



振動台を用いた管軸方向地盤ばねの速度依存性に関する実験的研究（その2）

鋤田, 泰子
稲瀬, 友樹
澤田, 純男

(Citation)

土木学会論文集A1（構造・地震工学）, 74(4):I_568-I_577

(Issue Date)

2018

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2018 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007076>



振動台を用いた管軸方向地盤ばねの 速度依存性に関する実験的研究(その2)

鉾田 泰子¹・稲瀬 友樹²・澤田 純男³

¹正会員 神戸大学大学院准教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

E-mail: 162t105t@stu.kobe-u.ac.jp

³正会員 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

ガスや水道などの埋設管の地震応答解析において構造物の挙動を支配する管軸方向の地盤ばねは、埋設管の静的載荷実験に基づいた単純なクーロン摩擦が用いられている。本研究では、速度依存性を考慮した管軸方向地盤ばねの導入に向けて、先行研究で行った振動台を用いた管の引き抜き実験に追加実験を行い、管の引き抜き速度の他に、地盤材料や埋設深をパラメータにして地盤摩擦特性を明らかにした。その結果、低速による引き抜きの場合、地盤や管種による差異はなく、摩擦係数は0.4～0.6になった。低含水粘性土では正の速度依存性が見られ、管種や上載圧に関係なく、最大せん断応力は低速の場合に対して1.2～1.4倍大きくなった。一方、低含水砂質土では正の速度依存性は生じなかった。

Key Words : axial soil spring, buried pipe, soil friction, velocity dependency, shaking table

1. はじめに

水道や下水道、ガスなどのライフラインの埋設管の耐震設計では、地震時の波動や地盤変状を管に伝達するために管・地盤間の相互作用を表現した地盤ばねが採用されている。管軸方向の地盤ばねは、地盤のせん断剛性に比例した値として、応答変位法が導入された石油パイプライン技術基準(案)¹⁾や共同溝設計指針²⁾で規定されて以降、広く使用されている。現行の水道施設耐震工法指針(以下、水道指針)^{3) 4)}や下水道施設の耐震対策指針と解説(以下、下水道指針)⁵⁾では、管軸方向の地盤ばねにすべりは考慮されていない(水道のレベル2地震動の設計では、すべりを考慮した非線形応答計算の管体応力と等価な管体応力となるように外力を低減した速度応答スペクトルが導入されている)。一方、高圧ガス導管耐震設計指針(以下、ガス指針)⁶⁾では、管と地盤の間に生じるすべりを考慮してバイリニア型でモデル化されている。各種耐震設計指針間で地盤ばねの評価方法は異なっている。しかし、管・地盤間の動的相互作用を埋設管の静的載荷実験の結果に基づいて評価するのは不十分であり、現行指針では考慮されていない地盤摩擦力の速度依存性について検討しておく必要がある。

本研究では、速度依存性について、速度が速くなるほど、働く応力(摩擦力など)が大きくなるのを正の速度依存性、その反対を負の速度依存性と呼ぶことにする。静的・動的な地盤ばね特性に関しては、実験的な研究や波動理論に基づく解析的な研究^{7) 8)}がこれまで行われてきた。前者では、埋設管の静的載荷実験^{9) 10)}の他に、起振機や振動台を用いた動的載荷実験^{11)~14)}がある。高田¹¹⁾による砂土槽の静的・動的加振実験では、動的摩擦力は静的摩擦力の7割程度になったことが報告されている。土山・中村¹²⁾は、小型洞道模型の動的・静的載荷実験において、動的・静的な地盤ばね特性は静的実験で得られる地盤ばね特性で評価できるが、模型-地盤間のすべりに関わる載荷速度の影響には別途検討が必要であると示唆している。小林ら¹³⁾は、管を埋設した土槽の振動実験で摩擦力の速度依存性はなかったと報告している。このように多くの実験で速度依存性は無いが、負の速度依存性が示されている。一方、管路の引き抜き実験で正の速度依存性が報告された事例もある。島村ら¹⁴⁾の実大規模の埋設管(口径600mm, 土被り180cm)の引き抜き実験によると、せん断応力のピークは載荷速度に応じて大きくなったことが報告されている。竹本ら¹⁵⁾は、島村ら¹⁴⁾の実験結果を受けて、個別要素法にせん断ばねを導入し、

地盤を模擬した粒状体の塊に一定の上載圧を加えたせん断実験を解析し、せん断力の速度依存性を明らかにした。彼らは、この解析により引き抜き速度に依存してせん断面の圧縮力が増加するためにせん断抵抗が強くなったと述べている。

著者らによる前論文¹⁶⁾では、振動台の上に管を埋設した土槽を設置し、反力壁で固定された管に対して土槽を移動させる仕組みで管の引き抜き実験を行い、管の引き抜き速度や管周辺の地盤条件による摩擦力の特性を明らかにした。その結果、粘性土の場合には正の速度依存性が見られ、最大せん断応力（管の表面積あたりの引き抜き抵抗力のピーク値）が2倍近く大きくなった。地盤摩擦力の速度依存性が定性的に明らかにはなかったが、実験事例が十分でなく、耐震解析等に用いる地盤ばねの評価に実験結果を反映させるまでには至っていなかった。

本稿では、速度依存性を考慮した地盤ばねの提案に向けて、前論文¹⁶⁾の実験（以下、既実験と呼ぶ）に加えて新たに管の引き抜き実験を行い（以下、本実験と呼ぶ）、これらの実験結果を整理して地盤ばねを評価することが目的である。とくに、以下の点に着目している。一つは、速度依存性と上載圧との関係である。既実験では一般的な管の埋設深60cmを基準にして、砂質土よりも粘性土の方が最大せん断応力が大きくなり、低含水粘性土では正の速度依存性もみられた。上載圧が変化した場合にも、同様な速度依存性が示せ、かつ、定量的に摩擦係数を用いて最大せん断応力の評価ができれば将来的に利用し易い。二つ目は、砂質土による再現性の確認である。既実験では、低含水粘性土で管の引き抜き速度を様々変化させ、静的な実験の最大せん断応力よりも大きくなる場合の速度帯を示した。それは、著者らが当初設定した最も高速なものよりもやや遅い10cm/s程度であった。本稿では、現行の敷設工法で推奨されている砂地盤に対して当該速度で実験を行う。既実験では示せなかった特性を本実験で補完し、速度依存性を考慮した地盤摩擦力の特性を明らかにする。

2. 実験方法

(1) 本研究における管の引き抜き機構

本研究では、図-1に示す実験装置を用い、管を固定して土槽を移動させる方法を採用した。管は管外径より大きな穴を開けた土槽に貫通させ、土槽は振動台に固定する。振動台は高速载荷のアクチュエータとして利用する。加振時には反力壁側に土槽が移動し、管端部が反力壁に接触後、管と地盤との間に相対変位が生じる機構になっている。

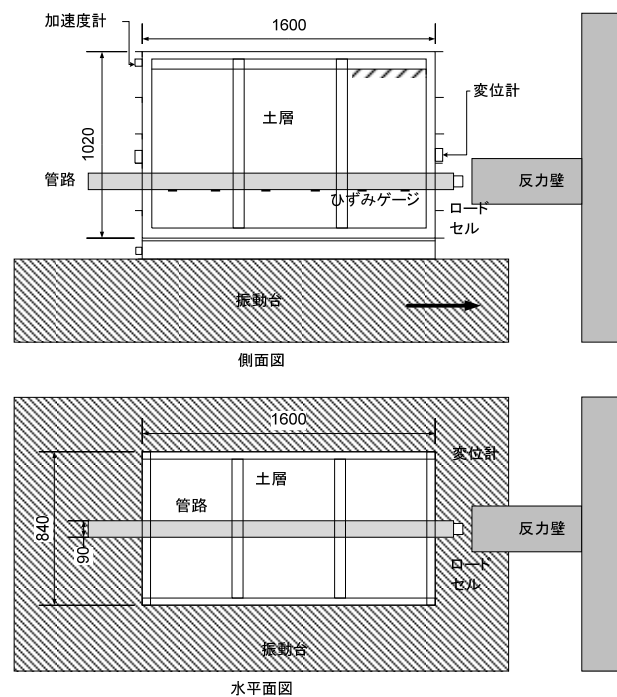


図-1 実験装置の概要図

(2) 実験装置の概要

本実験で使用した振動台は、神戸大学の水平1軸のハイブリッド振動試験装置（TMV型）である。土槽は、長さ1,600mm、高さ1,020mm、奥行き840mmで、鋼板で作製した。土槽の短手方向の壁には土槽底面から245mmのところ直径190mmの穴が開いており、そこに管路を通す仕組みになっている。管と土槽の相対変位を管の両端に設置した変位ゲージで計測し、反力壁側の管の端に固定した圧縮型ロードセルで荷重を計測した。管には適宜ひずみゲージを貼り付け、管の軸ひずみを計測した。

本実験で使用する埋設管は、配水用ポリエチレン管（PE管）φ75（外径90mm、管厚7.5mm、長さ1,900mm）である。PE管は剛性が低く柔軟であり、载荷時に気中部分で座屈する恐れがあるために、PE管の両端10cmには外側と内側から鋼管と鋼棒で補強した。さらに、PE管の中に鉄製の軸芯（直径20mm）を通して両端を繋げることで、管路の両端で同じ外力が作用する構造になるように工夫した。継手部の張り出しによる摩擦の影響をみるために、熱融着（EF）継手が管供試体の中央にある場合も検討した。継手のソケットの厚さは10mm、長さは120mmある。また、既実験ではダクタイル铸铁管（DIP管）φ75（外径93mm、管厚9.0mm、長さ2,000mm）も使用した。

土槽内の地盤については、図-2に示すように管の上下100mmは検討する地盤材料を用い、それ以外の下層の地盤については同じ地盤材料か砂材料を100mm敷き詰めた。一方、上層の地盤については、同じ地盤材料で500、300、

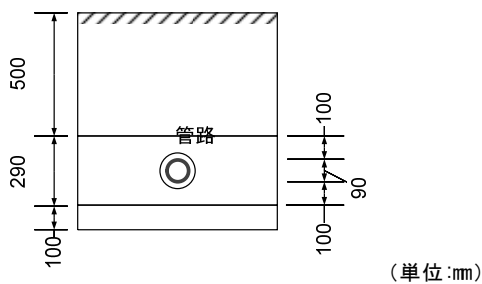


図-2 管路の埋設条件

表-1 実験に用いた地盤材料の物性

項目		掛津古砂 S1	光明寺土 S2	混合土 S3	川砂 S4
土粒子密度 (g/cm ³)		2.65	2.78	2.66	2.67
最大乾燥密度 (g/cm ³)		1.60	1.51	1.85	1.78
最適含水比 (%)		11.0	26.2	14.2	11.4
粒度分布	礫分 (%)	0	19.5	20.0	0
	砂分 (%)	98.0	26.6	69.9	89.7
	細粒分 (%)	2.0	53.9	10.1	10.3
	均等係数 U_c	1.57	516	28	5.97
	曲率係数 U_c'	1.09	65.5	12.4	0.55
	平均粒径 D_{50} (mm)	0.33	0.050	0.31	0.32
実験条件	含水比 w(%)	2.0	24.3	1.9	1.6
	締固め度(%)	94.5	75.5	87.2	87.0
	特性	低含水砂質土	高含水粘性土	低含水粘性土 S1 と粘性土の体積比 1:1	低含水砂質土 S1 を目標

100mm 積載したものに相当する重さの土嚢袋を積載した。管周りの地盤の締固めについては、体積と含水比で管理し、複数の層に分けながら一定の体積になるよう足で踏み固めた。実験に用いた地盤材料の締固め度は後述する。

(3) 地盤材料の特性

既実験の3種類の地盤材料（表-1のS1からS3）の内、本実験では混合土（S3、掛津古砂（S1）と刃金土（粘性土）を体積比 1:1 で混合したもの）と新たに川砂（S4）を用いた。これらの物性を表-1 に示す。川砂は掛津古砂に近い砂質土を再現するために人工的にふるいで大きい粒径を省いた。一方、光明寺土（S2）と混合土（S3）は、現行施工の地盤材料とは異なり、管周辺地盤が締固まり易くするために細粒分の多い材料を採用した。光明寺土（S2）は細粒分が多い粘性土であり、最適含水比に近い状態で使用した。

これら地盤材料の締固め試験の結果を図-3 に示す。
掛津古砂 (S1) は含水比 2.0% で使用し、光明寺土 (S2) は最適含水比に近い 24.3%、混合土 (S3) は 1.9%、川砂

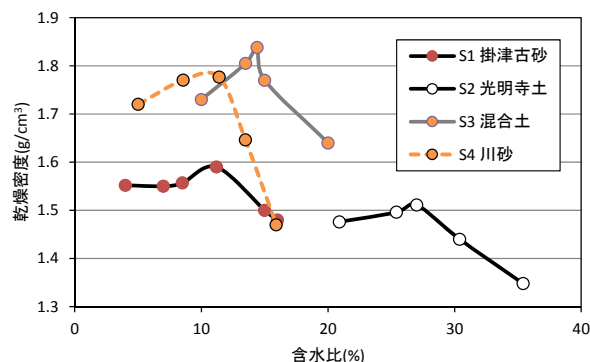


図-3 地盤材料の締固め曲線

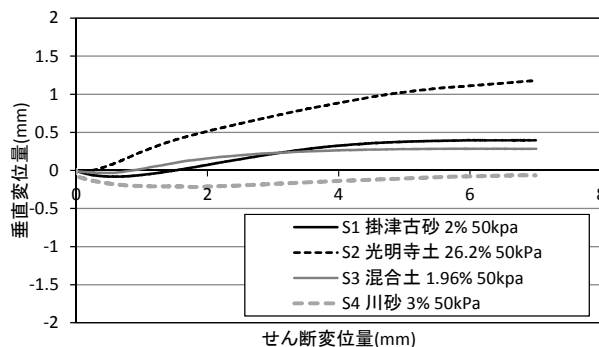


図-4 一面せん断試験 ($\sigma_v=50\text{kPa}$)

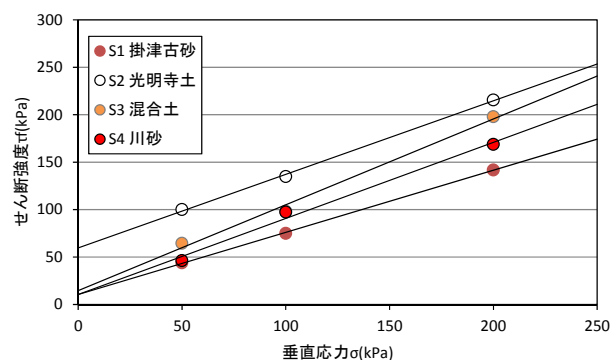


図-5 地盤材料の一面せん断試験の結果

表-2 クーロン破壊基準による c , ϕ

	掛津古砂 S1	光明寺土 S2	混合土 S3	川砂 S4
粘着力(kN/m ²)	10.7	59.8	14.6	10.7
内部摩擦角(°)	33.1	37.7	42.1	38.7

(S4) は 1.6% で使用した。S1, S3, S4 の砂材料は、最適含水比の場合に管の引き抜きによるせん断変形で周辺地盤が液状化を起こす恐れがあるために、乾燥状態にした。さらに、地盤材料のせん断変形特性ならびにせん断強度が影響すると考えられるため、実験で使用する含水比に近い状態の地盤材料に対して一面せん断試験を実施した。図-4 は鉛直応力 $\sigma_v=50\text{kPa}$ の場合の一面せん断試験結果を、図-5 はクーロン破壊基準による c 、 ϕ を算出

表-3 実験ケース (既実験)¹⁶⁾

番号	名称	管	地盤	速度	埋設深(cm)	継手
1	PE-S1-L	PE	掛津古砂	低速	60	無
2	PE-S1-H	PE	掛津古砂	高速	60	無
3	PE-S1-L-J	PE	掛津古砂	低速	60	有
4	PE-S1-H-J	PE	掛津古砂	高速	60	有
5	PE-S2-L	PE	光明寺土	低速	60	無
6	PE-S2-H	PE	光明寺土	高速	60	無
7	DIP-S2-L	DIP	光明寺土	低速	60	
8	DIP-S2-H	DIP	光明寺土	高速	60	
9	DIP-S3-L	DIP	混合土	低速	60	
10	DIP-S3-H	DIP	混合土	高速	60	
11	DIP-S3-0.2	DIP	混合土	0.2Hz	60	
12	DIP-S3-0.5	DIP	混合土	0.5Hz	60	
13	DIP-S3-M	DIP	混合土	中速	60	

表-4 実験ケース (本実験)

番号	名称	管	地盤	速度	埋設深(cm)	継手
14	PE-S3-L	PE	混合土	低速	60	無
15	PE-S3-L-40	PE	混合土	低速	40	無
16	PE-S3-L-20	PE	混合土	低速	20	無
17	PE-S3-M	PE	混合土	中速	60	無
18	PE-S3-M-40	PE	混合土	中速	40	無
19	PE-S3-M-20	PE	混合土	中速	20	無
20	PE-S4-L	PE	川砂	低速	60	無
21	PE-S4-M	PE	川砂	中速	60	無
22	PE-S4-L-J	PE	川砂	低速	60	有
23	PE-S4-M-J	PE	川砂	中速	60	有

するため一面せん断試験の結果を、表-2 は試験結果に基づいた c , ϕ を示している。図-4 より、光明寺土 (S2) はせん断直後から正のダイレイタンスがみられた。また、掛津古砂 (S1) と混合土 (S3) は光明寺土 (S2) 程ではないが、少し変位した後に正のダイレイタンスが現れた。川砂 (S4) は、正のダイレイタンスは現れなかった。また、 c , ϕ の関係をみると、川砂 (S4) は掛津古砂 (S1) を再現させるために用いたが、細粒分が多いのかかわらず、粘着力は同じで、内部摩擦角が大きくなった。また、混合土 (S3) については、光明寺土 (S2) より粘着力が小さかったが、内部摩擦角は他の地盤材料よりも大きくなった。

(4) 実験ケース

管種、管周りの地盤材料、引き抜き速度、埋設深と継手の有無を変えながら全23ケースの実験を行った。表-3 には既実験の13ケースの一覧を、表-4には本実験の10ケースを示す。後者の実験は2017年7月に実施した。

引き抜き速度は、低速、高速、および 0.2, 0.5, 1.0Hz

の5種類がある。実測の変位と速度は前論文¹⁶⁾に示しているので参考にされたい。最大 60cm/s で概ね 40~60cm/s になるように設定した高速ケースでは、既実験で摩擦力が小さくなる傾向がみられた。そこで、既実験で速度による摩擦力増加が見られた 1.0Hz の加振ケースを中速ケース (M) として扱い、本実験では低速と中速ケースの2種類を用いた。管路の引き抜き速度は低速の場合で 2cm/s 程度、中速の場合で 10~20cm/s になる。以下の分析ではそれぞれの実験ケースを管種 (DIP, PE) - 地盤材料 (S1, S2, S3, S4) - 加振ケース (L, H, 0.2, 0.5, M) - 埋設深 (20, 40 の時のみ) または継手有 (J) として表記する。

実験結果の整理にあたり、管と地盤の相対変位と摩擦力の関係を示す場合、相対変位は基本的に管の両端で計測している土槽と管の相対変位の平均としている。摩擦力はロードセルで計測された荷重である。さらに管種によって外径が異なるため、摩擦力を管の表面積で除したせん断応力に統一して比較を行う。本実験の結果を中心に示すが、論点整理のため既実験の結果も引用する。

3. 実験の結果

(1) 混合土 : S3 (低含水粘性土) の結果

まず、実験 14 から実験 19 の混合土 (S3) のせん断応力を比較する (図-6 参照)。既実験では、混合土 (S3) で管が DIP の場合、低速加振よりも速度の上昇に応じて最大せん断応力が増加した。同じ条件で、管種を DIP から PE に替え、地盤の埋設深を変化させた場合を検討した。その結果、低速ケースよりも中速ケースの最大せん断応力は大きくなり、最大せん断応力も埋設深さに応じて比例的に大きくなった。実験 14 (PE-S3-L) のみ、他の結果から類推されるせん断応力以上の大きな応力が生じていた。この理由として、埋設深 500mm 分の土嚢を積載する時に、重量 1t 近くの大きな土嚢袋を管路上の土槽中央に配置したため、荷重を均等に積載できていなかったことが考えられる。そのため、管路には想定以上の上載圧が作用しており、せん断応力が大きくなったことが推察される。実験 14 以降の実験については、なるべく小さい土嚢に分配して、上載圧が土槽全体に均等に作用するように対応した。図-6 には、適切に積載された場合に得られたと思われる結果を、実験 15, 16 の最大せん断応力の比から推定して、実験 14 のせん断応力を 0.67 倍した値も参考として示している。

低速ケースの場合では、初期の剛性が大きく、管路の変位が 1mm 程度に達した直後にすべりが生じているのに対し、中速ケースの場合には、低速ケースよりも若干ではあるが初期剛性が小さく、管路の変位が 3~5mm で

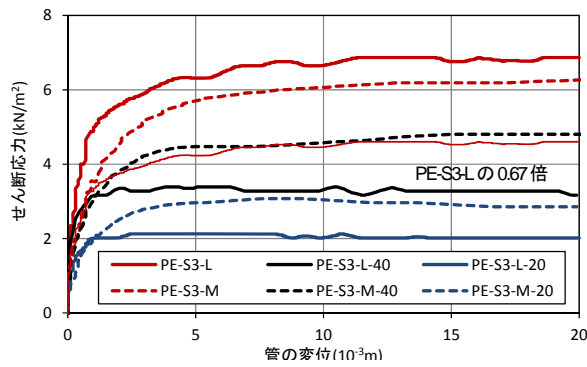


図-6 混合土：S3（低含水粘性土）において引き抜き速度と埋設深さによる PE 管の変位とせん断応力との関係（実験 14～19）

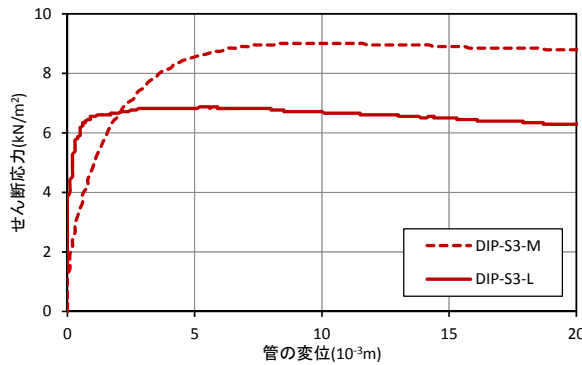


図-7 混合土：S3（低含水粘性土）において引き抜き速度による DIP 管の変位とせん断応力との関係（既実験 9, 13）

すべりに至った。この傾向は、既実験の実験 9 と 13 で管種が DIP の時にも確認できた。図-7 は DIP のせん断応力を図-6 と同じように示している。DIP の方が低速・中速ケースともに PE の場合よりも大きなせん断応力が生じているが、すべりに至るまでの地盤ばねの初期剛性の傾向は同じであった。せん断応力の差異は、管表面の摩擦の影響が考えられる。

(2) 光明寺土：S2（高含水粘性土）の結果

粘性土でも含水比の高い光明寺土（S2）の場合には、図-8 の実験 5～8 の結果を示すように、最大せん断応力は低速ケースで $6\sim7\text{kN/m}^2$ と他の地盤材料よりも大きくなった。さらに、管の変位が 1mm 程度を超えるとせん断応力は一気に低下し 4kN/m^2 程度に収束する傾向が見られた。DIP の方が PE よりも最大せん断応力は若干大きくなったが、変位とせん断応力との関係はほぼ同じであった。含水比の高い粘性土の場合には、粒子間の粘着力が強いために、最大せん断応力を生じた後に、管と土粒子の間で摩擦が切れるためにせん断応力が低下しているものと考えられる。また、粘着力の強い粘性土であっても、高速ケースの場合には変位 1mm 程度で完全にすべるような傾向は示さず、低速ケースのせん断応力よりも小さく、変位に応じて緩やかにせん断応力が増加した。

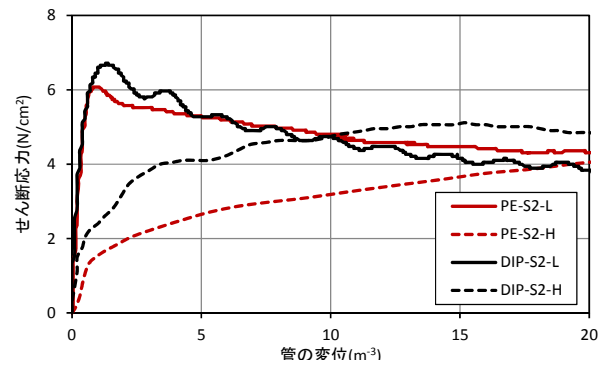


図-8 光明寺土：S2（高含水粘性土）において引き抜き速度による変位とせん断応力との関係（既実験 5～8）

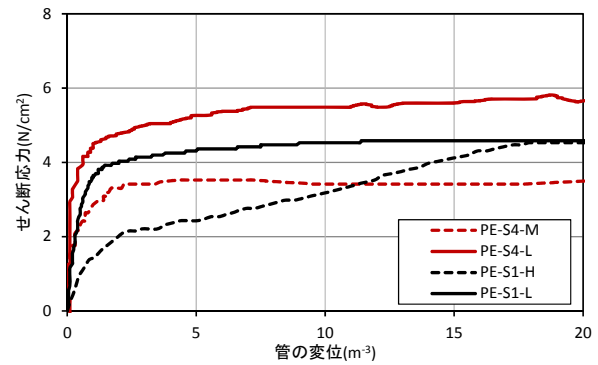


図-9 掛津古砂：S1 および川砂：S4（低含水砂質土）において引き抜き速度による PE 管の変位とせん断応力との関係（既実験 1～2, 実験 20～21）

(3) 掛津古砂：S1 および川砂：S4（低含水砂質土）の結果

掛津古砂（S1）と川砂（S4）は全く同じものではないが、同じ低含水砂質土と見なしてせん断応力の特性を検討する。図-9 は掛津古砂と川砂において PE 管の変位とせん断応力との関係を示している。低速ケースでは、掛津古砂（既実験 1）と川砂（実験 20）で最大せん断応力に 1kN/m^2 ほど違いはあるが、いずれも変位 1mm 程度で最大せん断応力に達し、その後の変位に対してせん断応力は増加しなかった。つまり低速ケースの場合には同じようにパイリニア型の挙動を示していると思われ、掛津古砂（S1）よりも川砂（S4）の方が最大せん断応力が大きくなった。掛津古砂（S1）の方が締固め度が大きい、一面せん断試験の結果からせん断初期には収縮も大きい、引き抜き特性には寄与していないと考えられる。一方、川砂（S4）は掛津古砂（S1）よりも締固め度は高くはないが、最大乾燥密度が高く掛津古砂（S1）よりも密な状態であったために最大せん断応力が大きくなったと考えられる。

一方、高速ケース（既実験 2）の場合には、低速ケースで見られたように初期変形時に大きなせん断応力は生じなかった。中速ケース（実験 21）の場合には、低速

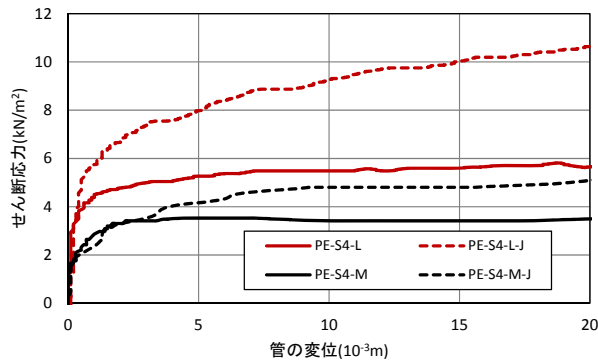


図-10 川砂:S4 (低含水砂質土) における継手の有無の比較 (実験 20~23)

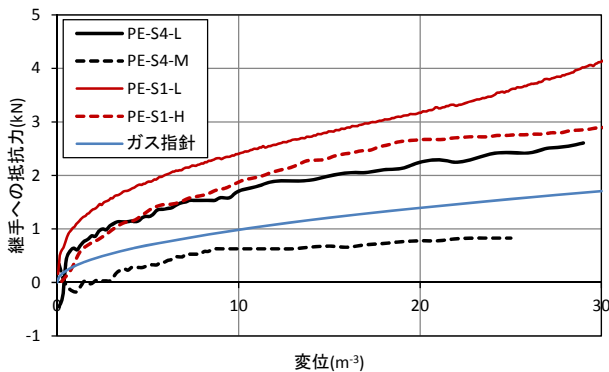


図-11 掛津古砂 : S1 および川砂:S4 (低含水砂質土) における継手の抵抗力の比較 (既実験 1~4, 実験 20~23)

ケースに似たバイリニア型の変位とせん断応力の関係を示したが、低速ケースよりもせん断応力は小さくなった。川砂 (S4) においても中速ケースで正の速度依存性が現れることを期待したが、結果として高速ケースと同様の負の速度依存性を示した。

(4) 継手の凸部による速度依存性への影響

PE 管の継手ソケットの凸部による摩擦力の速度依存性について確認するため、地盤材料、引き抜き速度が同じで継手の有無の実験ケース間の摩擦力の差をソケットの抵抗力として比較した。図-10 は川砂 (S4) の実験ケースのせん断応力を比較したものである。継手のない PE 管の川砂 (S4) で中速ケース (実験 23) の場合のせん断応力は、低速の方 (実験 20) が大きかったが、継手が付いても低速の方が大きくなった。この傾向は、既実験の 1~4 で掛津古砂 (S1) においても同様の傾向があった。

継手の有と無の実験ケースの差は、継手の抵抗力となり、管軸直角方向の地盤摩擦力と見なせる。砂質土であれば軸直角方向の地盤摩擦力についても管軸方向と同様に低速ケースの方が大きな抵抗力となることが推察される。粘性土においても継手ソケットのある管の実験をし

て、管軸直角方向の地盤摩擦力の速度依存性について今後検討が必要である。

図-11 は、実験 20~23 の川砂 (S4) における継手抵抗力の他に、既実験 1~4 の掛津古砂 (S1) における継手抵抗力と、中低圧ガス導管耐震設計指針¹⁷⁾で規定されている継手抵抗力を比較している。掛津古砂 (S1) よりも川砂 (S4) の方が、低速・中速ケースともに継手抵抗力は小さくなった。また、川砂 (S4) の中速ケースを除き、本実験の継手抵抗力は、中低圧ガス導管耐震設計指針のそれよりも大きくなった。

4. 地盤ばねの評価

(1) 現行指針の地盤ばね

実験結果から地盤ばねを評価するにあたり、まず、現行の耐震設計指針の地盤ばねを参照しておく。水道指針の地盤ばねは以下のように設定されている^{3),4)}。

$$K_{g1} = C_1 \cdot \frac{\gamma_t}{g} \cdot V_s^2 \quad (1)$$

ここで、 K_{g1} : 埋設管路の管軸方向の単位長さあたりの地盤剛性係数(kN/m²)、 γ_t : 土の単位体積重量(kN/m³)、 g : 重力加速度(9.8m/s²)、 V_s : 表層地盤のせん断弾性波速度(m/s)。 C_1 はおおむね1.5前後。

下水道指針⁵⁾の地盤剛性も水道指針と同じである。

一方、ガス指針⁶⁾では地盤ばね K_1 (kN/m²)は地盤の剛性に関わらず以下で示される。

$$K_1 = \pi D k_1 \quad (2)$$

ここで、 D : 外径、 k_1 : 地盤ばね係数=6,000 kN/m³

本研究で用いた管の口径 $\phi 75$ (外径90 mm) の場合、ガス指針⁶⁾の地盤ばね係数を用いて地盤ばねを算出すると、 $K_1=1,696$ kN/m²である。水道指針の場合、仮に $V_s=50$ m/s、 $\gamma=14$ kN/m³、 $C_1=1.5$ とすれば、 $K_{g1}=5,357$ kN/m²である。ガス指針で想定されている地盤は相当軟弱な地盤であることがわかる。

また、ガス指針⁶⁾ではすべりが生じる時の限界せん断応力 τ_{ol} は埋設深1.8mに対して15kN/m²と規定されており、本実験の埋設深0.6mの場合には、5kN/m²となる。地盤ばね係数が規定されているので、限界せん断応力に達する時の地盤との相対変位は0.8mmとなる。実験1や実験20の低速ケースで砂質土の場合には、限界せん断応力や降伏時の変位は指針に近い値が得られている。

(2) 実験結果から考えられる地盤ばねのモデル

既実験、本実験では、地盤摩擦力の正の速度依存性は、10cm/s程度の限られた速度帯で低含水粘性土の条件においてのみ現れた。速度依存性を考慮した地盤ばねのモデ

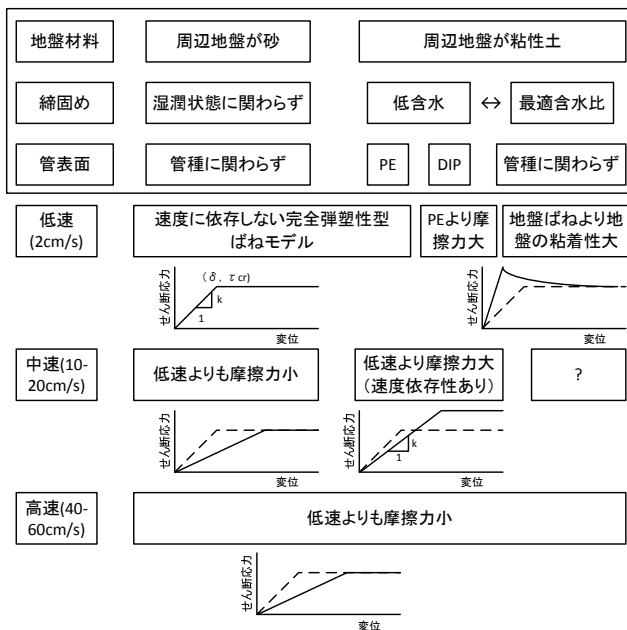


図-12 諸条件による地盤ばねの概念図

ル化に向けて、実験結果を総括する。図-12は諸条件による地盤ばねモデルの概念図を示している。直管のみを対象にして述べる。

既往のガス指針⁹⁾で示されているバイリニア型の地盤ばねは、著者らや西川ら¹⁰⁾の実験では、引き抜き速度が2cm/s以下の低速で砂質土の場合に整合している。

低速でも粘性が強い地盤の場合には、最大せん断応力に達した後に急激にせん断応力が減少する挙動を示した。これは、地盤の粘着が強く、先に管と地盤との粘着が外れるため、あるせん断応力に達すると一気にせん断応力は低下するためだと考えられる。

次に、中速・高速で引き抜く場合について述べる。土粒子が均質で締め固まりにくい砂質土では、微小変位に対してせん断応力は低速時のものよりも小さくなった。さらに、変位が大きくなると低速のせん断応力に漸近した。つまり中速・高速時の地盤ばねは、低速のモデルより小さな値となった。

一方、高含水粘性土や低含水粘性土など粘着力の強い地盤材料であっても40cm/s以上の高速であれば、砂質土の高速の場合と同様に、微小変位に対してせん断応力は小さくなった。高速の場合には、土粒子のダイレイタンスの問題だけではなく、せん断変形が速すぎて、土粒子の再配置が間に合わずに摩擦力が管に伝わらないことが考えられる。しかし、乾燥状態に近い粘性土で中速ケースの時に地盤摩擦に正の速度依存性が現れた。管種による差異がみられ、管表面に僅かな凹凸があるDIPの方が大きな最大せん断応力となった。その一方で地盤ばねの剛性は小さくなる傾向が見られた。

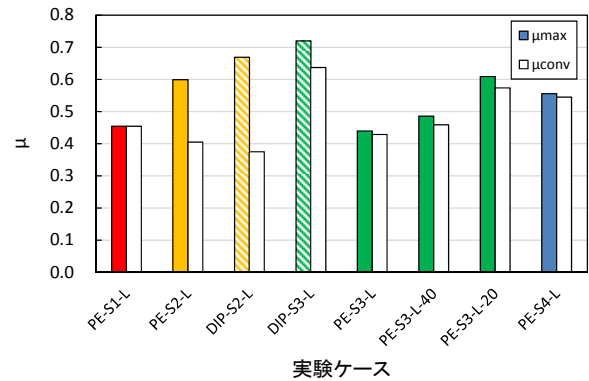


図-13 低速ケースによる摩擦係数の比較

現行の管路の埋設施工では、各種管材協会から管路の10cm四方は掘削で出た原土の代わりに砂で置換することが推奨されている。しかし、砂地盤を締め固めるのは難しく、地震時に液状化をして管路が被害を受けやすい環境をつくっている。砂に原土を一部混ぜ込むなど粒度分布の調整をすれば、締め固めやすい地盤となり、液状化もしにくくなる。

(3) 摩擦係数

管路が低速で移動して地盤との間にすべりが生じる場合には、地盤の上載圧に摩擦係数を乗じて得られるクーロン摩擦が作用すると考えられる。まず、摩擦係数について評価する。管の周辺地盤によって初期にせん断応力のピークを示すものやバイリニア型のバネ特性を示すものがあるので、本研究では最大せん断応力と収束時せん断応力の二つで評価する。前者は相対変位が20mmに達するまでのせん断応力の最大値とし、後者は相対変位20mm時のせん断応力として定義する。相対変位20mm以上でせん断応力が増減する場合も考えられるが、著者らの実験の範囲では大きな増減は見られなかった。そこで、上載圧 (=管路上の地盤重量/管路の投影面積) に対するせん断応力 (=管の引き抜き力/管路の表面積) を摩擦係数 μ として、低速ケースの実験で得られた最大せん断応力と収束時せん断応力による摩擦係数 μ_{max} と μ_{conv} を図-13に示す。実験14については、図-6で補正したせん断応力によって算出している。高含水粘性土のS2の場合には最大せん断応力に達した後にせん断応力が低下したため、最大せん断応力による摩擦係数よりも収束時せん断応力で算出した摩擦係数 μ_{conv} は0.2から0.3小さくなったが、その他の地盤では μ_{conv} は μ_{max} よりも同じか若干小さくなる。 μ_{max} で見れば、摩擦係数は0.4から0.7の間にばらついてはいるが、 μ_{conv} で0.4から0.6になりばらつきは小さくなる。本実験によって埋設深が異なっても、PEの低速ケースでは、摩擦係数 μ_{max} は0.4から0.6になっている。西川ら¹⁰⁾も

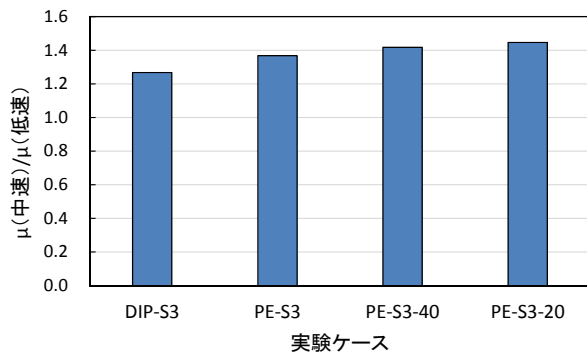


図-14 混合土：S3（低含水粘性土）の低速ケースに対する中速ケースの摩擦係数の比

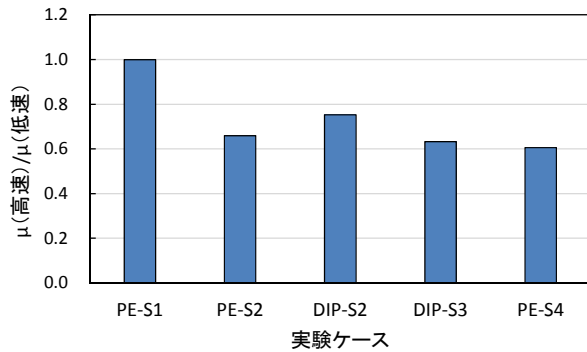


図-15 低速ケースに対する中・高速ケースの摩擦係数の比

PE管で同様の管の引き抜き実験を行っており、含水比の高い砂を用いているが、すべり時のせん断応力で摩擦係数で比較すると、摩擦係数 μ_{\max} は0.5程度となっている。

一方、中速ケースでせん断応力に正の速度依存性がみられた低含水粘性土の混合土（S3）について、管種、埋設深が同じ条件で、低速ケースの摩擦係数 μ_{\max} に対する中速ケースの摩擦係数 μ_{\max} の比を比較する。図-14に示すように、摩擦係数の比は1.2～1.4の間に分布した。このことより、速度によって摩擦力は増加し、その増加割合は管種、上載圧に関わらず一定となった。

同様にして他の中・高速ケースと低速ケースの摩擦係数を比較する（図-15）。図中の右端のPE-S4は中速ケース、その他は高速ケースの摩擦係数である。いずれのケースも最大せん断応力は低速のそれと同じか小さくなった。掛津古砂（S1）では、高速の最大せん断応力は低速のものと同じになったが、それ以外では0.6～0.8になった。これらの値は高田¹⁰⁾の結果と同様であった。

以上より、摩擦係数は平均的に0.5程度の値が得られ、低含水粘性土で中速ケースのみ正の速度依存性が認められ、摩擦係数が1.2～1.4倍大きくなった。

(4) 地盤ばねの剛性

本実験の地盤ばね係数を評価するにあたり、ガス指針に準じてバイリニア型の地盤ばねを想定し、図-16に示す方法により求めることとする。すなわち、最大せん断

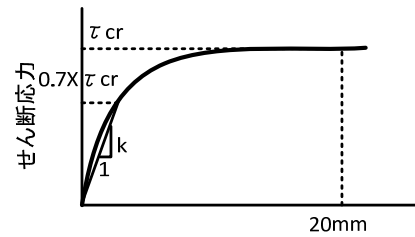


図-16 本研究の地盤ばね係数の設定

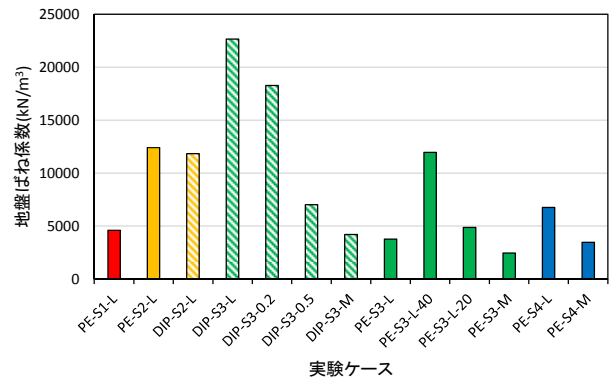


図-17 本実験の地盤ばね係数

応力を限界せん断応力と見なし、地盤ばね係数は限界せん断応力の70%時のせん断応力と相対変位から算出される勾配と定義する。

図-17は、高速ケースと継手有りのケースを省いた実験から算出した地盤ばね係数を示している。係数は2,500～22,500kN/m³の間に分布している。ガス指針で規定されている6,000kN/m³は、本実験で使用したS1やS4の砂質土の低速ケースに近かった。低速ケース間の地盤ばね係数で比較すると、混合土（S3）でDIPの場合に最も高くなった。DIPとPEでは、同じ条件の実験ではDIPの方が地盤ばねが大きく、これはDIPの管表面の凹凸が影響していると考えられる。実験の管路埋設時には光明寺土（S2）が最も粘性があり施工しづらかったが、それでも地盤ばね係数にすれば12,000kN/m³程度であった。

次に、中速ケースと低速ケースの地盤ばね係数を同じ地盤材料と管種の条件のもので比較をすると、中速ケースの地盤ばね係数は低速ケースの係数よりも0.2～0.6倍に小さくなった。高速ケースの場合には、せん断応力が緩やかに増加するケースが多く、図-16に示したバイリニア型を想定した方法では評価が難しい。中速・高速ケースの地盤ばね係数については実験数を増やしてさらに検討する必要がある。

5. 結論

本研究では、振動台を用いて管の引き抜き実験を行い、管と地盤の間に働く管軸方向の地盤ばねの速度依存性を

明らかにするため、先行研究の追加実験を行った。とくに追加事項として、埋設深さを变化させた場合の摩擦係数の評価と砂質土での速度依存性の確認を行った。

- ・ 管の引き抜き速度の増大とともに管の引き抜き力が大きくなる正の速度依存性は、混合土（低含水粘性土）を用いた、速度が10cm/s程度の実験で明瞭に現れた。しかし、低含水砂質土では同じ速度でも正の速度依存性はみられなかった。
- ・ 2cm/s程度の低速で管と地盤に変位が生じる場合、埋設深や地盤に関わらず、摩擦係数は0.4から0.6になった。
- ・ 正の速度依存性が見られる場合には、摩擦係数は、管種、上載圧に関係なく、低速の摩擦係数に対して1.2~1.4倍大きくなった。それ以外の地盤の中・高速の場合の摩擦係数は、0.6から1.0倍と同じか小さくなった。
- ・ 中速ケースの地盤ばね係数は低速時のものの0.2~0.6倍と小さくなった。
- ・ 継手の凸部に作用する地盤摩擦力も、砂質土の場合には管の管軸方向のせん断応力と同様に低速の方が中速・高速よりも大きくなった。

既実験と追加で実施した本実験では、混合土（低含水粘性土）を用いた場合のみ、管軸方向の地盤ばねに正の速度依存性が見られた。一方で、既往の管の引き抜き実験等で良く用いられる砂質土では正の速度依存性を確認できなかった。すなわち、正の速度依存性のある地盤や速度の条件が限定的であり、耐震計算等に用いるには、その条件を見つけ出すために実験を追加する等、さらに検討が進められるべきである。

また、実験では管の引き抜き速度を2cm/sから60cm/sまでの範囲で变化させたが、これらの条件と設計時の地震外力との関係についてはまだ検討に至っておらず、今後整理する必要がある。

謝辞：本研究は、科学研究費（基盤研究(B)（代表者：澤田純男））の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本道路協会：石油ガスパイプライン技術基準（案），1974.
- 2) 日本道路協会：共同溝設計指針，1986.
- 3) （社）日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997年版，1997.
- 4) （社）日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，2009年版，2009.
- 5) （公社）日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説，2014年版，2014.
- 6) （社）日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，2000.
- 7) 後藤尚男，土岐憲三，高田至郎：地中埋設管の振動特性に関する二，三の研究，土木学会論文報告集，第207号，pp.15-25，1973.
- 8) 鵜飼恵三，山口柏樹：埋設管の動的地盤ばね定数に関する理論的考察，土質工学会論文報告集，Vol.19, No.4, pp.93-102，1979.
- 9) 飯村正一，宇梶忠雄，福島修司：埋設管に作用する土の動的軸方向拘束力について，土木学会第35回年次学術講演会講演概要集第III部，pp.570-571，1980.
- 10) 西川源太郎，塩浜裕一，鈴木剛史，大沼博幹，清野純史：水道配水用ポリエチレン管の地震動に対する耐震性評価に関する研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 72, No. 4, pp. I_424-I_433，2016.
- 11) 高田至郎：埋設管路ー地盤系の復元力特性と地震応答解析，土木学会論文報告集，第249号，pp.1-11，1976.
- 12) 土山茂希，中村晋：実験に基づいた洞道〜地盤間の地盤ばね定数に関する研究，土木学会論文集，No.471/I-24, pp.105-114，1993.
- 13) 小林実央，安藤広和，小口憲武：埋設管に作用する軸方向地震時地盤拘束力に及ぼす地盤の速度と繰り返し変位の影響，土木学会論文集，No. 591/I-43, pp. 299-312，1998.4
- 14) 島村一訓，竹之内博行，三木千壽，福澤小太郎：実大実験による埋設パイプラインの軸方向動的地盤ばね特性の研究，土木学会論文集，No. 612/I-46, pp. 55-66，1999.
- 15) 竹本幸士郎，澤田純男，後藤浩之：数値解析に基づく粒状体のせん断抵抗の速度依存性に関する考察，土木学会第71回年次学術講演会講演概要集，I-562，2016.
- 16) 稲瀬友樹，鋤田泰子，澤田純男：振動台を用いた管軸方向地盤ばねの速度依存性に関する実験的研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 73, No. 4, pp. I_376-I_384，2017.
- 17) （社）日本ガス協会：中低圧ガス導管耐震設計指針，2013.

(2017.11.3 受付, 2018.1.27 修正, 2018.2.17 受理)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE VELOCITY DEPENDENCY OF AXIAL SOIL SPRING FOR BURIED PIPE BY SHAKING TABLE (PART 2)

Yasuko KUWATA, Tomoki INASE and Sumio SAWADA

Axial soil spring between the pipe and ground is treated as the Coulomb's friction law in the seismic response analysis of buried pipeline, for water and gas supply, etc. In order to investigate an axial soil spring considering the velocity dependency of soil friction, the pipe pulling-out test using the shaking table was carried out in addition to our previous tests. Not only the pipe moving velocity but also soil and install depth were dealt as the parameter. In the slow-moving cases, the friction coefficient was 0.4 to 0.6 regardless of the soil and pipe material. The positive velocity-dependency appeared in the cases of cohesive soil with low water content, whose maximum shear stress increased 1.2 to 1.4 times comparing to that of the slow-moving cases. The cases of sandy soil with low water content did not show the positive velocity-dependency.