

I - 429

応答変位法による大口径立坑の耐震計算モデルに関する検討

(株)鴻池組第一技術部○正会員 河西 寛
 神戸大学工学部 正会員 高田 至郎
 京都大学防災研究所 正会員 佐藤 忠信
 (株)鴻池組第一技術部 正会員 嶋村 貞夫

1. まえがき

応答変位法による立坑の耐震設計では、立坑を梁に地盤をばねにモデル化し、地震時の地盤変形を強制変位として地盤ばねを介して梁に与え、軸方向の地震時断面力を計算することが一般的である。

本報告では、外径 29m の大口径立坑を例とし、軸対称 FEM と梁・ばねモデルを用いた応答変位法による解析結果を比較することにより、大口径立坑に対する梁・ばねモデルの適用性について検討した。

2. 検討対象構造物および地盤

検討の対象とした立坑は、外径 29m、内径 25m、長さ 75m、底版厚さ 5m の底付き円筒形状の鉄筋コンクリート製仮想構造物である。地盤は大阪中心部の地盤を 2 層地盤に理想化したもので、地表面から GL. -30m が沖積粘土層、GL. -30m ~ -90m が洪積砂層とした。表-1 に地盤定数を示す。

3. 解析モデルおよび条件

3.1 軸対称 FEM モデル

軸対称 FEM を用いた解析では立坑の側壁を軸対称(薄肉)シェル要素に、立坑の底版および地盤を軸対称連続体要素にモデル化し、立坑のない地盤だけのモデル全体に図-1 の変形を生じさせる等価節点力を荷重として立坑と地盤の一体モデルに作用させた。解析領域は、水平方向が立坑中心より 150m の範囲、鉛直方向が地表面から GL. -90m までとした。解析に用いた FEM メッシュを図-2 に示す。

3.2 梁・ばねモデル

梁・ばねモデルを用いた解析では、立坑を梁に、立坑側面の地盤を水平方向ばねに、立坑底面の地盤を回転およびせん断ばねにモデル化し、図-1 の立坑底面に対する相対変位を強制変位として立坑側面の地盤ばねを介して梁に与えた。解析モデルを図-3 に、解析ケースと地盤ばね定数を表-2 に示す。なお、地盤ばね定数の評価方法は以下のようにした。

(1) 立坑側面地盤の水平方向ばね定数

① 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編の方法：地盤の動的変形係数から求めた水平方向の地盤反力係数に立坑直径を乗じて算出した。

② 高田の式による方法：無限弾性地盤中の円柱の変形を正弦波状と仮定して波動方程式を解き、その結果より得られたトンネルと地盤との静的相互作用ばね定数¹⁾を用いた。

表-1 地盤定数

地 層	沖積粘土	洪積砂
単位体積重量 γ (tf/m ³)	1.6	1.8
せん断弾性波速度 V_s (m/sec)	125	227
せん断弾性係数 G_s (tf/m ²)	2550	9450
ポアソン比 ν	0.49	0.45
動的変形係数 E_0 (tf/m ²)	7660	27400

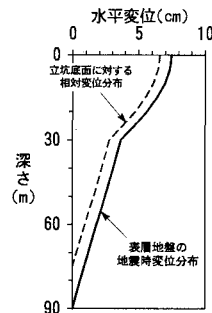


図-1 地震時の地盤変位

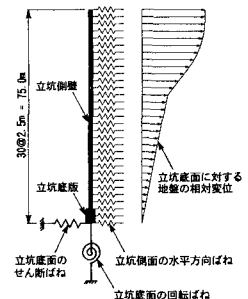


図-3 梁・ばねモデル

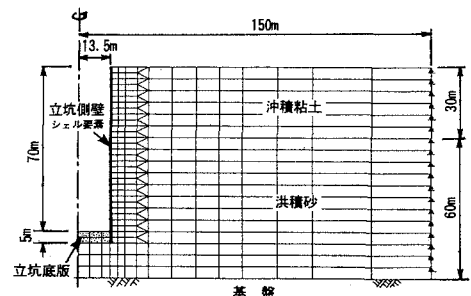


図-2 軸対称 FEM モデル

(2) 立坑底面地盤の回転およびせん断ばね定数

① 水道施設耐震工法指針・解説の計算例の方法：道路橋示方書に従って求めた立坑底面地盤の地盤反力係数に立坑底版の断面積、断面2次モーメントを乗じて算定した。

② 半無限弾性地盤上の剛な円版に関する理論解：半無限弾性地盤上の剛な円版に関するBrowicaとBycroftの静的ばね定数²⁾で評価した。

表-2 解析ケースおよび地盤ばね定数

解析ケース	立坑側面の水平方向ばね定数 K_h (tf/m ²)		底面の回転ばね定数 K_θ (tf.m/rad) & せん断ばね定数 K_s (tf/m)	
	評価方法および算定式	採用値	評価方法および算定式	採用値
ケース 1	① 道路橋示方書 V 耐震設計編の方法 $K_h = k_h \cdot D$ k_h : 水平方向の地盤反力係数 (tf/m ³) D : 立坑の直径 (m)	沖積粘土 $K_h = 20050$ 洪積砂 $K_h = 72180$	① 水道施設耐震工法指針の計算例の方法 $K_\theta = k_v \cdot I$, $K_s = k_v / 3 \cdot A$ k_v : 鉛直方向の地盤反力係数 (tf/m ³) I : 底版の断面 2 次モーメント (m ⁴) A : 底版の断面積 (m ²)	回転ばね $K_\theta = 5.486 \times 10^8$ せん断ばね $K_s = 19.57 \times 10^5$
ケース 2	同 上	同 上	同 下	同 下
ケース 3	② 高田の式による方法 $K_h = 16 G_s$ G_s : 地盤のせん断弾性係数 (tf/m ²)	沖積粘土 $K_h = 40800$ 洪積砂 $K_h = 151200$	② 半無限弾性地盤上の剛円版に関する理論解 $K_\theta = \frac{8 G_s r}{3(1-\nu)}$, $K_s = \frac{32(1-\nu) G_s r}{7-8\nu}$ G_s : 地盤のせん断弾性係数 (tf/m ²) ν : 地盤のポアソン比 r : 底版の半径 (m)	回転ばね $K_\theta = 1.397 \times 10^8$ せん断ばね $K_s = 7.093 \times 10^5$

4. 解析結果および考察

図-4は、立坑側壁の曲げ応力度と立坑側壁の円環断面内に発生する最大せん断応力度で、梁・ばねモデルと軸対称FEMの解析結果を比較したものである。

立坑底面付近の曲げ応力度は、ケース2とケース3は軸対称FEMと概ね一致するが、ケース1はこれらの2倍以上になり、梁・ばねモデルでは立坑底面の回転およびせん断ばね定数の評価が重要であることが分かる。大口径立坑に梁・ばねモデルを適用する場合、立坑底面地盤の回転およびせん断ばね定数は半無限弾性地盤上の剛な円版に関する静的ばね定数を利用できると考えられる。

一方、せん断応力度は、今回の解析では梁・ばねモデルと軸対称FEMが必ずしもよく一致しているとは言えない。これは、大口径の立坑では立坑のロッキングや曲げ変形に伴って生じる鉛直方向変位が増大するため、鉛直方向地盤ばねの影響を無視できなくなるためと考えられる。したがって、大口径立坑に対して従来の梁・ばねモデルを適用する場合には、ロッキングや曲げ変形に対して働く鉛直方向ばねの影響を考慮して立坑側面地盤の水平方向ばね定数を評価する必要があると思われる。

5. あとがき

本報告は地下空間の活用と技術に関する研究協議会³⁾（座長：京都大学土岐憲三教授）の第3分科会耐震グループ（代表：神戸大学工学部高田至郎教授）の研究成果の一部をとりまとめたものである。耐震計算モデルに関する検討は、本報告で取り上げたモデル以外に軸対称シェル・ばねモデルや2次元FEMに対する検討も実施しているので、機会があれば報告したいと思う。最後に、御討議頂いた委員、WGのメンバーの皆様へ感謝致します。

【参考文献】 1) 高田, 肖: 地下空間の活用と技術に関する研究協議会第3分科会耐震グループ第4WG検討会, 平成4年7月8日配布資料 2) 例えば, 土質工学会: 土と構造物の動的相互作用, 土質基礎工学ライブラリーNo.9, pp55, 1973. 3) 土岐, 足立, 松井: 関西における地下空間の活用と技術に関する研究動向(その3), 地下空間シンポジウム1993, 土木学会, pp189~198, 1993.

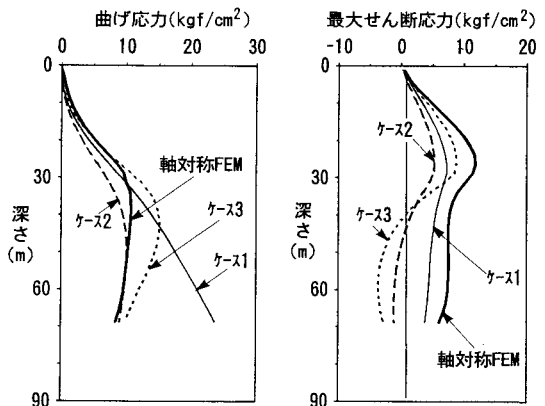


図-4 梁・ばねモデルと軸対称FEMの解析結果の比較