

(113) 地震時地盤の側方変位により埋設管に作用する拘束力の検討

東京ガス基礎技術研究所 安藤広和
小林実央
小口憲武

1 はじめに

地震時に地盤変位が小さい場合には、埋設管などの線状地中構造物に作用する拘束力は、構造物近傍の地盤を線形ばねとしてモデル化することが一般的である。地盤変位が大きい場合には、非線形的な取扱いが必要となり、埋設管の管軸方向に関しては、地盤と管のすべりを考慮した設計¹⁾が既に導入されており、大規模な繰り返し変位に対する検討²⁾も行われている。一方、管軸直角方向に関しては、地盤沈下など鉛直変位の場合には実験および解析的³⁾な検討が行われており、平板載荷試験結果を用いるなどの評価方法も確立されている。しかし、地震時液状化による側方流動や地すべりなど、地盤が側方変位した場合については、Trautmannら⁴⁾による実験以外はあまり詳細な検討は行われていない。

そこで、埋設管に水平かつ管軸方向に作用する地盤拘束力を評価するために、実験ピットを用いたフルスケール実験を行った。得られた結果との比較により、Trautmannらのモデルを検証すると共に、併せて、FEMによる地盤解析を実施し、数値解析手法の適用性についても調べた。

2 実験方法

図1のように地盤が側方変位した場合を想定した実験を行った。ただし、液状化による場合でも、管は非液状化層に埋設された状態にあり、しかも過剰間隙水圧の上昇による地盤剛性の低下等が起らない場合を想定した。実験装置および計測項目の概要を図2に示す。

縦5m×横2.0m×深さ2.1m=容積21m³のコンクリート製のピットに、口径600A, 300A, 150A (それぞれの管外径はD=60.96, 31.85, 16.52cm) の塗覆なし鋼管 (管長L=1.9m) を埋設した。埋設深さは地表面から管中央部まで深さH=1.5mである。埋め戻しは良質な山砂にて行き、約30cm毎に転圧を行い、締固め度が95%以上となるように調整した。山砂の土質特性は含水比w=約11%、湿潤単位体積重量 $\gamma_t=1.73\text{gf/cm}^3$ 、平均粒径 $D_{50}=0.31$ 、均等係数 $U_c=2.8$ であった。また、三軸圧縮試験により内部摩擦角 $\phi=45.8$ 度、粘着力 $C=0.05$ であると推定された。

実験は管を油圧ジャッキを用いて変位速度約0.3cm/secで載荷し、最大約25cmまで相対的に変位させることにより行った。地盤拘束力と変位の関係は、ジャッキと管の間に取り付けたロードセルおよび変位計により計測した。また、図に示す管表面中央およびコンクリート壁の土圧や管自体の変形の程度を、土圧計および管内側に貼付したひずみゲージにより計測した。併せて、地盤のすべり等の変形状況を観察するため、転圧毎に石灰を敷いた。また、管端部側における地盤と壁との摩

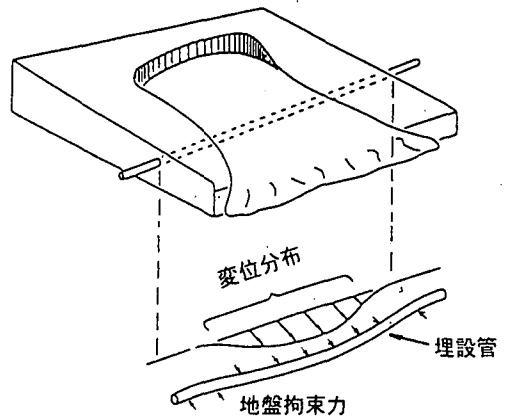


図1 地盤が側方変位した例

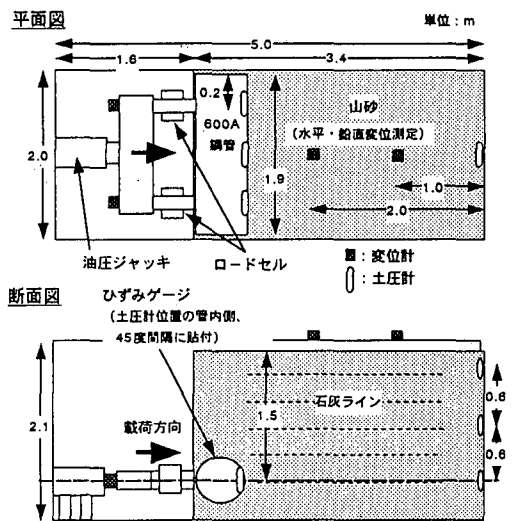


図2 実験装置および計測項目 (口径600Aの場合)

摩擦力を最大限低減するため、ビニールシートを2重に敷き、さらにその間にグリスを塗布した。

実験条件は口径600A, 300Aおよび150A (共に埋設深さH=1.5m) の計3ケースであり、それぞれ2回ずつ行った。そのうち、口径150Aについては地盤と管のなじみの影響をみるため、埋設後1週間程度放置した実験を1回行った。その結果、用いた山砂は粘着力が小さい等により明確な差異はみられなかったため、それ以外のケースは1晩のみの放置とした。

3 実験結果

実験結果を図3に示す。ここでは、地盤と管の相対変位 δ は管外径Dとの比 δ' (δ/D) で、地盤拘束力は発生した荷重Fを $D \times L$ で除した単位面積当たりの拘束力 σ (F/DL) と鉛直土圧 ($\gamma \cdot H$) の比 F' ($F/\gamma \cdot HDL$) とし、それぞれ無次元化した。

この結果より、各ケースとも変位の増加に伴い拘束力は著しく上昇し明瞭なピークをとり、その後は変位が増加しても拘束力は漸減する傾向となった。口径600Aの場合についてみると、変位比 $\delta' = \text{約}0.05$ ($\delta = \text{約}3\text{cm}$) で拘束力比 $F' = \text{約}9.4$ ($F = \text{約}30 \times 10^3 \text{kgf}$) は最大となり、その後、拘束力は漸減していることがわかる。各ケースとも2回の実験結果はよく一致しており、実験の再現性が高いことがわかった。また、埋設深さと口径の比H/Dが大きくなるに従って、最大地盤拘束力比 F'_{max} および降伏変位比 δ'_{cr} が増加する傾向も見られた。

また、拘束力は著しく非線形性を示すことがわかった。各ケースとも写真1に示すように、実験中载荷が進むにつれ、地表面に管軸に沿った方向の地割れが多数発生した。また、実験後にピット縦方向の半分を掘削し、断面の石灰ラインの状況を観察したところ、管付近の様子は確認できなかったが、写真2に示すように管から地表面に向かう約45度方向に地盤のすべりが発生し、地表面にも段差が生じていた。それを境に埋設管側の地表面では盛り上がりおよび载荷方向への移動が見られた。この範囲における地盤の降伏、特に地盤のすべりにより、拘束力に著しい非線形性が現れたものと思われる。

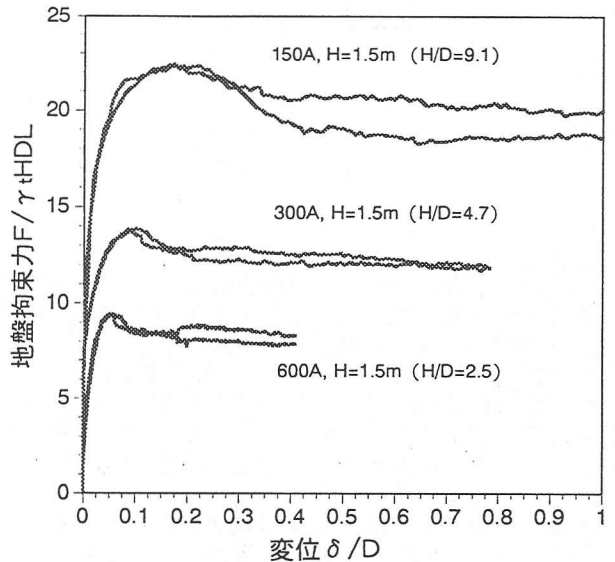


図3 実験による地盤拘束力と変位

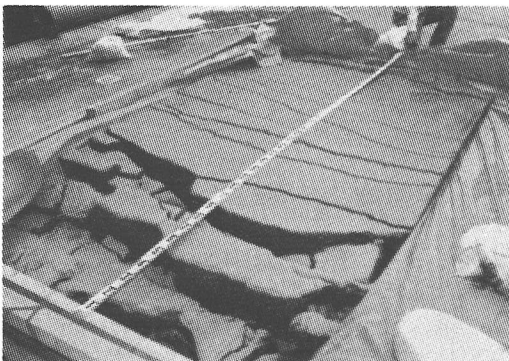


写真1 実験終了後の地表面状況

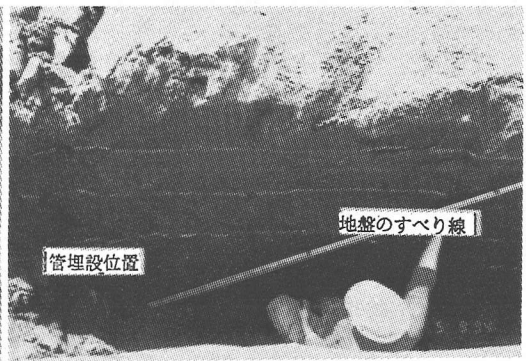


写真2 地盤のすべり発生状況

4 数値解析との比較

実験により示された地盤拘束力挙動を検証するため、地盤と管を有限要素にモデル化し、汎用FEM解析コードABAQUSにより数値解析を実施した。地盤物性は三軸圧縮試験結果を参考に、ヤング率 $E_g=437\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\mu=0.38$ と類推して与えた。それ以外は前述した値をそのまま用いた。地盤要素の非線形性はMohr-Coulombの破壊基準に基づき、弾完全塑性モデルで近似した。また、管については、実験で得られた周方向ひずみが最大でも0.2%程度（口径300Aの場合）の弾性範囲にあったことから、変形は十分小さいと判断し剛体とした。地盤と管の境界にはジョイント要素を配置し、地盤との剥離を表せるように管の半径方向に圧縮応力のみが作用するものとした。実験結果と解析結果の比較を図4に示す。

各ケースとも、実験で得られた地盤拘束力の特徴は解析結果とよく一致することがわかった。実験と同様、地盤の非線形性が解析結果においても現れており、最大地盤拘束力や降伏変位など細部についても実用上十分な精度で再現できることが示された。

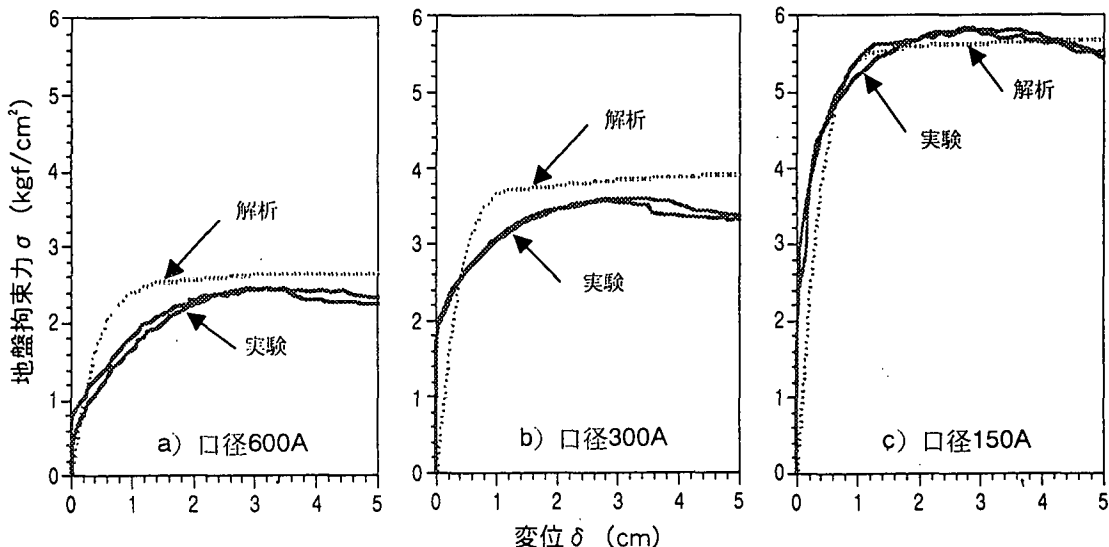


図4 実験と解析の比較

5 地盤拘束力の評価方法

5.1 最大地盤拘束力および降伏変位

前述した実験結果から、最大地盤拘束力比 F_{max} (F_{max}/γ_tHDL) および降伏変位と埋設深さの比 δ_{cr}/H と埋設深さと口径の比 H/D の関係を図5に示す。ここでは、本土質条件がほぼ一致する内部摩擦角 $\phi=45$ 度でのTrautmannらによる結果を併記した。

この結果から、埋設深さ比 H/D の増加に伴い、最大拘束力比 F_{max} は増加することがわかる。一方、降伏変位と埋設深さの比 δ_{cr}/H は埋設深さと口径の比 H/D によらずほぼ一定となった。以上の傾向はTrautmannらによる結果と一致した。Trautmannらは本土質条件下での降伏変位と埋設深さの関係を $\delta_{cr}=0.03H$ と規定しているが、本検討では0.02H程度と若干低めの値を示した。

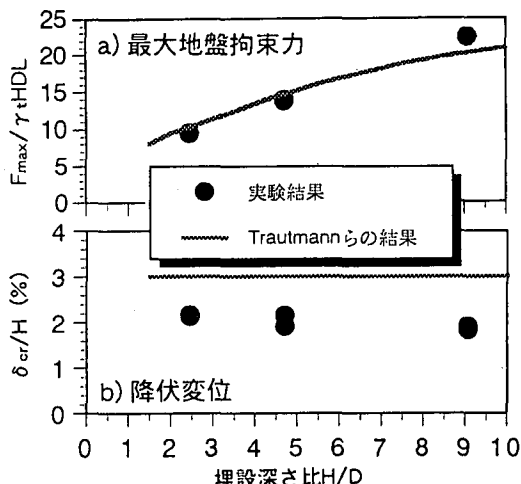


図5 最大地盤拘束力、降伏変位と埋設深さ比

5. 2 地盤拘束力モデル

ここでは、設計等に用いる場合の地盤拘束力モデルについて検討した。実験結果から、地盤拘束力を $F''=F'/F'_{max}$ で、管と地盤の相対変位を $\delta''=\delta'/\delta'_{cr}$ として整理した。結果を図6に示す。また、本実験と同様な密な砂と緩い砂およびその中間の砂での結果に併せて、Trautmannらが示した双曲線による回帰式 $F''=\delta''/(0.17+0.83\delta'')$ を示す。

その結果、本実験で得られた地盤拘束力と変位の関係は、Trautmannらが示した双曲線モデルとよく一致することがわかった。これにより、地盤の側方変位に対して埋設管の管軸直角方向に作用する拘束力を評価する、双曲線で表されると予想される。さらに、双曲線で表される同拘束力をバイリニアモデルで近似すると耐震設計等が簡便になる。

そのため、Thomasら⁶⁾は $F'/F'_{max}=70\%$ を勾配とするモデルを提案した。それによると図中の破線で示した関係が得られる。この関係より口径600A、埋設深さ $H=1.5m$ について、設計用降伏変位 δ'_{crd} (cm)、拘束力係数 k_d (kgf/cm^3)、最大地盤拘束力 σ'_{crd} (kgf/cm^2) を算定した。最大地盤拘束力比 F'_{max} 等は、図5に示したTrautmannらの結果を用いた。その結果、 $\delta'_{crd}=1.8cm$ 、 $k_d=1.4kgf/cm^3$ 、 $\sigma'_{crd}=2.6kgf/cm^2$ となる。

6 まとめ

地震時、地盤の大変位が埋設管に水平かつ軸直角方向に入力される場合を想定して、地盤から管に作用する拘束力を最大口径600mmを用いたフルスケール実験およびその数値解析により検証し、地盤拘束力の評価方法を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- ・地盤拘束力は変位の増加に伴い著しく上昇し、微小な変位領域で最大となり、それ以降は漸減する傾向となった。このことは、地表面に発生した多数の地割れや実験後に確認された管近傍から地表面に向かい発生したすべり線に起因する地盤の降伏によるものと思われる。
- ・埋設深さと口径の比 (H/D) が大きくなるに従って、最大地盤拘束力が増加することが確認され、この傾向はTrautmannらの結果ともよく一致した。
- ・地盤拘束力挙動はFEM数値解析により実用上十分な精度で評価できることが示唆された。従って、本実験で対象とした一様地盤のみならず、種々の埋設環境を考慮した拘束力を評価できる可能性がある。
- ・地盤拘束力は双曲線モデルで近似できる。また、それにより設計等に用いるバイリニアモデルに置換することも可能である。

参考文献

- 1) 日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針 (1982)
- 2) 小林他：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
—管軸方向における振動台実験結果—, 第23回地震工学研究発表会投稿中 (1995)
- 3) 島村他：突出条件下の埋設管に作用する土圧,
土木学会論文集, 第388号/J-8, pp.179-188 (1987)
- 4) 兵藤他：埋設管の地盤反力係数評価のための実験および解析,
土と基礎, Vol.39-4, pp.3-8 (1991)
- 5) Trautmann, C. H. et al. : Lateral Force-Displacement Response of Buried Pipe,
Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111 No.9, pp.1077-1092 (1985)
- 6) Thomas, H. O. : Discussion of " Soil Restraint Against Horizontal Motion of Pipe,
Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.10, No.GT9, pp.1214-1216, 1978

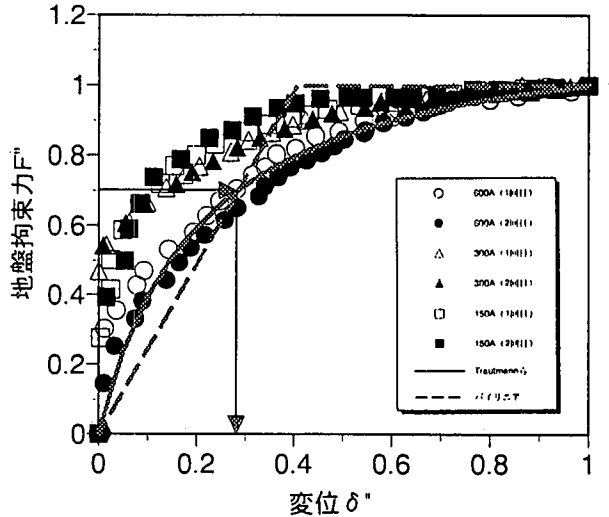


図6 地盤拘束力モデル