

高速一面せん断試験による埋設管に作用する 軸方向地盤拘束力特性の検討

小林実央¹・細川直行¹・安藤広和¹・小口憲武²・岩崎公俊³

¹正会員 工修 東京ガス(株)基礎技術研究所(〒105 東京都港区芝浦 1-16-25)

²工修 東京ガス(株)基礎技術研究所(〒105 東京都港区芝浦 1-16-25)

³正会員 工博 基礎地盤コンサルタンツ(株)関東支社技術部(〒135 東京都江東区東陽 3-22-6)

これまで振動台実験により、埋設管の軸方向に作用する地盤拘束力特性の検討を行ってきたが、同拘束力が僅かな変位で頭打ちとなり滑り出すこと、地盤速度による依存性はないこと、数回の繰り返しで著しく低減することなどを確認した。ただし、この特性は最大速度 50cm/s までの範囲での検討結果であるため、兵庫県南部地震級の 100cm/s 以上での特性を得ることを主な目的として、地盤と管の高速一面せん断試験を実施した。その結果、振動台実験で得られた地盤拘束力特性とほぼ一致する結果が得られた。つまり、100cm/s 以上のせん断速度でもせん断挙動に速度依存性がないことがわかった。

key words: earthquake, buried pipe, axial ground restraint force, ground velocity, 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、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、軸直角方向水平についてその値が規定されている。土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言¹⁾が示され、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た状況を踏まえると、地盤拘束力に関しては、大規模地震動を想定し、地盤速度による依存性や繰り返しによる影響をも考慮することが重要となる。

これまで振動台実験²⁾により、地盤拘束力特性の検討を行い、地盤速度による依存性はないこと、数回の繰り返しで著しく低減すること、同拘束力が僅かな変位で頭打ちとなりすべり出し、その挙動が地盤と管の極近傍領域で発生していると考えられることなどを確認してきた。しかしこれは、最大速度 50cm/s までの範囲のものである。

室内土質試験的なアプローチとして、岸田ら^{3)~5)}が地盤と構造材料とのすべり特性の検討として、数多くのせん断試験を実施している。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いふ相関を示すこと、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 程度のすべり層が出来ることなどが報告されており、すべり現象が管の極近

傍領域での発生していることを裏付ける知見であるといえる。しかし、埋設深さが浅いガス導管と比較して、垂直応力が $1.0\text{kgf/cm}^2 (100\text{kN/m}^2)$ 以上と比較的高い条件での結果であり、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)の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。

そこで、一面せん断試験に準じた試験装置によって、兵庫県南部地震級の 100cm/s 以上の地盤速度を対象とした高速せん断時のポリエチレン被覆鋼板と土の境界面に発生するせん断力を測定し、地盤と管の間の軸方向地盤拘束力特性を検討することとした。試験は、せん断速度(地盤速度)、埋め戻し材の土質を変化させて行った。また、得られた結果と振動台実験結果との比較を行った。

2. 試験方法

(1) 試験装置

試験装置の構成を図-1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。

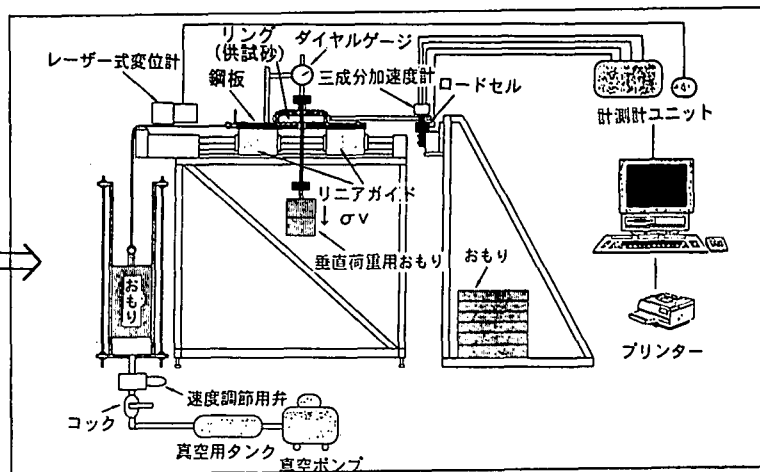
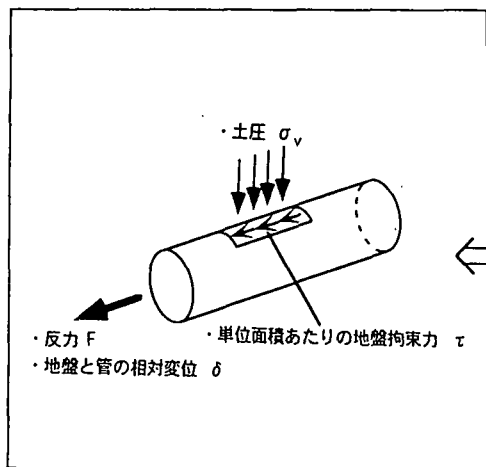


図-1 高速一面せん断試験装置

(2) 試験条件

試験は地盤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，既往の振動台実験で用いた砂（以下，山砂と称す），もう一つは，図-2 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 $\phi=43^\circ$ ， $c=0.13\text{kgf/cm}^2$ （ 13kN/m^2 ），砕砂では $\phi=50^\circ$ ， $c=0.29\text{kgf/cm}^2$ （ 29kN/m^2 ）であることが確認された．砂は，振動台実験と同じ条件の 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．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

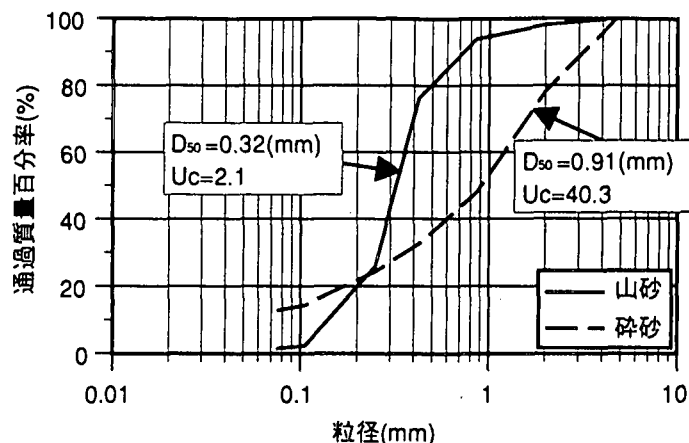


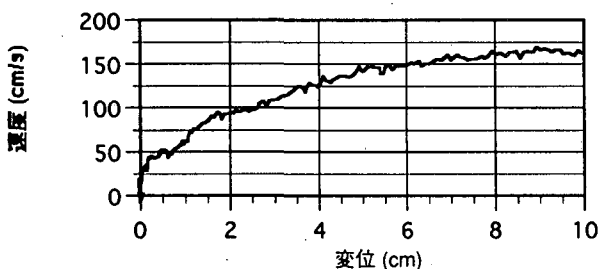
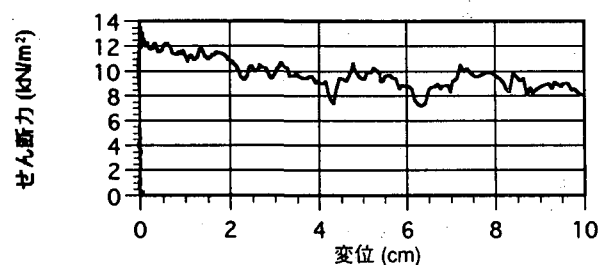
図-2 高速せん断試験に用いた砂の粒度特性

で 99%以上，砕砂で 95%以上の締固め度となった．

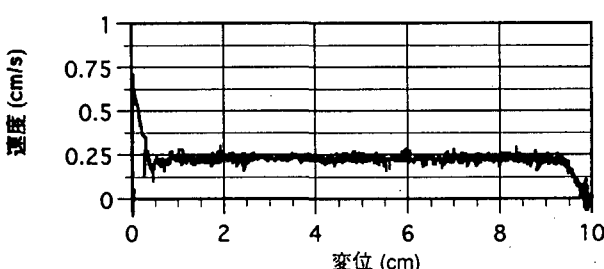
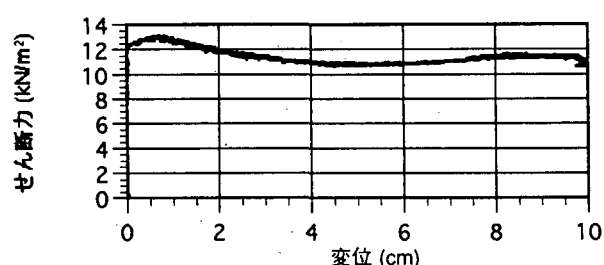
鋼板については，ガス管のポリエチレン被覆を幅 140mm×長さ 300mm×厚さ 10mm の長方形に切り取り，平滑な鋼板上に張り付けせん断面を形成した．ポリエチレンの表面状態を常に初期状態と同一にするため，JIS R 6260 を参考に #600 のサンドペーパーで各試験前に表面研磨を行った．なお，せん断の際，リングの下面とポリエチレン被覆鋼板との間に摩擦が発生しないように，両者に 0.4mm のすき間を設けた．

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 0.10, 0.25, 0.40 kgf/cm^2 （10, 25, 40 kN/m^2 ）の 3 種類とした．山砂の場合， $\sigma_v=0.25\text{kgf/cm}^2$ （25 kN/m^2 ）のケースでは，再現性を確認するため，各 2 回ずつ実施した．

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 40 cm/s^2 程度で，慣性力や垂直応力に換算してもその影響は限界せん断力の 1%程度と，ごく僅かであった．そのため，以下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力とすることにした．



(1) 最大せん断速度160cm/s



(2) 最大せん断速度1cm/s

図-3 せん断力と変位, せん断速度と変位の関係

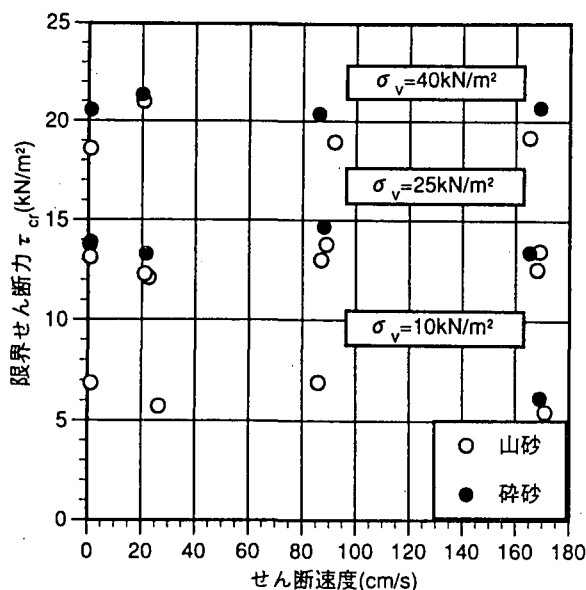


図-4 限界せん断力とせん断速度の関係

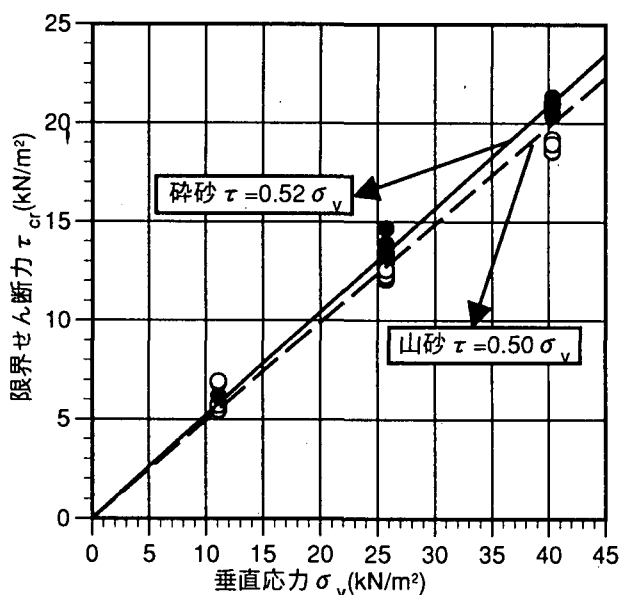


図-5 限界せん断力と垂直応力の関係

3. 試験結果および考察

(1) せん断速度, 土質および垂直応力の影響

山砂について, 垂直応力 $\sigma_v = 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ (25 kN/m^2) の最大せん断速度 160 cm/s および 1 cm/s のケースについて, せん断力と変位の関係を図-3に示す。どちらも, ごく僅かな変位でせん断力は限界値をとり, その後, 漸減する傾向が得られた。低減の度合いが 1 cm/s のケースの方が若干少ないものの, ほぼ同様のせん断力-変位関係が得られた。他のせん断速度においても同じであり, せん断力-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-4に限界せん断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力 τ_{cr} は, 山砂の $\sigma_v = 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ (25 kN/m^2) の場合, せん断速度 160 cm/s で平均 $\tau_{cr} = 0.13 \text{ kgf/cm}^2$ (13 kN/m^2),

1 cm/s の低速せん断でも平均 $\tau_{cr} = 0.14 \text{ kgf/cm}^2$ (14 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。

限界せん断力が速度に依存しないため, 垂直応力による整理を行った。図-5にその結果を示す。限界せん断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, 一般に埋め戻し砂と呼ばれる粒度特性を有する砂であれば, 限界せん断力 τ_{cr} は垂直応力 σ_v から算出できるものと推察される。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 が山砂で $\mu = 0.50$, 砕砂で $\mu = 0.52$ となった。なお,

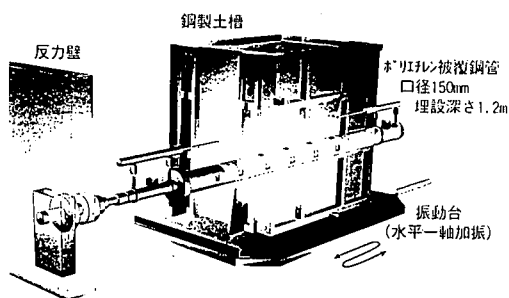


図-6 振動台実験の状況

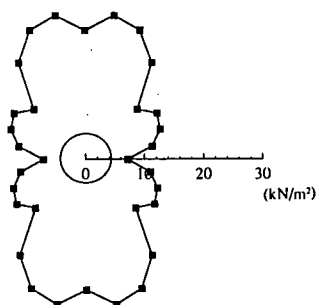


図-7 解析による管周りの法線方向土圧分布
(口径 ϕ 150mm, 埋設深さ 1.2m)

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で近似した。

(2) 一面せん断試験と限界地盤拘束力

図-6 に示す振動台実験から得られる限界地盤拘束力 τ_{cr} は地盤速度によらず 0.06kgf/cm^2 (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せん断力が推定できる。

そこで、振動台実験の埋設条件である、口径 ϕ 150mm, 埋設深さ 1.2m 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、解析対象範囲を振動台実験土槽の断面としたモデルとした。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 $E=143\text{kgf/cm}^2$ (14MN/m^2)、ポアソン比は $\nu=0.4$ として与えた。

解析から求まる管周りの法線方向土圧分布を図-7 に示す。この結果から得られた土圧分布を、管周りの平均土圧に換算すると、管天端位置で鉛直土圧の 0.7 倍に相当する 0.17kgf/cm^2 (17kN/m^2) となった。この値から図-5 に示す限界せん断力 τ_{cr} を算出した

ところ、 0.09kgf/cm^2 (9kN/m^2) となり、振動台実験の限界値とほぼ符合することが確認された。

4. まとめ

地震時、埋設管の軸方向に作用する地盤拘束力について、兵庫県南部地震級の 100cm/s 以上の地盤速度を対象とした速度依存性を検討するため、一面せん断試験に準じた試験装置によって、高速せん断時のポリエチレン被覆鋼板と土の境界面に発生するせん断力を測定した。試験は、せん断速度（地盤速度）、埋め戻し材の土質、垂直応力を変化させて行った。その結果、以下に示すことが明らかになった。

- ・発生するせん断力は、ごく僅かな変位で限界値をとり、その後、漸減する傾向が得られた。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、せん断力-変位関係がせん断速度に依存しない傾向が確認された。

- ・せん断力の限界値は垂直応力 σ_v 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同様の試験を行ったが、砕砂と山砂の限界せん断力は、10%の差が認められる程度であった。したがって、通常埋め戻しに使われる範囲の砂であれば、垂直応力 σ_v がわかると、限界せん断力 τ_{cr} が算出できるものと推察される。

- ・振動台実験における口径 ϕ 150mm, 埋設深さ 1.2m の管周りの土圧を数値解析より求め、管周りの平均土圧を一面せん断試験から求まる限界せん断力に換算し、振動台実験の限界地盤拘束力と比較した。その結果、両者はほぼ符合することが確認された。

謝辞：高速一面せん断試験の実施にあたっては、基礎地盤コンサルタンツ（株）の林氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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 年 3 月
- 4) H. Kisida and M. Uesugi : Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus, Geotechnique, Vol. 37, No. 1, pp. 45-52, 1987
- 5) 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