

弾性 FEM 解析に基づく円形管きよの断面方向耐震設計法の検討

阿南工業高等専門学校 吉村 洋
 大阪市立大学客員教授・Buried Pipe Research Center 東田 淳
 大日本プラスチックス 丸吉克典

まえがき 円形管きよの現行耐震設計法(例えば下水道施設耐震対策指針と解説, 1997)は, 管面に働くせん断土圧が管きよの断面方向の地震時挙動を支配すると想定するが, この想定は著者らが行った一連の実験的, 解析的研究により実態と異なることが分かった¹⁾。そこで著者らは, レベル 2 地震動によって地盤に生じる単純せん断ひずみ $\gamma=3.2\%$ を遠心加速度 30 g 場で模型地盤に繰返し与えた静的遠心実験²⁾, ならびに管面境界に完全滑動条件を与えた連続体モデルに対する弾性理論解²⁾に基づいて, 円形埋設管きよの耐震設計法を提案した³⁾。

この連続体モデルの弾性理論解は実験結果をうまく近似するが, 管と土の間の開口, 管自重, 地盤の深さ方向の変形係数の変化を扱えないという制約がある。一方, 弾性 FEM 解析にはこのような制約がなく, 弾性理論解よりも遠心実験の測定結果に近い解析結果を与えることが確認されている⁴⁾。そこで本報告では, 弾性 FEM 解析によって円形管きよの地震時の最大曲げモーメント $K(=M_{max}/(\sigma_s R^2))$ ~ 埋設管のたわみ性指数 $\kappa(=E_s/S_p)$ の関係を求め, 遠心実験の測定結果および弾性理論解で得られた $K \sim \kappa$ 関係と比較した。

表-1 模型地盤材料の性質

| Ground | G_s | D_{max} (mm) | F_c | U_c | ρ_{dmax} (g/cm ³) | ρ_{dmin} (g/cm ³) | ρ_d (g/cm ³) | w (%) |
|--------|-------|-------------------|-------|-------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------|
| S0L | 2.65 | 1.4 | 0 | 1.75 | 1.58 | 1.32 | 1.43 | 0 |
| S0D | 2.65 | 1.4 | 0 | 1.75 | 1.58 | 1.32 | 1.55 | 0 |
| S16L | 2.71 | 2.0 | 16 | 70 | 1.92 | 1.42 | 1.50 | 10 |

なお上記の K と κ に含まれる変数は, M_{max} : 管に生じる最大曲げモーメント, σ_s : 管側深度における土自重応力, R : 管厚中心半径($= (D-t)/2$), D : 管の外径, t : 管厚, E_s : 土の変形係数, $S_p = E_p t^3 / \{12(1-\nu_p^2) R^3\}$: 管の曲げ剛性, $E_p \cdot \nu_p$: 管材料のヤング率とポアソン比である。

表-2 FEM 解析で用いた土の入力定数

| 地盤 H/D | E_s (MPa) | ν_s | γ (kN/m ³) |
|----------|-------------|---------|-------------------------------|
| S0L 0.5 | 0.7~3.1 | 0.37 | 14.0 |
| S0L 1 | 0.8~3.5 | 0.37 | 14.0 |
| S0L 2 | 0.8~4.1 | 0.37 | 14.0 |
| S16L 1 | 0.5~1.2 | 0.33 | 16.2 |
| S0D 1 | 1.4~7.6 | 0.35 | 15.2 |

FEM 解析の入力定数と計算方法 表-1 に遠心実験²⁾ で用いた S0L (乾燥砂ゆる詰め) 地盤, S0D (乾燥砂密詰め) 地盤, S16L (まさ土ゆる詰め) 地盤の性質を示す。

表-2 に FEM 解析で用いた土の入力定数を示す。ポアソン比 ν_s と変形係数 E_s は K_0 圧縮試験の結果⁵⁾ から決めた。 E_s は, 土被り高 H が異なる実験模型に合わせて, 各模型地盤を深さ方向に 6~9 層に分け, 各層中央の土自重応力に相当する E_s を各層に割り振った。 ν_s は試験結果に基づいて応力レベルに拘わらず一定とした。

表-3 FEM 解析で用いた管の入力定数

| 管 | D (mm) | t (mm) | E_p (MPa) | ν_p | γ_p (kN/m ³) |
|-----|----------|----------|-------------|---------|---------------------------------|
| F03 | 90 | 0.34 | 72 | 0.33 | 49.1 |
| F05 | 90 | 0.51 | 72 | 0.33 | 41.6 |
| F07 | 90 | 0.74 | 72 | 0.33 | 41.1 |
| F | 90 | 0.95 | 73 | 0.33 | 85.8 |
| R | 90 | 3.5 | 73 | 0.33 | 36.6 |

表-3 の管の入力定数(γ_p は模型管きよの自重を管体に均等に割り振った単位体積重量)は, 遠心実験で用いた模型管に合わせた。実験ケース以外の解析では, F 管の κ よりも小さい κ の範囲では R 管の FE メッシュと γ_p を, また S0L 地盤・ $\kappa=1000$, および S16L・S0D 両地盤で F 管の κ よりも大きい κ の範囲では F03 管の FE メッシュと γ_p をそれぞれ用い, E_p を変化させることにより S_p を変化させた。

解析結果と測定結果の比較 地盤を左方向に $\gamma=3.2\%$ だけ傾けた時点に対して実験, 弾性理論解, FEM 解析で得られた $K \sim \kappa$ 関係を, 図-2(S0L 地盤・ $H/D=0.5, 1, 2$), 図-3(S0D 地盤・ $H/D=1$), 図-4(S16L 地盤・ $H/D=1$) に示す。各図において, 矢印で示した各模型管のマークがせん断変形の繰返し回数 $N=1, 2, 5, 10$ 回において測定された実験 K , 赤ラインが理論 K , 各図の黒丸マークとそれらを連ねた黒ラインが解析 K をそれぞれ表す。

実験, 理論, 解析で得られた $K \sim \kappa$ 関係の比較から以下が分かる。

キーワード: 埋設管きよ, 耐震設計法, 弾性 FEM 解析, 弾性理論解析, 遠心実験

連絡先: 東田 淳, 橿原市鳥屋町 24-7 エスペランサ森川 II202 号, Buried Pipe Research Center, FAX: 0744-35-5007

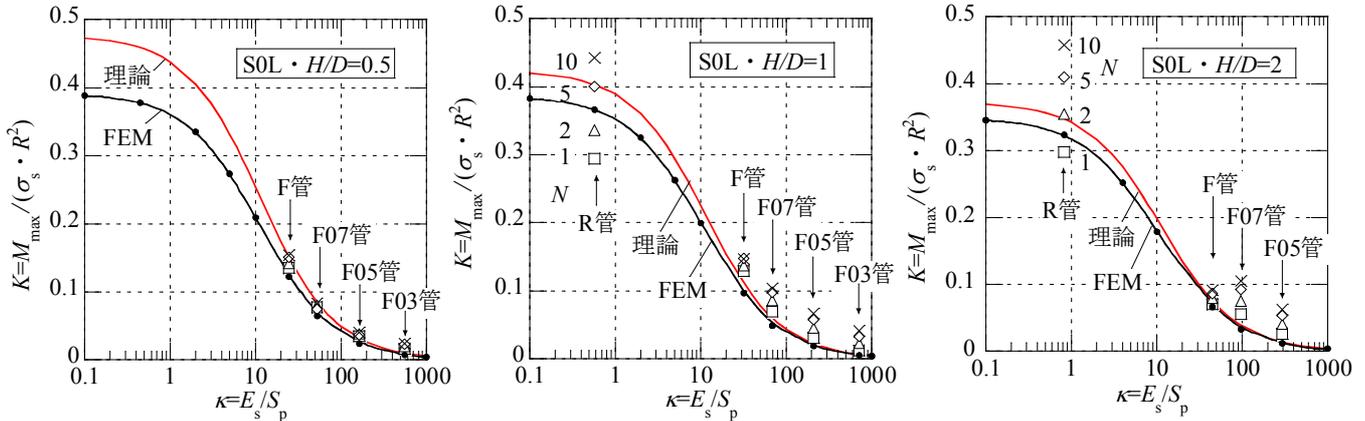


図-2 実験, 理論, FEM 解析で得られた $K \sim \kappa$ 関係の比較(SOL 地盤)

- κ が F 管の κ よりも大きい範囲では, どのケースも解析, 理論の差がほとんどなく, $N=1$ の実験結果にごく近い。
- SOL 地盤(図-2)の解析 K は, κ が F 管の κ よりも小さくなるにつれて理論 K よりも小さくなり, N が小さい時の R 管の実験 K に近づく。これは解析で管面の開口を考慮した効果である。

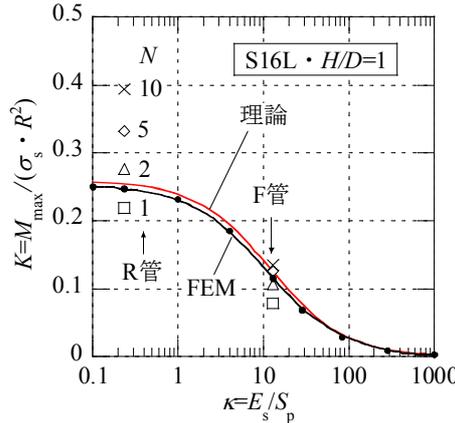


図-3 実験, 理論, FEM 解析で得られた $K \sim \kappa$ 関係の比較(S16L 地盤)

- E_s が最小の S16L 地盤(図-3)では解析 K と理論 K にほとんど差がなく, いずれも N が小さい時の R 管, および F 管の実験 K に近い。これは, S16 地盤では実験, 解析, 理論とも管面の開口が生じないためである。
- E_s が最大の S0D 地盤(図-4)では, κ が小さい範囲の解析 K は理論 K より小さいが, R 管の実験 K よりもまだかなり大きい。実験で測定された垂直土圧 σ の分布(図-5)によれば, 開口した管面で土圧の再配分が生じていると推定されるので, 解析 K を実験 K に近づけるためには管面境界条件として開口後のリボンドを導入する必要があると思われる。
- 全ての実験 K は, せん断変形の繰返し(N の増大)に伴う地盤の E_s の増大によって大きくなる。特に R 管の実験 K の増え方が大きい, これは, 文献 6)の図-2 に示したように, κ が小さいほど E_s の増大の影響が強まるためである。
- 解析, 理論とも地盤の E_s の変化を無視しているため, N の増大に伴う実験 K の変化を扱えない。精密な解析のためには N の増大に伴う地盤の E_s の変化を定量化すべきであるが, これはかなり困難なので, 当面は, 文献 3)で示した補正方法を解析 K に適用して, 埋設管きよの地震時の M_{max} を実用的に十分な精度で予測すれば良いと思われる。

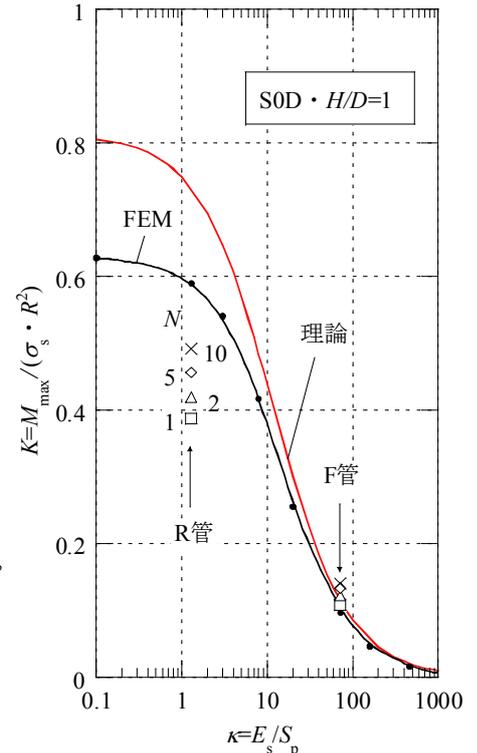


図-4 実験, 理論, FEM 解析で得られた $K \sim \kappa$ 関係の比較(S0D 地盤)

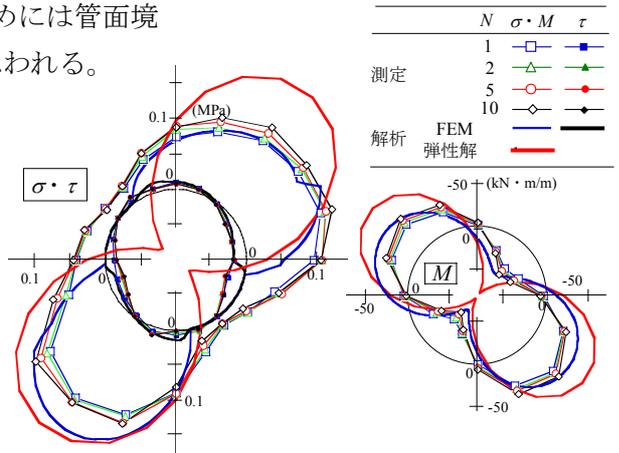


図-5 S0D 地盤の実験, 理論, FEM 解析で得られた土圧と曲げモーメントの比較

参考文献 1) 老朽化した埋設カルバートの復旧に関する研究委員会(2013): 既設および更生した管きよの力学挙動と設計に関する技術資料(案), 地盤工学会. 2) 東田他(2012): 地盤せん断遠心実験による埋設管きよの地震時挙動の検討(円形管きよの測定結果と連続体モデルの弾性解の比較), pp.1285-1286, 47回地盤工学会. 3) 東田他(2012): 連続体モデルに基づく円形管きよの断面方向耐震設計法の提案, III405, pp.809-810, 67回土木年講. 4) 吉村他(2012): 地盤せん断変形を受ける埋設管きよの遠心実験に対する弾性FEM解析, pp.1287-1288, 47回地盤工学会. 5) 伊地他(1999): 埋設管施工に用いられる砂粒土の設計用弾性定数, 第3部門, Vol. B, pp.278-279, 54回土木年講. 6) 東田他(2010): 土自重と水平震度を考慮した連続体モデルによる地中埋設管の地震時挙動の検討, III354, pp. 707-708, 65回土木年講.