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

大阪市大　東田　淳・阿南高専　吉村　洋・大阪市　大杉朗隆・中央復建ｺﾝｻﾙﾀﾝﾂ　井上裕司

まえがき　本報告では、地中埋設管の断面方向の地震時挙動を説明するための二次元弾性連続体モデルを示し、このモデルの解によって計算された動土圧と曲げひずみの分布を動的遠心実験の測定結果と比較して、モデルの妥当性を確認する。

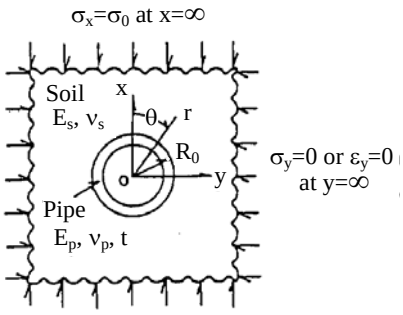


図-1 管と土の静的相互作用を説明するための連続体モデル

管と土の静的相互作用を説明するための連続体モデル　図-1 は、著者らが埋設施工時の管の土圧・変形挙動のメカニズムを説明するためにこれまで用いてきた二次元弾性連続体モデル [1)]である。土と管は等方弾性体と仮定し、平面ひずみ条件で無限遠鉛直境界に垂直応力 $\sigma_x=\sigma_0$ を作用させた時の地盤の応力と変位を Airy の応力関数を用いて表し、管の変位の微分方程式の解に含まれる未定定数を管面での接触境界条件を決定する手法で求めた。計算は、管面の接触境界条件として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。なお、実際の接触境界条件とは異なるが、比較のために、結合条件(管面での半径・周方向の変位が管と土で同じ)についても計算した。また、地盤側方の無限遠境界での条件を管の埋設方式と関連させ、矢板を用いる溝型埋設方式において矢板引き抜き時に抜け跡が空洞になった時点に対応する $\sigma_y=0$、および盛土型の場合に対応する $\varepsilon_y=K_0\sigma_0=\{\nu_s/(1-\nu_s)\}\sigma_0=0$ の 2 条件を与えた。

管と地盤の相対剛性 $\kappa=E_s/S_p$ と地盤のポアソン比 ν_s を変化させて行った土圧と管の変形挙動の計算結果は、埋設方式、管の剛性、管面の粗度を変えた遠心実験の測定結果と良く一致した [1)]。ここに、E_s・ν_s: 地盤のヤング率とポアソン比、S_p: 管の曲げ剛性$=S_f/R_0^3$、S_f: 管壁の曲げ剛性$=E_pt^3/\{12(1-\nu_p^2)\}$、$E_p$・$\nu_p$: 管材料のヤング率とポアソン比、t: 管厚、$R_0$: 変形前の管の半径(管の中心から管壁の中立軸までの距離)である。この計算結果と測定結果の比較から、図-1 に示した連続体モデルの弾性計算の結果は、埋設管の挙動に及ぼす埋設方式・管と土の剛性・管面境界条件の各影響、ならびに剛性管の土圧集中とたわみ性管の集中緩和のメカニズムをうまく説明することが分かり、これらの知見に基づいて、土と管の相互作用を支配する主要な要因は、管面の滑動条件、管と土の相対剛性、埋設方式によって変化する地盤側方の境界条件の 3 つであると結論した。

次いで著者らは、極薄肉埋設管の弾性バックリング問題に図-1 の盛土型に対する連続体モデルを適用し、変形前後の座標変換によって管要素の有限変形を表す手法を用いてバックリング解を求めた。そしてこの解が、乾燥砂中に埋められた薄肉金属管のバックリング圧力の測定結果ときわめて良く一致することを示した [2)]。

著者らは以上の研究成果に基づいて、管と土の相互作用を表すモデルとしてこれまで提示されている連続体モデルとばねモデルの二つのうち、連続体モデルの方が正当であり、ばねモデルによる相互作用の解釈は実態と合わないので誤っていると結論した。今回は、連続体モデルを動的相互作用の説明に用いることを試みた。

管と土の動的相互作用を説明するための連続体モデルと埋設管の地震時挙動　図-1 に示した連続体モデルの無限遠における境界応力を $\sigma_x=\sigma_0$、$\sigma_y=-\sigma_0$ とおけば、図-2 に示すように無限遠境界にせん断応力 $\tau=\sigma_0$ が働く純粋せん断モードの解が得られる。なお、$\sigma_x=-\sigma_0$、$\sigma_y=\sigma_0$ とおけば、境界せん断応力 $\tau=\sigma_0$ の向きが変わる。この無限遠境界に働くせん断応力 τ の大きさは地震動の大きさ(加速度、または静的震度)に対応すると解釈できる。

図-3～図-5 は、境界応力が図-2 に示した $\sigma_x=\sigma_0$、$\sigma_y=-\sigma_0$、および管面が実際に近い滑動条件の場合の解析で

キーワード: 埋設管、土と構造物の動的相互作用、弾性理論解析、土圧、変形
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

得られた垂直土圧σ(圧縮が正、τはゼロ)の分布、鉛直・水平土圧の分布、ならびに曲げモーメントの分布を、種々のκについて描いている。

図-3 から、σの最大値が管頂・管底から時計回りに 45 度回転した位置に存在すること、また剛な管(κ=0)のσの最大値はσ_0の 2.7 倍と著しく大きいが、管の剛性が低下するとσの値は次第に減り、管がほぼ剛性を失った状態に相当する$\kappa=10^5$ ではどの位置でもσがほぼゼロになることが分かる。図-4 は、図-3 のσ分布から求めた鉛直・水平土圧 p_v・p_h の分布をσ_0との比として表している。図-5 の曲げモーメントの分布(外側引張りが正)は、管頂・管底から±45 度回転した対称軸の位置で極値をとり、κの増大につれて減少する。

図-6 は、剛性の異なる 2 本の模型管(R 管と F 管、管の外径 D=90mm)をまさ土の密詰め地盤中に土被り高 H=D で埋め、遠心加速度 30G 場で振動台に最大水平加速度 0.8G の正弦波を加えて加振した時に測定された管面に働く動土圧Δσと管に生じた曲げひずみΔεの分布(両振)を示したものである [3)]。測定結果は、図-3 と図-5 に示した計算結果と定性的に良く一致している。

以上に示した剛性の高い管の計算・測定曲げひずみ分布は、兵庫県南部地震の際に観測された大口径コンクリート管やシールド二次覆工の X 形クラックの発生メカニズムをうまく表している。また、剛性の高い管の計算・測定土圧分布から、地震動と土被り圧の大きさにもよるが、管頂・管底から±45 度回転した位置では、管面で管と土が開口する可能性があることが分かる。

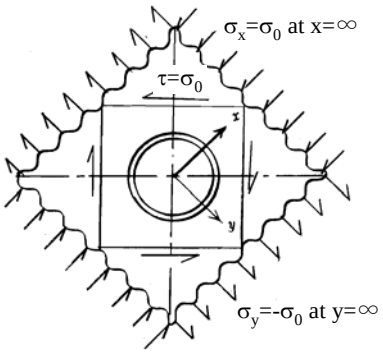


図-2 地震時挙動説明用モデル

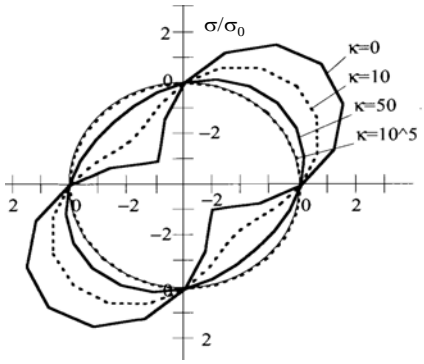


図-3 垂直応力σの分布

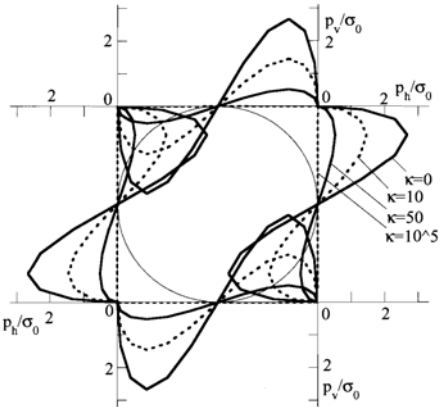


図-4 鉛直・水平土圧の分布

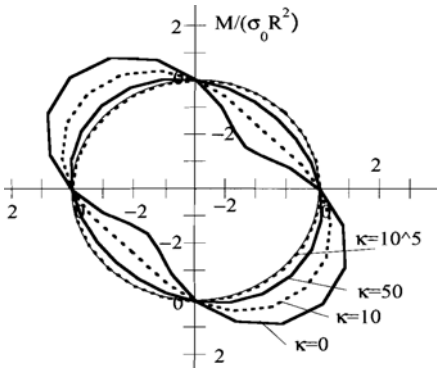
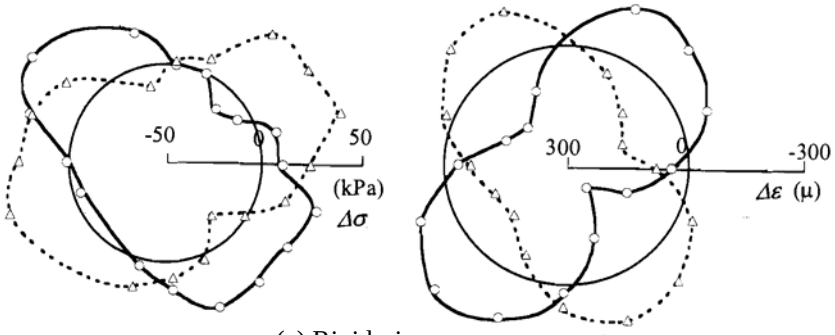
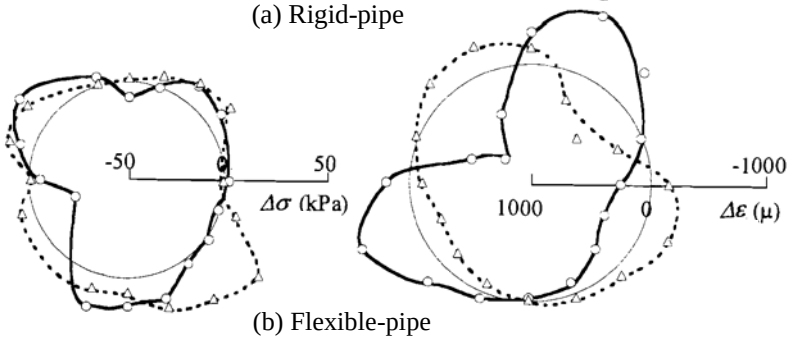


図-5 曲げモーメントの分布



(a) Rigid-pipe



(b) Flexible-pipe

図-6 動的遠心実験の測定結果（まさ土密詰め地盤，H/D=1，H_b/D=2）

参考文献 1) 東田淳・三笠正人: 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, 1986. 2)東田淳: 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, 2001. 3) J.Tohda, Y.Nakamura, Y.Inoue, H.Yoshimura, H.-Y.Ko & A.Ohsugi: Dynamic Response of Sewer Concrete Pipes Rehabilitated by CIPP through Centrifuge Model Tests, 6th ICPMG ‘06, pp.759-764, 2006.8.