

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

小林実央¹・安藤広和²・小口憲武³

¹正会員 工修 東京ガス(株)基礎技術研究所地盤工学チーム (〒105 東京都港区芝浦 1-16-25)

²正会員 工修 東京ガス(株)基礎技術研究所地盤工学チーム係長 (〒105 東京都港区芝浦 1-16-25)

³工修 東京ガス(株)基礎技術研究所地盤工学チームリーダー (〒105 東京都港区芝浦 1-16-25)

地震時、埋設管の軸方向に作用する地盤拘束力について、大規模地震動を想定した速度依存性および繰り返しによる影響を検討するため、ポリエチレンコーティングされた鋼管(PLP鋼管)を対象として振動台実験を行った。その結果、地盤拘束力が地盤の速度に依存しないことが確認された。また、加振条件によらず埋め戻し地盤と管の間に1mm以内の微小な相対変位が発生した時点ですべりが生じ、拘束力は 6kN/m^2 程度の限界値を示す完全塑性モデルに近い非線形挙動を示した。さらに、大変位を繰り返し作用させることで拘束力は著しく低減することがわかった。併せて、高速一面せん断試験を最大速度 160cm/s で行い、振動台実験と同様、軸方向地盤拘束力が速度に依存しないことなどが確認された。

Key Words: earthquake, buried pipe, axial restraint force, velocity, cyclic loading, shaking table, direct shear test, soil-structure interaction

1. 緒言

埋設管の地震時挙動を把握するためには、まず、地盤から埋設管に作用する外力を定量的に把握することが重要である。その外力は通常、地盤拘束力と呼ばれ、耐震設計においては、軸方向、軸直角方向についてその値が規定されている。一般にこの地盤拘束力は、周辺の地盤と管の間に生じる相対変位量に応じたばね力としてモデル化されるが、ある程度の相対変位以上では、地盤と管の間にすべりが生じることを考慮する方が現実的であり、高圧ガス導管耐震設計指針¹⁾にもこのような非線形性を考慮した考え方が採用されている。

1995年の兵庫県南部地震発生後、土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言²⁾が示され、耐震設計においては、きわめて希であるが非常に強い地震動(レベル2地震動)を考慮することの必要性が指摘され、従来の設計基準を上回るような地震動レベルに対して、より精度の高い照査が様々な構造物に要求されるようになってきている。

このような状況を踏まえると、地盤拘束力に関しては、仮に粘性的な項を考慮した場合においては速度に応じてその大きさが変化する可能性があり、また、大規模地震時においては、地盤と管の間ですべりが生じたあとも比較的大きな振幅の地震動が続き、

すべる方向が繰り返し変化することを考慮する必要があるため、地盤の速度と繰り返しによる影響について検討することが重要である。しかし、既往の研究でも検討はされているものの、実験方法や速度レベルが十分でない、等の理由で知見をそのまま適用することは困難である。そこで、大速度で繰り返し変位を与えることができ、直接かつ精度よく地盤拘束力を測定できる点に特徴を有する振動台を利用した実験により、ポリエチレンコーティングされた鋼管(PLP鋼管)の軸方向に作用する地盤拘束力を測定し、上記課題の検討を行った。

併せて、著者らが開発した高速一面せん断試験装置を用いて試験を実施し、振動台実験結果の妥当性の検証、より速い地盤の速度領域における拘束力の速度依存性の検討、土質の違いによる影響についての検討を行った。

なお、本内容の一部は著者らが既に報告したが³⁾、管径や波形を変えた実験、繰り返し特性等の更なる考察、および高速一面せん断試験による結果も加えてここにとりまとめた。

2. 耐震設計での取扱いおよび既往の研究例

(1) 耐震設計での取扱い

埋設線状構造物の耐震設計における地盤拘束力の

表-1 各種耐震設計における地盤拘束力の比較

石油パイプライン 技術基準(案)	水道施設耐震工法指針	高圧ガス導管耐震設計 指針	共同溝設計指針
日本道路協会 (1974)	日本水道協会 (1979)	日本ガス協会 (1982)	日本道路協会 (1986)
$K_1=K_2=3 \cdot \gamma_s/g \cdot V_s^2$ K_1, K_2 : 軸方向, 軸直角方向の変位に関する地盤の剛性係数 γ_s : 土の単位体積重量 g : 重力加速度 V_s : 埋設位置でのせん断弾性波速度	$K_{q1}=k_{q1}G_s, K_{q2}=k_{q2}G_s$ G_s : せん断弾性係数 $(=\gamma_s/g \cdot V_s^2)$ K_{q1}, K_{q2} : 軸方向, 軸直角方向の地盤の剛性係数 k_{q1}, k_{q2} : 軸方向, 軸直角方向の地盤の剛性係数に対する定数. K_{q1}, K_{q2} は、一般には概ね3前後の値であるが、実験等によって定めるのが望ましい。 γ_s : 土の単位体積重量 g : 重力加速度 V_s : 埋設位置でのせん断弾性波速度	$K_1=\pi Dk_1, \tau_{cr}=9.8\text{kN/m}^2$ $K_2=K_1$ K_1, K_2 : 単位長さ当たりの軸方向, 軸直角方向地盤ばね係数 τ_{cr} : 限界せん断応力 k_1 : 単位面積当たりの軸方向地盤ばね係数 k_1 および τ_{cr} の値は $5.9\text{MN/m}^3, 9.8\text{kN/m}^2$ とするが、実測により定めてもよい。 D : 管外径	$K_1=\gamma_{teq}/g \cdot V_{DS}^2$ $K_2=\gamma_{teq}/g \cdot V_{DS}^2$ $K_3=3 \cdot \gamma_{teq}/g \cdot V_{DS}^2$ K_1, K_2, K_3 : 軸方向と、これに直交する水平面内及び鉛直面内の地盤の剛性係数. γ_{teq} : 表層地盤の換算単位体積重量 V_{DS} : 表層地盤のせん断弾性波速度 g : 重力加速度

取扱いについて表-1にその比較を示す^{1), 4) ~6)}。

設計上は、いずれも地盤拘束力は地盤ばねとして表現されている。高圧ガス導管耐震設計指針¹⁾を除き、地盤ばね係数は周辺もしくは表層地盤のせん断弾性係数 G に比例するものとして線形ばねで表現されており、基本的には石油パイプライン技術基準(案)⁴⁾を継承した形になっている。一方、高圧ガス導管耐震設計指針では実験によりそれを定めており、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の間のすべりを考慮したバイリニアモデルとしている。

共同溝やトンネルといった大断面の構造物の場合、埋設深さが深く、構造物が地盤変形に与える影響が大きくかつ広範囲に及ぶが、ガス導管など埋設深さが浅く(～GL-1.8m)、口径は1000mm未満と小断面な埋設線状構造物(以下、埋設管と称する)の場合、上記構造物と比較して周囲の地盤変形に与える影響が小さく、周辺地盤は所定の砂で埋め戻しされ、管表面は塗覆装と呼ばれるコーティングが施され滑らかであることから、地盤と管の間にすべりを生じやすく、それらの特性を考慮した地盤拘束力を算定する必要がある。

さらに、大規模な地震においては大きな速度のもとで、地盤の変形が繰り返し起こると考えられるが、表-1に示すように、現行の耐震設計法で、これらの影響を考慮した例はない。

(2) 既往の研究例

埋設管の地盤拘束力特性についての研究は大きく以下の3つに大別される。

a) 解析的検討

埋設管の動的挙動の解析的手法としては、一つは地盤と構造物を弾性体としてとらえ、これら両者の動的な相互作用を波動方程式を用いて解析する手法がある。後藤ら⁷⁾は、管の周辺地盤の特性が管の応答に及ぼす影響について注目し、地盤の動きに対して生じる管との相対変位はきわめて小さく、また、管独自の固有振動は生じないとしている。しかし、どのような管種や地盤条件に適用されるかが明確になっていない。一方、弾性床の上のはり理論を用いた検討もあり、青木ら⁸⁾は、沈埋トンネルの模型振動実験結果が、同理論を用いた検証解析から説明できることを示唆した。桜井ら⁹⁾は、松代群発地震時に観測された埋設管に生じたひずみ等のデータに基づいて、管の軸方向、軸直角方向の振動特性を取扱い、地盤の変形、すべり抵抗を考慮に入れた弾性床の上のはりとして解析を行った。それによると、軸方向には弾性的な拘束ではなく、すべりを考慮した摩擦力として作用させる方がよいとしている。

さらにそれを発展させる形で、鶴飼ら^{10)~12)}はすべりの条件を、管の外面に作用する軸方向のせん断応力が管と地盤との間の摩擦抵抗を越えるか否かに注目した解析を行った。その結果、すべり出しに必要な相対変位はオーダーとして、数ミリ前後の値となること、既往の実験結果はこの解析から得られた

表-2 既往の埋設管の軸方向地盤拘束力実験の一覧

著者及び所属	強制変位		管径 (mm)	載荷 速度 (cm/s)	地盤拘束力	
	条件	対象			限界値 (kN/m ²)	ばね係数 (MN/m ³)
東京電力 ¹³⁾ (1968)	一方向	管	125	95	27	言及なし
宮本ら ¹⁴⁾ (1974)	一方向	管	50	静的	13	言及なし
北出ら ¹⁵⁾ (1974)	一方向	管	350	静的	3	6.9
栗林ら ¹⁶⁾ (1975)	繰り返し (振動台)	地盤	150	15	13	3.6~18.1
西尾ら ¹⁷⁾ (1975)	繰り返し (アクチュエータ)	管	300	10	8	3.9~4.6
高田 ¹⁸⁾ (1976)	繰り返し (振動台)	管	55	13	5	言及なし
宮島ら ¹⁹⁾ (1977)	一方向	管	50~1500	静的	6	口径に依存
飯村ら ²⁰⁾ (1980)	繰り返し (アクチュエータ)	管	50, 25	20	3~13	言及なし
J.D.Colton et al. ²¹⁾ (1982)	繰り返し (アクチュエータ)	管	300	5	13	言及なし

動的地盤ばね係数と比較すると、0.12~2.34倍であること、大地震時には管と地盤との相対変位もかなり大きくなると考えられるので弾塑性型の履歴曲線を仮定すればよいことも示しており、地盤拘束力特性を検討する上で、重要な知見であると考えられる。しかし、ここでの検討は弾性波動論に基づいており、想定している地盤のひずみレベルが小さいため、大地震時の特性としては定量的なものとはいえない。

b) 実験の検討

軸方向地盤拘束力について実験的に検討した例を表-2に示す^{13)~21)}。ここでは、関連の深い3例について、以下に示す。

東京電力による実験¹³⁾は、ばねを利用し管を強制変位させることで、変位速度95cm/sでの地盤拘束力の計測データが得られているが、管の慣性力が含まれているため、速度依存性を確認するまでには至っていない。

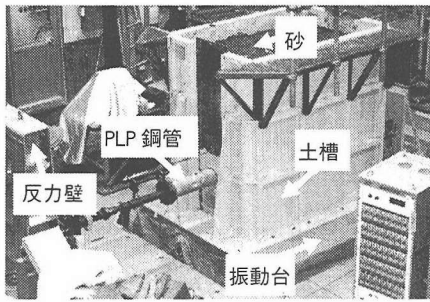
栗林ら¹⁶⁾は振動台を用いて、土槽内に管を埋設し、管端部を反力壁に固定した状態で土槽を軸方向に加振させた実験を行った。実験土槽が幅2m×長さ12m×高さ5mと大規模である点や地盤拘束力の計測データに前述したような慣性力が含まれてこない点で画期的である。加振は最大速度約15cm/s(振動数1.3Hzの正弦波、変位振幅18mm)であった。その結果、軸方向地盤ばね係数は3.6~18.1MN/m³となること、地盤拘束力は限界値をとり、その値は2サイクルの繰り返し変位で最大70%程度に低減することが報告されている。

飯村ら²⁰⁾は口径φ50mmの小口径管を対象とし、アクチュエータにより最大速度約20cm/sの正弦波加振で管を繰り返し強制変位させた実験を行った。地

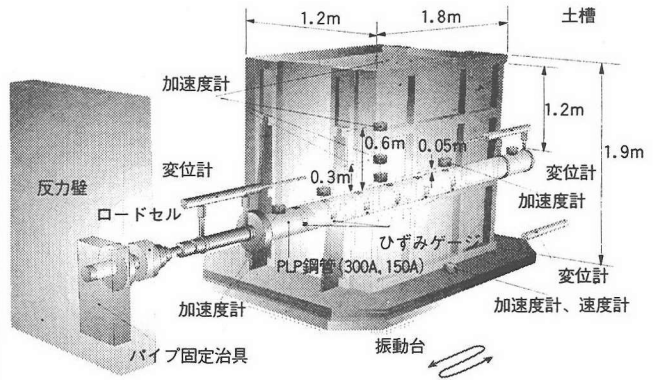
盤拘束力の限界値は繰り返し初期にピークを示し、最初の1サイクルを過ぎると極端に減少し、5サイクル以上ではほとんど一定になることが報告されている。繰り返し変位の振幅は30mm程度とあまり大きくないが、3サイクルを越える繰り返し変位と地盤拘束力の低減の関係について具体的に述べている点で他に類をみない。

c) 地盤と構造材料の間のすべり特性

地盤と構造材料の間のすべり特性に関しては岸田ら^{22)~24)}による研究がよく整理されている。その中で地盤と鋼材の摩擦係数には、材料の表面粗さ、埋め戻し用砂の平均粒径およびその種類による影響の有意性が認められる一方、同係数は摩擦面が滑らかな場合には、垂直応力の影響をあまり受けないことが示されている。摩擦係数が表面粗さを砂の平均粒径で除した正規化粗さとの相関を示すこと、一方、鋼材表面の粗さによらず、繰り返しせん断荷重を作用させると、鋼材摩擦面近傍の砂がせん断破壊を起こし、厚さ5mm程度のすべり層ができることが報告されており、地盤と管の相互作用を検討する上で、有用な知見が得られている。しかし、埋設深さが浅いガス導管と比較して、垂直応力が100kN/m²以上と比較的高い条件での結果であり、しかも、せん断速度は1mm/s以下と静的である。また、現在ガス導管(鋼管)に標準的な塗覆材として使用されている、ポリエチレンコーティングを対象とした実施例もないため、この知見を直接反映することはできない。



(1) 装置外観



(2) 計測項目

図-1 実験装置

3. 振動台実験の概要

(1) 基本的な考え方

前述したように、埋設管の軸方向に作用する地盤拘束力は、周辺地盤による影響を受け、地震動のレベルおよび特徴に応じた地盤挙動、その不均一性と管剛性による地盤と管の相対変位に応じて定まる値であると想定される。それを定量的に評価するためには、周辺地盤まで含めた相互作用特性を把握することが重要であるが、ガス導管は埋設時、管周りは砂による埋め戻しを行っており、比較的均一な材料であること、管表面は一般的にポリエチレンで塗覆されていることから、埋め戻し地盤と管の境界面近傍の特性を把握することがまずは重要であり、このことは前述した既往の研究からもわかる。また、大規模地震を想定した地盤の速度および繰り返しの影響を検討するにあたっては、地盤と管の間にすべり挙動が発生する場合の地盤拘束力の限界値がどう変化するかが焦点となる。言い換えれば、埋め戻し地盤と管の境界面近傍での限界地盤拘束力が把握できれば、今後この結果から、周辺地盤を含めた相互作用特性を把握し、設計上で用いられる地盤拘束力を、ばねとしてモデル化した場合の定数等を含め精度よく定式化することが可能となる。そこで、以下に示す実験を行った。

(2) 実験装置および材料

実験は振動台を用いて、管端部を反力壁に固定し、管を埋設した土槽を加振することで、地盤と管の間に相対変位を発生させた。この方法は既往の実験例でも指摘したように管の慣性力が生じず、直接、かつ精度良く管に作用する拘束力を測定できる点に特徴を有する。

表-3 実験に用いた山砂の物性

比重	G_s	2.68
粒度特性	礫分 (%)	2
	砂分 (%)	96
	シルト、粘土分 (%)	2
	50%粒径 D_{50} (mm)	0.32
	均等係数 U_c	2.1
最大乾燥密度	ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.64
最適含水比	w_{opt} (%)	16
粘着力	C (kN/m ²)	13
内部摩擦角	ϕ (°)	43

図-1に示す実験装置を作製し、速度計、変位計および加速度計を設置した。地中の加速度計は、管上60cm、30cmおよび5cmに設置し、前者の2つは土槽内の地盤挙動、後者は地盤と管の相互作用の影響範囲の確認を主な目的とした。また、管外面にはひずみゲージを埋設部に5断面、ロードセル側の露出部に1断面の計6断面に、それぞれ周方向90度間隔で管の軸方向に直接貼付した。実験は幅1.2m×長さ1.8m×高さ1.9mの鋼製土槽を用いて行った。幅1.2mは実際の掘削幅に概ね相当するものである。本土槽内に、ポリエチレンコーティングされた鋼管 (PLP鋼管) を通常の低压ガス導管の埋設深さである1.2mに埋設した。管材料は、JIS G 3469を満足するものとし、口径は ϕ 300mm (管外径 $D_o=318.5$ mm, 管厚 $t=6.9$ mm) と ϕ 150mm ($D_o=165.2$ mm, $t=5.0$ mm) の2種類とした。埋め戻し材には埋設施工要領²⁵⁾に示される標準的な山砂を用いた。室内土質試験による山砂の特性を表-3に示す。山砂の埋め戻しにおいては、一層の仕上がり厚が約30cmになるように転圧を行い、各層の締固め度が95%以上になることを目標とした。実際の締固め度は、RI計器による密度試験を行った結果、各実験ケースの管床、管横、管上~地

表面の各層において目標値である 95%以上の値となり、また、ケース別に各層の平均値をとると、97%~100%となった。なお、各計測器によるデータのサンプリング間隔は5kHzを基本とした。

地盤拘束力は、管と反力壁を連結する位置に設置したロードセル（東京測器研究所製、TCLM-20B、容量 196kN、非直線性およびヒステリシスともに 0.05%RO）により反力として計測した。管に発生する軸方向地盤拘束力を精度よく評価するため、管固定位置での治具等の緩み、ボルトの増し締めによる管の軸方向微小ずれや管中心位置のずれ、振動台のロッキング、振動台中立位置のずれ等が発生しないように細心の注意を払って調整した。また、管の水平度が要求されるため、準備の段階で数回の水準測量を実施し、土槽に埋設された管の両端 1.8m の区間で 1mm 以内の精度で水平となるようにした。

なお、後述する各ケースとも、計測された加速度波形から埋設地盤中の管上 60cm、30cm と地表面では振動台上と最大値および振動特性はほぼ一致することがわかり、土槽内における地盤自体の独自の振動および増幅はないことが確認された。また、管上 5cm の地盤加速度も、振動台加速度とほぼ一致することから、管との相互作用は管のごく近傍で発生するものと推察された。加振中の固定治具近傍の管の加速度が十分に小さかったことおよび目視観察より、管および固定治具に関しても、緩み等が発生していないことが確認され、所定の条件が満足されていることが明らかになった。管に貼付したひずみゲージにより、加振中に発生する管軸ひずみを計測したところ、発生ひずみは反力壁に近づくにつれ大きくなる傾向を示し、管軸方向に三角形分布となった。このことは、管軸方向に沿って均等に地盤拘束力が作用していることを示す結果であり、実験方法の妥当性を確認することができた。また、発生するひずみは数十 μ 程度であることから、地盤拘束力特性に管自体の変形等による影響が含まれず、精度よく管に作用する外力のみを評価できることが分かった。

(3) 実験条件

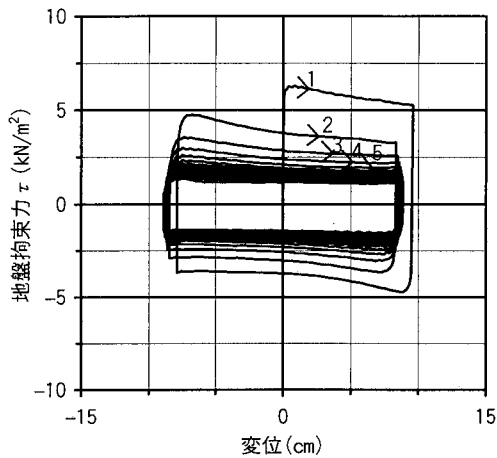
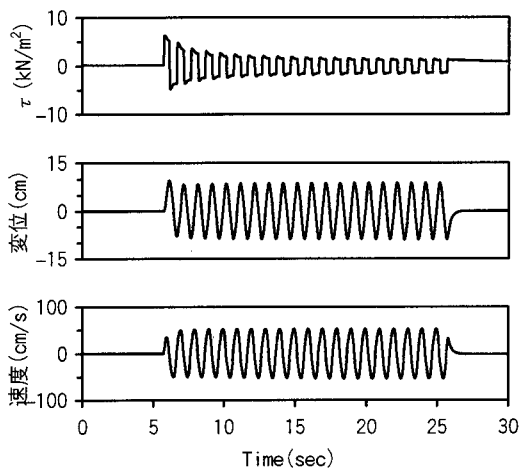
実験条件は、表-4 に示すように 3 種類の加振波を用いて行った。正弦波加振は地盤の速度と繰り返し変位に対する影響を評価することを主眼とし、変位振幅 10cm を固定し、振動数 1Hz、0.1Hz、0.01Hz を用いた。振動数は振動台の最大能力から、まず最大速度 50cm/s となる 1Hz を定め、5cm/s と準静的な 0.5cm/s と、速度がワンオーダーずつ変化するように 0.1Hz、0.01Hz を定めた。テーパ波加振では相対変位の大小による影響を評価するため、正弦波振

表-4 実験条件

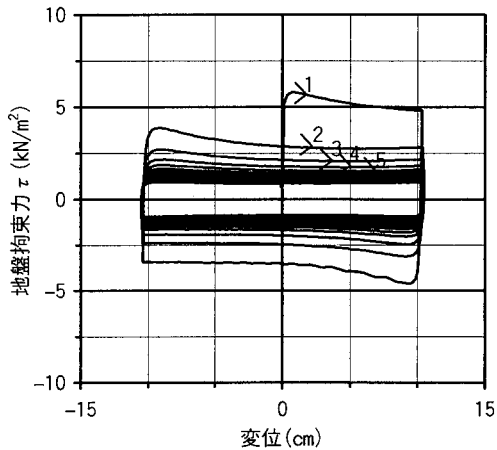
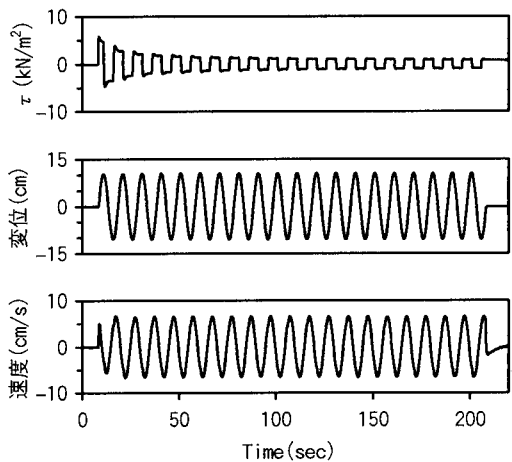
加振条件		ケース数		備考
		ϕ 300	ϕ 150	
正弦波	最大速度 50cm/s (1Hz, 振幅 10cm)	2	4	ϕ 150については埋設後25日放置したケースと、圧縮側から加振したケースを含む。
	最大速度5cm/s (0.1Hz, 振幅 10cm)	1	2	
	最大速度 0.5cm/s (0.01Hz, 振幅 10cm)	1	2	
テーパ波	最大振幅10cm (1Hz, 最大速度 50cm/s)	1	-	
実地震波	宮城県沖地震 (1978)	1	2	東北大学 1F NS方向
	兵庫県南部 地震(1995)	1	-	神戸海洋気象台 NS方向 (速度で80%、 変位で60%の 再現波形)

幅をテーパ状に漸増漸減させた波（図-3 参照）を用いた。実地震波加振では以上の加振で得た知見の検証および地震動の大きさが与える影響の評価のため、1978年の宮城県沖地震において、東北大学の建物 1 階で観測された NS 方向成分（最大加速度=258cm/s²）と、1995年の兵庫県南部地震において、神戸海洋気象台で観測された NS 方向成分（最大加速度=818cm/s²）を用いた。両波形とも、ガス導管を含め構造物に甚大なる被害を発生させた地震での記録である。なお、振動台で両地震動の再現性を高めるため、再現コントロールシステムを用いた波形制御を行った結果、加速度波形の誤差として波形誤差 5%以内での制御ができたが、速度および変位波形で見ると、宮城県沖地震の波形入力時においては最大で 36cm/s、11cm と十分再現できたものの、振動台のストロークの制約から、兵庫県南部地震の波形入力時においてはそれぞれ最大で 74cm/s、12cm と観測された値と比較して、速度で約 80%、変位で約 60%の再現波形であることに留意する必要がある。

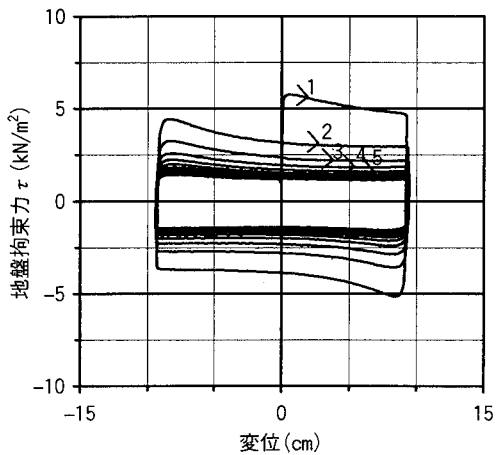
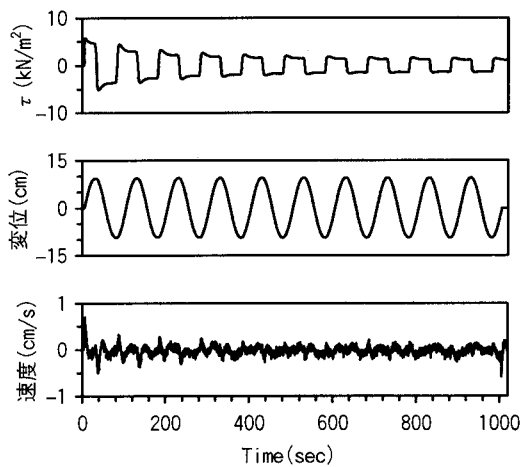
なお、管が引張を受ける方向と圧縮を受ける方向とでは、管径の収縮および膨張により、地盤拘束力特性が異なってくる可能性がある。そこで、加振初期（1/4 サイクル）を管が圧縮を受ける方向とした実験を 1 ケース行ったところ、管が引張を受ける場合と拘束力に違いはみられなかったため、これ以外のケースでは、条件を統一して管が引張りを受ける側を初期加振とした。また、管を埋設後、そのまま



(1) 最大速度50cm/s



(2) 最大速度5cm/s



(3) 最大速度0.5cm/s

図-2 正弦波加振による地盤拘束力履歴(口径φ300mm)

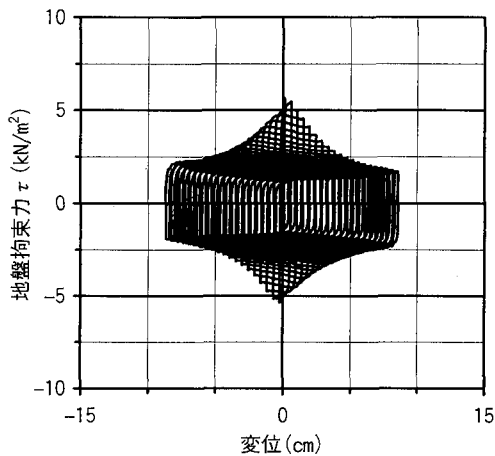
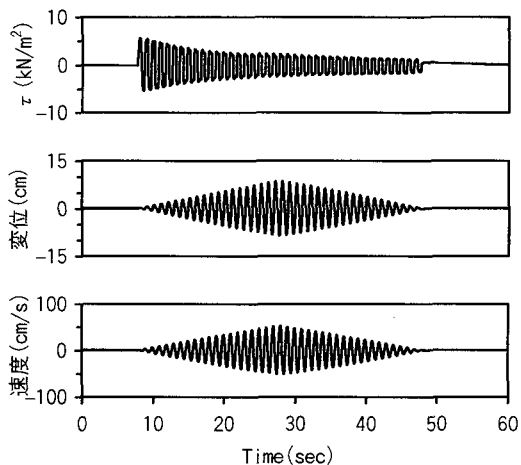
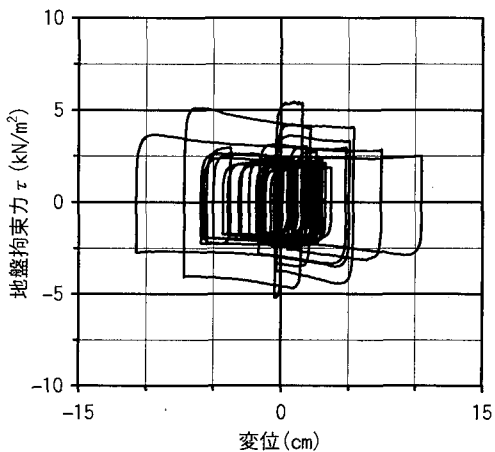
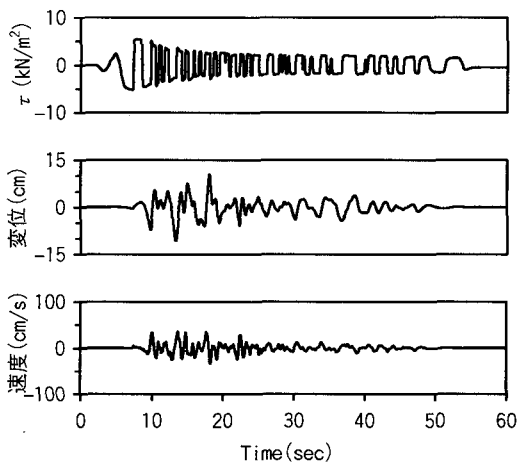
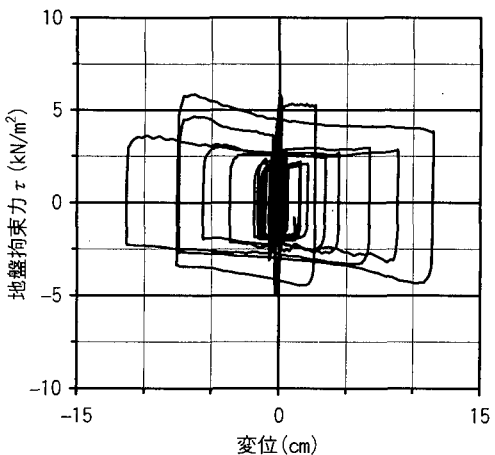
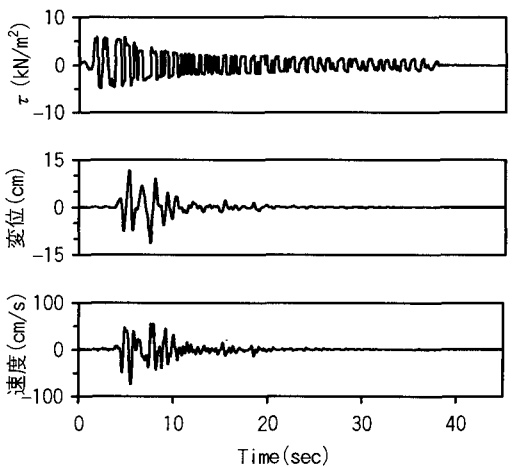


図-3 テーパー波加振による地盤拘束力履歴(口径 ϕ 300mm, 最大振幅10cm)



(1) 宮城県沖地震



(2) 兵庫県南部地震

図-4 実地震波加振による地盤拘束力履歴(口径 ϕ 300mm)

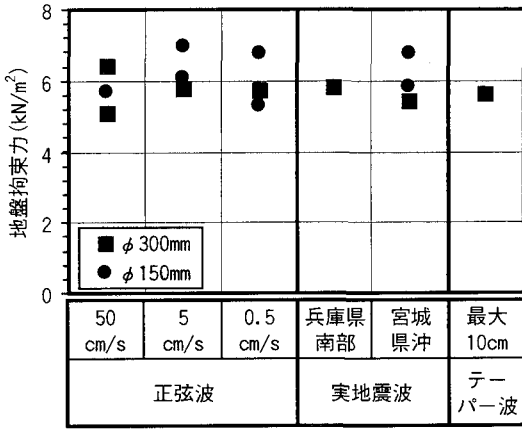


図-5 限界地盤拘束力の最大値

放置することによって、得られる地盤拘束力に違いが発生しないかどうかを確認するため、埋設後 25 日放置したケースも実施した。その結果、地盤拘束力にほとんど差はみられなかったため、埋設後放置せずに実験することとした。

4. 振動台実験結果

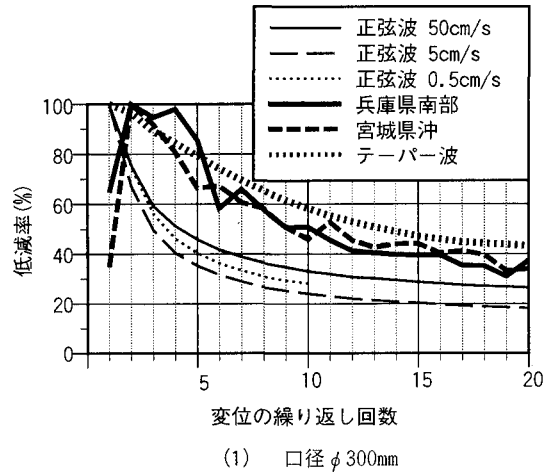
(1) 速度依存性

各加振条件における地盤拘束力の経時変化と履歴ループについて、口径 $\phi 300\text{mm}$ の結果を図-2~図-4 に示す。以下、地盤拘束力 τ はロードセルに発生する反力 F を埋設された管の表面積で除した値 ($F/(\pi D_0 L)$, D_0 は管外径, L は管の長さを示す) とした。なお、地盤拘束力 τ の符号は管が引張られる側を正として定めた。

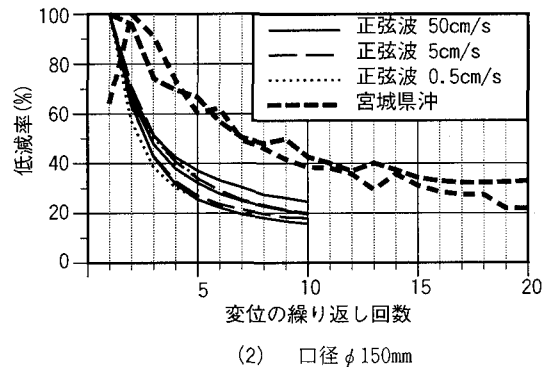
図-2 より、正弦波加振の場合、微小変位で地盤拘束力は限界値となり、その後の変位の繰り返しとともに地盤拘束力が低減しており、その傾向に最大速度 50cm/s, 5cm/s, 0.5cm/s の 3 ケースでほとんど差がなく、地盤拘束力の履歴ループに最大速度 50cm/s までの範囲で速度依存性がないことが確認された。

また、テーパー波加振の場合も、微小変位で地盤拘束力は限界値となった。図-3 に示すように、加振とともに速度が変化して、時刻歴 30 秒付近で最大速度 50cm/s となっているが、そのような速度の変化に対しても地盤拘束力の値は影響を受けず、逆に低減していく傾向が確認された。地震波加振の場合にも同様で、図-4 の兵庫県南部地震の場合、時刻歴 5~10 秒付近で 50cm/s を越える速度となっているが、地盤拘束力の値はやはり低減しており、地盤拘束力は、正弦波加振以外でも速度依存性がないことが確認された。

以上 3 種類の加振条件下での、各ケースの限界地



(1) 口径 $\phi 300\text{mm}$



(2) 口径 $\phi 150\text{mm}$

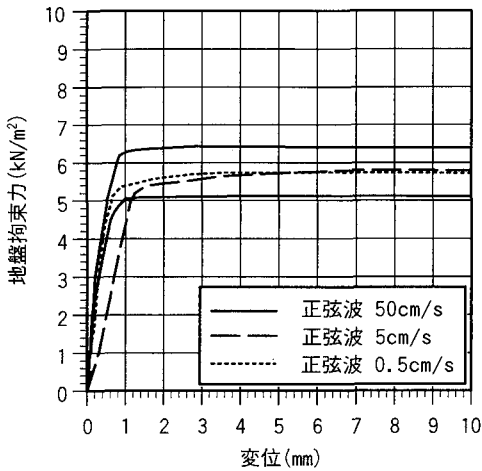
図-6 地盤拘束力と変位の繰り返しの関係

盤拘束力値を図-5 に示す。正弦波加振の場合、初期繰り返しの限界地盤拘束力は口径 $\phi 300\text{mm}$, $\phi 150\text{mm}$ とも、 6kN/m^2 程度の値となった。地震波およびテーパー波加振においても初期繰り返しの限界地盤拘束力は正弦波加振の場合と同様に、 6kN/m^2 程度の値となった。これらの結果より、限界地盤拘束力は、速度および加振条件によらないことが確認された。また、今回実験を行った口径 $\phi 300\text{mm}$ と口径 $\phi 150\text{mm}$ とでは、口径依存性がほとんどないこと、限界地盤拘束力の値は表-1 に示す高圧ガス導管耐震設計指針¹⁾で規定された 9.8kN/m^2 を下回ることも確認された。

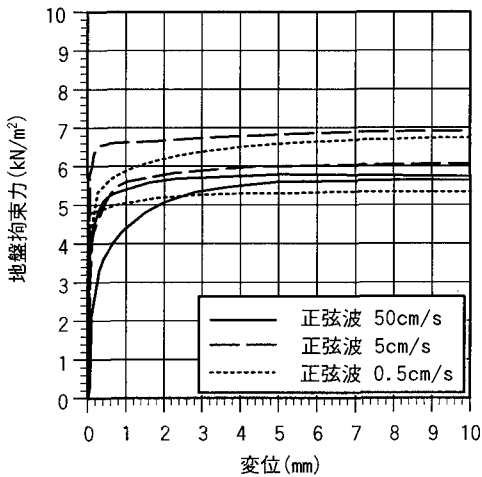
(2) 繰り返し特性

図-6 に地盤拘束力比と繰り返し回数の関係を示す。地盤拘束力比とは、繰り返し各回の限界値をその中の最大値で除したものである。

正弦波加振の場合、大変位を繰り返し作用させることで、地盤拘束力は著しく減少することがわかる。繰り返し初期の限界値と比較すると、5 サイクル程



(1) 口径 ϕ 300mm



(2) 口径 ϕ 150mm

図-7 微小変位領域での地盤拘束力特性

度の繰り返しで約 40%まで低減した。また、どの速度においても、ほぼ同じ低減傾向を示していることがわかり、前述したように繰り返し特性についても速度に依存しないことが確認された。なお、このように地盤拘束力の限界値の 5 サイクル目までの挙動は前述の栗林ら¹⁶⁾、飯村ら²⁰⁾の知見と同様の傾向であった。

一方、テーパ波および実地震波の場合には、繰り返し 10 サイクル程度で 50%程度まで低減し、2 つの地震波では低減の傾向にほとんど差がないことが確認された。低減の度合いは正弦波と比べやや緩やかであったが、これは一定の大変位が繰り返される正弦波と、変位振幅がランダムなテーパ波および実地震波との違いによるもので、大変位が繰り返さ

れるほど低減の度合いも大きいことが確認された。つまり、変位振幅が大きくても限界拘束力は変わらず、むしろ、繰り返しに伴う低減の度合いが大きくなることを示しており、このことは管材料の疲労寿命を考える上で、有用な知見となりうるものである。

なお、各ケースとも実験終了後、地盤拘束力の復元性を確認するため、最長半日程度放置した後、再度加振した。その結果、拘束力は復元せず、先に示した低減後の値が測定されたことを付記する。

(3) 限界相対変位

ここでは、地盤拘束力が限界値となるまでの地盤と管の相対変位に言及する。なお、ここに示すそれぞれの関係は、初期繰り返しの内、1/4 サイクルを示したものである。結果を図-7 に示す。

この図より、地盤拘束力の立ち上がりは急激であり、ほとんどのケースで、1mm 以内に限界値に近い値が発生して、地盤拘束力と変位の関係が、完全塑性に近い挙動を示した。鶴飼ら¹⁰⁾の知見と同様、地盤拘束力を限界値として規定する方が現実的であることを示唆するものである。ただし、地盤ばねとして与えられている傾きは、口径 ϕ 300mm と口径 ϕ 150mm とで異なっており、両口径の管と地盤の相互作用が発生する影響範囲に、ここで対象とした埋め戻し地盤と管の間でも多少なりとも差がみられ、大口径になるにしたがって、その範囲が大きくなるものと推測される。今後地盤ばねの傾きを考えるにあたっては、前述したように、ここでの限界値とそれが周辺地盤に与える影響を加味してゆく必要がある。

5. 高速一面せん断試験

(1) 概要

地盤と PLP 鋼管を模擬したポリエチレン被覆銅板との間のせん断応力を測定することで、埋め戻し地盤と管の間の地盤拘束力の速度依存性の有無を再確認するため、高速一面せん断試験を実施した。

(2) 試験方法

a) 試験装置

軸方向の地盤拘束力は、前述した振動台実験から、管と地盤の間に 1mm 以内の微小な相対変位が生じた時点ですべり出して限界値となり、すべり挙動が管周りの埋め戻し用砂と管のごく近傍の領域で発生しているものと推察されたため、一面せん断試験を応用することによって、その特性を把握することができるものと考えられる。図-8 の上段右側に試験装置の構成を、せん断応力を評価する上で検討すべき項

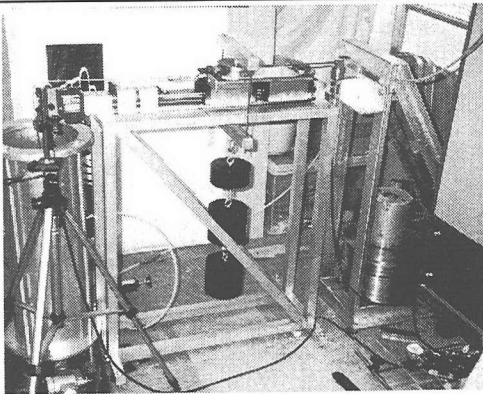
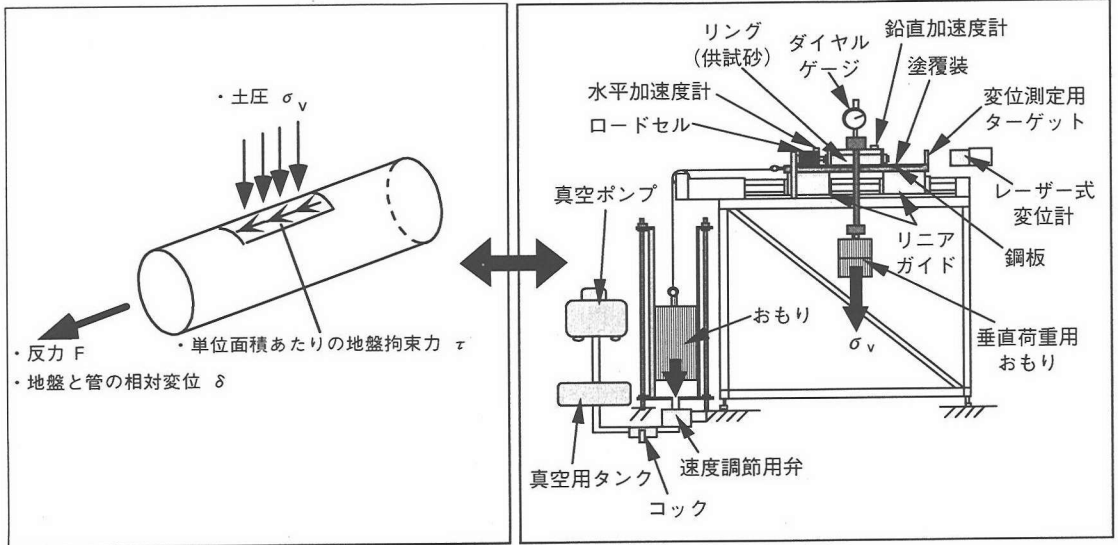


図-8 高速一面せん断試験装置

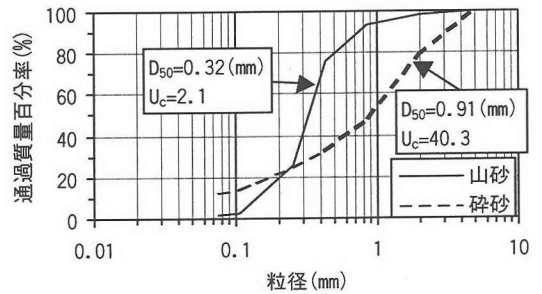


図-9 高速一面せん断試験に用いた砂の粒度特性

目を図-8の上段左側に示す。図に示すように供試砂を入れた内径90mm、高さ30mmのリングをガス導管表面を模したポリエチレン被覆鋼板上に設置することでせん断面を形成した。せん断変位は鋼板に繋がれたおもりを落下させることで発生させた。なお、せん断の際、ロードセルおよび供試砂を入れたリングは変位が発生しない側に位置するため、測定値に慣性力が含まれない構造になっている。

b) 試験条件

試験は地盤の速度に相当するせん断速度、土質および垂直応力をパラメータとして、計25ケースについて実施した。目標せん断速度は、兵庫県南部地震級の地震動を想定した速度として160cm/sおよび85cm/s、中速の25cm/s、準静的な1cm/sの4水準に設定した。

供試砂としては2種類の砂を用いた。一つは、振動台実験で用いた砂(以下、山砂と称す)、もう一つは、図-9の粒度分布に示すような粒度特性の異なる

砂(以下、砕砂と称す)を使用した。いずれも、一般に埋め戻し用砂として用いられているものである。なお、三軸圧縮試験(CD試験)により、内部摩擦角 ϕ と粘着力 c は山砂では前述したように $\phi=43^\circ$ 、 $c=13\text{ kN/m}^2$ 、砕砂では $\phi=50^\circ$ 、 $c=28\text{ kN/m}^2$ であることが確認された。砂は、95%以上の締固め度となるように、最適含水比(山砂で16.4%、砕砂で6.7%)に調整した結果、実際には、最適含水比に対して山砂で0.1%、砕砂で0.3%のばらつきを有したが、山砂で99%以上、砕砂で95%以上の締固め度となった。

ポリエチレン被覆鋼板については、PLP鋼管のポリエチレン被覆を幅140mm×長さ300mm×厚さ10mmの長方形に切り取り、平滑な鋼板上に張り付けせん断面とした。ポリエチレンの表面状態を常に初期状態と同一にするため、JISR 6260を参考に#600のサンドペーパーで各試験前に表面研磨を行った。なお、せん断の際、リングの下面とポリエチレン被覆鋼板との間に摩擦が発生しないように、両者に0.4mmの

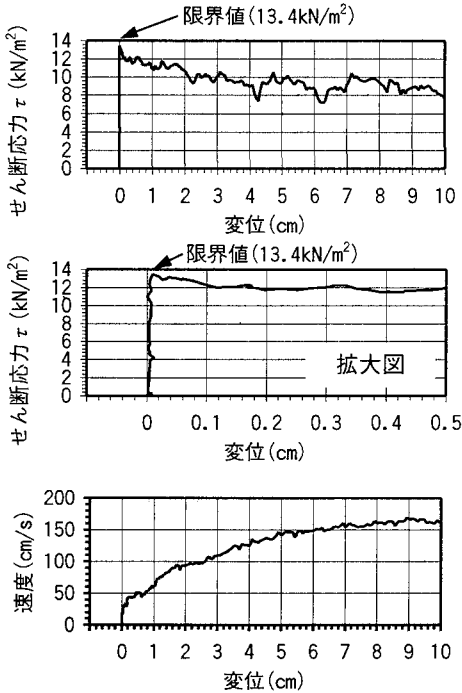


図-10 せん断応力、せん断速度と変位の関係
(山砂、最大せん断速度160cm/s、
垂直応力25kN/m²)

すき間を設けた。

埋設深さが地盤拘束力に与える影響を把握するため、垂直応力 σ_v は約0.5~2.0mの埋設深さ(地表面から管天端まで)での鉛直土圧に相当する10, 25, 40kN/m²の3種類とした。山砂の場合、 $\sigma_v=25\text{kN/m}^2$ のケースでは、再現性を確認するため、各せん断速度に対して2回ずつ試験を実施した。

試験時にリングおよびロードセルの水平、鉛直加速度を測定したところ、限界せん断応力の発生時には試験装置に振動がほとんど発生しておらず、それ以降でも加速度レベルで最大40cm/s²程度と、慣性力に起因するせん断応力や垂直応力に換算してもその影響は限界せん断応力の値の1%程度と、ごく僅かであった。そのため、以下ではロードセルによる測定結果をそのまま地盤とポリエチレン被覆鋼板との間のせん断応力とすることにした。

(3) 試験結果および考察

a) せん断速度、土質および垂直応力の影響

山砂について、最大せん断速度160cm/s、垂直応力 $\sigma_v=25\text{kN/m}^2$ のケースについて、せん断応力と変位の関係を図-10に示す。図-7のようにごく僅かな変位でせん断応力は限界値、すなわち限界せん断応力

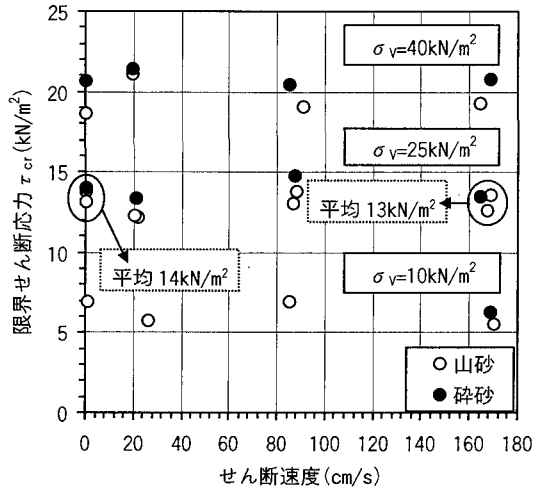


図-11 限界せん断応力と速度の関係

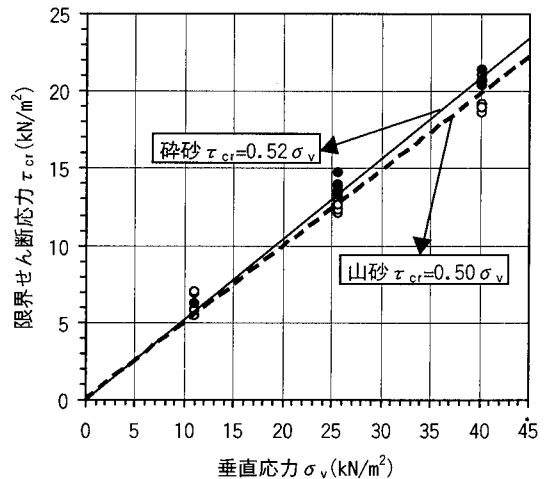


図-12 限界せん断応力と垂直応力の関係

となり、その後は、速度が上昇するにもかかわらず、図-2と同様の漸減傾向を示したため、本試験によって振動台実験とほぼ同様のせん断現象が再現されているものと推察された。また、他のせん断速度の試験においても同様の結果であり、せん断応力-変位関係がせん断速度に依存しない傾向が確認された。

図-11に限界せん断応力とせん断速度の関係を示す。ポリエチレン被覆鋼板に対する限界せん断応力 τ_{cr} は、山砂の $\sigma_v=25\text{kN/m}^2$ の場合、せん断速度160cm/sで平均 $\tau_{cr}=13\text{kN/m}^2$ 、1cm/sの低速せん断でも平均 $\tau_{cr}=14\text{kN/m}^2$ であり、兵庫県南部地震級の地震動を想定しても、限界せん断応力の値がせん断速度に依存しない傾向が確認された。このことは、垂直応力 σ_v を変化させた場合や砕砂の場合にも、同様であった。

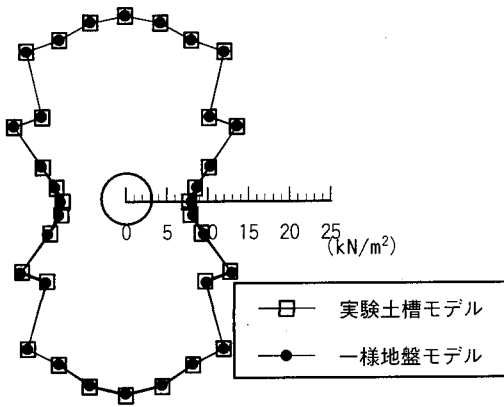


図-13 解析による管周りの法線方向土圧分布
(口径 ϕ 300mm, 埋設深さ1.2m)

限界せん断応力が速度に依存しないことから、垂直応力による整理を行った。図-12 にその結果を示す。限界せん断応力は垂直応力に伴い増加し、ほぼ線形な関係にあることがわかった。砕砂と山砂の限界せん断応力は、最大で10%の差が認められる程度であった。したがって、一般に埋め戻し用砂と呼ばれる粒度特性を有する砂であれば、限界せん断応力 τ_{cr} は垂直応力 σ_v から算出できるものと推察された。また、この関係を最小二乗法によって近似したところ、摩擦係数 μ として山砂で $\mu=0.50$ 、砕砂で $\mu=0.52$ となった。なお、不飽和試料であるため、砂粒子間にメニスカスが形成されるなど、見かけ上の粘着力が発生することが想定されるが、その定量的な評価は困難であるため、ここでは原点を通る直線として近似した。

b) 一面せん断試験結果と地盤拘束力の相関

振動台実験から、単位面積当たりの限界地盤拘束力 τ_{cr} は地盤の速度によらず 6kN/m^2 程度になる結果を得た。一方、高速一面せん断試験から、地盤とポリエチレン被覆鋼板との間の限界せん断応力が垂直応力から推定できるという知見を得た。したがって、管周りの土圧およびその分布がわかれば、本試験よりその限界地盤拘束力が推定できる。

そこで、振動台実験における口径 ϕ 300mm, ϕ 150mmの管周りの土圧を数値解析より求め、振動台実験結果との比較を行った。解析モデルは、解析対象範囲を実験土槽断面とした実験土槽モデルと水平および鉛直長さを十分にとった一樣地盤モデルの2種類とした。解析は解析コードABAQUSを用いた弾性解析とし、2次元平面ひずみ要素を用いて、地盤をモデル化した。前述した土質試験結果から地盤の変形係数は $E=14\text{MN/m}^2$ 、ポアソン比は $\nu=0.4$ として与えた。

図-13に数値解析結果の一例として、口径 ϕ 300mm, 埋設深さ1.2mの場合の管周りの法線方向土圧分布を示す。実験土槽モデルと一樣地盤モデルとで、土圧の分布傾向およびその値はほとんど一致しており、解析上、実験土槽の境界が管の土圧分布に与える影響はないという結果となった。

そしてこの土圧の値を、管周りの平均土圧に換算すると 16kN/m^2 、同じ埋設深さ1.2mの口径 ϕ 150mmの場合で 17kN/m^2 とほぼ同じになった。これら平均土圧は、管天端位置での鉛直土圧のそれぞれ、0.65, 0.70倍の値となった。

この平均土圧を図-12の高速一面せん断試験での垂直土圧 σ_v とすれば、限界地盤拘束力が限界せん断応力 τ_{cr} として求まり、口径 ϕ 300mmで 8kN/m^2 、口径 ϕ 150mmで 9kN/m^2 と、振動台実験の限界値とほぼ符合する結果となった。また、口径に依存しないことから、高速一面せん断試験から限界地盤拘束力を推定できることが確認された。

6. 結言

地震時、埋設管の軸方向に作用する地盤拘束力について、大規模地震動を想定した動的な特性として、速度および繰り返しによる影響を把握するため、ガス導管として現在一般的に用いられているポリエチレンコーティングされた鋼管 (PLP 鋼管) を対象とした振動台実験を行った。本実験手法は既往の実験で問題点として指摘されている管の慣性力が生じず、直接かつ精度良く地盤拘束力を測定できる特徴を有するものである。

実験条件としては、口径 ϕ 300mm, ϕ 150mmの2種類のPLP鋼管を、埋設施工要領²⁵⁾等に準じ、山砂で十分締固めを行いながら1.2mの深さに埋設した。加振波は正弦波およびテーパー波、実地震波の3種類を用いた。なお、最大速度は振動台の最大能力である 50cm/s とした。

また、振動台実験の検証および補間を目的とし、高速一面せん断試験を実施し、地盤と管 (ここではポリエチレン被覆鋼板) の間のせん断応力を測定することで地盤拘束力の特性を評価した。この場合の最大速度は1995年兵庫県南部地震で観測されたほぼ上限値に相当する 160cm/s とし、土質による違いも併せて検討した。

その結果、以下に示すことが明らかになった。

- ・地盤拘束力は1mm以内の微小な地盤と管の相対変位時に限界値となり、完全塑性に近い挙動を示すこと、それ以降大変位が作用すると漸減することが確認された。

・正弦波加振で、最大速度 50cm/s, 5cm/s, 0.5cm/s の 3 種類の結果にほとんど差はみられず、最大 50cm/s までの範囲では、地盤拘束力履歴は速度に依存しないことが確認された。また、テーパー波および最大速度が異なる 2 種類の実地震波による検証によって、地盤拘束力は、正弦波加振以外でも速度依存性がないことが確認された。

・実験で得られた限界地盤拘束力はどのケースも管外面の単位面積当たりで約 6kN/m²程度と現行の高圧ガス導管耐震設計指針¹⁾に採用されている値を下回る結果となり、限界地盤拘束力が速度および加振波形に依存しないことが確認された。また、今回実験を行った口径φ300mmと口径φ150mmの結果の比較により、限界地盤拘束力の口径依存性がほとんどないことも確認された。

・大変位を繰り返し作用させることで、地盤拘束力は著しく低減することが確認された。正弦波加振の場合、地盤拘束力は繰り返しに伴い低減し、5 回程度で初期繰り返し時と比較して、約 40%になり、その後は漸減した。この傾向については過去の知見とも概ね一致した。テーパー波および実地震波の場合も、低減の度合いこそ正弦波と比べやや緩やかなものの、10 回程度の繰り返しで、50%程度まで低下することがわかった。

・高速一面せん断試験の結果、振動台実験で用いた管周りの埋め戻し材料である山砂とポリエチレン被覆鋼板の間に発生するせん断応力は、ごく僅かな変位で限界値となり、その後漸減したため、本試験によって振動台実験とほぼ同様のせん断現象が再現されているものと推察された。この傾向は 160cm/s, 85cm/s, 25cm/s, 1cm/s の 4 水準のせん断速度に対してほぼ一致し、兵庫県南部地震級の地震動においても、地盤拘束力が速度に依存しないことが確認された。

・限界地盤拘束力は垂直土圧に伴い増加し、ほぼ線形な関係にあることが分かった。粒度特性の異なる砕砂でも上記と同様の試験を行ったが、砕砂と山砂の限界せん断応力は、10%の差が認められる程度であったため、通常埋め戻しに使われる範囲の砂であれば、垂直土圧がわかると、限界せん断応力が算出できるものと推察された。

・振動台実験における口径φ300mm, φ150mmの管周りの土圧を数値解析より求め、その土圧から高速一面せん断試験から求まる限界せん断応力に換算し、振動台実験結果と比較した。その結果、両者はほぼ一致することがわかり、高速一面せん断試験の妥当性と、本試験からも限界地盤拘束力を推定できることがわかった。

謝辞：数値解析には当社地盤工学チームの細川氏に、振動台実験の計測およびデータ整理には CSK 長野システム（株）の茅野氏、大橋氏に、高速一面せん断試験の計画から実施およびそのデータ整理には、基礎地盤コンサルタンツ（株）の岩崎氏、林氏に多大なるご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，1982。
- 2) 土木学会：土木構造物の耐震基準に関する第二次提言，1996.1。
- 3) 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および繰り返し依存性，第 23 回地震工学研究発表会，pp.405～408，1995。
- 4) 日本道路協会：石油パイプライン技術基準（案），1974.6。
- 5) 日本水道協会：水道施設の耐震工法指針・解説，1979。
- 6) 日本道路協会：共同講設計指針，1986.3。
- 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 290 号，pp.15～25，1973.1。
- 8) 青木義典，土田 肇，林 聰：沈埋トンネルの野外模型振動実験，港湾技術研究所報，Vol.11, No.3, pp.261～307，1972。
- 9) 桜井彰雄，高橋 忠，栗原千鶴子，矢島 浩：長大構造物の地震応答解析についての一考察，Proceedings of the 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.429～439，1970。
- 10) 鶴飼恵三：軸方向すべりを考慮し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.27～37，1978.4。
- 11) 鶴飼恵三，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, 1979.12。
- 12) 鶴飼恵三：地表面付近に設置された管状地中構造物の動的解析，土質工学会論文報告集 Vol.24, No.4, pp.205～210，1984.12。
- 13) 東京電力（株）技術研究所：電力用埋設鋼管の挙動調査，研究報告 352-3，1968。
- 14) 宮本 宏，北条貞宗，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，土木学会第 13 回地震工学研究発表会講演概要集，pp129～132，1974.7。
- 15) 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.490～506，1974。
- 16) 栗林栄一，岩崎敏男，川島一彦：地中埋設管の振動性状に関する実験的研究，埋設管に関するシンポジウム，土質工学会，pp.61～64，1975。
- 17) 西尾宣明，高木貞人，吉越 亘：軸方向の地盤の拘束力に関する研究，埋設管に関するシンポジウム，土質工学会，pp.25～30，1975。
- 18) 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。
- 19) 宮島信雄，宮内二郎，青野雄司：埋設軸方向ばね定数に及ぼす管径の影響，第 12 回土質工学研究発表会，pp.1197～1200，1977。

- 20) 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.
- 21) Colton, J.D., Chang, P.H.P. and Lindberg, H.E. : Measurement of dynamic soil - pipe interaction for full-scale buried pipelines, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.1, No.4, pp.183-188, 1982.
- 22) 岸田英明: 地盤と構造材料との間の動摩擦特性, 昭和 57 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 文部省, No. 56850145, 1983. 3.
- 23) Kishida, H. and Uesugi, M. : Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus, *Geotechnique*, Vol.37, No.1, pp.45-52, 1987.
- 24) 上杉守道, 椿原康則, 岸田英明: 繰り返し荷重下における砂-鋼材間の摩擦抵抗, 第 22 回土質工学研究発表会, pp. 505~506, 1987.
- 25) 例えば, 東京都建設局: 土木材料仕様書, 1995. 7. 10. (1997. 6. 5 受付)

EFFECTS OF VELOCITY AND CYCLIC DISPLACEMENT OF SUBSOIL ON ITS AXIAL RESTRAINT FORCE ACTING ON POLYETHYLENE COATED STEEL PIPES DURING EARTHQUAKES

Mio KOBAYASHI, Hirokazu ANDO and Noritake OGUCHI

An important factor in the analysis of the behavior of buried pipelines is the ground restraint force, which is generally considered to be proportional to the amount of one directional movement. However, large cyclic deformations during strong earthquakes drew attention to the fact that the effect of displacement velocity and cyclic loading have to be taken into account. A series of dynamic loading tests and dynamic direct shear tests has been conducted to examine the cyclic and velocity effect using a shaking table to produce seismic loadings.

The test showed the followings. Axial ground restraint force was generally independent of displacement velocity and cycles for the polyethylene coated steel pipes of 300mm and 150mm in diameter in the test.