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

稲瀬 友樹¹・楢田 泰子²・澤田 純男³

¹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

²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

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挙動を支配する管と地盤の間の地盤ばねは、静的な摩擦力特性をもつとして単純なクーロン摩擦が用いられているのが現状である。本研究では、実大規模の埋設深に対して振動台を用いて外力を作用させることで管の引抜き実験を行い、管と地盤の間に働くせん断応力の速度依存性を明らかにすることを試みた。その結果、管の移動速度によって最大せん断応力が2倍程度大きくなることや、管周辺の地盤条件によって最大せん断応力のピークやその状態以降のすべり特性が異なることがわかった。

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

1. はじめに

現在の埋設管の耐震設計において、地震時に管路に作用する外力は管・地盤間の相互作用を考慮した地盤ばねを介して入力される。例えば、高圧ガス導管耐震設計指針¹⁾では、管軸方向の摩擦力は埋設管の表面積で除したせん断応力として定義され、管と地盤の相対変位とせん断応力との関係はバイリニア型で示され、すべりが生じる時にせん断応力は最大となり限界せん断応力に達し、すべり後には一定のせん断応力が作用すると規定されている。このように管と地盤の間に働く摩擦力には、クーロン摩擦則が仮定されており、バイリニア型で示されている限り、管の移動速度に影響されない。

そもそも、これら耐震設計指針の基礎資料となる埋設管の引抜き実験^{2,3)}では、1cm/s以下の非常に遅い速度で管を移動させるために移動速度による摩擦特性は評価されていない。しかし、島村ら⁴⁾は高速載荷実験装置を開発し、実大規模の埋設管(口径600mm, 土被り180cm)で軸方向の動的地盤ばね特性を検討した。その結果、限界せん断応力は載荷速度が速くなるにつれて大きくなり、高速載荷時には明瞭なピークを有し、ピーク後には変位量に応じて低速載荷時の限界せん断応力に近づくことが確認されている。一方、小林ら⁵⁾は、口径150mm、

300mmの鋼管を埋設した土槽を振動台に設置し、最大速度が50, 5, 0.5cm/sとなる正弦波による繰り返し加振を与えて実験したが、摩擦力の速度依存性については確認できなかったと報告している。

竹本ら⁶⁾は、島村ら⁴⁾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数値解析によってシミュレーションし、せん断力の速度依存性を明らかにしている。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ることを示している。

一般に地盤材料では、よく締まった地盤であるほどせん断変形に対して正のダイレイタンスが作用することが知られている。つまり、竹本らの研究を参考にすると、地盤がより締まった状態になると埋設管の移動時には地盤の体積膨張によってさらに圧縮力が増加するので、すべり時の摩擦力よりも大きな力が作用すると考えられる。

これらの実験や解析の研究により、管の移動速度による摩擦力の速度依存性や地盤の締固め状態による摩擦力の影響は明らかになってきているものの、まだ検討の余地がある。そこで、著者ら⁷⁾は小型模型による管の引抜き実験を行い、摩擦力の速度依存性について確認することを試みた。その結果、管の最大速度が50cm/s以上の時

の方が50cm/s未満の時よりも大きな摩擦力が作用することが確認された。しかし、埋設深が浅いことにより十分な地盤拘束圧を再現できないことや、実験規模の限界による諸問題などがあり、実際の現象を捉える段階には至っていなかった。

本研究では高速加振を可能にするために振動台の上に管を埋設した土槽を設置し、実際の埋設深の条件で管の引抜き実験を行い、管の移動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することを目的とする。

2. 実験方法

(1) 本研究における管の引抜き機構

過去の管の引抜き実験では、管と地盤との相対変位を生じさせるために土槽内に埋設した管を片側から押す、もしくは引張る方法か、管を固定して土槽を移動させる方法のいずれかで行われている。ロードセルを付着した管が移動する時には摩擦力以外に慣性力が発生する。本研究では管の移動速度による影響を検討するため、慣性力が生じず、直接管に作用する摩擦力を測定することができる後者の方法を採用した。

実験装置の概要図を図-1に示す。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。振動台は高速載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、管端部が反力壁に当たり、さらに変位を加えることで管と地盤との間で相対変位を生じさせる。実験装置の様子を図-2に示す。

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、神戸大学にある水平1軸の動電式振動試験装置とACサーボモータのアクチュエータによるハイブリッド振動試験装置 (TMV型) である。振動台の底板の大きさは3,000 mm (加振方向) × 2,000mm, 最大搭載質量は10,000kg, 振動数範囲は0.1~20Hz, ストロークは±550mm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 のところに直径 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、ダクタイル鋳鉄管 (DIP 管) $\phi 75$ (外径93mm, 管厚9.0mm, 長さ2,000mm) と配水管ポリエチレン管 (PE管) $\phi 75$ (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、載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。PE管については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。

土槽内の地盤については、図-3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、同じ地盤材料を500mm積載するか、それに相当する重さの土嚢袋を積載し、全ての実験ケースで管の上載圧が同じになるように設定した。同じ地盤材料で実験した場合と土嚢袋で上載圧を置換した場合による実験結果の違いについて検討したが、結果

図-2 実験装置の様子

図-3 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	光明寺土	混合土
土粒子密度 (g/cm^3)	2.65	2.776	2.658
最大乾燥密度 (g/cm^3)	1.598	1.514	1.845
最適含水比 (%)	11.0	26.2	14.2
粒度分布	礫分 (%)	0	19.5
	砂分 (%)	98.0	26.6
	細粒分 (%)	2.0	53.9
	均等係数 U_c	1.57	516
	曲率係数 $U_{c'}$	1.09	65.5
	平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.33	0.050

である摩擦力に差異がないことを確認している。管周りの地盤の締固めについては、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

本実験では、3種類の異なる地盤材料を管周辺に用いた。掛津古砂 (S1)、光明寺土 (S2)、混合土 (S3、刃金土と掛津古砂を体積比 1:1 で混合したもの) の物性を表-1 に示す。掛津古砂は細粒分が少なく、粒径が均質であり標準砂に近い。一般には、各種管材料の協会が管の上下 100mm の深さの原土を砂に置換することを敷設工法として推奨している。そのため、掛津古砂は現行の施工に用いられている地盤条件といえる。一方、光明寺土と混合土は、現行施工の地盤材料とは異なり、管周辺地盤が締固まりやすい条件にするために細粒分の多い材料を採用した。光明寺土は細粒分が多く粘土のような材料であり、最適含水比に近い状態で使用する。また、混合土に用いた刃金土は、光明寺土と類似した細粒分の多い土で、掛津古砂と混合させることで砂粒径が大部分の中に一部細粒分を含む土となっている。

実験ではこれら地盤材料の締固め試験の結果を図-4 に示す。掛津古砂は含水比 2.0% で使用し、光明寺土は最適含水比に近い 24.3% で、混合土は 1.9% で使用した。砂材料を最適含水比にする場合には、管の引抜きによって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。実験における各地盤材料の締固め度は、掛津

図-4 3地盤材料の締固め曲線

図-5 一面せん断試験

古砂で 94.5%、光明寺土で 75.5%、混合土で 87.2% となった。さらに、管と地盤との関係は、地盤材料のせん断変形特性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で一面せん断試験 (いずれも $\sigma_v=50\text{kPa}$) を行い、せん断変位に対する体積変化を確認した。一面せん断試験の結果を図-5 に示す。その結果、光明寺土はせん断直後から正のダイレイタンスーがみられた。また、掛津古砂と混合土は光明寺土程ではないが、少し変位した後にダイレイタンスーが現れる。

(4) 実験ケース

本実験では管・管周りの地盤材料・速度を変えながら全13ケース行った。実験ケースの一覧を表-2に示す。実験は3時期に分け、表-2の通し番号の実験1から実験4を2015年10月に、実験5から実験10を2016年3月に、残りを2016年6月に実施した。

加振速度は、低速、高速、それ以外の 0.2, 0.5, 1.0Hz の5種類がある。実験当初、限界せん断応力が生じる微小な相対変位時の速度を制御しようとしたため、低速、高速の加振ケースでは、振動台の速度が図-6 のように加振直後に低速で最大 4cm/s、高速で最大 60cm/s になるように設定した。ただし、実験設備の制約で各ケースの実験開始前にはロードセルと反力壁の間に 1cm 弱の隙間があるために、同じ加振ケースであっても反力壁に接触する瞬間の加振速度には多少ばらつきが生じる。また、

表-2 実験ケース

番号	名称	管	地盤	速度	継手
1	PE-S1-L	PE	掛津古砂	低速	無
2	PE-S1-H	PE	掛津古砂	高速	無
3	PE-S1-L-J	PE	掛津古砂	低速	有
4	PE-S1-H-J	PE	掛津古砂	高速	有
5	PE-S2-L	PE	光明寺土	低速	無
6	PE-S2-H	PE	光明寺土	高速	無
7	DIP-S2-L	DIP	光明寺土	低速	
8	DIP-S2-H	DIP	光明寺土	高速	
9	DIP-S3-L	DIP	混合土	低速	
10	DIP-S3-H	DIP	混合土	高速	
11	DIP-S3-0.2	DIP	混合土	0.2Hz	
12	DIP-S3-0.5	DIP	混合土	0.5Hz	
13	DIP-S3-1	DIP	混合土	1.0Hz	

後述の実験の考察でも触れるが、本研究で設定した高速の加振ケースが衝撃波のような外力であり、衝撃によって土粒子の噛み合わせが外れ、抵抗を上手く評価できていない可能性があったことから、追加の3つの加振ケースは、微小相対変位時の速度が低速と高速の加振ケースのそれらの間になるように設定した。また、実験 11 から実験 13 までは、加振前に地盤が良く締め固まるように 5Hz の 300cm/s^2 の正弦波 30 波を与えてから、引抜き実験の加振を行った。踏み固めによる締め固めのばらつきを少なくするために、正弦波による締め固めを期待したが、それによる有意な影響は実験結果に現れなかった。その結果については後述する。

3. 実験の結果

(1) 結果のまとめ方

本実験では、全 13 ケースについて管の引抜き実験を実施したが、紙面の制約上それら全てを示すことは難しい。そこで、分析の着眼点を絞り、その着眼点に該当する実験ケースごとに比較を行いながら整理する。

実験結果の整理方法であるが、管と地盤の相対変位と摩擦力の関係を整理する場合、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。また、摩擦力については、前述したように管は移動していないためにロードセルで計測される荷重をそのまま摩擦力として扱う。土槽にある両端の穴は管路と接触することではなく、引抜き前後で土槽の穴から多量の地盤材料が流れ出ることはないため、土槽の管口周辺に生じる摩擦を考慮する必要はない。さらに実験で用いた管の外径が異なるために、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。以下の分析ではそれぞれ

図-6 加振ケースの振動台入力速度・変位

図-7 実験1と耐震設計指針の変位・せん断応力の関係の比較

図-8 管種による摩擦力の違い (実験5~8)

の実験ケースを(管種(DIP, PE)ー地盤材料(S1, S2, S3)ー加振ケース(L, H, 0.2, 0.5, 1.0))として図中の凡例を表記する。

(2) 管の引抜き実験の妥当性に関する検討

本実験で与えている加振ケースは、低速であっても一般に行われている管の引抜き実験よりも速い。そこで、本実験の妥当性を検討するために、一般に行われる実験に近い条件である実験1(PE管、掛津古砂、低速、継手無)を確認した。図-7は、実験1の変位とせん断応力との関係に、高圧ガス導管耐震設計指針⁹⁾で規定されている限界せん断応力とその応力時の管の変位との関係を示す。指針では、高圧ガス導管を対象としているために実験で対象としている管よりも口径が大きく、管頂までの埋設深が1,800mmと深い場合の実験ケースから換算して600mmの場合の限界せん断応力を算出しているの、本実験の方が限界せん断応力が若干小さくなっているが、限界時の変位も近く、指針等のベースになっている静的な管の引抜き実験に近い結果が得られている。したがって、実験1から低速の加振で砂の地盤であれば既往実験を再現できることが確認でき、本実験で使用した装置や方法の妥当性が担保できる。

(3) 管種による摩擦抵抗

本実験では、PE管とDIP管の二種類の管を使用して

(a) PE管のひずみ分布 (実験5と6)

(b) DIP管のひずみ分布 (実験7と8)

図-9 管が1mm, 2mm変位した時の管の軸ひずみ

いる。基準⁹⁾では土と管の摩擦係数はPE管の場合は0.3、DIP管の場合は0.5と示されているが、同じ地盤において引抜き実験を行い、それらの影響について分析を行う。ここでは、管周りの地盤に光明寺土を用いた実験5から実験8を比較する。図-8はそれらの実験結果を示す。低速の実験では、せん断応力は微小な変位時に最大を示し、その後、変位に応じてピーク時の1/2から2/3程度に減少している。その傾向は管種に因らず同じ傾向を示している。一方、高速時には、PE管とDIP管の応答はそれぞれ異なっていた。DIP管は微小変位時に最大せん断応力を示すのではなく、変位が15mm程度でピークを示し、その後、低速時のせん断応力に漸近するように収束した。一方、PE管はDIP管のせん断応力よりも小さい値になった。以上のことから、低速で管を移動する限り、管種による顕著な差異は確認できず、管表面の摩擦の影響は小さいものと考えられる。

加振ケースや管周辺の地盤材料の違いによるせん断応力については後述することとし、ここでは高速で差異が生じたことについて考察する。図-9は、管種ごとに変位が2mmの時の管の軸ひずみ分布を示す。横軸は反力壁側の土槽壁端からの距離を示す。いずれの管種でも低速の場合には、反力壁側で最大の圧縮ひずみを生じ、反対側の管路ではひずみが0になるように、管延長に沿ってほぼ一定の勾配でひずみが分布している。つまり、管

(a) 低速ケースの場合(実験1, 5, 7, 9)

(b) 高速ケースの場合(実験2, 6, 8, 10)

図-10 地盤材料によるせん断応力の比較

延長に沿って均質な摩擦力が作用していることが確認できる。このような軸ひずみの分布は、加振ケースが低速の場合には、管種や地盤材料に関わらず同様の結果が得られた。一方、高速の場合には、軸ひずみは管に沿って波打つように分布し、一貫した傾向は確認できなかった。高速の場合には、反力壁に衝突する瞬間に衝撃波のようなものが管に沿って伝播しているためか、一様な摩擦力が作用していない。したがって、図-8のように高速ケース間でせん断応力に違いが出た原因は、管種によるものか、地盤材料によるものかは現段階の実験ケースだけでは判断できない。

(4) 地盤材料による摩擦力の特性

上述の(3)の実験結果の比較から、加振ケースが低速の場合には管種に因らずせん断応力の傾向は変わらないことが示された。そこで、速度が同じ場合の3つの地盤材料におけるせん断応力の比較を図-10で行う。

低速の場合には、乾燥砂である掛津古砂は、最大せん断応力に達するとそれ以降は変位に対してせん断応力はほぼ一定の値で推移する。一方、粘性土である光明寺土では、管路変位が2mm程度で掛津古砂の場合の1.5倍程度の最大せん断応力に達し、その後すぐにせん断応力は減少し、管路変位が10mmを超えると掛津古砂の限界せん断応力よりも低いせん断応力になる。さらに、乾燥状

態に近い混合土の場合、光明寺土とほぼ近い最大せん断応力を示すが、光明寺土ほど敏感に減少するのではなく、変位に応じて緩やかにせん断応力は減少する傾向が見られた。

地盤材料に関して、粒径の揃った掛津古砂の場合には実験で締固めを行っても土粒子構造の骨格が崩れにくく、管路の変位によるせん断変形を受けて管路周辺部の土粒子は移動して再配置するが、それほど大きなダイレイタシーを生じることがない。一方、細粒分の多い光明寺土や混合土では、砂の土粒子の間に細粒分の土粒子が噛み合っているため、締固まりやすく、せん断変形を受けるときにはそれらの土粒子の再配置のために大きなエネルギーが必要となり、掛津古砂の場合の最大せん断応力よりも大きな応力が発生する。ただし、最適含水比に近い光明寺土と乾燥状態の混合土では、最大せん断応力に達した後の挙動が大きく異なっている。光明寺土の場合は、土粒子間の粘着力が大きいため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。その後、管周辺の光明寺土は、管に追従して土粒子が動くことはないため、せん断応力は一気に低下する。一方、乾燥状態の混合土は土粒子間の粘着が弱いために、最大せん断応力に達した後も、砂の土粒子と管の間に細粒分の土粒子が噛み合ったり、管がある程度変位する間、それらが再配置を繰り返すために高いせん断応力が持続されると考えられる。

一方、同じ地盤材料で高速ケースで管を変位させた場合には、実験1の掛津古砂で低速ケースの場合よりも、管の変位が2, 3mmの段階でせん断応力の傾きは緩やかになり、変位は20mm程度で実験1の最大せん断応力に収束する。高速ケースの場合には、(3)で上述したように衝撃の影響があるため、地盤材料に因らず低速のせん断応力よりも小さくなる傾向が見られた。

(5) 速度による摩擦力の特性

実験の当初、高速ケースを設定していたが、上述したように高速ケースでは管の微小変位時に高い速度を与えるために、その衝撃によって管と土粒子との噛み合わせが外れ、想定しているような土粒子再配置に関わる速度依存が確認できなかった。そこで、低速ケースと高速ケースの間の速度に相当する図-6(c), (d), (e)に示すハーフサイン波の変位を与えて、速度によるせん断応力の変化を確認した。過去の研究で摩擦力の速度依存性が確認できた島村ら⁴⁾の実験でも、管に与えた最大速度50cm/sは管の微小変位時ではなく、変位し始めてからの速度であるため、本研究の入力条件と類似する。

図-11は乾燥状態の混合土にダクトイル鋳鉄管を埋設し、速度だけを変化させた実験9~13の結果の比較を示している。その結果、高速ケースを除き、1mm以下の

図-11 速度変化によるせん断応力の比較 (実験 9~13)

図-12 管路の移動速度 (実験 9~13)

図-13 継手の有無によるせん断応力の比較 (実験1~4)

図-14 管軸直角方向の地盤拘束力の比較

微小変形時の初速が速い実験ケースから順に大きな最大せん断応力が働くことが示された。加振ケースが 0.2Hz の場合においても、せん断応力は最大に達した後、緩やかに実験 1 の掛津古砂での実験の最大せん断応力とほぼ同じ値に収束する。実験 11 の 1Hz の場合の最大せん断応力と比較すると、移動速度を変化させるだけで最大せん断応力はほぼ 2 倍になることがわかった。実験 9, 10 の低速・高速ケースでは、他の 3 ケースと異なり実験前に正弦波加振による締固めを行っていなかったが、加振速度がさほど変わらない低速と 0.2Hz のケースを比較すると正弦波加振をしなかった低速ケースの方が大きな最大せん断力を示しており、正弦波加振による締固めの効果は十分確認できなかった。図-12 は管の変位が 40mm までの変位推移から移動速度を算定したものである。管の変位が 1.5mm までの速度は、15cm/s 以下である。この範囲の速度であれば、管と土粒子との噛み合わせが外れることなく、土粒子が移動する際にエネルギーを要し、それがせん断応力として生じるものと考えられる。

(6) 継手による摩擦力の特性

継手などの凸部を有する管の摩擦力への影響を検討するため、PE 管に継手ソケットがある場合とない場合の比較を行った。図-13 は掛津古砂に PE 管を埋設した場合のせん断応力を比較したものである。継手がある場合

には、高速・低速ケースの管の速度に関わらず、変位が 10mm 程度で継手のない場合のせん断応力の倍近い値が生じていることがわかる。さらに変位が大きくなればせん断応力は 3 倍近くになる。この種の実験の比較では、地盤の締固め条件など、実験の再現性を担保するのは難しいが、せん断応力の勾配が変化する時の管の変位は、低速ケースで 1mm、高速ケースで 2mm と 20mm など、同じ加振ケースであればほぼ同じになることが確認できる。

そこで、継手による抵抗がある場合の摩擦力の速度依存性について確認するため、継手凸部への抵抗力を同じ加振ケースで継手の有と無の実験ケースの摩擦力の差として算出した。図-14 は管の変位と継手凸部の抵抗力との関係を示している。高速ケースと低速ケースの実験を比較すると、抵抗力は高速ケースの方が低速ケースよりも小さい。実験数は少ないが継手による摩擦力の影響は速度によって変化するほど有意な差は確認できなかった。

図中の中低圧ガス導管耐震設計指針⁹⁾の曲線は、継手にかかる抵抗として過去の実験から得られた近似式から導出したものである。なお、近似式は継手の張り出し面積の関数で、地盤条件や埋設深は変数にはない。指針の継手の抵抗力は本実験のものよりも小さくなった。指針の基になっている実験結果を参照しても、張り出し面積によって抵抗力はばらついている。本研究で対象として

いる継手の張り出し面積 31.42cm^2 のように小さい張り出し面積の実験では近似式よりも小さくなる傾向にあり、本研究の結果でも面積が小さいために抵抗力は小さくなった。また、本実験で継手のある管路を埋設した地盤条件が粘着力の小さい掛津古砂であったことも近似式よりも小さくなる要因であったと考える。

本研究では、1 箇所の継手による摩擦力を示したが、指針等で継手部の摩擦力を考慮する場合には延長あたりの継手個数を反映させる必要がある。また、掛津古砂のみの検討しか行っていないため、他の異なる締固め条件の時の凸部の抵抗を十分検討する必要がある。

4. 実験の考察

本研究の実験結果から、管の移動速度や管周辺の地盤条件によるせん断応力の特性について考察する。

今回実施した実験ケースによると、管路の移動速度によって管の最大せん断応力は変化し、速度が速いほど最大せん断応力は増すことが確認できた。これは竹本ら⁹⁾が示唆した移動速度が速いほど土粒子の上向き変位に要する速度が増え、せん断面の圧縮力が増加することを実験によって証明したことになる。せん断面の圧縮力の増加によりせん断応力が大きくなった。ただし、実験では移動速度が 15cm/s よりも速くなると、砂の噛み合わせが外れ力の伝達機構を失ってしまうために、実験で再現できないケースがあることも示された。

実験でダイレイタンシーを計測できていないのでせん断変位に伴う体積膨張は確認できないが、一面せん断試験の結果から、光明寺土のような粘性地盤は初期変形に対して敏感に膨張する。一面せん断試験の速度よりも本実験の加振速度は速いので、体積膨張はより大きかったと考えられる。

現行施工では砂置換が一般的な工法であるが、細粒分の多い地盤材料を採用すれば締固まりやすく、管路変位時にも基準よりも倍程度大きなせん断応力が期待できる。これは前述したように、砂の土粒子の間に細粒分の土粒子が噛み合わさっているため、締固まりやすい。さらに、せん断変形を受けるときにはそれらの土粒子の再配置のために大きなエネルギーが必要となり、粒形が揃っている砂地盤の場合の最大せん断応力よりも大きな応力が発生する。さらに、砂以外の地盤になれば液状化の問題もなくなる。

本研究の実験から地中管路の耐震解析に用いる地盤ばねの速度依存性があることを示すことはできたが、実験ケースだけでは指針に導入できるだけの知見は不足している。しかし、管種による影響は小さいことが示されたので、あとは管周辺地盤の締固め状態や上載圧などの条

件により、変位に関する地盤ばね以外に速度に関する地盤ばねを提案することができれば、解析モデルを改良することができ、より現実に近い耐震解析を行えると期待できる。

5. 結論

本研究では、振動台を用いて実際の埋設深に近い条件で管の引抜き実験を行い、管の移動速度や管周辺の地盤条件によるせん断応力の特性を明らかにした。以下に本実験で得られたことをまとめる。

- ・ 本実験で低速ケースで管を引き抜いた場合、既往の遅い管の引抜き実験によるせん断応力を再現できることが確認できた。
- ・ ダクタイル鋳鉄管と配水用ポリエチレン管による摩擦力への影響を比較した。管種による顕著な差異は確認できず、管表面の摩擦の影響は小さいものと考えられる。
- ・ 現在の埋設管の布設状況に近い砂で埋設した場合には、最大せん断応力は限界せん断応力となるが、細粒分が多い地盤材料や最適含水比に近くよく締め固まっている地盤材料であれば、最大せん断応力は砂の場合の2倍近くになることが示された。
- ・ 地盤の締固めが強いと、最大せん断応力が生じた後に管と地盤の摩擦が切れやすく、変位後直ぐにせん断応力が低下することが確認された。
- ・ 砂に細粒分が含まれる地盤材料では、管の引き抜き速度によって2倍近く最大せん断応力が大きくなることがわかり、地盤ばねの速度依存性が確認された。ただし、管と地盤の間が 15cm/s 以上の高速に変位する場合には、土粒子の噛み合わせが切れるために、速度による摩擦力として作用しないこともある。
- ・ 継手などの凸部のある管路では、 30mm の変位に対して凸部のない管路よりも地盤のせん断応力は2～3倍程度大きくなることがわかった。また、継手の抵抗は速度による顕著な差異は確認できなかった。

参考文献

- 1) (社) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，2000.3
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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, 1999.1
- 5) 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
 - 6) 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, 2018.
 - 7) 平山智章, 鉏田泰子, 澤田純男: 小型模型実験による
(2016. 11. 4 受付, 2017. 1. 5 修正, 2017. 2. 18 受理)
 - 管路・地盤間に働く摩擦力の速度依存性, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. I_290-I_296 I_296, 2016.
 - 8) 大阪府土木部: 土木工事施工管理基準, 2004.4
 - 9) (社) 日本ガス協会: 中低圧ガス導管耐震設計指針, 2013.4

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

Tomoki INASE, Yasuko KUWATA and Sumio SAWADA

Axial soil spring between the pipe and ground is treated under the assumption that only a static friction acts. A simple coulomb friction is used in many of seismic response analysis on the buried pipe. In this study, the velocity dependency of shear stress between the pipe and ground was tried to make clear by the real-scale pipe pulling-out test using the shaking table. As a result, it has been understood that the maximum shear stress are different about twice depending on the pipe-moving velocity, and the maximum shear stress and the sliding characteristics are different by the ground compacting condition.