

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

大阪市立大学 東田 淳・丸吉克典

阿南工業高等専門学校 吉村 洋・中央復建コンサルタンツ 井上裕司

大阪市 大杉朗隆・中西啓輔

**まえがき** 前報<sup>1)</sup>では、地中埋設管の断面方向の地震時挙動が純粋せん断モードの二次元弾性連続体モデルによってうまく説明できることを示した。本報告では、土自重と水平震度を考慮した連続体モデルの解を用いて埋設管の地震時挙動(土圧と変形挙動)を示し、2通りの遠心実験<sup>2)3)</sup>で測定した模型埋設管の地震時挙動と比較する。

**管と土の地震時挙動を説明するための連続体モデル** 図-1は、今回用いた二次元連続体モデルで、土と管は等方弾性体と仮定し、管面の境界条件は、実際のプレキャスト管に近い滑動条件(管面で発揮されるせん断抵抗がゼロ、半径方向の変位が管と土で同じ)を与えた。このモデルは、前報のモデル<sup>1)</sup>とは無限遠方の境界応力の与え方が異なり、土自重応力 $\sigma_0$ が働く $K_0$ 状態の地盤に水平震度 $K_h$ の水平地震力が作用した状態をシミュレートして、図-1に示すように、無限遠鉛直境界に垂直応力 $\sigma_x = \sigma_0$ と $\tau_{xy} = K_h \sigma_0$ を、また無限遠水平境界に $\sigma_y = K_0 \sigma_0$ と $\tau_{xy} = K_h \sigma_0$ をそれぞれ与えている。図-1の $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ から、最大主応力 $\sigma_1$ 、最小主応力 $\sigma_3 = K\sigma_1$ 、および水平・鉛直面と主応力面のなす角度 $\alpha$ が、それぞれ次式： $\sigma_1 = [(1 + K_0)/2 + \{(1 - K_0)^2/4 + K_h^2\}^{1/2}] \sigma_0$ 、 $\sigma_3 = [(1 + K_0)/2 - \{(1 - K_0)^2/4 + K_h^2\}^{1/2}] \sigma_0$ 、 $\sin 2\alpha = K_h / \{(1 - K_0)^2/4 + K_h^2\}^{1/2}$ と求まるので、 $\sigma_y = K_0 \sigma_0$ と $\tau_{xy} = K_h \sigma_0$ の係数 $K_0$ と $K_h$ を与えれば、 $K = \sigma_3 / \sigma_1$ と $\alpha$ が決まる。よって、主応力 $\sigma_1$ と $\sigma_3$ が無限遠方の境界応力として働く場合の連続体モデルの解<sup>4)5)</sup>を $xy$ 座標に変換することによって、図-1のモデルの応力・変位成分が得られる。

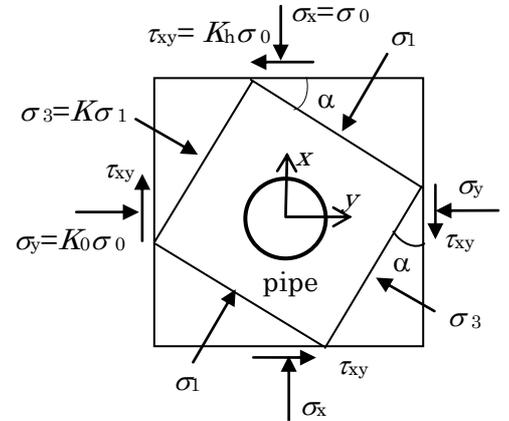


図-1 二次元連続体モデル

**計算結果** 図-2は、 $K_h = 0.5$ 、 $K_0 = 0.5$ 、地盤のポアソン比 $\nu_s = 1/3$ の場合を例にとって、管と地盤の相対剛性 $\kappa = E_s / S_p$ を変化させた時の管面に働く垂直土圧 $\sigma/\sigma_0$ と管に生じる曲げモーメント $M/(\sigma_0 R^2)$ の変化を、 $\sigma$ が圧縮、 $M$ が内側引張りの場合を正にとって極座標表示している。ここに、 $E_s$ : 地盤のヤング率、 $S_p$ : 管の曲げ剛性 $= E_p t^3 / [12(1 - \nu_p^2) R^3]$ 、 $E_p \cdot \nu_p$ : 管材料のヤング率とポアソン比、 $t$ : 管厚、 $R$ : 管厚中心半径である。図-2から、 $\tau_{xy} = K_h \sigma_0$ が加わることによって $\sigma/\sigma_0$ 分布と $M/(\sigma_0 R^2)$ 分布の対称軸は回転するが、 $K_h$ が一定であれば $\kappa$ が変化しても対称軸の回転角は変わらないこと、また $\kappa$ が小さいほど、すなわち管剛性が地盤剛性よりも相対的に大きいほど、 $\sigma/\sigma_0$ と $M/(\sigma_0 R^2)$ の最大値が大きいことが分かる。

図-3は、遠心実験で用いた2本の土圧測定用模型管( $S_p = 36.7 \text{ kgf/cm}^2$ で剛性の高いR管と $S_p = 0.67 \text{ kgf/cm}^2$ で剛性が低いF管、原型外径2.7m)を乾燥砂(SOL)地盤中に原型土被り高 $H = 2.7 \text{ m}$ で埋めた場合に相当する $\kappa = 0.5$ (図-3(a))と $\kappa = 30$ (図-3(b))の場合を例にとって、 $K_0 = 0.5$ 、 $\nu_s = 1/3$ の条件で $K_h$ を0~1の範囲で4通りに変えた時の $\sigma/\sigma_0$ と $M/(\sigma_0 R^2)$ の変化を示している。両管とも $K_h$ の増大につれて $\sigma/\sigma_0$ と $M/(\sigma_0 R^2)$ の最大

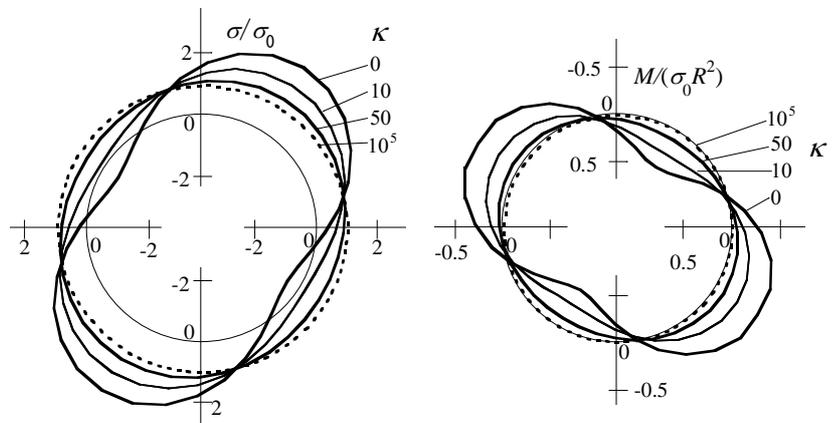


図-2  $\sigma/\sigma_0$ と $M/(\sigma_0 R^2)$ の $\kappa$ による変化 ( $K_h = 0.5$ 、 $K_0 = 0.5$ 、 $\nu_s = 1/3$ )

キーワード: 埋設管、地震時土圧、土と構造物の相互作用、連続体モデル、弾性理論解析

連絡先: 大阪市住吉区杉本3-3-138、大阪市立大学工学部、TEL & FAX: 06-6605-2725

値が増え、 $\sigma/\sigma_0$ と $M/(\sigma_0 R^2)$ の分布の対称軸の回転角、すなわち図-1の $\alpha$ の値も、 $K_h=0, 0.25, 0.5, 1$ に対して $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 32^\circ, 38^\circ$ と増える。また $K_h$ の違いによる $\sigma/\sigma_0$ と $M/(\sigma_0 R^2)$ の変化幅と最大値は $\kappa=0.5$ の方が $\kappa=30$ よりもはるかに大きい。

図-4は、R管とF管をSOL地盤に埋めて、地震動をシミュレーションした2通りの遠心実験で測定された管面の垂直土圧 $\sigma$ ・せん断土圧 $\tau$ (反時計回りが正)の分布と管壁の曲げモーメント $M$ (原型換算)の分布である。図-4の□と青ライン、および○と赤ラインが、それぞれ静的せん断変形繰返し遠心実験<sup>2)</sup>と動的遠心実験<sup>3)</sup>において、2波目の同じ位相で得られたデータを示す。静的・動的実験の模型管の原型土被り高は2.7mと同じであるが、基盤と管底の距離はそれぞれ4.5m、5.4mと少し異なる。静的実験では地盤の両端に設置した壁を下端で回転させて地盤にせん断ひずみ $\gamma=\pm 6.3\%$ を与え、動的実験では基盤に $\pm 0.8G \cdot 1\text{Hz}$ のsine波状の原型水平加速度を与えた。

図-4の静的・動的両実験のデータを比べると、R管の $\sigma \cdot M$ は両実験でよく一致するが、F管では $\sigma \cdot M$ とも動的実験の方が小さく、 $M$ の分布形も異なる。つぎに、図-4と図-3を比べると、図-4の測定 $\sigma \cdot M$ は、図-3の計算 $\sigma \cdot M$ と同じく、剛性の大きなR管の方が剛性の小さいF管よりも大きく、また $\sigma \cdot M$ の分布形も測定と計算が良好に近似していることが分かる。

以上から、今回の連続体モデルは土と管の動的相互作用のメカニズムをかなり正確に表わすと結論できる。今後、この連続体モデルを用いて、極薄肉管の地震時バックリング挙動に検討を加える予定である。

参考文献 1) 東田他(2008): 連続体モデルによる地中埋設管の地震時挙動に対する考察, 63回土木学会年講, III-044, pp.87-88. 2) 丸吉他(2010): 劣化した更生管(複合管)の地震時安定性に関する遠心実験(地盤せん断変形実験), 45回地盤工学研究発表会(投稿中). 3) 大杉他(2009): 製管工法で更生された老朽下水道管の地震時安全性に関する動的遠心実験, 64回土木学会年講, pp.867-868. 4) 東田・三笠(1986): 弾性論による埋設管の土圧の検討, 土木学会論文集, 第376号/III-6, pp.181-190. 5) 東田(2001): 弾性論による地中埋設管のバックリング挙動の検討, 土と基礎, 49-4, pp.19-22.

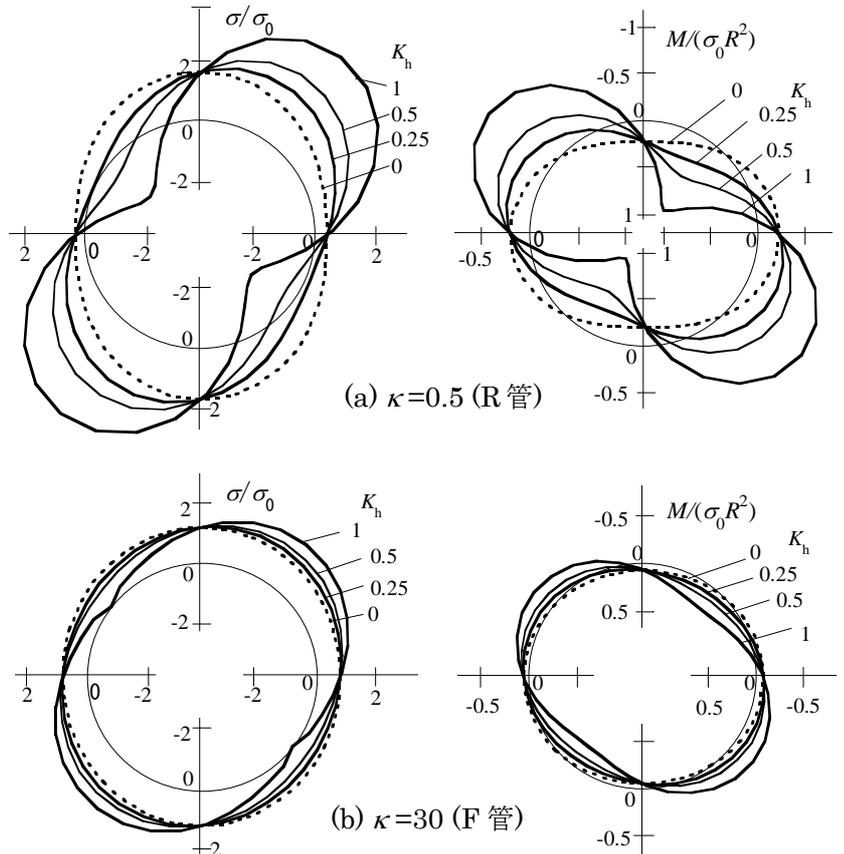


図-3  $\sigma/\sigma_0$ と $M/(\sigma_0 R^2)$ の $K_h$ による変化 ( $K_0=0.5, v_s=1/3$ )

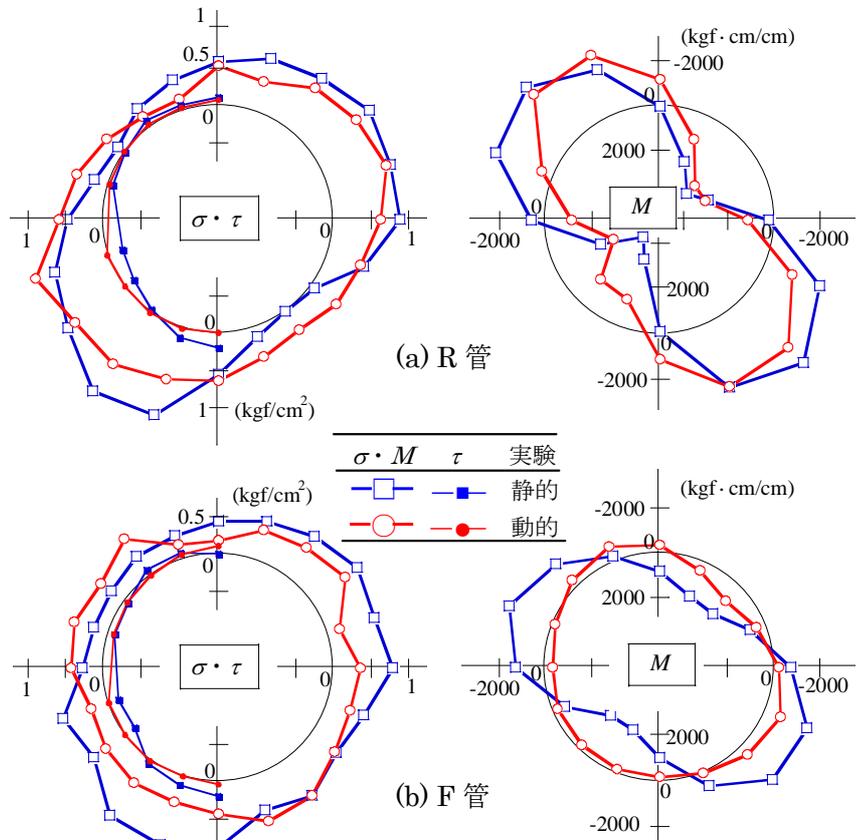


図-4 遠心実験で測定された土圧 $\sigma \cdot \tau$ と $M$