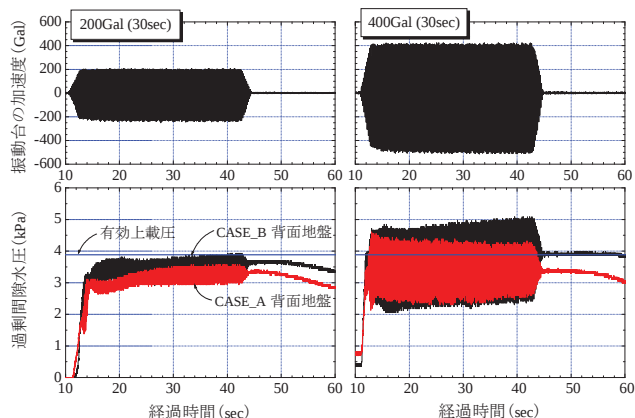


図-25 入力加速度と過剰間隙水圧

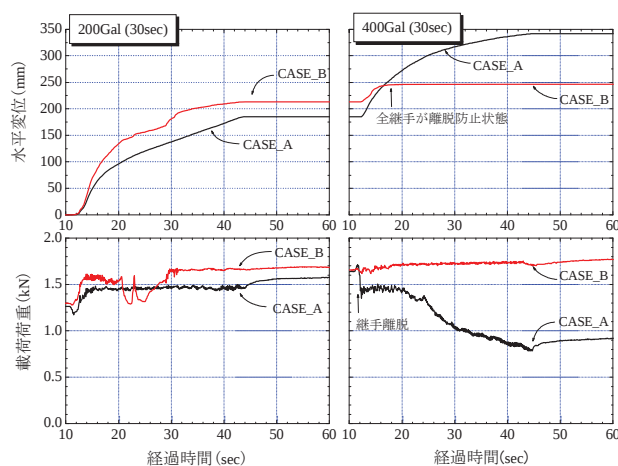


図-26 管の水平変位と載荷荷重

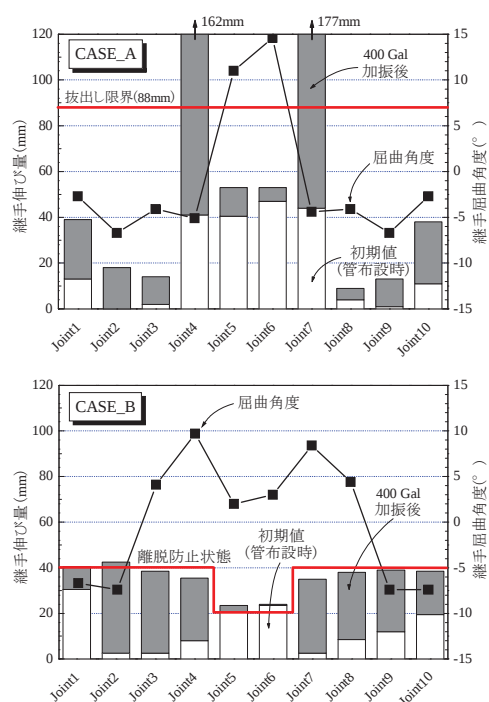


図-27 継手の伸縮・屈曲量

(5) 各種対策工法の適用範囲の明確化

1) 鎖構造継手による管路の耐震化範囲

①考え方

- i) 過去の被災事例分析や数値解析をもとに、地震時の内圧スラスト力による曲管の変位量を想定する。
- ii) 曲管前後の一部区間を鎖構造管路化するときの挙動を把握し、変形モードを定める。
- iii) 変形モードにしたがって鎖構造継手管の使用本数、単位管の長さから許容変位量を求め、地震時の曲管想定変位を満足する使用本数を決定する。

②地震時の曲管変位の検討

- i) 大規模地震による管路被災調査記録などから、曲管部のスラストブロックが背面側に移動・漏水した事例に着目すると、液状化を伴わない場合には最大 **400mm** 程度の変位が発生している。液状化が確認された被災事例ではさらに大きく、**600～800mm** の変位が記録されている。
- ii) 地震時の地盤の強度・剛性低下を考慮した数値解析からは、掘削溝内の砂基礎と現地地盤がともに剛性低下する条件では **300mm** 以上の変位が試算されている。



図-28 日本海中部地震における被災事例

③管路の変形モード設定

- i) スラスト力は曲管部に作用し、水平変位は曲管から前後の管路へと伝達する。
- ii) 曲管に直接つながる継手は剛構造(離脱防止状態)であり、伸縮屈曲しない。
- iii) 曲管から2箇所目以降の鎖構造継手は、伸縮量と屈曲に伴う伸びし量の合計が許容伸びし量に達した時点で離脱防止状態となり、隣接する外側の継手が伸び出して順次追従する。
- iv) 管路の変形モードは図-29 のとおり、曲管から2本目の継手が背面側に角度 ϕ だけ屈曲する。この継手が離脱防止状態まで屈曲しながら伸び出したとき、その外側の継手は2箇所が逆方向(曲率内側)へ $\phi/2$ ずつ屈曲したのち、伸び出して離脱防止状態となる動きを示し、順次外側の継手に伝達して、変位に追従する。

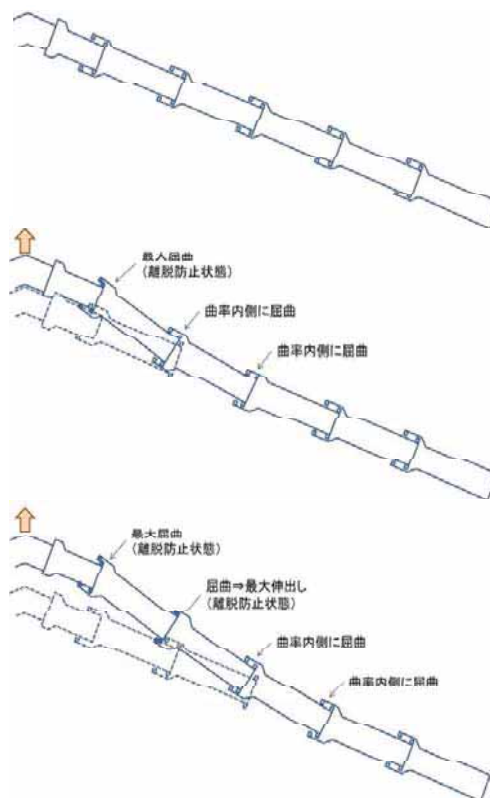


図-29 管路の変形モード(影響範囲)

④管路の耐震化範囲の検討

管路の変形モードを図-30 のように考え、曲管角度、継手の初期状態、単位管の長さ、鎖構造継手の本数による許容最大変位を算定する。

45° および 90° 曲管を対象として、鎖構造継手の本数による許容変位量の試算結果を表-5 に示す。

ここで、強震時の液状化等による曲管の水平変位を 400mm と仮定したとき、鎖構造継手管の必要本数は表-5 より 45° 曲管では片側 4 本、90° 曲管では呼び径 100 以下で片側 5 本、呼び径 150 以上で片側 4 本、となる。

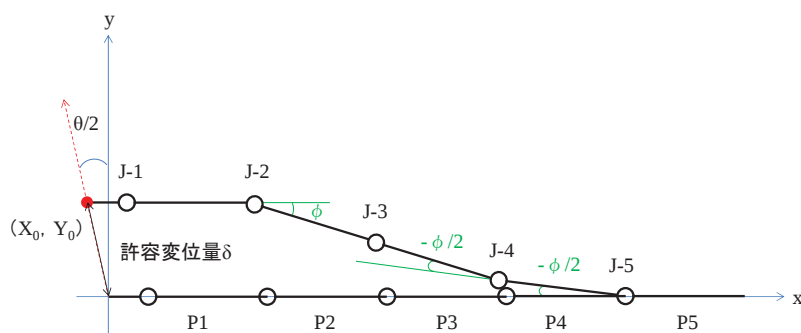


図-30 曲管の許容変位量の算定

表-5 許容変位量の計算結果

呼び径	直管長さ (m)	45° 曲管			呼び径	直管長さ (m)	90° 曲管		
		n=4本	n=5本	n=6本			n=4本	n=5本	n=6本
75	4.0	559	762	962	75	4.0	329	442	555
100		554	758	959	100		328	441	554
150	5.0	689	944	1195	150	5.0	409	551	692
200		679	936	1188	200		406	549	690
250	6.0	670	928	1181	250	6.0	403	546	688
300		805	1114	1418	300		484	656	825
350		796	1107	1410	350		482	654	824
400		788	1099	1403	400		479	652	822
450		779	1092	1397	450		477	650	820
500		771	1085	1390	500		474	647	818
600		755	1070	1376	600		469	643	814
700		740	1056	1363	700		465	639	810
800		725	1043	1350	800		460	635	807
900		711	1029	1337	900		455	631	803
1000		697	1017	1325	1000		451	627	799

2) 耐震化による費用対効果の算定

設計基準「パイプライン」の耐震設計では、施設の重要度がA種またはB種で液状化対策が必要な場合には、費用対効果の検討に抛らず対策を実施する。

ここでは参考として、「大規模地震対策に係る土地改良事業の費用対効果分析に関する効果算定マニュアル」（平成23年6月30日 23農振第600号 農村振興局整備部長）に準じて、本工法の費用対効果を算出した計算例を示す。

① 考え方

経済効果（総費用総便益比）は、土地改良事業の経済性評価を行うもので、一定地域の範囲における評価期間（当該事業の工事期間+40年）の下で必要な投下費用（総費用）と、それによって発現する総便益を対比することで測定を行う。

大規模地震対策の効果の算定では、一連の確からしいシナリオ（地震発生から復旧までのストーリー想定）を設定する。また、効果額算定では、評価期間内に大規模地震発生確率を効果額に乗じる。なお、地震発生確率が大きくなれば、より高い費用対効果となる。

$$\text{総費用総便益比} = \text{総便益} / \text{総費用} \geq 1.0$$

② 総費用

総費用は、通常のパイプライン工事費に加えて別途必要となる耐震対策工事費を合算した全体工事費であり、図-31の右側の耐震対策ありせば工事費にあたる。

③ 総便益

総便益は、通常のパイプライン工事費（耐震対策なかりせば工事費）に加えて、パイプラインの大規模地震対策を行うことにより未然に防げる被害額であり（図-32）、図-31の左側にあたる。

なお、一律に定められないため図-31には表記していないが、断水に伴う作物減産被害や、道路交通障害に伴う損失、住宅近接地では二次被害の発生リスクなど、便益として考慮すべき項目がある。



図-31 耐震対策の費用対効果の概要

〔耐震対策なかりせば〕

—大規模地震発生時—

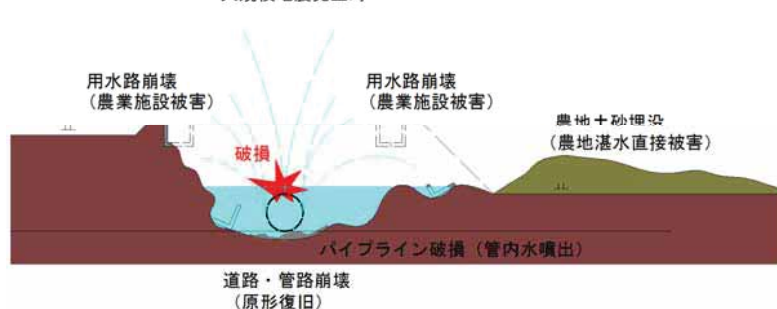


図-32 大規模地震による被害のイメージ

④ 費用対効果の算定条件

費用対効果の算出条件は、新設パイプラインを対象とし、屈曲角度 45° に対して、「(B) 耐震対策なかりせば」は従来工法としてスラストブロックによるスラスト対策、「(A) 耐震対策ありせば」は耐震対策として管路の鎖構造化（範囲は屈曲部上下流それぞれ管 5 本）を想定した。

配管模式図を図-33 に示す。

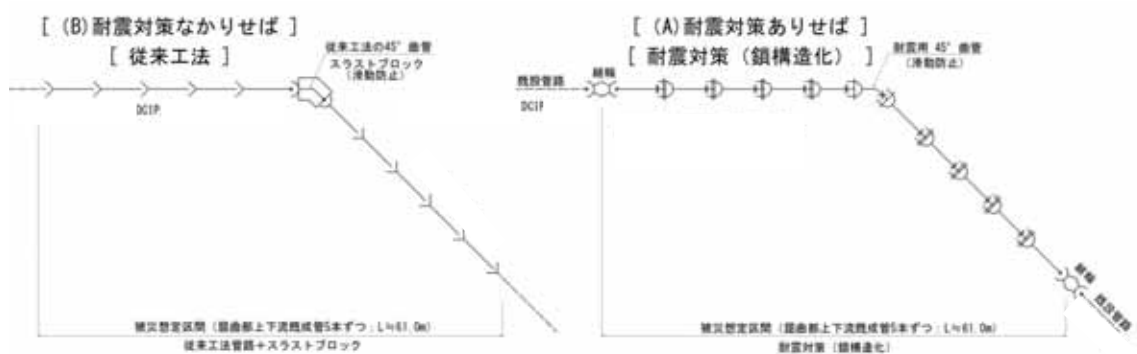


図-33 配管模式図

その他の諸元は下記のとおりであり、従来工法は設計基準「パイプライン」の構造計算手法により求めた。

- ・口径： $\phi 500$ 、 $\phi 1000$
- ・管種：ダクタイル鋳鉄管
- ・設計水圧：0.5MPa、0.75MPa、1.0MPa
- ・今後 30 年の大規模地震（震度 6 弱以上）の発生確率：65%

⑤ 費用対効果の算定結果

パイプラインの大規模地震対策による費用対効果の算定結果は表-6 のとおりであり、計算例では全て 1.0 以上となった。

計算例では、効果として農地および農業施設被害額とパイプライン本体の被害額を計上しているが、これら以外に断水に伴う作物減産被害、道路交通障害に伴う損失、住宅近接地においては二次被害の発生リスクなど、便益として考慮すべき項目があり、これらの損失が発生するような条件ではさらに高い費用対効果となる。

表-6 大規模地震対策による経済効果の検討結果

対象施設		総費用 (千円)	総便益 (千円)	総費用 総便益比	判定 ≥ 1.0
DCIP $\phi 500$	0.5MPa	13,600	17,896	1.31	OK
	0.75MPa	13,600	17,940	1.31	OK
	1.0MPa	13,600	17,940	1.31	OK
DCIP $\phi 1000$	0.5MPa	26,700	30,060	1.12	OK
	0.75MPa	26,700	30,247	1.13	OK
	1.0MPa	26,700	30,534	1.14	OK

(6) 設計・施工マニュアルの作成

研究成果をとりまとめ、設計・施工マニュアルを作成した。

地震時のウィークポイントとなる屈曲部について、内圧スラスト力に対する通常時ならびに地震時の合理的な設計手法を提示するとともに、施工上の留意点等もとりまとめたマニュアルを作成した。

1. 7 実証試験（現場適用）の概要、結果、課題等

(1) 宗吾北地区（印旛沼二期農業水利事業所）における現地実証試験

平成 28 年 1 月末から、試験管路の布設工事予定。

(2) 松梅地区（愛知県海部農林水産事務所）における現地実証試験

平成 27 年 11 月 30 日から、試験管路布設とセンサー設置を完了。

1. 8 機能監視の概要、結果、課題等

平成 27 年度末で本事業は完了するが、実証試験管路の通水開始時の測定値を初期状態として観測を継続実施し、地震発生に備える。

2 事業の成果

2. 1 成果の内容

(1) 管路屈曲部の挙動メカニズムの解明

内圧スラスト力を受ける埋設管屈曲部が地震時のウィークポイントとなる大きな要因は、地震動による地盤の強度・剛性低下、液状化に伴うスラスト抵抗力の大幅な低下による屈曲部の変位発生、継手の離脱である。

この過程で継手構造管路がどのような挙動を示すかを鎖構造継手管路の模型実験と数値解析による検証を加え、挙動メカニズムを解明した。

すなわち、曲管に近い継手から屈曲と伸び出しを生じ、離脱防止状態に達すると隣接する継手に伸縮・屈曲が伝達し、管路全体で曲管変位に追従することがわかった。このときの管路変形モードを見出した。また、地盤の状態が飽和状態から液状化状態へ変化しても、管路変形モードは大きく変わらないことがわかった。

(2) 管路耐震化範囲の明確化

既往の管路被災事例を調査分析し、屈曲部での被害に着目して地震時に想定すべき変位を示した。また地盤の強度低下を考慮した数値解析からも内圧スラスト力による地震時の曲管変位が推定できることを示した。

この想定変位に対して、曲管角度、鎖構造継手管の本数、単位管の長さから耐震化範囲（鎖構造継手の使用本数）を求める手順を提示した。

(3) 設計マニュアルの作成

地震時のウィークポイントとなる屈曲部について、内圧スラスト力に対する通常時ならびに地震時の合理的な設計手法を提示するとともに、費用対効果の分析や施工上の留意点等もとまとめたマニュアルを作成した。

(4) 外部公表論文

- ①埋設管の水平抵抗力と液状化程度の関係、平成 26 年度農業農村工学会大会講演会、2014 年 8 月、井谷昌功、藤田信夫、澤田 豊、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ②液状化地盤における断面形状の異なる埋設管の水平抵抗力、平成 26 年度農業農村工学会大会講演会、2014 年 8 月、藤田信夫、井谷昌功、澤田 豊、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ③水平載荷実験による継手構造管路屈曲部の挙動、平成 27 年度農業農村工学会大会講演会、2015 年 9 月、井谷昌功、横田木綿、藤田信夫、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ④液状化地盤における継手構造管路屈曲部の動的挙動、平成 27 年度農業農村工学会大会講演会、2015 年 9 月、藤田信夫、井谷昌功、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ⑤液状化地盤における管路挙動 ー隈戸川地区幹線用水路の被災事例ー、平成 27 年度農業農村工学会京都支部研究発表会、2015 年 11 月、春本朋洋、宮田 勉、有吉 充、井谷昌功、毛利栄征、河端俊典

- ⑥液状化地盤における埋設管の水平抵抗力に関する模型実験、農業農村工学会論文集第 295 号、2015 年 2 月、井谷昌功、藤田信夫、澤田 豊、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ⑦水平載荷時の継手構造管路屈曲部の挙動メカニズム、農業農村工学会論文集第 300 号、2015 年 12 月、井谷昌功、藤田信夫、横田 木綿、有吉 充、毛利栄征、河端俊典
- ⑧液状化地盤中の管路屈曲部の動的挙動に関する検討、農業農村工学会論文集第 301 号、2016 年 2 月、井谷昌功、藤田信夫、有吉 充、毛利栄征、河端俊典

2. 2 目標の達成度

(1) 成果から得られる効果

近い将来、発生が懸念される東南海・南海地震などの大規模地震によって、甚大な管路被害を生じさせないため、地震時のウィークポイントとなる異形管部や構造物周辺について耐震性を向上させる方法を提示している。

離脱防止機構を有する鎖構造継手管路を適切な範囲に採用することにより、経済性も勘案しつつ高い耐震性を確保したパイプラインシステムを構築し、大規模地震発生時の被害軽減ならびに復旧費用の低減に大きく貢献することができる。本研究開発の成果は基幹水利施設を中心に、すべての管種を対象として幹線系から末端系までの幅広い口径のパイプラインに適用できる。

また、新設される管路だけでなく既設管路を部分的に改修する際にも適用が可能であり、ウィークポイントを抽出して適切な改修範囲を選定することで工事費を削減し、既存施設の耐震性を効率的に向上させることができる。

(2) 従来技術との比較

1) 比較する従来技術

地盤変状に対するパイプラインの耐震性を高める技術として、現行の設計基準には「埋戻し土」、「現地盤」、「管路」への対策が列記されているが、このうち「管路」について設計手法までの記載はない。本研究開発はこれを具体化する役割を果たすものと考えており、比較すべき従来技術はない。

2) 従来技術に対する優位性

液状化対策として比較すべき従来技術はないが、ここではスラストブロックを用いた柔構造継手管路を対象として、以下に示す。

①経済性

初期コストを単純比較すると従来技術より高価となるが、地震被害の軽減を勘案した費用対効果分析によると経済効果がある。

②工程

配管施工に関しては、通常の管布設工と同等である。

③品質

管路屈曲部の耐震性が向上する。

④安全性

管路屈曲部の耐震性が向上する。

⑤施工性

従来のパイプライン工事と比較して、適用するパイプの継手構造が異なることで接合作業工数が若干増加するが、使用箇所も限定されることから工事全体への影響はほとんどない。

⑥周辺環境への影響

地震による管路そのものの被害や、漏水に伴う土砂流失による周辺農地被害などを未然に抑止できるため、周辺環境を健全に保つことができる。

2. 3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

新技術の適用範囲は、基幹水利施設を中心に、すべての管種を対象として幹線系から末端系までの幅広い口径のパイプラインに適用できる。

また、新設される管路だけでなく既設管路を部分的に改修する際にも適用が可能であり、ウィークポイントを抽出して適切な改修範囲を選定することで工事費を削減し、既存施設の耐震性を効率的に向上させることができる。

3 普及活動計画

3. 1 想定される利用者

すべての農業用パイプラインの発注事業者。

3. 2 利用者への普及啓発等の方法

- ①設計施工マニュアルの公表・配布。
- ②技術説明会、研修会の開催。
- ③論文投稿、学会発表。
- ④技術基準類への反映。

3. 3 利用者に対するサポート体制、参考資料等

土地改良技術事務所等の公的機関を通じた技術説明会の開催。
設計業務における技術支援活動。

3. 4 特許・実用新案等の申請予定

パイプラインの設計施工に広く提供すべき技術と考えており、特許出願は予定していない。

4 研究総括者による自己評価

項 目	自己評価	自己評価の理由
研究計画の効率性・妥当性	A	管路の液状化対策としてウィークポイントである屈曲部に着目し、液状化を模擬できる実験装置の製作と性能確認から始めた。管路模型実験とハリ・バネモデルによる非線形弾性解析との照合、振動台実験、地震被害事例の分析、費用対効果の分析など、幅広い項目についてほぼ計画通りに実施できた。
目標の達成度	A	内圧スラスト力を受ける管路屈曲部の変形挙動について、実験と解析からメカニズムを明らかにし、鎖構造継手の効果とその適用範囲を確認することができた。また、それに基づいて管路屈曲部の耐震性向上のために必要な手法を提示することができた。また、液状化時の曲管変位予測について、合理的な新しい解析手法を試行実施できた。さらに2箇所の現地実証試験において、今後の地震発生に備えてデータ観測を継続している。
研究成果の普及可能性	A	研究成果をまとめた設計施工マニュアルを作成している。管路に対して行う地震応答対策の具体化により、設計実務に適用しやすい形にとりまとめることができたと考えている。 普及を進めるためには設計基準等の技術指針に反映されることが重要であり、引き続き論文等の整備を進めていきたい。
総合コメント パイプラインの耐震性向上に寄与する本研究成果の普及を図り、設計実務への展開に努めたい。		

注) 評価結果欄は、A、B、Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入する。

5 今後の課題及び改善方針

①現地実証試験のフォロー

大規模地震時に液状化のおそれがある 2 地区において現地実証試験を実施している。テーマ実施期間内の業務は、実管路の屈曲部に耐震化範囲を定め、鎖構造継手管路を布設し、初期値ならびに年度末の計測を実施するまでであった。

今後、5 年間をめどに観測を継続し、当該地点における一定規模の地震発生時にはその影響を確認する予定である。

②技術普及活動のフォロー

技術説明会の開催などを継続して、普及促進に努める。

また、管路設計や費用対効果算定については、具体的な事例の蓄積に努め、マニュアルに加えて設計事例集を作成したい。技術基準類への反映に向けて資料整備を進めたい。

③関連データの蓄積

管路の耐震化計画・設計の参考とするため、今後も地震による管路被災事例の収集分析を継続し、地盤特性と管路被災の関連など、対策工法の立案に寄与するデータを蓄積したい。