

地盤の擬似三次元解析による地下構造物の耐震解析手法

日本原子力発電(株) 正会員 坂上 武晴 中房 悟
 東電設計(株) 正会員 寺村 芳明 北爪 貴史
 鹿島建設(株) 正会員 浜田 友康 高原 秀夫 戸田 孝史

1. はじめに

地中深く埋め込まれた線状構造物の耐震設計においては、構造物～地盤の鉛直断面を二次元平面ひずみ状態にモデル化したFEM(応答震度法など)で安全照査を行うことが一般的である。一方、鉛直地下構造物のように奥行き方向が比較的短い構造物においては、作用する地震時土圧を評価する際に、構造物への三次元的な作用を無視できない場合がある。本報告では、平面ひずみモデルの面外に側方地盤の広がり模擬する面外バネを付けた二次元静的解析(擬似三次元解析)により、三次元的に作用する地震時土圧を評価する方法を検討した。以下にその概要を示す。

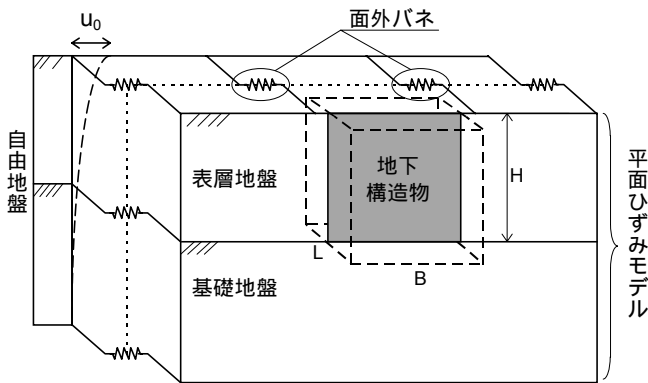
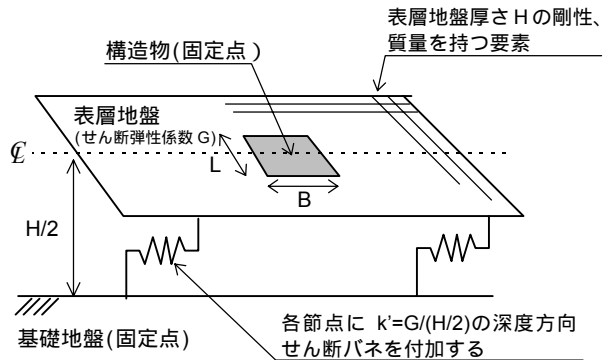


図-1 擬似三次元解析モデルの概念図



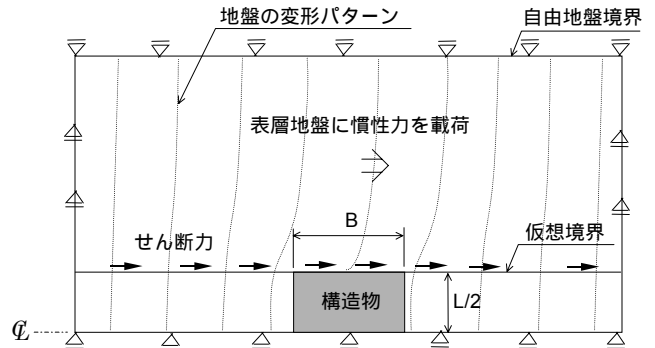
(a) 検討用モデルの考え方

2. 検討方法

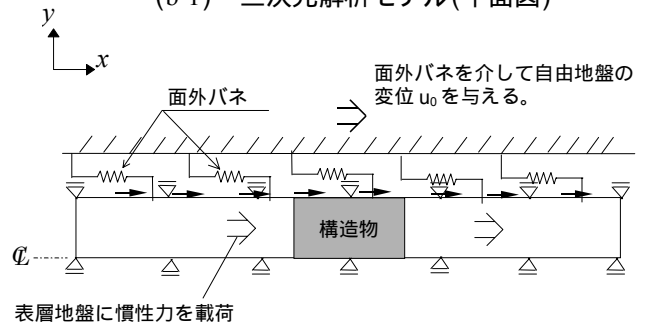
考案した擬似三次元解析手法は、図-1に示すように、平面ひずみモデルに静的地震力(地震震度)を載荷すると同時に、応答変位法の考え方を導入して、モデル面外に取り付けたバネの外側に自由地盤の地震時変位(u_0)を強制変位として載荷する方法である。

この擬似三次元解析手法では、FEM各節点に取り付ける面外バネの設定方法が問題となる。そこで、構造物と周辺地盤を単純化した図-2(a)の三次元効果検討用モデルにより、バネの大きさ及び分布を検討した。同モデルは、剛性が大きな地下構造物を固定点とし、周囲の表層地盤は、せん断バネ($G/(H/2)$)で基礎地盤から支持される厚さHの平板としてモデル化したものである。図-2の(b-1)は同モデルの平面図で、周辺地盤から構造物に作用する土圧を評価できる三次元モデルである。一方(b-2)は、周辺地盤の土圧を面外バネを介して自由地盤の変位による外力として評価した擬似三次元モデルである。これら(b-1)と(b-2)の両モデルのx方向に地震震度を載荷し、相互の解析結果の比較から仮想境界上の面外バネの大きさ及び分布を評価する。

表-1に検討ケースを示す。



(b-1) 三次元解析モデル(平面図)



(b-2) 擬似三次元解析モデル(平面図)

* 解析の便宜上モデル(b-1)、(b-2)は、表層平板厚さ、深度方向せん断バネ、面外バネを表層厚さHで除した単位厚さモデルとする

図-2 三次元効果検討用モデル

3. 検討結果

モデル(b-1)の結果から、下式により仮想境界上の面外バネを算出して図-3に示す。

$$\text{面外バネ}(k) = \frac{\text{仮想境界上のせん断力}(\tau)}{\text{自由地盤の変位}(u_0) - \text{仮想境界上の変位}(u(0))}$$

面外バネの分布は、 H を変化させたCASE5を除き、CASE1~4でほぼ同じである。また、各ケースとも構造物周辺(特に隅角部)で大きく、構造物側方では小さい。

この様に、面外バネの大きさは仮想境界上の位置により異なるが、実際の複雑なモデルで各位置のバネ定数を変化させることは必ずしも容易ではない。そこで、面外バネを、仮想境界上のせん断応力による重み付け平均値 \bar{k} (図-3に併記)で代表させることとし、CASE1~4についてモデル(b-2)による解析を実施した。

表-2は、モデル(b-1)と(b-2)で構造物に作用する土圧を比較したものである。この結果から、面外バネを一定とした擬似三次元解析でも、構造物に三次元的に作用する土圧をほぼ適切に評価できることがわかった。

4. 理論的考察

構造物に作用する土圧への影響が大きい構造物側面部に着目すると、構造物幅 B が大きくなれば表層地盤は、図-4に示すような深度方向せん断バネを持つ単位幅の一次元のせん断梁モデルに近似できる。

微小区間についてのつり合い式から、微分方程式は以下となる。

$$G \frac{d^2 u}{dy^2} - k'(y) \cdot u(y) = -p(y)$$

上式を、建屋位置($y=0$)で、 $\tau = \tau_a$ 、 $u = 0$ 、自由地盤($y = H$)で、 $\tau = 0$ 、 $u = u_0$ なる境界条件で解くと、建屋側面でのせん断応力 τ_a と u_0 の関係として次式が導かれる。

$$\tau_a = \sqrt{G \cdot k'} \times u_0$$

今回の検討モデルでは、 $k' = G / (H/2) / H$ (単位深さ)であるから、面外バネ k は以下となる。

$$k = \sqrt{G \cdot k'} = \sqrt{2} \cdot G / H$$

上式は、面外バネが「表層地盤のせん断剛性」と「表層地盤厚さ」の関係式から求まることを示している。

上式から、 $H=68\text{m}$ (CASE1~4)のとき $k = 1040 \text{ (kN/m}^3)$ 、 $H=96\text{m}$ (CASE5)のとき $k = 737 \text{ (kN/m}^3)$ が得られ、図-3に示したFEMからせん断応力の重み付け平均で算出した \bar{k} ともよく一致する。

5. おわりに

二次元静的解析モデルに面外バネを付加する疑似三次元解析手法によって、地下構造物に三次元的に作用する地震時土圧を適切に評価できることがわかった。また、今回設定したパラメータ(構造物形状、地盤剛性)の範囲では、面外バネは構造物側面中央の表層地盤を一次元的にモデル化した理論解($k = \sqrt{2} \cdot G / H$)によって求めることができる。本検討手法は比較的簡易であり、三次元的な地震時土圧を無視することができない地下構造物の形状や断面の設定時に、将来有効に活用することができると考えられる。今後は、本検討手法を基本に、構造物の形状や地盤条件などのパラメータに着目し、展開していくことを考えている。

表-1 検討ケース

検討ケース	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
構造物形状 (m)	B: 100 L: 100 H: 68	B: 220 L: 100 H: 68	B: 100 L: 200 H: 68	B: 100 L: 100 H: 68	B: 100 L: 100 H: 96
表層地盤 G (kPa)	50000				
表層地盤ポアソン比	0.49		0.33		0.49

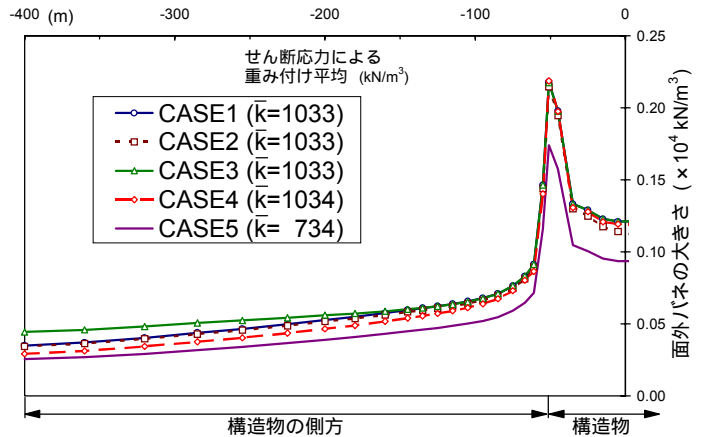


図-3 仮想境界上の面外バネの分布 ($\times 10^4 \text{ kN/m}^3$)

表-2 構造物に作用する土圧 ($\times 10^3 \text{ kN/m}$)

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
三次元モデル	64.3	84.5	97.2	59.6
擬似三次元モデル	62.8	82.6	97.1	56.8

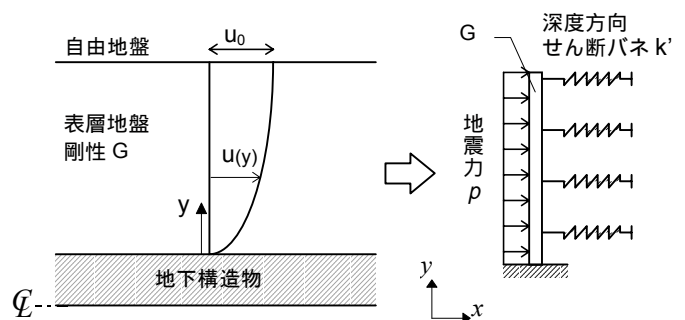


図-4 構造物と表層地盤の理論モデル(平面図)