

小型模型実験による管路・地盤間に働く 摩擦力の速度依存性

平山 智章¹・鍬田 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: 150t135t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院 工学研究科 准教授 (〒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

現行の地中管路の耐震設計指針において、管軸方向に働く管路と地盤間の地盤拘束力はバイリニアモデルにて近似されている。つまり、地盤拘束力を決める管路・地盤間の摩擦力は、管路の移動速度に関わらず一定であると仮定されている。実際には、管路・地盤間に働く摩擦力は管路周辺地盤の土粒子の再配置の条件によって速度依存性があると考えられる。本研究では、小型模型実験装置を作製し、管路の引き抜き試験によって管路と地盤間に働く摩擦力の速度依存性について検討を試みた。結果として、管路に生じる摩擦力は、引き抜き速度によって大きくなることが確認できた。

Key Words : velocity dependency, pipeline, soil friction, experiment

1. はじめに

水道やガスなどのライフラインの耐震設計において、地震時に地中管路に作用する外力は通常、地盤拘束力と呼ばれ、設計指針では軸方向、軸直角方向にそれぞれの値が規定されている。例えば、石油パイプライン技術基準や水道施設耐震工法指針、共同溝設計指針では、地盤とのすべりは考慮しないものとして、地盤バネは周辺もしくは表層地盤のせん断弾性係数に比例した線形ばねで表現されている。一方、高圧ガス導管耐震設計指針では軸方向に関しては限界せん断応力を規定することで地盤と管路の間のすべりを考慮したバイリニアモデルが採用されている¹⁾。このモデルは、指針作成を目的に実施された遠心模型実験、振動台模型実験や数値解析で得られた知見等により提案されたものである。管軸方向の地盤拘束力は、管路と地盤との間に働く摩擦力によって決まると考えられる。この管路・地盤間の摩擦力は、ガス導管指針で示されているバイリニアモデルである限り、管路の移動速度に関わらず一定の値であり、動的な摩擦力は考慮されていない。

地震動等の外力によって管路が軸方向に移動する時、管路周辺の土粒子は管路の移動に応じて配置が換わる。この時、管路の移動速度が速ければ土粒子は再配置する

のに間に合わず、再配置にかかる力が大きな摩擦力として現れる。また、土粒子の再配置が終われば、すべりが生じることになるので、管路の変位に応じて摩擦力は一定値に収束するものと考えられる。また、これらの特性は、管路の移動速度や変位だけでなく、摩擦力を生じる土粒子の大きさやその構成比にも影響される。このように、管路と地盤との摩擦力には速度依存の関係があると考えられるが、一般の管路引き抜き試験では引張速度が非常に遅いため、上記のような課題に対して詳細な検証はほとんどなされていない。

本研究では、管路と地盤間に働く摩擦力の速度依存性について着目し、小型土槽における管路の引き抜き試験によって引き抜き速度と摩擦力の関係を明らかにすることを目的とする。また、実際の地中管路には継手が存在し、管路縦断面には多くの凸部を有する。そこで、継手の有無による摩擦力の影響についても検討を行うために、管路に継手を模した凸部を配置した実験も行った。

2. 管軸方向の地盤拘束力に関する既往研究

管軸方向の管路と地盤間の摩擦特性に関する実験事例は少ないが、島村ら²⁾は地中管路の軸方向動的な地盤ばね

特性について実大実験により検討し、管路と地盤の摩擦に起因する限界せん断応力について考察している。実大実験の実験装置は、盛土地盤中に埋め戻された供試体(埋設管)を高速加圧ジャッキで押し引きできるようにしたものであり、鋼管を加力して地盤との相対変位を生じさせる方式となっている。供試体には口径 600mm のポリエチレン被覆鋼管が使用された。

実験の結果よりせん断応力と相対変位との関係は線形ではなく、せん断応力が一定値に達すると、管路と地盤の間にすべりが生じ、低速載荷時にはほぼ一定になることが示されている。また、高速載荷時の限界せん断応力は低速載荷時のそれよりも大きく、ピークを過ぎた後せん断応力は低下し、変位が大きくなるにつれて低速載荷時の値に近づく傾向があることも示されている。

一方で、小林ら³⁾は管軸方向の地盤拘束力について速度依存性と地震動の繰り返しによる影響をみるために、口径 150mm, 300mm の鋼管を埋設した土槽を振動台に搭載して加振し、管路と地盤の相対変位と限界地盤拘束力との関係について検討した結果、速度 50cm/s 以下の範囲では速度依存性は確認できなかったと報告している。

既往研究では、実験の方法や管路の敷設条件により、地盤拘束力の速度依存性が確認できる場合とそうでない場合がある。高レベル地震動に対する地中管路の挙動を踏まえる上で、地盤拘束力の速度依存性のメカニズムやその原因等を究明することは重要である。

3. 試験装置概要

(1) 試験装置

本研究では、管路と地盤間の摩擦力の速度依存性を明らかにするために、砂による小型土槽を作製した。土槽に貫通させた鋼管を片側から軸方向に押すことで、管路と地盤との相対変位を生じさせる方式とする。

土槽には透明なポリエチレン製ケース(長さ 55cm×高さ 30cm×奥行 38cm)(THC64B, トラスコ)を使用し、管路には外径 48.6mm, 管厚 1.5mm の鋼管を使用した。管路の長さは 1.5m である。本試験ではこの鋼管を 2 本用意し、1 本は土槽モデルにおける疑似埋設鋼管として、もう 1 本はその疑似埋設鋼管を軸方向に押すためのガイドとして使用した。また、管路の自重たわみを考慮するために土槽の両端にはローラーによるガイドを設置した。図-1 に試験装置の概略図を、図-2 に実際の試験装置の様子を示す。図-2 の左に見える鋼管がガイド用鋼管である。さらに、管路の移動とともに砂の流出や管路引き抜き側の土槽内側で砂の移動が拘束されるため、土槽内側の管路取り出し口周辺にはプラスチック漏斗を配置して拘束を緩衝させるとともに、漏斗の先にセロハンで管路を巻

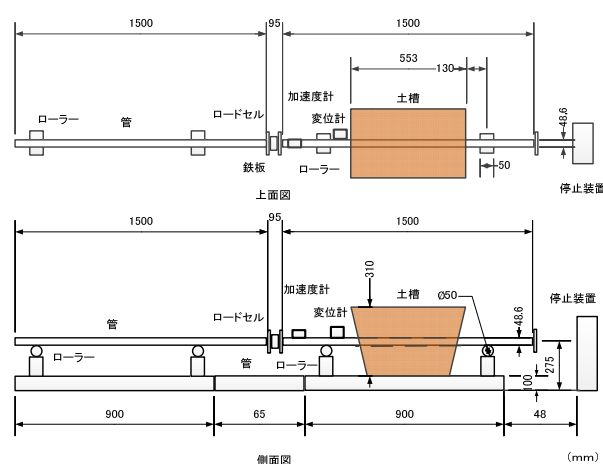


図-1 試験装置概要図



図-2 試験装置の様子

くようにさせて砂の流出を防護するなどの工夫を施した。

試験の計測については、荷重測定用のロードセル(TCLZ-20NA, 東京測器)を疑似埋設鋼管とガイド用の鋼管の間に設置した。鋼管には加速度計(ARF-20A, 東京測器)と巻込み型変位計(DP-500B, 東京測器)を取り付けた。

(2) 気中試験

本実験装置のロードセルでは、管路と地盤の間に作用する摩擦力の他に、管路が加速されることによって生じる慣性力、また、管路と装置両端に設置したローラーとの間に生じる摩擦力など、試験装置自体の抵抗力の合計が測定される。そのため、試験装置自体の抵抗力の影響を調べる目的で、砂を入れない土槽で気中状態における管路引き抜き試験を実施した。なお、測定はサンプリング周波数 100Hz で実施し、微小ノイズは 10Hz のローパスフィルタで処理をした。鋼管速度は変位から時間微分して算出した。

図-3 に気中試験の一例として、鋼管変位に対するロードセル荷重と慣性力を合わせて示す。10cm まで変位させる中での速度の最大値は 30cm/s であった。同図より、ロードセル荷重と鋼管の慣性力の差は鋼管変位に関わらず 5N 程度で一定である。また、管路の移動速度を変化させても、ロードセル荷重と鋼管の慣性力の差は変わらないことを確認した。これらの結果から、ローラー等の試験装置自体の抵抗力は、一定でかつ微小であることから、土中での管路引き抜き試験に及ぼす影響は少ないと考え

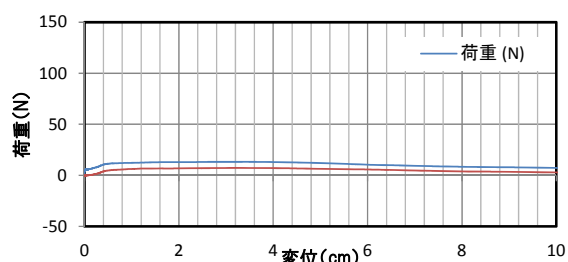


図-3 気中試験におけるロードセル荷重と鋼管の慣性力の比較

表-1 実験に用いた砂の土質試験結果

項目		けい砂5号	掛津古砂
土粒子密度 (g/cm^3)		2.65	2.65
最大乾燥密度 (g/cm^3)		-	1.598
最適含水比 (%)		-	11.0
粒 度 分 布	礫分 (75~2mm) (%)	0	0
	砂分 (2~0.075mm) (%)	99.7	98.0
	細粒分 (0.075mm 以下) (%)	0.3	2.0
	均等係数 U_c	3	1.57
	曲率係数 U_c'	1.6	1.09
	平均粒径 D_{50} (mm)	0.57	0.33

られる。したがって、本研究では、以降の引き抜き試験においてロードセル荷重から鋼管の加速度測定結果より求めた慣性力を差し引いた値を、管路と地盤の間に作用する摩擦力として算出する。

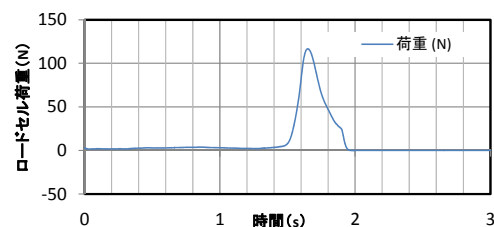
(3) 土槽の砂の物理特性

本研究の土槽の砂には、粒径のばらつきによる影響を考慮しないものとして、比較的粒径の揃っているけい砂5号と掛津古砂を用いる。実験に用いたけい砂5号および掛津古砂の土質試験結果を表-1に示す。けい砂5号については、粒子が角ばっているため透水性が非常に高く、最大乾燥密度および最適含水比を得ることができず、締固めを行うことが出来なかった。そのため本研究では、けい砂5号を乾燥砂として締固めを行わず自然乾燥状態で使用し、掛津古砂については締固め度90で締固めをして実験を行う。

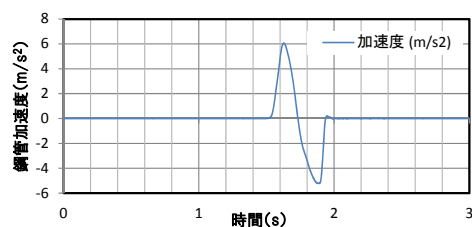
4. 管路引き抜き試験

(1) けい砂および掛津古砂による試験結果

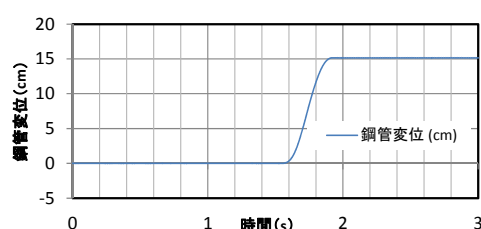
土槽内にけい砂および掛津古砂を満たして、管路引き抜き試験を行う。けい砂については、締固めを行わず自然乾燥状態で鋼管を埋め戻した。掛津古砂については、三層に分けて砂を入れ込み、一層毎に十分に突き固めを



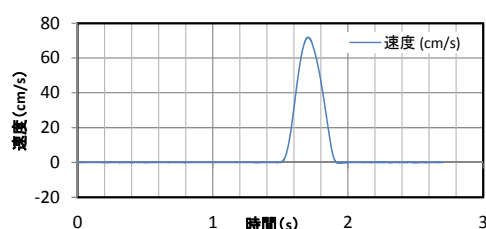
(a) ロードセル荷重



(b) 加速度



(c) 鋼管変位



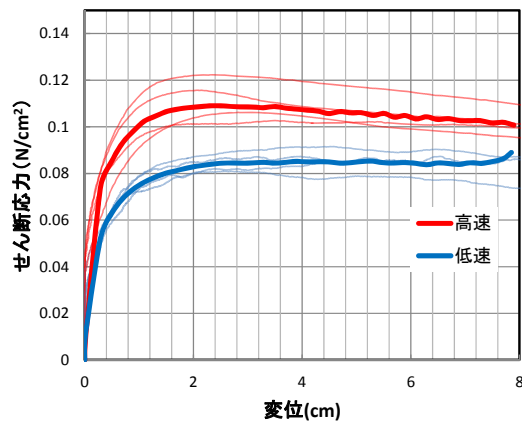
(d) 速度

図-4 試験装置の様子

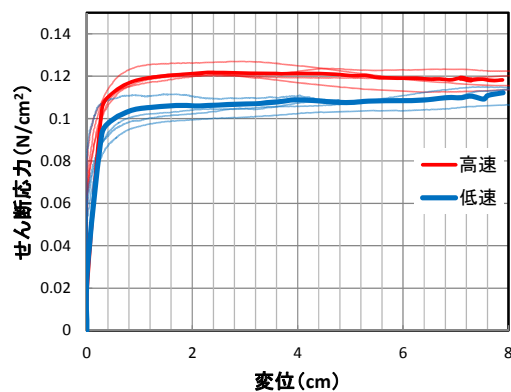
行いながら鋼管を埋め戻した。また、試験が終わる度に土槽表面から突き固めを実施して、試験を繰り返した。実験におけるケース内の土層の厚さは270mm、土被り厚は100mmである。

結果の一例として、けい砂土槽の引き抜き試験におけるロードセル荷重、鋼管変位、鋼管加速度、速度を図-4に示す。引き抜きは人力で行っているために、必ずしも同じ引っ張り速度を再現することはできないが、図に示すように最大速度までの上がり・下がり勾配はほぼ同じになる三角形分布を示している。また、ロードセルにおいて最大荷重が作用した直後に、管路が最大速度に達することが確認できる。

けい砂、掛津古砂それぞれの土槽において移動速度の異なる試験を繰り返した。図-5にけい砂および掛津古砂について管路・地盤間に作用するせん断応力と相対変位の関係をそれぞれ示す。図の縦軸のせん断応力は、



(a) けい砂



(b) 掛津古砂

図-5 せん断応力と鋼管・地盤間の相対変位の関係

ロードセルの測定荷重より鋼管加速度から求めた慣性力を差し引いた摩擦力に対して、砂と接触している鋼管の表面積で除した値である。ここでは、既往の研究に基づき、摩擦力が鋼管の管軸方向に一樣に分布していると仮定し、周方向についての平均的なせん断応力を求めることとしている。設計では、地盤はばねでモデル化され、管路表面近くの地盤のせん断変形は無視されるので、管路と少し離れた位置での管路と地盤変位の差、すなわち本実験では鋼管変位を両者間の相対変位とみなす。

本研究では、管路の移動速度を評価するにあたり、管路の引き始めから 10cm 程度の変位が生じるまでの間の最大速度で分類した。けい砂では、最大速度が 9.8cm/s から 84.2cm/s の間になる試験を 8 回実施し、掛津古砂でも同様に 5.4cm/s から 83.4cm/s の間になる試験を 8 回実施した。それらの実験ケースを管路の最大速度 50cm/s 未満とそれ以上で低速と高速のグループに分類し、1 グループ 4 試験でせん断応力の特性について整理した。図-5 中の薄赤・薄青の細実線が低速または高速での結果である。さらに各速度グループの平均せん断応力を求めるために、横軸の変位軸を 0.2cm ごとに分割し、その分割変位内にある全データのせん断応力の平均値を結んだものが図中の太実線になっている。

けい砂土槽では、引っ張り速度が低速 ($\mu=17.9\text{cm/s}$,



図-6 管路の凸部の様子

$\sigma=8.6\text{ cm/s}$) で変位が 2cm 以上になれば、せん断応力はほぼ一定に収束することがわかる。高速 ($\mu=68.6\text{cm/s}$, $\sigma=11.3\text{ cm/s}$) の場合は、低速の場合のせん断応力の 3 割増しの応力が働いている。また、変位が 1.6cm 程度でせん断応力はピークに達した後、変位が大きくなるにつれ僅かであるが減じることが分かった。

掛津古砂土槽の場合も、低速 ($\mu=21.1\text{cm/s}$, $\sigma=14.1\text{ cm/s}$) で引っ張った場合は変位が 1cm 未満で一定のせん断応力に収束するのに対して、高速 ($\mu=68.5\text{cm/s}$, $\sigma=11.6\text{ cm/s}$) では、せん断応力はピークに達した後、変位が大きくなるにつれ、若干減じるもののほぼ一定の値になることが確認できた。また高速の場合は低速の場合よりもせん断応力が 1~2 割大きくなることが確認できた。

けい砂の場合は、せん断応力は 0.09N/cm^2 に収束し、掛津古砂の場合は、 0.11N/cm^2 に収束した。また、けい砂では、変位が 1.6cm でせん断応力がピークに達するのに対し、掛津古砂では変位が 0.8cm でピークに達し、けい砂と掛津古砂ではピークに達するまでの変位が大きく異なることが確認できた。

(2) 凸部のある管路の引き抜き試験

地中管路における継手構造の有無による引き抜き速度とせん断応力との関係について検討するために、継手構造を模した凸部を管路に配置して上述と同様な引き抜き試験を実施した。凸部は厚紙を用いて作成した。図-6 に実際に鋼管に取り付けた状態の様子を示す。凸部の厚さは 5mm で、管軸方向長さは 5.3cm である。

けい砂、掛津古砂の土槽で試験を実施したものの、管路に僅かな厚さの凸部が付いただけで大きな摩擦力がかり、人力では凸部のない場合のような速度を再現させることは困難であった。図-7 は凸部のある場合のけい砂土槽でのせん断応力と相対変位の関係を示したものである。全 8 回の試験の最大速度は最大で 44.0cm/s となり、平均 $\mu=30.3\text{cm/s}$, $\sigma=11.1\text{ cm/s}$ であった。つまり、凸部のない場合の低速のグループに属することになる。また変位が 3cm 以上になると、急に大きな負荷がかかるため

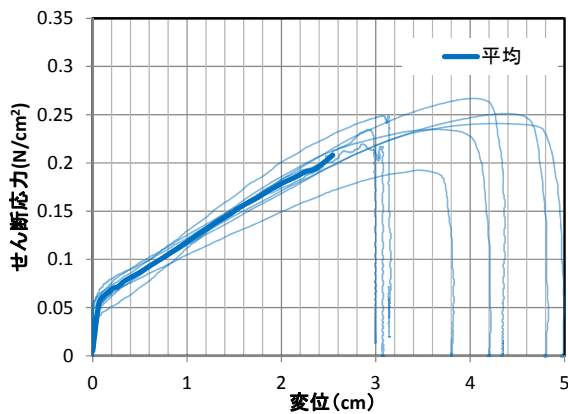


図-7 凸部がある場合のけい砂土槽内管路のせん断応力と相対変位の関係

にその段階で管路を押し込むことを中断した。そのため、平均値は変位が 2.5cm までで算出した。なお、掛津古砂土槽の場合では、さらに大きな荷重が作用しており、想定していたロードセル荷重を超える可能性があったので実験を中止した。

図-7 より、1mm 程度の変位が生じると勾配がやや緩やかになる。しかし、凸部のない管路で見られたせん断応力と異なり、変曲点を過ぎた後もある程度の勾配でせん断応力が変位に対して大きくなることがわかった。

5. 実験の考察

(1) 限界せん断応力

実験に用いたけい砂、掛津古砂の単位体積重量はそれぞれ、 12.9kN/m^3 、 16.9kN/m^3 であり、それらによって管路中心部における水平土圧 ($=\gamma H/2$) は 0.080N/cm^2 、 0.104N/cm^2 と算出され、今回低速時に観測されたせん断応力とほぼ等しい値になることが確認できた。

また、高圧ガス導管指針¹⁾の限界せん断応力の経験式においても、基準となる導管の埋設深さ（地表面から導管の管頂までの距離）が 1.8m に対して、本試験での埋設深さは 10cm と遙かに浅いが、限界せん断応力を算出すると、 0.08N/cm^2 となり、実験で得られた値と非常に近いものになることを確認した。

(2) けい砂および掛津古砂における差異

けい砂および掛津古砂の土槽における実験で生じたせん断応力の大きさはほぼ同程度であった。この差は、前述したように管路上部の堆積重量の差異によるものといえる。一方、せん断応力がピークに達するまでの変位量は、けい砂が 1.6cm 程度であるのに対し、掛津古砂では 0.8cm 程度である。良く締まった掛津古砂の方が、小さな相対変位でせん断応力がピークに達している。ゆる締

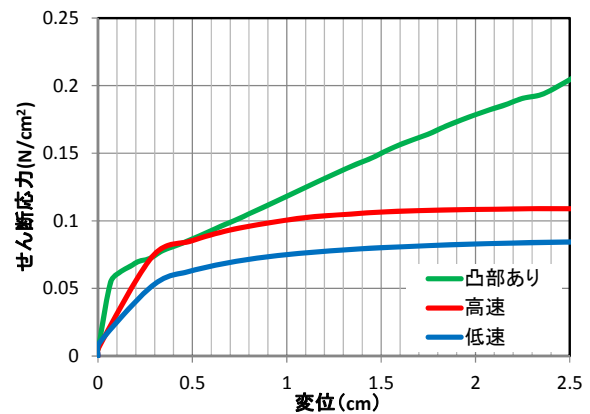


図-8 凸部の有無によるせん断応力の比較（けい砂）

め地盤であれば、管路が移動し始めるときに管路周囲に十分な間隙があり、土粒子の噛み合わせが安定するまで変位するため、せん断応力は緩やかな立ち上がりになる。一方、掛津古砂はけい砂よりも締まっているために、わずかな変位で土粒子が再配置されて管路周辺の土粒子だけのすべりの状態に至ったと考えられる。

(3) 管・地盤間に働く摩擦力の速度依存性

本実験では、けい砂、掛津古砂の場合ともにせん断応力と相対変位との関係について、管路の移動速度による違いが確認できた。ただし、高速時には島村ら²⁾が示したように変位とせん断応力との関係でピークとなる限界せん断応力を示した後に変位とともにせん断応力が減少することが想定されたが、本実験ではバイリニア型の形状のまま限界せん断応力のみ増加する結果となった。実験で用いた砂の条件はいずれもゆる締めであったためにピークが見えなかったといえる。また、管路がすべり始めた後も速度によってせん断応力に差が生じたことは、すべり時の管路周辺の土粒子範囲は変わらないとしても、土粒子の移動・回転が低速時よりも速いために、土粒子の慣性力が大きくなって管路の摩擦力、せん断応力として現れたと考えられる。

(4) けい砂による試験の凸部の有無による影響

けい砂土槽において凸部のある引き抜き試験結果と凸部のない結果を比較する。図-8に示すように外径 48.6mm の鋼管に外径が 10mm (20%) 増え、すべり後の変位—せん断応力関係も変位に応じて応力が増加する。管路全体で初期状態から土粒子の再配置が終了した後も、凸部周辺で土粒子の再配置が繰り返されるためにこのような応力が増加し続けるものと考えられる。

凸部の実験は低速時の条件であるが、それにより生じるせん断応力は凸部のない高速時のものよりも大きくなった。生じるせん断応力の大小は、凸部の断面増加量に

依存すると考えられるが、本実験で想定した管路直径の2割増しの凸部直径は現在の管路規格から外れたものではない。つまり、移動速度によるせん断応力の増分よりも管路の継手等の凸部による増分は軽視できないものと示唆される。ただし、本実験では、管路の移動が3cm程度で停止している。また、実験では凸部の移動方向前後で砂表面に盛り上がりとくぼみができていることから、土粒子が管路周辺で一様に移動したのではなく、凸部で土粒子の移動が妨げられ、土槽と凸部との間で水平方向に圧縮されたと考えられる。小型模型のために、土槽と凸部の距離が十分でなかったこと、管路上部で砂が盛り上がるほどの土圧がかかっていなかったことも考えられるので、実環境に近い状態でこれらの検討をする必要がある。

6. 結論

本研究では、小型土槽を用いて管路引き抜き試験を実施し、管路・地盤間に働く摩擦力の速度依存性に関して検証した。得られた結論を以下に示す。

- 1) けい砂、掛津古砂ともに管路と地盤の間に生じるせん断応力は、引き抜き最大速度が50cm/s以上の高速時の方が、50cm/s未満の低速時よりも大きくなることが確認できた。
- 2) せん断応力が限界せん断応力に達する時、地盤がゆる締めであるほど緩やかな立ち上がりとなった。ゆ

る締め地盤であれば間隙があるために管路周囲の土粒子は移動しやすく、噛み合わせが安定するまで変位するためと考えられる。

- 3) 管路のすべり後も、管路周辺の土粒子の移動・回転が低速時よりも速いために、土粒子の慣性力が大きくなって管路の摩擦力、せん断応力として現れると考えられる。
- 4) 継手のように管路に凸部がある場合、すべり後の変位一せん断応力関係も変位に応じて応力が増加する。初期状態から土粒子の再配置が終了した後も、凸部周辺で土粒子の再配置が繰り返されるためにこのような応力が増加し続けるものと考えられる。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費（基盤研究(B) No.26289144）により支援されている。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) （社）日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針（改定版），2000.3
- 2) 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
- 3) 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

A SMALL-SCALE EXPERIMENTAL STUDY ON VELOCITY-DEPENDENT SOIL FRICTION BETWEEN PIPE AND GROUND

Tomoaki HIRAYAMA, Yasuko KUWATA and Sumio SAWADA

In the current seismic design of underground pipeline, the axial ground restraint force between the pipeline and the ground is modeled as bi-linear against the relative displacement. In other words, the soil friction determining the ground restraint force is assumed as constant regardless of the pipe moving velocity. However, it is thought that the soil friction is dependent to the pipe moving velocity because of the relocation of the soil particle. This study tried to examine the velocity-dependency of the soil friction by the pipe pilling test of the small-scale soil box. As a result, the frictional force becomes larger according to the pipe moving velocity.