

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

島村一訓¹・竹之内博行²・三木千壽³・福澤小太郎⁴

¹正会員 M.S. 東京ガス(株)設備技術部(〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

²正会員 (社)日本建設機械化協会建設機械化研究所研究第二部(〒417-0801 静岡県富士市大淵3154)

³フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴日本鋼管(株) エネルギー・エンジニアリング本部ガス計画設計部(〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

埋設パイプライン耐震設計の重要なパラメータである軸方向の動的地盤ばね特性(ばね定数および限界せん断応力)について、実大規模で実験するための高速載荷実験装置を開発し、口径600mmのポリエチレン被覆鋼管を土被り180cmに埋設して、高速載荷で押し引きする実験を行った。その結果、パイプラインと地盤の間のせん断応力が一定値に達するとパイプラインと地盤の間に滑りが生じる、地盤ばね定数および限界せん断応力は載荷速度が大きくなるにつれて増加する、高速載荷時の限界せん断応力は1回目の載荷時が最も大きく2回目には40%~50%低下する、等の結論が得られた。

Key Words : earthquake, pipeline, real scale experiment, high velocity loading, soil spring, slippage, critical shear stress

1. まえがき

パイプラインは、ガス、水、石油等の流体を高効率で大量に長距離輸送する施設である。欧米では、100年程前から、天然ガスパイプライン、石油パイプラインとして広範囲かつ大規模に使用されており¹⁾、我が国においても、新潟～東京、新潟～仙台、苫小牧～札幌間で天然ガス輸送に使用されるとともに、上越～高崎間で建設が計画されている²⁾。また、都市域では、パイプラインは、都市機能を維持するうえで欠かすことのできない重要なインフラストラクチャーの一つとして、エネルギー(ガス、電気)、水、情報(電話)を市民に供給するライフライン施設を形成している。

埋設パイプラインの設計では、耐震設計が重要な項目であり、一般に応答変位法により耐震計算がなされている³⁾。応答変位法は、構造物の慣性力による動的効果が無視できる場合に適用される手法であり、地震時の地盤変位を地盤ばねを介して静的に構造物に作用させて耐震性が照査される。すなわち、

耐震設計は、静的な条件のもとに行われる。しかしながら、実際の地震時の現象は動的であるため、パイプと地盤の間の相対変位速度や繰り返しの影響などの動的な効果を地盤ばね特性に含ませる必要がある。本研究は、この観点に立って、埋設パイプラインの軸方向の動的ばね特性(ばね定数および限界せん断応力)を実験的に検討したものである。

この研究課題は、次章で述べるように、解析的および実験的研究が以前よりなされており、ばね定数と限界せん断応力は、パイプラインの地震時応答に支配的な影響を及ぼすことが示してきた。しかし、今までに、実大規模といえる実験は行われていない。そこで、今回、そのための高速載荷実験装置を開発した。そして、口径600mmのポリエチレン被覆鋼管を土被り180cmに埋設して、高速載荷で押し引きする実験を実施し、埋設パイプラインの軸方向の動的地盤ばね特性を実験的に検討した。実験では特に、埋設パイプラインと地盤との間の滑りの有無、滑りが生じる場合の限界せん断応力の速度依存性、および載荷繰り返しによる限界せん断応力変化に着目した。

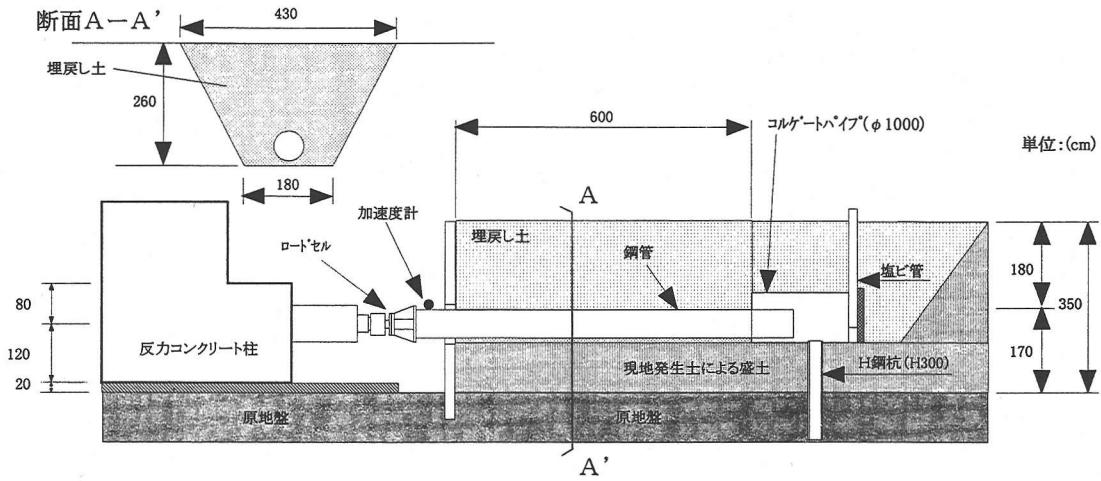


図-1 実験装置概要図

2. 既往の研究

各種の耐震設計基準・指針では、地盤ばねの特性および決定方法は必ずしも一致していない。本研究で着目している軸方向の地盤ばね特性についてみると、特に、パイプラインと地盤との間にせん断応力がある限界を越えた時に、パイプラインと地盤との間で「滑り」を考慮するか否かで大きな違いがみられる。例えば、埋設地中線状構造物の最初の耐震設計基準として策定された「石油パイプライン技術基準(案)」⁴⁾では、滑りを考慮しない線形ばねを考える大きさは、地盤の動的せん断弾性係数 G ($= \gamma_s / g \cdot V_s^2$, γ_s : 土の単位体積重量, g : 重力加速度, V_s : 地盤のせん断弾性波速度) の3倍としている。水道施設耐震工法指針⁵⁾、共同溝設計指針⁶⁾でも同様の考え方である。駐車場設計・施工指針⁷⁾では、線形ばねを採用しているが、その大きさは、有限要素法により算出する。一方、高圧ガス導管耐震設計指針⁸⁾では、パイプラインに作用するせん断応力がある値になると、パイプラインと地盤の間に滑りが生じる、バイリニア型の非線形ばねが採用されている。

パイプラインと地盤の間に滑りを考慮すると、配管系としてみた場合には、直管に発生するひずみが減少し、曲管部のひずみが大きくなることが、多くの解析的な研究により指摘されている^{9)~12)}。このため、過去に多くの地盤ばね特性に関する実験が行われてきた。軸方向動的実験についてみると、北出ほか⁹⁾は起震機を用いた実験を行い、宮本ほか¹³⁾は多数の小型振動台を組み合わせた実験を行っている。高田¹⁴⁾、宮本ほか¹⁵⁾は、埋設管端部を直結し

た振動台ないし起震機で加振する実験を行っており、逆に、土木研究所¹⁶⁾、小林ほか¹⁷⁾は管を反力壁に固定した状態で振動台上の土槽に埋設し、土槽を加振する実験を行っている。これらの実験結果は、いずれもパイプラインと地盤との間に滑りが生じることを示している。また、文献15)の研究を除いて、滑りの起こる動的限界せん断応力は、静的限界せん断応力よりも小さいかほぼ等しい。しかしながら、これらの実験は、地盤振動変位が小さい(文献9))、管の口径が小さい(文献13), 14))あるいは実大規模とはいえない(文献16), 17)), 管の慣性力の扱いが不明(文献15)), 滑り開始までの変位速度が不明(文献16), 17))等が指摘できる。

3. 高速載荷実験装置の開発

(1) 実験装置

実験は、盛土地盤中に鋼管を埋戻し、その鋼管を加力して地盤との相対変位を生じさせる方式とした。盛土の大きさは、埋設する鋼管の寸法および鋼管と地盤との相対変位に比べて、十分な広さを有するよう、長さ20m×幅20m×高さ3.5mの規模とした。実験装置の概要を図-1に示す。供試体は、ガスパイプラインの実用サイズとして代表的な、口径600mmのポリエチレン被覆鋼管とした。ポリエチレン被覆の特性を表-1に示す。樹脂には、低密度のポリエチレンが使われている。鋼管断面は、外径609.6mm×肉厚12.7mmで、長さは7.6mとした。実験装置は、埋戻した供試体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る。供試体鋼管と高速加圧ジャッキの間には、荷重測定用のロードセルを取り付けた。

表-1 ポリエチレン被覆の特性

樹脂	低密度ポリエチレン
被覆厚さ	2.9mm
製法	粉末流動層への加熱钢管つけ込み
樹脂性	密度(JIS K6760) 0.926g/cm ³ マルトフローレット(JIS K6760) 3.2g/10min 引張強さ(JIS K6760) 170kgf/cm ² 伸び(JIS K6760) 840% ショア-D硬さ(JIS K6760) 36~42H _D

1kgf/cm²=98kN/m²

(2) 高速載荷装置

この実験では地盤ばね特性の立上がり過渡状態における動的特性を把握することが目的であるため、加力装置としても高速度の加力能力に加えて、十分な初期応答性能を有するものが必要である。ここでは、実験で必要とされる変位速度および載荷能力を以下のように想定した。

1995年の阪神・淡路大震災以後、重要構造物については、きわめて稀であるが非常に強い地震動(レベル2地震動)に対し、構造物の損傷過程にまで立ち入って、構造物の耐震性能を照査することが求められている¹⁸⁾。したがって、実験条件は、レベル2地震動を考慮したものでなければならない。

さて、地震時のパイプと地盤の相対速度について考えると、両者は一般的には、同位相で、ほぼ一体運動すると考えられる。しかし、例えば、成層地盤では両者間の相対変位速度はごく小さく、切り土・盛り土境界や基盤の不整形構造部を横断する箇所では地盤応答の違いにより境界部付近で相対速度が大きくなる、等が定性的には推察されるものの、定量的には明らかになっているとは言えない。そのため、本研究では、地震時の状況を十分に包含する設定として、地盤の絶対変位速度を実験時に钢管と地盤の相対変位速度として与えることとし、大規模地下構造物を地震時保有水平耐力法により耐震性照査する場合の標準速度応答スペクトル¹⁹⁾を参考に高速載荷装置の変位速度目標値を85cm/sとした。この仕様は、阪神・淡路大震災直前に定めたものであったが、結果として、レベル2地震動での地盤変位速度をほぼ想定した値となっている。また、載荷能力は、載荷荷重とストローク変位の関係を0~10tf(0~98kN)/0~1mm(管軸方向の載荷を想定)と0~40tf(0~392kN)/0~20mm(管軸直角方向の載荷を想定)の2種類とし、それぞれの変位(1mmおよび20mm)が生じるまでに変位速度85cm/s程度まで加速できるものとした。

このような高度の初期加速性能を効率よく実現するため、いくつかの特長を有する高速加压ジャッキ

表-2 高速加压ジャッキの主要仕様

項目	仕様
駆動方式	アクチュエータ駆動
常用最大圧力	210kgf/cm ²
最大押しつけ力	60.8tf (210kgf/cm ²)
最大引き戻し力	60.8tf (210kgf/cm ²)
シリンダー形式	両動ピストン型
シリンダー	250mm (有効ストローク200mm +クッションストローク50mm)
変位速度	50tf出力時最大85cm/s (172kgf/cm ² において)
速度設定範囲	0.5~85cm/s (任意手動設定)

1kgf/cm²=98kN/m², 1tf=9.8kN

の新システムを開発した。その1つは、アクチュエータ駆動方式の油圧載荷装置の採用であり、この方式では、アクチュエータに蓄圧した作動油を一気に加力シリンダーに送り出すことにより高速でピストンを駆動する。さらに、この装置の最大の特長は、両動ピストン型シリンダーの前後両側にあらかじめ高油圧を作用させておき、作動命令信号により一方の油圧を高速で抜くと同時に、他方にアクチュエータからの油圧を送り込む方式を探ったことである。すなわち、ピストンの両側で減圧と加圧を同時にすることにより、これまでにない高速載荷を可能にした。また、これらの油圧の切替えを高速で行うため、応答性に優れたサーボロジック弁を採用した。なお、この装置では上記の運転モード(最高速モード)の他に、ピストンの片側からの高速加压による運転モード(中速モード)や低速でシリンダーを動かす運転モード(低速モード)も可能なものとした。また、全ストローク250mmのうち、試験条件である100mmの押し引きの往復載荷を、ストローク長中心位置で繰返せるように、所定の位置でシリンダーを止める停止装置を取付けた。

加压ジャッキの変位速度は、両動ピストン型シリンダーの前後両側への油圧作動の有無、およびバルブ開度(中速モード)の設定により調整する。この設定条件とジャッキ変位速度の関係については、事前の予備実験により再現性が高いことを確認している。また、ジャッキ変位方向の逆転は、油圧装置の再セットが必要で、時間的に連続してはできない。

高速加压ジャッキの主要性能を表-2に、油圧装置および加力シリンダーの外観を写真-1に示す。

(3) 予備実験結果

図-1の実験装置のロードセルでは、钢管と埋戻

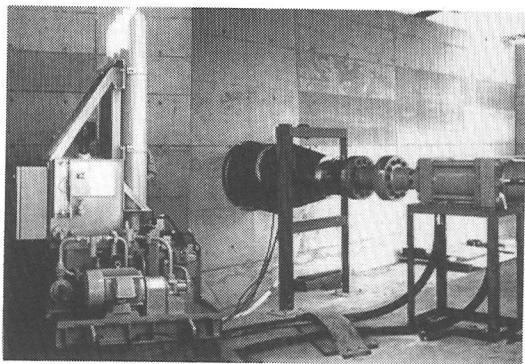


写真-1 高速加圧ジャッキの油圧装置および加力シリンダー

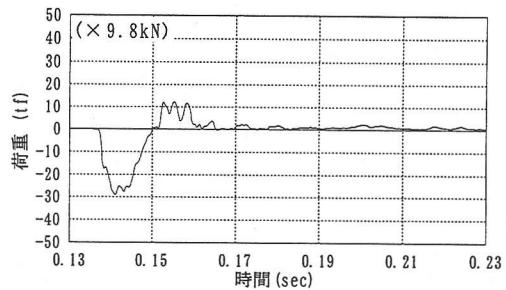
し土の間に作用する摩擦力および鋼管が加速されて動くことによる慣性力の合計が測定される。したがって、鋼管と埋戻し土の間の摩擦力を求めるには、ロードセルで測定された値から鋼管の慣性力を差し引く必要がある。そのため、載荷速度と鋼管の慣性力との関係を予め把握する目的で、埋戻し土がない状態で予備実験を行った。

予備実験では、埋戻し土がない状態で、床付け面に設置したH鋼上にコロを置き、その上を鋼管が動くようにすることにより鋼管の摩擦力が無視できる状態にした。載荷は最高速モードで行い、載荷速度は85cm/s程度とした。

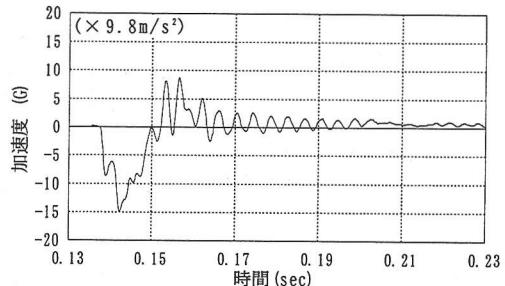
予備実験で測定されたロードセル荷重、鋼管の慣性力と時間の関係を図-2に示す。

ロードセル荷重と加速度波形には、大きな変化を示す波形の他に微振動波形が認められる。これは、鋼管の中を伝わる弾性波(縦波、横波)や載荷治具等の振動によるものと推察される。ここでは、鋼管と埋戻し土の間に作用する摩擦力を算出するため、これらの微小波形を数値処理(200Hz以上をカットするローパスフィルタをかける)により除去した。鋼管の慣性力は、鋼管に設置した加速度計で測定した加速度に、ロードセルから自由端側の鋼管および取付け治具の質量を乗じて求めた。

図-3にロードセル荷重と慣性力を合わせて示す。同図より、ロードセル荷重と鋼管の慣性力は最大の誤差でも3tf(29kN)程度であり、よく一致することが確認された。したがって、以降は、それぞれの実験ごとに、ロードセル荷重から鋼管に設置した加速度測定結果より求めた慣性力を引き、その値を鋼管と埋戻し土の間に作用する摩擦力として解析を実施した。



(a) 荷重



(b) 加速度

図-2 ロードセル荷重、鋼管加速度と時間の関係
(予備実験)

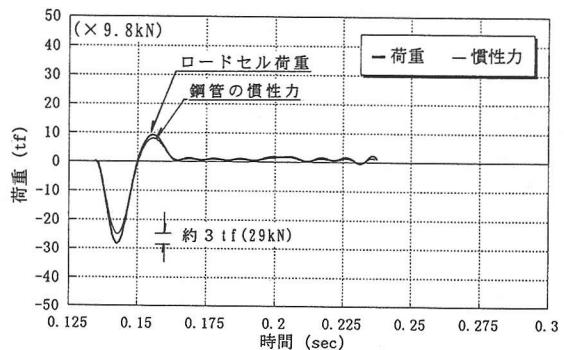


図-3 微小波形除却後のロードセル荷重と鋼管の慣性力の比較

4. 軸方向動的地盤ばね特性の実験

(1) 実験条件

図-1に示すように、口径600mmのポリエチレン被覆鋼管を土被り180cmに敷設し、パイプライン工事で使用される2種類の埋戻し土により埋戻した。実験に用いた静岡県産および千葉県産の埋戻し土の土質試験結果を表-3に、実際のパイプライン工事現場での埋戻し土の調査結果を表-4に示す。実験に使用した埋戻し土は、実現場での埋戻し土をほぼ代表しているといえる。

表-3 埋戻し土の土質試験結果

		静岡県産	千葉県産
土粒子の密度(g/cm ³)		2.72	2.72
粒度	礫分(%)	8	1
	砂分(%)	73	95
	細粒分(%)	19	4
	D ₅₀ (mm)	0.52	0.37
	均等係数Uc	63.5	3.15
	曲率係数Uc'	4.21	1.47
	最大粒径(mm)	4.75	4.75
粒形		角ばった	—
最大乾燥密度		2.00	1.60
最適含水比(%)		12.0	20.8
三軸圧縮試験	試験条件	非圧密非排水(UU)	
	粘着力(kgf/cm ²)	0.03	0.00
	内部摩擦角(度)	47	46

1t/m³=9.8kN/m³, 1kgf/cm²=98kN/m²

表-4 埋戻し土の現場調査結果*

		平均	最大	最小
粒度	礫分(%)	22	64	0
	砂分(%)	74	99	34
	細粒分(%)	4	13	1
	最大乾燥密度(t/m ³)	1.84	2.09	1.61

* 新潟、山形および宮城の12工事現場調査結果

実験条件を表-5に示す。実験の再現性確認を一部の実験条件で行い、その後、載荷速度および埋戻し土をパラメータとして、合計で7ケース実施した。また、繰返し載荷は、時間的に連続して実施したのではなく、1回の載荷毎に実験装置の再セットのための静止時間を置いた。

埋戻しでは、まず管下に埋戻し土を約20cm敷きならし、鋼管をセットして、載荷装置に接続した。次に、載荷装置と反対側の管端部でコルゲートパイプと鋼管の間に埋戻し土が入り込まないよう、鋼管直径大の円孔をあけた厚ベニヤ板をコルゲートパイプにあてがった（実験終了後に調べても、この部分より埋戻し土がコルゲートパイプ内に流入していることはなかった）。続いて、実際の施工を参考にして、埋戻し土を約40cm敷きならし、プレートコンパクタで1回、および80Kgタンパで3回転圧して30cmに締め固めることを地表面まで繰り返した。埋戻し部の断面は、図-1に示してある。実験終了後に、次の実験で、同じ種類の埋戻し土を使用する場合には管の上半分まで、埋戻し土を変える場合には管下まで掘削し、転圧した後、埋戻し施工をやり直した。

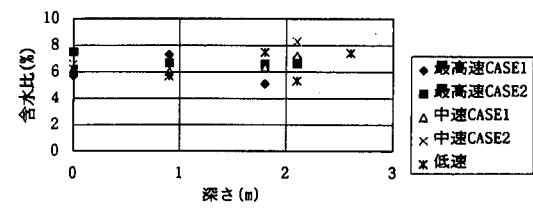
各実験での埋戻し土の含水比と乾燥密度を、地表面からの深さをパラメータにして図-4および図-

表-5 実験条件

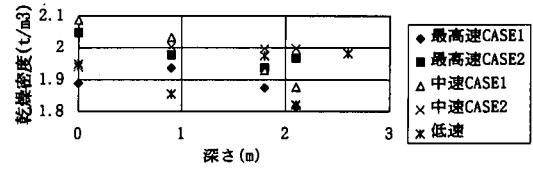
埋戻し土の種類	載荷速度(目標)	実験回数	変位	繰返回数
静岡県産	最高速(85kine程度)	2回	100mm程度	10回(5往復)
	中速(40kine程度)	2回		
	低速(0.5kine程度)	1回		
千葉県産	最高速(85kine程度)	1回		
	低速(0.5kine程度)	1回		

表-6 含水比、乾燥密度、湿潤密度の平均値

埋戻し土の種類	含水比(%)	乾燥密度(t/m ³)	湿潤密度(t/m ³)
静岡県産	6.6	1.95	2.08
千葉県産	16.7	1.52	1.77

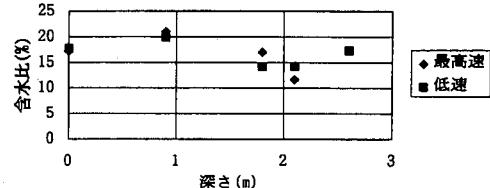


(a) 含水比

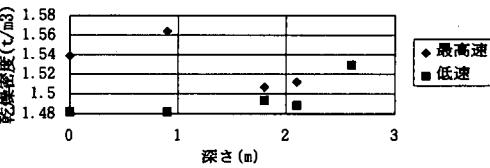


(b) 乾燥密度

図-4 静岡県産埋戻し土の含水比および乾燥密度



(a) 含水比



(b) 乾燥密度

図-5 千葉県産埋戻し土の含水比および乾燥密度

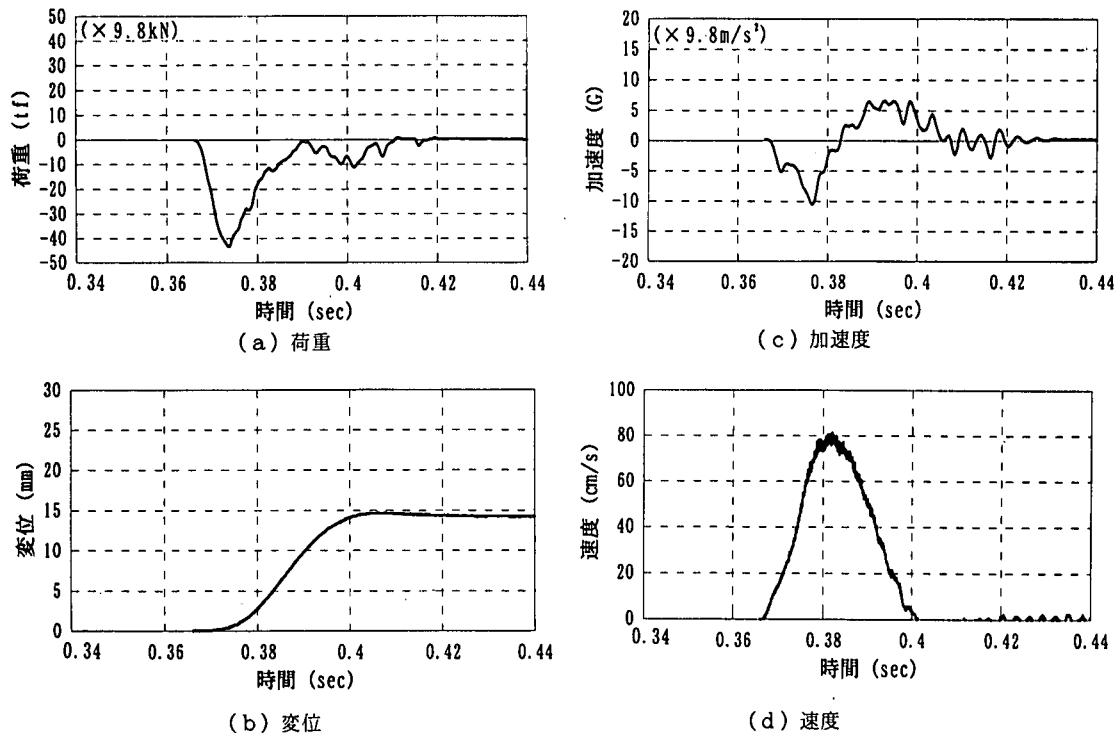


図-6 ロードセル荷重、鋼管変位、鋼管加速度等測定結果例

(静岡県産埋戻し土、最高速実験Case 1, 1回目載荷)

5に示す。多少のバラツキはあるが、実大規模の実験であることを考慮すると、概ね良好な施工管理がなされたと言える。それぞれの埋戻し土の含水比等の全平均値を表-6に示す。これらの値は、実験前の値であり、実験後には測定していない。

(2) 実験結果

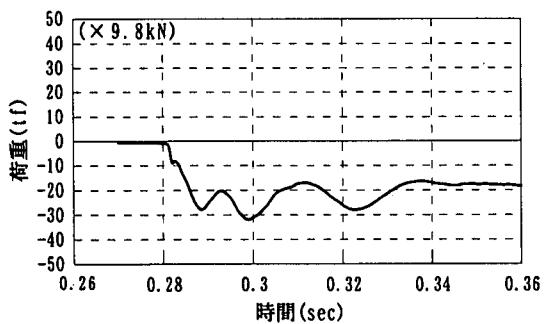
図-6, 7に静岡県産の埋戻し土を用いた最高速実験Case 1および中速実験Case 1での、最初の載荷時のロードセル荷重、鋼管変位、鋼管加速度等測定結果を示す。鋼管変位は、載荷装置側鋼管端部でレーザ変位計により測定した。サンプリング速度は0.1ms、分解能は0.01mmである。加速度も同部での測定値である。実験での最終変位量は、約100mmであるが、図では最大荷重の生じた載荷直後を拡大して示している。速度は、鋼管変位の測定結果を時間で除して求めた。最高速実験では、当初の目標に近い約80cm/s、また中速実験では、目標よりもやや大きい約60cm/sの最大速度が得られた。

図-8, 9に、それぞれの実験での荷重および摩擦力と鋼管変位の関係を示す。摩擦力は、ロードセルでの測定荷重よりそれぞれの実験で測定された鋼管加速度値から求めた慣性力を差し引いた値である。ここで、鋼管全長に作用する埋戻し土からの力を摩

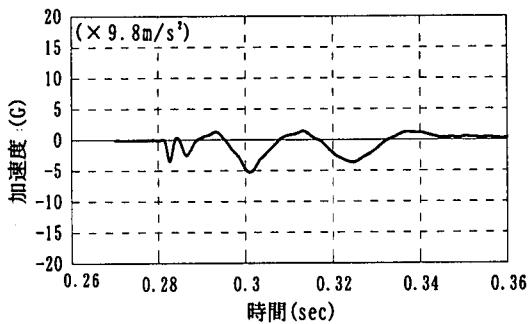
擦力と呼び、鋼管の単位表面積当たりのそれを後述のようにせん断応力、その最大値を限界せん断応力と呼ぶことにする。変位1mm弱で摩擦力がピークに達し、その後減じていること、すなわち、鋼管と地盤との間に滑りが生じていることがわかる。中速実験では、変位の小さい時の摩擦力に2つのピークがある。詳細に調べると、1つ目のピーク後に変位速度が減じておらず、再度の変位速度上昇に伴って2つ目の摩擦力のピークが生じている。載荷システムの特性によるものなのか、速度に関係する摩擦力特性によるものなのか、現時点では理由は不明である。

図-10, 11に、最高速実験Case 1での2回目(1往復)載荷時および10回目(5往復)載荷時の荷重および摩擦力と鋼管変位の関係を示す。2回目載荷時には最大摩擦力は、約50%減じている。10回目までに更に減じるが、その程度は、2回目ほどではない。中速実験でも傾向は同様である。

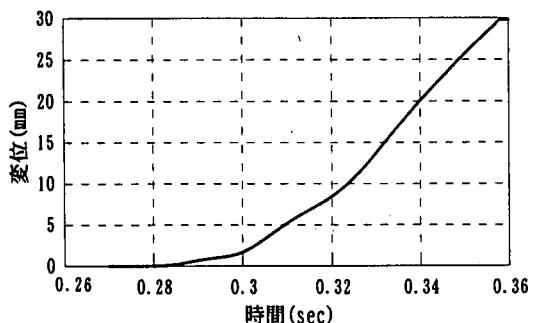
鋼管の長手方向4断面の内面で測定したひずみの例を図-12に示す。ひずみゲージは、各断面で管上、下、側部の4箇所に貼付しており、図の値はその平均値である。また、この値には、慣性力の影響が含まれている。他の実験ケースでも同様の傾向を示しており、鋼管のひずみレベルは小さく、したがって鋼管の変形はほぼ無視できること、および、ひ



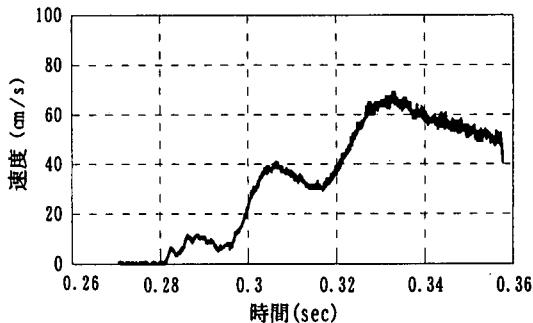
(a) 荷重



(c) 加速度



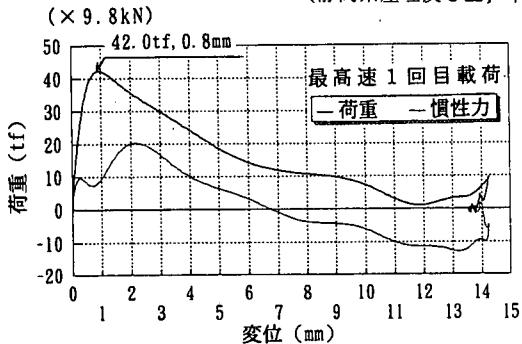
(b) 変位



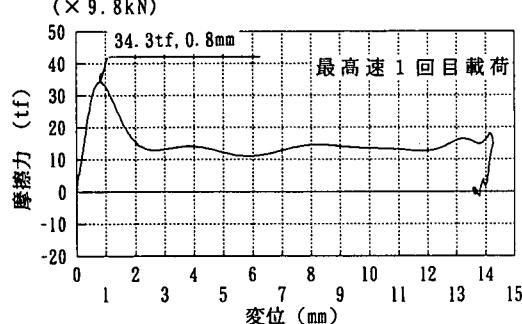
(d) 速度

図-7 ロードセル荷重、鋼管変位、钢管加速度等測定結果例

(静岡県産埋戻し土、中速実験Case 1, 1回目載荷)

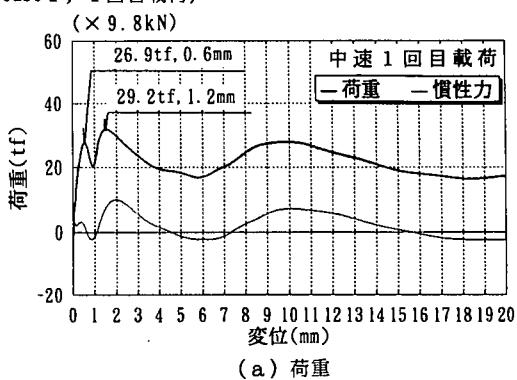


(a) 荷重

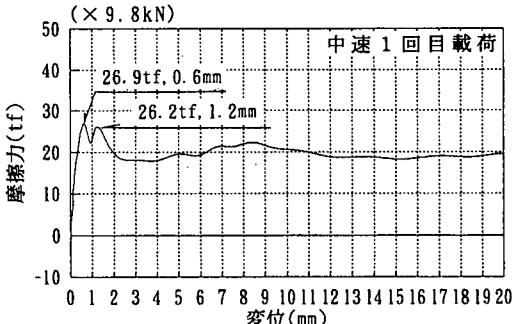


(b) 摩擦力

図-8 ロードセル荷重および摩擦力と鋼管変位の関係（最高速実験Case 1, 1回目載荷）



(a) 荷重



(b) 摩擦力

図-9 ロードセル荷重および摩擦力と鋼管変位の関係（中速実験Case 1, 1回目載荷）

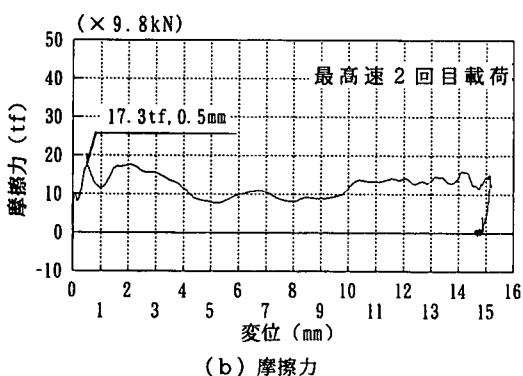
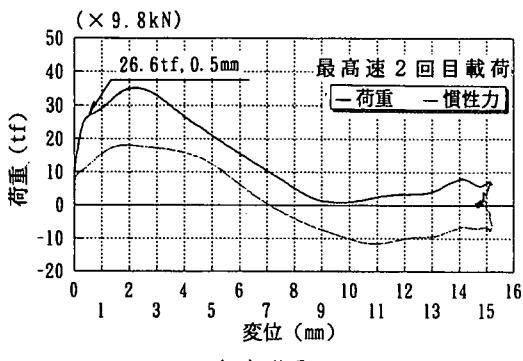


図-10 ロードセル荷重および摩擦力と鋼管変位の関係（最高速実験Case 1, 2回目載荷）

すみが直線分布に近いことから、管の長手方向にほぼ一様な外力が作用していることがわかる。ただし、ひずみレベルが小さいので、管と地盤との間の摩擦力の定量的な検討は、ロードセルで測定された荷重で行うこととした。

全7ケースの最初の載荷時について、鋼管・地盤間に作用するせん断応力と両者間の相対変位の関係をまとめて図-13に示す。せん断応力は、鋼管に作用する単位表面積当たりの力で、摩擦力を鋼管の埋設部表面積で除して求めている。ここでは、1)摩擦力が鋼管の長手方向に一様に分布していると仮定し、2)周方向についての平均的なせん断応力を求めていることになる。また、3)鋼管と地盤との間の相対変位は、鋼管変位に等しいと仮定している。1)の仮定は、ひずみの測定結果よりほぼ妥当と判断される。2)については、せん断応力が摩擦に起因すると考えると、管の周方向で垂直応力が異なるので、それに伴ってせん断応力も異なると推定されること、また3)については、鋼管表面近くの地盤はせん断変形していると推定されることが問題点として挙げられる。しかし、埋設パイプラインの応答変位法による耐震設計では、パイプラインは、通常は要素でモデル化されるため、設計には周方向の平均的なせん断

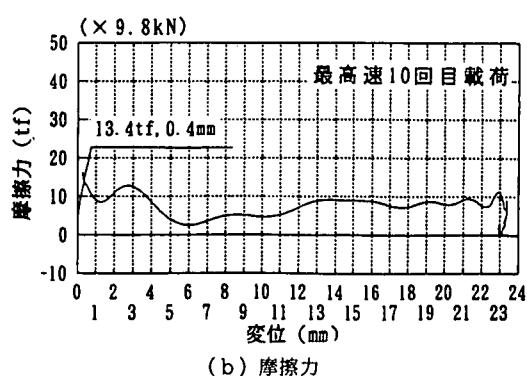
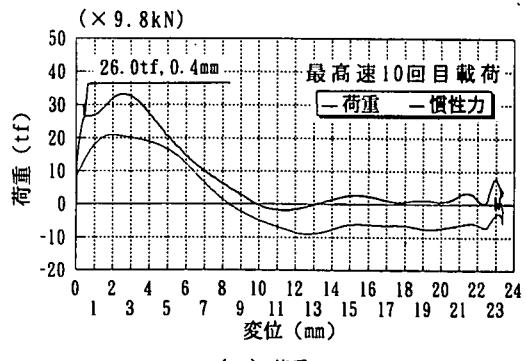


図-11 ロードセル荷重および摩擦力と鋼管変位の関係（最高速実験Case 1, 10回目載荷）

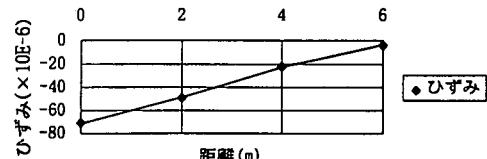


図-12 鋼管ひずみの測定例（静岡県産埋戻し土、最高速実験Case 1, 1回目載荷）

応力が必要である。また設計では、地盤はばねでモデル化され、鋼管表面近くの地盤のせん断変形は無視されるので、管と少し離れた位置での管と地盤変位の差、すなわち今回の実験では鋼管変位そのものを両者間の相対変位とみなしてよいと考える。なお、鋼管の直上2cm離れた位置で測定した地盤加速度を2度積分して得られた地盤変位は、鋼管変位100mm時に1~1.5mm（静岡県産埋戻し土、最高速実験Case 1）であった。

静岡県産埋戻し土による最高速と中速の実験は、それぞれ2回ずつ実施したが、図-13に示すとおり、それらのデータはよく一致しており、実験の再現性が高いことが確認された。この図より、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、管と地盤の間に滑りが生じ、せん断応力が減じる（最高速および中速載荷。以後

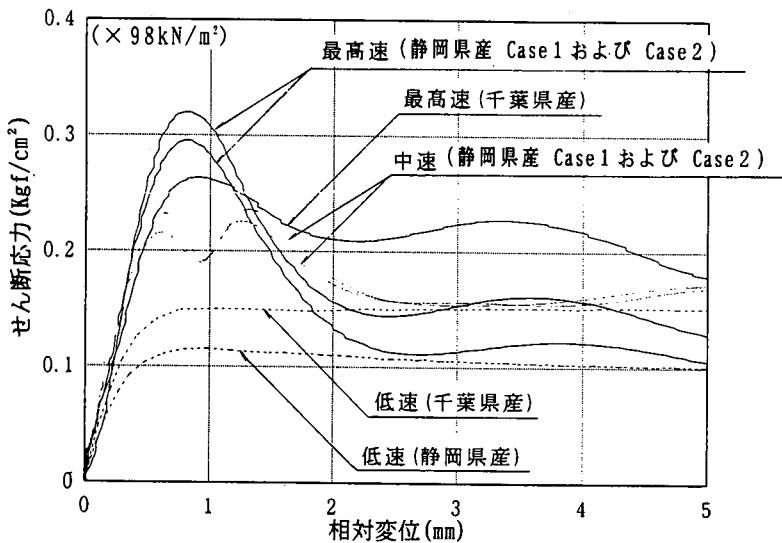


図-13 せん断応力と鋼管・地盤間の相対変位の関係

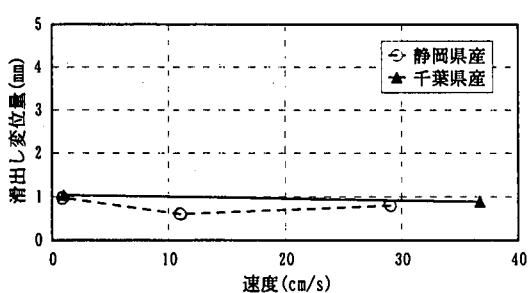


図-14 滑り出し変位量と載荷速度の関係

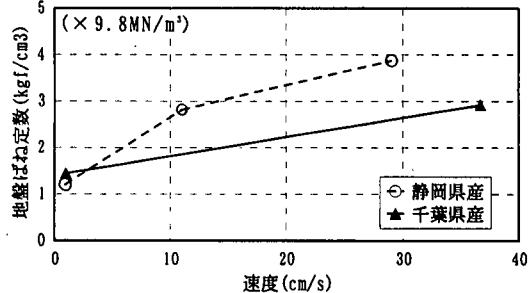


図-16 地盤ばね定数と載荷速度の関係

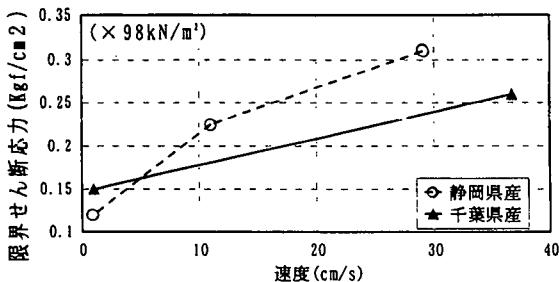


図-15 限界せん断応力と載荷速度の関係

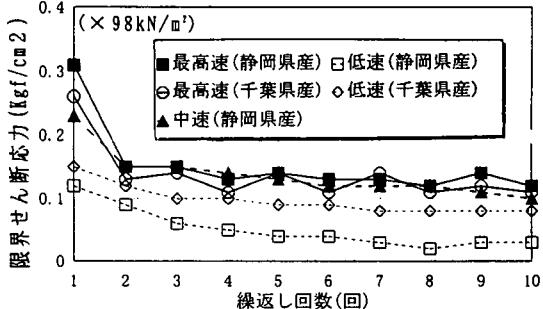


図-17 限界せん断応力と繰返し載荷回数の関係

ではまとめて高速載荷と呼ぶ)か, ほぼ一定になる(低速載荷)ことがわかる。また, 高速載荷時には, 相対変位が大きくなると, せん断応力は低速載荷時の値に近づく。この傾向は, 程度は異なるが, 埋戻し土の種類によらない。

図-14~16に, 最初の載荷時における滑り出し変位量, 限界せん断応力(せん断応力の最大値)および地盤ばね定数と載荷速度との関係を示す。こ

で, 滑り出し変位量は, 限界せん断応力を与える相対変位量であり, 地盤ばね定数は, 限界せん断応力を滑り出し変位量で除した値である。同条件で2回実験したものについては, 平均値を用いている。また, 速度については一定ではなく, 載荷過程で上昇しているので, それぞれの実験での代表値として, 限界せん断応力が作用する時点での速度をとった。

図-14より、滑り出し変位量は、埋戻し土の種類および載荷速度によらず、変位0.6~1.0mmの範囲であることがわかる。また、図-15及び図-16より、限界せん断応力および地盤ばね定数は、速度とともに増加する傾向にあることがわかる。低速での実験は、静的載荷での限界せん断応力・地盤ばね定数を求めていたのにはほぼ等しいので、動的載荷の立ち上がり過渡状態には、静的載荷時よりも大きな限界せん断応力・地盤ばねが作用するという、従来の研究にはない知見が得られた。

図-17に各実験条件毎の限界せん断応力と繰返し載荷回数との関係を示す。2回目(1往復)以降のせん断応力でピーク値が明確でないものは、鋼管変位10mmでのせん断応力をとした。高速載荷での限界せん断応力は、最初の載荷時が最も大きく、2回目には40%~50%低下する。その後はあまり変化がみられない。低速載荷での限界せん断応力も最初の載荷時が最も大きく、その後徐々に低下する傾向がみられる。

5. 実験結果の考察と評価

(1) 限界せん断応力

钢管断面を一辺の長さが口径に等しい正方形断面に置き換える、共同構設計指針⁶⁾を参考に、図-18に示す土圧分布を仮定して、管表面に作用する平均垂直応力 σ_v を算定すると、式(1)を得る。この式に土の単位体積重量等の数値を代入し、管と地盤

$\sigma_v = (1+K_0)\gamma H/2 + K_0\gamma B/4 + W_p/(4B)$ (1)
とのみかけの摩擦角 δ を $\delta = \tan^{-1}(\tau/\sigma_v)$
 τ : 限界せん断応力、より求めて、載荷速度との関係を示すと、図-19になる。

O'Rourkeら²⁰⁾は砂とポリマー材料との間のせん断強度特性を一面せん断試験により研究しており、両者間のみかけの摩擦角 δ と一面せん断試験による砂のせん断抵抗角 ϕ'_{ds} の比、すなわち δ/ϕ'_{ds} がポリマー材料のショアード硬さに反比例すると報告している。 ϕ'_{ds} の代わりにUU三軸試験の ϕ' を使い、本研究でのポリエチレン被覆のショアード硬さ36~42(表-1)を彼らの提案式に代入すると、 $\delta=38$ 度前後となる。一面せん断試験は、せん断変形速度0.4~0.6mm/minで行われており、本研究の低速載荷に相当するので、これと比較すると、本研究でのみかけの摩擦角 δ (静岡県産で約22度、千葉県産で約30度)とは、やや差がある。理由は不明であるが、平均垂直土圧の妥当性も可能性の1つとして挙げられる。また、彼らの研究²⁰⁾で、ショアード

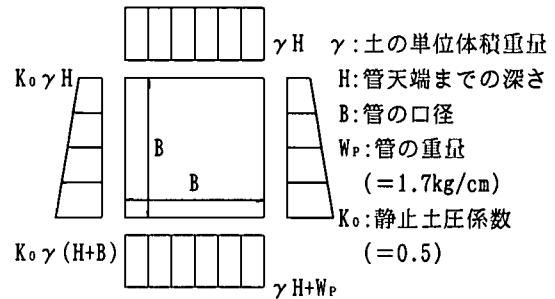


図-18 平均垂直応力の算定モデル

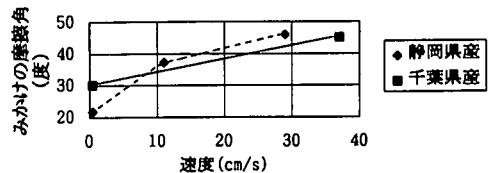


図-19 みかけの摩擦角と載荷速度の関係

硬さが小さく、管の被覆層が柔らかいと、砂粒子がポリマー材料にくい込み、砂粒子が回転しながら境界でのせん断変形が進むので、みかけの摩擦抵抗力が大きくなることが指摘されている。彼らは、35のショアード硬さを例示している。この点を本研究での実験について考察すると、埋戻しによる土圧で、管被覆層に土粒子がくい込んでおり、低速載荷ではくい込みの影響はあまり生じないが、高速載荷ではそれが大きな抵抗力、すなわち摩擦力の原因になり、限界せん断応力の速度依存性が生じた、との可能性の検討が今後の課題として挙げられる。角張った粒形の静岡県産埋戻し土のほうが千葉県産埋戻し土に比べて載荷速度の影響が大きいことも土粒子の被覆層へのくい込み効果を示唆するものである。

(2) 地盤ばね定数

高圧ガス導管耐震設計指針⁸⁾では、地盤ばね定数の設計値として、 $0.6 \text{ kgf/cm}^3 (6 \text{ MN/m}^3)$ を採用している。また、UU三軸試験結果から、静岡県産埋戻し土のせん断弾性係数を $300 \text{ kgf/cm}^2 (29,000 \text{ kN/m}^2)$ 、千葉県産のそれを $100 \text{ kgf/cm}^2 (9,800 \text{ kN/m}^2)$ と見積もり、石油パイプライン技術基準(案)⁴⁾より地盤ばね定数を算定すると、静岡県産埋戻し土では $4.7 \text{ kgf/cm}^3 (46 \text{ MN/m}^3)$ 、千葉県産埋戻し土では $1.6 \text{ kgf/cm}^3 (16 \text{ MN/m}^3)$ になる。また、鶴飼ら²¹⁾で、入力地震波の波長と管外半径の比(L/a)を無限大とし、単位管長当たりの軸方向動的ばね定数 K_a を、無次元量である $K_a/(2\pi G)$ 、 G :地盤のせん断弾性係数、として算定すると0.2前後となり、これを単位表面積当たりの地盤ばね定数に換算すると、静岡県産で2.0

kgf/cm^3 (20MN/m^3)、千葉県産で 0.7kgf/cm^3 (7MN/m^3)となる。本実験での結果は、静岡県産で $1\sim 4\text{kgf/cm}^3$ ($10\sim 39\text{MN/m}^3$)、千葉県産で $1\sim 3\text{kgf/cm}^3$ ($10\sim 29\text{MN/m}^3$)であり、ほぼ既往の報告の範囲に入っている。ただし、鵜飼¹¹⁾によれば、管軸方向の滑りを考慮した埋設管の振動応答解析では、地盤ばね特性を完全塑性型の履歴曲線としても、弾塑性型の履歴曲線としてもパイプラインに発生する軸ひずみにはほとんど差がない。このことは、軸方向滑りを考慮した設計では、地盤ばね定数の値はあまり大きな意味を持たないことを示している。

(3) 繰返し載荷による限界せん断応力の低下

繰返し載荷によって鋼管被覆層の粗さが変化し、それが見かけの摩擦角に影響したのであれば、同じ鋼管を再使用しているので、回を重ねる毎にその傾向が著しくなるはずである。しかし、そのような傾向はなく、載荷速度および埋戻し土が変わっても同じ現象が再現されている。また、O'Rourkeら²⁰⁾の垂直応力を一定とした一面せん断繰返し試験では、砂とポリマー材料の間のみかけの摩擦角は繰返しによっては変化していない。したがって、繰返し載荷による限界せん断応力の減少は、垂直応力の減少に起因している可能性がある。

(4) 設計への反映

例えば、高圧ガス導管耐震設計指針⁸⁾では、限界せん断応力の設計値として、 0.1kgf/cm^2 (9.8kN/m^2)が採用され、この値を用いて座屈開始ひずみ、および繰返し載荷による疲労損傷に対して設計が行われている。

今回の実験結果は、高速載荷条件で特に設計値より大きな値となっており、高レベル地震動に対するパイプライン耐震設計において、座屈開始ひずみの設計条件のように、パイプラインに作用する外力の最大値が問題となる場合には、設計値の見直しを検討する必要があることを示している。その際には、限界せん断応力の速度依存性が生じた原因の究明や実験で想定したパイプラインと地盤との間の相対変位速度の妥当性等を併せて検討し、本実験結果の適用範囲をより明確にする必要がある。また、別の観点からの設計条件である、繰返し載荷による疲労損傷に対する設計では、地震動の継続時間中に繰返される外力の平均的な値が問題になるので、実験により示された、繰返し載荷による限界せん断応力の低下を考慮すれば、従来の設計値を変える必要はないと考える。地盤ばね定数については、先に述べたように、設計上の影響は少ない。

6. 結論

高速載荷実験装置を開発し、実大規模の埋設パイプライン(口径600mm、土被り180cm)で軸方向の動的地盤ばね特性を実験的に検討して、以下の結論を得た。

(1) パイプラインと地盤の間のせん断応力が一定値に達すると、両者の間に滑りが生じる。滑り出し変位量は、実験に用いた2種類の埋戻し土の種類および載荷速度によらず、変位 $0.6\sim 1.0\text{mm}$ の範囲である。

(2) 限界せん断応力は、載荷速度が大きくなるにつれて増加する傾向を示す。この原因として、パイプライン被覆層の硬度の影響が考えられる。埋戻しによる土圧で土粒子が被覆層にくい込み、高速載荷時の大きなせん断抵抗の原因になった可能性の検討が今後の課題として挙げられる。高速載荷時には、ピークを過ぎた後のせん断応力は、低下し、変位量が大きくなると、低速載荷時の値に近づく。

(3) 地盤ばね定数は、載荷速度が大きくなるにつれて増加する傾向を示す。値は、ほぼ既往の報告の範囲に入る。

(4) 高速載荷時の限界せん断応力は、最初の載荷時が最も大きく、2回目には40%~50%低下し、その後はあまり変化がみられない。低速載荷時についても最初の載荷時が最も大きく、以後徐々に低下する傾向がみられる。繰返し載荷による限界せん断応力の減少は、パイプライン被覆層に作用する垂直応力の減少に起因している可能性がある。

(5) 高レベル地震動に対する設計において、座屈開始ひずみのように、パイプラインに作用するせん断応力の最大値が問題となる設計条件では、設計値の見直しを検討する必要がある。その際には、限界せん断応力の速度依存性の原因等を究明し、本実験結果の適用範囲をより明確にする必要がある。

(6) 疲労損傷に対する設計では、繰返し載荷による限界せん断応力の減少を考慮すれば、従来の設計値を変える必要はない。地盤ばね定数については、設計上の影響は少ない。

謝辞：本研究は、石油公団が(財)エンジニアリング振興協会に委託し、石油開発環境安全センターが平成7年度及び平成8年度に実施した「ガスパイプライン保安対策に関する調査」の成果の一部をまとめたものである。石油公団をはじめとする関係各位およびガスパイプライン保安対策調査分科会の各委

員に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 高梨洋治, 武政茂夫, 当麻純一, 山本正受:パイプライン, pp.3~8, 技報堂出版, 1991年.
- 2) 中林健一:新潟~仙台間天然ガスパイプラインの建設, 天然ガス, pp.2~13, 1996年2月.
- 3) 川島一彦, 杉田秀樹, 中島燈:地下構造物における耐震設計の考え方, 基礎工, pp.43~48, 1993年12月.
- 4) 日本道路協会:石油パイプライン技術基準(案), pp.50~52, 1974年3月.
- 5) 日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説1979版, pp.76~89, 1979年12月.
- 6) 日本道路協会:共同溝設計指針, pp.71~80, 1986年3月.
- 7) 日本道路協会:駐車場設計・施工指針 同解説, pp.165~168, 1992年11月.
- 8) 日本ガス協会:高圧ガス導管耐震設計指針, pp.175~182, 1982年.
- 9) 北出浩三, 白木万博, 福沢清:地中埋設管の耐震強度, 三菱重工技報 Vol.11, No.4, pp.38~54, 1974年7月.
- 10) 高田至郎, 長尾貞夫:埋設導管の耐震性に与える継手の影響について, 第4回日本地震工学シンポジウム, pp.679~686, 1975年.
- 11) 鵜飼恵三:軸方向すべりを考えた場合の地中埋設管の震動応答解析, 土木学会論文報告集, 第272号, pp.27~37, 1978年4月.
- 12) 小池武:埋設パイプラインの地震時ひずみ評価, 土木学会論文報告集, 第331号, pp.13~24, 1983年3月.
- 13) 宮本宏, 北條貞宗, 古庄健次:地震時の埋設管路挙動把握のための振動実験について, 第13回地震工学研究発表会, pp.129~132, 1974年.
- 14) 高田至郎:埋設管路-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年5月.
- 15) 宮本幸始, 鈴木英世, 横山正義:埋設管路の振動特性, 第33回土木学会年次学術講演会, pp.476~477, 1978年.
- 16) 建設省土木研究所:埋設管の耐震設計法, 土木研究所資料第1037号, pp.477~505, 1975年5月.
- 17) 小林実央, 安藤広和, 小口憲武:地震時埋設管に作用する地盤拘束力の速度及び繰り返し依存性, 第23回地震工学研究発表会, pp.405~408, 1995年.
- 18) 土木学会:土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言, 1996年1月.
- 19) 建設省土木研究所:大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン(案), 土木研究所資料第3119号, pp.11~14, 1992年3月.
- 20) O'Rourke, T.D., Druschel, S.J., and Netravali, A.N.:Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces, J. of Geotechnical Engineering, Vol.116, No.3, pp.451~469, Mar. 1990.
- 21) 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, 土質工学論文報告集, Vol.19, No.14, Dec. 1979.

(1997.7.8受付)

A REAL SCALE EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC SOIL SPRING CHARACTERISTICS IN AXIAL DIRECTION FOR BURIED PIPELINE

Kazunori SHIMAMURA, Hiroyuki TAKENOUCHI, Chitoshi MIKI
and Kotaro FUKUZAWA

To investigate the dynamic soil spring characteristics in axial direction of the buried pipeline by the real scale experiment, the high velocity loading system was developed and the buried pipe of 600mm in diameter and 180cm in depth to the top, was loaded. The conclusions are as follows; 1) the slippage occurs between the pipe and the soil when the shear stress between them reaches the critical value, 2) the soil spring stiffness and the critical shear stress increases as the loading velocity increases, 3) the critical shear stress in high velocity, is the largest in the virgin loading, and it decreases 40% - 50% in the second loading.