第 64 回土木学会年次講演会 2009.9

下水道幹線カルバートの現行耐震設計法(断面方向)に関する考察

大阪市大 ○東田 淳・向市清司 阿南工業高等専門学校 吉村 洋
大阪市 大杉朗隆・中西啓輔 中央復建コンサルタンツ 井上裕司

まえがき 土と構造物の相互作用を説明するモデルには、連続体モデルとばねモデルの二つがある。著者らはこれまで一連の研究を通して、相互作用のメカニズムは図-1 に示す連続体モデルによって矛盾無く解釈できるが、ばねモデルは現象をうまく説明できないと結論した[1)]。一方、下水道カルバートの断面方向の検討に用いられる現行耐震設計法[2)~4)]は、ばねモデルに基づく応答変位法を用いているので、カルバートの地震時挙動を正しく捉えていない可能性が高い。そこで本報告では、下水道カルバートの現行耐震設計法を概説し、問題点を指摘する。なお、別報 5)でカルバートの動的遠心実験と現行耐震設計法による予測の比較を、また文献 6)～10)で動的遠心実験の方法と結果、および実験に対する FEM 解析の方法と結果を示したので、併せて参照されたい。

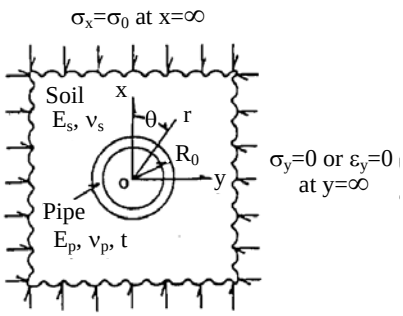

図-1 連続体モデル

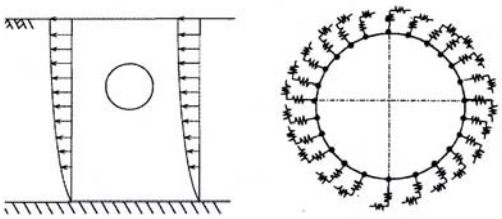
図-2 現行耐震設計法のばねモデル

現行耐震設計法の概要 現行耐震設計法では、常時と地震時に生じるカルバートの断面力・変形を足し合わせて、断面方向の検討を行う。地震時の断面力・変形は以下の手法で求める。

① 表層地盤中のカルバートは図-2 に示すように、地盤ばねによって支持されている。基盤から伝播してくる地震せん断波によって、一次モードの水平変位 U_h (m)とせん断応力τ_{xy} (KN/m^2)が表層地盤に生じる。

② カルバート底面を基準とする相対水平変位ΔU_h (m)を地盤ばねに作用させて求めた地震時水平力H (KN/m)がカルバートに働く。また地盤内せん断応力τ_{xy} (KN/m^2)がカルバートの周面に働く。矩形カルバートではτ_{xy} (KN/m^2)が側壁と頂・底版に働くが、円形カルバートではτ_{xy} (KN/m^2)を分解して得られる垂直応力σ_r (KN/m^2)とせん断応力$\tau_{r\theta}$ (KN/m^2)が働くものとする。以上の H とτ_{xy}が働いて、カルバートは変形する。

③ 直交座標系(xy 座標系)または極座標系の 2 軸方向の成分を併せて、構造物の変形を U_P (m)、地震時の地盤変形を U_G (m)、周面せん断力を S (KN/m)、構造物に働く慣性力を F (KN/m)、地盤ばね定数を K (KN/m^2)とそれぞれ表すと、弾性床上の梁理論で用いる荷重項 P (KN/m)は、$P=K(U_G-U_P)+S+F$ で求められる。ここに、地盤ばね定数と力はいずれも構造物部材の周方向分割長 L (m)当りの値である。K/L は地盤反力係数 k (KN/m^3)を表す。また、$P-F$ は構造物周面に働く L (m)当りの土圧総量 E (KN/m)を表し、E/L が土圧 (KN/m^2)となる。

現行耐震設計法の留意点と問題点：その 1 常時の検討 現行設計法が採用する常時の土圧・活荷重は、これまで指摘してきたように[1), 11)]、鉛直荷重の等分布形状の仮定に問題がある。また FRPM 管と uPVC 管で仮定されている水平荷重の三角形分布はこれまで測定された例がなく、さらに鉄筋コンクリート管と矩形カルバートの水平荷重は台形分布が仮定されているが、その大きさは前者が主働土圧、後者が静止土圧を採用しており、整合性に欠ける。

現行耐震設計法の留意点と問題点：その 2 地震時の検討

1. ばねモデルの採用 連続体モデルを用いた著者らの検討[1)]によれば、土と構造物の相互作用を支配する要因は、土・構造物の接触面での境界条件、地盤側方の境界条件、および地盤と構造物の相対剛性の 3 つである。ところが、応答変位法が採用するばねモデルはこれらの支配要因を正当に評価していないところに問題がある。

① 土・構造物の接触面の境界条件は滑動条件(土・構造物の垂直方向の応力、および変位は等しいが、せん断方向

キーワード: 土と構造物の動的相互作用、カルバート、現行耐震設計法、連続体モデル、ばねモデル
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

の応力と変位は不連続で、接触面で発揮されるせん断抵抗はゼロ)に近いことが確認されており、ばねモデルが仮定する結合条件(土・構造物の応力・変位が連続)とは全く異なる。さらにこのことは、地震時の地盤せん断応力τ_{xy}をカルバートの周面に作用させるという、FRPM 管、uPVC 管、およびプレキャストボックスカルバートの耐震計算例で採用されている手法に基本的な問題があることを示す。

② 地盤のばね定数 K (KN/m^2)を決める地盤反力係数 k (KN/m^3)は、載荷重 (KN/m^2)～地盤変位量 (m)曲線の勾配として定義される工学量であり、工学的条件(例えば、地盤側方の境界条件、地盤・構造物の接触面の境界条件、構造物の大きさ、載荷条件など)によって変化するので、地盤条件のみでは決定できない。これまで、実験とばねモデルによる解析の比較、あるいは連続体モデルとばねモデルの解析の比較から、地盤の弾性定数と k の関係を求めようとする試みがなされてきた[12]が、著者らが知る限り、成功例はまだない。

③ 円形管の場合、法線方向地盤反力係数 k_n (KN/m^3)は水平方向地盤反力係数 k_h (KN/m^3)と等しく、また接線方向地盤反力係数 k_s (KN/m^3)は $0.3k_h$ に等しいものと仮定しているが、k_n と k_s は角度によって方向が変化するので、水平方向地盤反力係数 k_h との関係が不明確である。

2. 鉄筋コンクリート管の耐震計算例

① 耐震計算例[3]の式(3-3)と式(3-4)に示された法線ばね定数 K_h (KN/m^2)、および接線ばね定数 K_s (KN/m^2)は、管の単位奥行き当りの定数と定義されているが、法線方向と接線方向の地震力を求める式(3-13)と式(3-14)の意味するところからすれば、K_h と K_s は部材の周方向分割長 L (m)当りのばね定数と修正すべきである。

② 計算例に示された X・Y 方向モデルの水平地震力 H (KN/m)の算定式(3-15)は、ベクトル和になっていないため、$H=(K_h\sin^2\theta+K_s\cos^2\theta)\Delta U_h$ と修正すべきである。なお別報 5)ではこの式で H を求めている。

3. FRPM 管・uPVC 管の耐震計算例

① 耐震計算例が依拠する大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン(案)[4]において地震時ばね定数と呼称されている係数(K_n、K_n')は、均質無限弾性体中に存在する円孔の内面に垂直応力とせん断応力が境界応力として働く場合に対する連続体モデル(図-3)の解から、円孔表面の変位と境界応力の関係を表す係数として求めたものであり、地盤反力係数 k (KN/m^3)や地盤ばね定数 K (KN/m^2)とは関係がない。係数(K_n、K_n')は、土・構造物の接触面の境界条件として実際とは異なる結合条件に相当する条件から求められているところに問題がある。すなわち、円孔内面に働くせん断応力によって弾性地盤に接線方向変位が生じると仮定しているが、実際には構造物の表面で地盤が滑動するので、せん断応力と地盤変位には関連性がない。

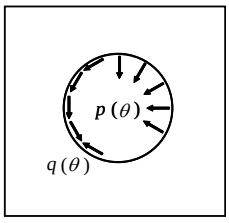

図-3 K_n・K_n'決定のための連続体モデル[4]

② つぎに、連続体モデルの解は、著者らが指摘したように、地盤側方の境界条件(この場合、無限遠方での境界条件)によって大きく変化する。図-3 の連続体モデルでは、無限遠方で境界応力がゼロの条件を採用しているが、この地盤側方の境界条件は疑問である。あえて図-3 のモデルを用いるのであれば、常時に対しては盛土型設置方式と対応する K_0 条件[1]を、また地震時に対しては純粋せん断に相当する境界条件[13]をそれぞれ与えるべきであろう。

③ これまでガイドライン(案)と同様に、連続体モデルによる解を直接、設計に用いようとした試みが幾つかあるが、実際の現象は連続体モデルですべて説明できるような単純なものでないので、いずれも成功していない。そのため、著者らは連続体モデルの解を、土と構造物の相互作用を定性的に説明するためにのみ用いてきた。なお、動的遠心実験の結果を割合良く近似する FEM 解析の手法と実験結果との比較を文献 9), 10)に示したので、参考にして頂きたい。

参考文献 1)東田・三笠(1986): 弾性論による埋設管の土圧の検討, 土木学会論文報告集, 第 376 号/Ⅲ-6, pp.181-190. 2)日本下水道協会(1997): 下水道施設の耐震対策指針と解説. 3)日本下水道協会(2001): 下水道施設耐震計算例. 4)建設省土木研究所(1992): 大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン(案). 5)向市他(2009): 下水道幹線カルバートの動的遠心実験に対する現行耐震設計法による予測, 64 回土木学会年講(投稿中). 6)井上他(2009): 下水道幹線カルバートの動的遠心実験(実験方法. 7)向市他(2009): 下水道幹線カルバートの動的遠心実験(カルバート形状を変えた場合の実験結果). 8)狭間他(2009): 下水道幹線カルバートの動的遠心実験(円形管で剛性を変えた場合のの実験結果). 9)東田他(2009): 下水道幹線カルバートの動的遠心実験に対する FEM 弾性解析(解析方法). 10)吉村他(2009): 下水道幹線カルバートの動的遠心実験に対する FEM 弾性解析(解析結果). 以上 6)～10)はいずれも第 44 回地盤工学研究発表会, 投稿中. 11)吉村・東田・李(1997): 遠心模型によるたわみ性埋設管の土圧・変形挙動の検討, 土木学会論文集, No.561, Ⅲ-38, pp.245-255. 12)例えば, Gumbel(1983): Analysis and design of buried flexible pipes, A doctoral thesis submitted to the University of Surrey. 13)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, 第 63 回土木学会年講, Ⅲ-044, pp.87-88.