

(29) N 次のせん断振動まで考慮した擬似 3 次元地盤モデルの提案

熊谷組技術研究所 正員 鈴木猛康

1. まえがき

擬似 3 次元地盤モデル (Tamura, C. and Suzuki, T., 1987)¹⁾ は、3 次元不整形表層地盤の地震応答解析のための簡便モデルとして提案され、3 次元表層地盤中の地中線状構造物の地震応答解析のための地盤の応答変位を時刻歴で解析するために利用されている^{2), 3)}。しかし、このモデルでは地盤ブロックあるいは土柱のせん断基本振動のみを取り扱っているため、せん断基本振動の卓越する表層地盤の応答変位を地盤の 3 次元不整形性を考慮して解析するには非常に優れているが、加速度応答にはさらに高次のせん断振動も寄与するので、一般に実際よりも最大応答加速度は小さい解析結果を与えてしまう。そこで擬似 3 次元地盤モデルを、3 次元不整形表層地盤の地震時変位応答のみならず、加速度応答のシミュレーションも可能にするために、土柱の N 次せん断振動まで取り扱えるようにモデルを拡張した。本論文では、このような拡張擬似 3 次元地盤モデルの定式化について説明し、解析例によってその有効性を示す。

2. 拡張擬似 3 次元地盤モデルの定式化

図-1 に拡張擬似 3 次元地盤モデル (EXQ3D) の概念図を示した。N 次せん断振動まで取り扱う場合には、

(a) 図に示す 3 次元表層地盤は (b) 図に示すような擬似 3 次元地盤モデル N 組によって置き換えられる。

(b) 図に示した n 次せん断振動系モデルを例にとって、本モデルの定式化を簡単に説明する。

n 次せん断振動系の i 節点の集中質量およびその質点 i と基盤の間のせん断バネ K_3 は、次のように定義することができる。

$$M_i^{(n)} = \lambda_{i,n} \int_0^{H_i} m_i(z) dz \quad (1)$$

$$K_{3x,i}^{(n)} = K_{3y,i}^{(n)} = \omega_{i,n}^2 M_i^{(n)} \quad (2)$$

ここで、 $M_i^{(n)}$ は土柱 i の n 次せん断振動モードの有効質量、 $K_{3x,i}^{(n)}$ 、 $K_{3y,i}^{(n)}$ は $M_i^{(n)}$ と基盤の間のせん断バネ定数、 $m_i(z)$ は土柱 i の深さ z における質量、 $\lambda_{i,n}$ は土柱 i の n 次せん断振動モードの有効質量比、 $\omega_{i,n}$ は土柱 i の n 次せん断振動の円振動数、 H_i は土柱 i の高さである。また、n 次せん断振動系の i 節点の集中質量およびその質点 i と基盤の間のダンパーの減衰係数 C_3 は、次式で与えることができる。

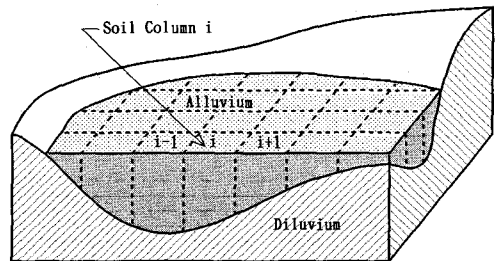
$$C_{3x,i} = C_{3y,i} = \frac{2D_{i,n}}{\omega_{i,n}} K_{3x,i}^{(n)} = \frac{2D_{i,n}}{\omega_{i,n}} K_{3y,i}^{(n)} \quad (3)$$

ここで $D_{i,n}$ は土柱 i の n 次せん断振動に関する減衰定数であり、多層で構成される土柱の場合には、n 次せん断振動の変位関数 $F_{i,n}(z)$ による重み付けを (4) 式のように行う。

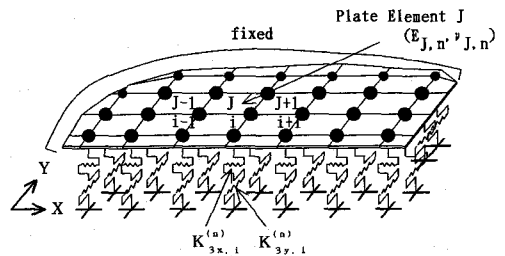
$$D_{i,n} = \frac{\int_0^{H_i} h_{i,n}(z) \cdot |F_{i,n}(z)| dz}{\int_0^{H_i} |F_{i,n}(z)| dz}, \quad F_{i,n}(z) = \beta_{i,n} f_{i,n}(z) \quad (4)$$

ここで $\beta_{i,n}$ は n 次せん断振動の刺激係数である。次に n 次せん断振動系の平板要素 J の構成について説明する。四角形平板要素 J のヤング率 $E_{J,n}$ は、要素を構成する 4 節点において、単位厚みの平板に置き換えたときの 4 つの等価ヤング率の平均として与えることができる。

$$E_{J,n} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 R_{i,n}, \quad R_{i,n} = \int_0^{H_i} E_i(z) \cdot |F_{i,n}(z)| dz \quad (5)$$



(a) Irregularly bounded three-dimensional surface ground



(b) n-th mode of shear vibration system in EXQ3D model

図-1 3次元表層地盤と n 次せん断振動系

ここで、 $R_{i,n}$ は土柱 i の n 次せん断振動に関する等価ヤング率であり、土柱 i のヤング率の深さ分布 $E_i(z)$ と $F_{i,n}(z)$ の絶対値を深さに関して積分することによって定義している。平板要素 J のポアソン比 ν_J についても、要素を構成する 4 節点のポアソン比 $\nu_{i,n}$ の平均として与えることができ、多層地盤の場合は、土柱 i のポアソン比の深さ分布 $\nu_{i,n}(z)$ に変位関数 $F_{i,n}(z)$ による重み付けを行って、 $\nu_{i,n}$ を (4) 式と同様に与えることができる。以上のように、平板要素 J のヤング率とポアソン比が与えられたので、これらを用いて平面応力状態の B および D マトリックスを構成すれば、平板要素 J の要素剛性マトリックス $[K_2]_J^{(n)}$ が (6) 式のように与えられる。

$$[K_2]_J^{(n)} = \int_{\Omega_J} B^T D B dv \quad (6)$$

要素 J の減衰マトリックス $[C_2]_J^{(n)}$ は以下のように与えることができる。

$$[C_2]_J^{(n)} = \frac{2D_{i,n}}{\omega_{J,n}} [K_2]_J^{(n)}, \quad \omega_{J,n} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \omega_{i,n} \quad (7)$$

ここで $D_{J,n}$ は要素 J の減衰定数であり、要素を構成する 4 節点の減衰定数の平均として求めることができる。(6) 式および (7) 式をを全要素に関して合成すれば、要素全体剛性マトリックス $[K_2]^{(n)}$ および要素全体減衰マトリックス $[C_2]^{(n)}$ が得られる。

$$[K_2]^{(n)} = \sum_{j=1}^{N_e} [K_2]_j^{(n)}, \quad [C_2]^{(n)} = \sum_{j=1}^{N_e} [C_2]_j^{(n)} \quad (8)$$

基盤と質点間のせん断バネ定数 K_{3x} 、 K_{3y} で構成された剛性マトリックスを $[K_3]^{(n)}$ 、基盤と質点間のダンパーの減衰係数 C_{3x} 、 C_{3y} で構成された減衰マトリックスを $[C_3]^{(n)}$ とすれば、 n 次せん断振動系の全体剛性マトリックス $[K]^{(n)}$ 、全体減衰マトリックス $[C]^{(n)}$ は、次のように与えられる。

$$[K]^{(n)} = [K_2]^{(n)} + [K_3]^{(n)}, \quad [C]^{(n)} = [C_2]^{(n)} + [C_3]^{(n)} \quad (9)$$

したがって、 n 次せん断振動系の擬似 3 次元地盤モデルの運動方程式が、以下のように得られる。

$$[M]^{(n)} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{bmatrix} + [C]^{(n)} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} + [K]^{(n)} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = -[M]^{(n)} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{w} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで $[M]^{(n)}$ は n 次の有効質量マトリックス、 X 、 Y は質点の X 方向、 Y 方向変位、 $\ddot{u}$ 、 $\ddot{w}$ は X 、 Y 方向の入力地震動である。表層地盤の基本せん断振動から N 次のせん断振動まで取り扱う場合、(10) 式の運動方程式が N 組存在し、 N 組の運動方程式を個々に解くと、以下の式によって表層地盤の任意の位置における地震時応答を求めることが可能となる。

$$\ddot{x}_i(z, t) = \sum_{n=1}^N \ddot{x}_{i,n}(t) F_{i,n}(z) + \ddot{u}_i(t), \quad \ddot{y}_i(z, t) = \sum_{n=1}^N \ddot{y}_{i,n}(t) F_{i,n}(z) + \ddot{w}_i(t) \quad (11)$$

$$\dot{x}_i(z, t) = \sum_{n=1}^N \dot{x}_{i,n}(t) F_{i,n}(z), \quad \dot{y}_i(z, t) = \sum_{n=1}^N \dot{y}_{i,n}(t) F_{i,n}(z) \quad (12)$$

$$x_i(z, t) = \sum_{n=1}^N x_{i,n}(t) F_{i,n}(z), \quad y_i(z, t) = \sum_{n=1}^N y_{i,n}(t) F_{i,n}(z) \quad (13)$$

ここで $\ddot{x}_i(z, t)$ 、 $\dot{x}_i(z, t)$ および $x_i(z, t)$ は節点 i の深さ z 、時刻 t における X 方向の絶対加速度、相対速度、相対変位であり、 $\ddot{y}_i(z, t)$ 、 $\dot{y}_i(z, t)$ および $y_i(z, t)$ は同様な Y 方向の絶対加速度、相対速度、相対変位である。

3. 数値解析例と考察

拡張擬似 3 次元地盤モデルにより表層地盤の基本せん断振動よりも高次のせん断振動を考慮することの有効性と、優位性を示すために、図-2 に示す 3 次元表層地盤を拡張擬似 3 次元地盤モデルによる地震応答解析コード "EXQ3D" によってモデル化し、数値解析を行った。表層地盤は中央部で 4 層構造となっており、図-3 に示すように有効質量比は基本せん断振動モードで 0.47、2 次せん断振動モードで 0.18、3 次せん断振動モードで 0.20 であり、これよりさらに高次のせん断振動では極めて小さい。したがって、"EXQ3D" による数値解析では、基本せん断振動のみ取り扱うケース (1)、基本せん断振動 + 2 次せん断振動を考慮するケース (2) および基本せん断振動から 3 次せん断振動まで取り扱うケース (3) の 3 ケースとした。なお、解析に用いた地盤の物性値は図-3 の右に示す通りであり、減衰定数はすべて 0.1 に固定した。また、入力地震動は 1968 年十勝沖地震、八戸港の NS および EW 成分の主要動 10 秒間を最大加速度 150gal

図-2
解析に用いた3次元
表層地盤

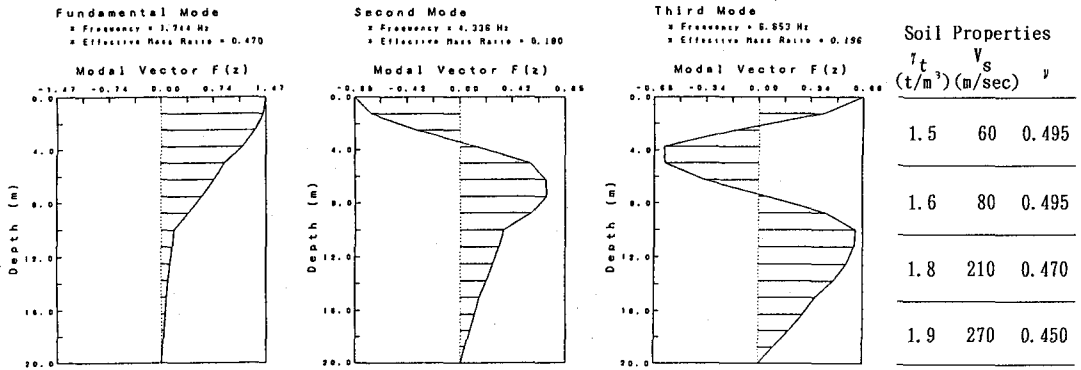
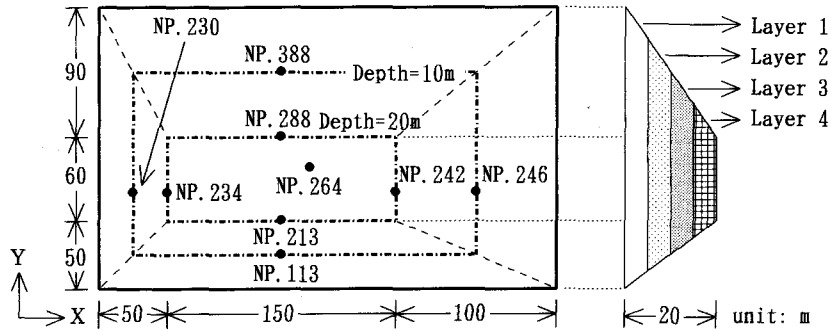


図-3 表層地盤の土質構成と卓越せん断振動モード

表-1 地震応答解析で得られた各解析ケースの絶対加速度、相対変位の最大値の比較

Location (NP, EXQ3D)	Depth (m)	Max. Acceleration (gal)						Max. Displacement (cm)					
		X-direction			Y-direction			X-direction			Y-direction		
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
264	0.0	286	325	313	217	248	242	2.51	2.49	2.50	1.99	1.87	1.90
264	-5.0	195	204	204	160	220	217	1.52	1.58	1.55	1.21	1.34	1.31
264	-10.0	147	153	164	146	167	184	0.30	0.33	0.36	0.24	0.32	0.37
264	-15.0	149	151	156	148	153	164	0.11	0.12	0.14	0.09	0.12	0.15
288	0.0	298	337	325	214	242	237	2.53	2.55	2.55	1.97	1.84	1.87
288	-10.0	146	153	163	147	167	184	0.30	0.32	0.35	0.23	0.31	0.36
242	0.0	316	350	339	208	230	221	2.57	2.58	2.59	1.93	1.78	1.81
242	-10.0	147	153	163	148	168	186	0.30	0.31	0.34	0.23	0.31	0.36
213	0.0	319	355	344	210	251	214	2.61	2.62	2.62	1.74	1.61	1.64
213	-10.0	146	152	163	148	165	185	0.31	0.31	0.34	0.21	0.29	0.34
234	0.0	308	328	317	201	226	221	2.39	2.39	2.40	1.82	1.70	1.73
234	-10.0	149	157	166	146	166	184	0.28	0.30	0.33	0.21	0.30	0.35
388	0.0	270	270	265	192	198	193	1.81	1.79	1.79	1.25	1.23	1.23
246	0.0	273	267	267	174	180	179	1.75	1.72	1.72	1.31	1.26	1.27
113	0.0	272	266	266	223	233	233	1.73	1.71	1.71	1.32	1.29	1.29
230	0.0	242	238	240	179	198	193	1.56	1.54	1.54	1.19	1.18	1.19

—— EXQ3D (3) , ——— EXQ3D (2) , EXQ3D (1)

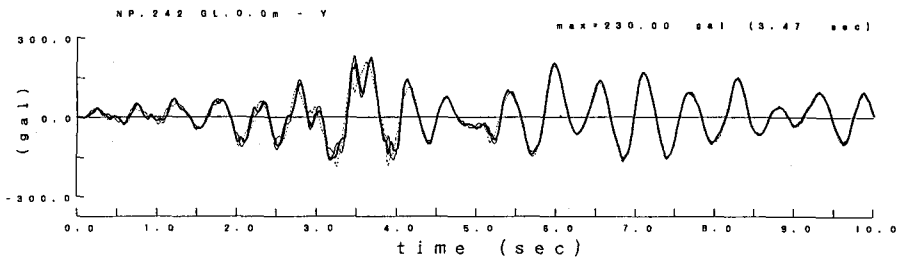


図-4 考慮するせん断振動モード次数による加速度応答波形の相違

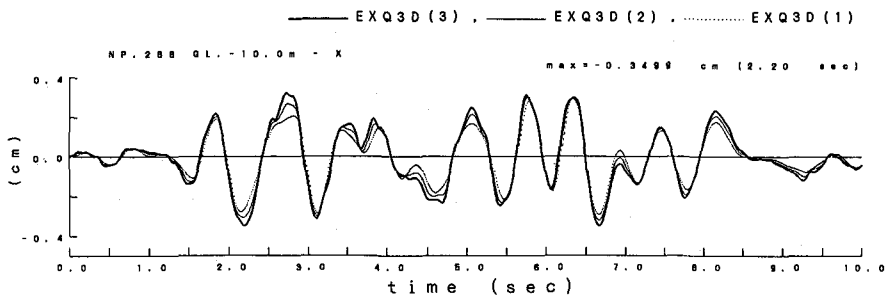


図-4 考慮するせん断振動モード次数による変位応答波形の相違

に調整し、それぞれ水平Y、X方向に入力した。

表-1は、解析結果のうち図-3中の9節点、16点の絶対加速度、相対変位の最大値について、3つの解析ケースで比較したものである。絶対加速度ではケース(1)と(3)の差は、だいたい10%前後、最大で20%程度であり、地層厚が薄く、2次、3次のせん断振動モードがほとんど寄与しない4点を除けばケース(3)の解析結果の方が大きい。絶対加速度の時刻歴応答の3つの解析ケースによる相違を示すため、N.P. 242の地表面のY方向の時刻歴波形の比較例を図-4に示した。入力地震動で短周期成分の多い前半の5秒まで、各解析ケース間の時刻歴応答波形の相違が明らかであり、とくに時刻歴応答波形の相違は比較的地表面に近い位置で大きいことがわかった。したがって、不整形表層地盤の加速度応答を求める場合、基本せん断振動よりも高次のせん断振動を考慮する本モデルは有効であると判断される。

次に表-1の中で相対変位の最大値について着目する。地表面近くでは、各解析ケース間で最大値の相違はさほどないが深い位置(15m、10m)においては、ケース(1)の解析結果に比べてケース(3)の解析結果が50%以上も大きくなっており、このような地盤では2次、3次のせん断振動を無視できないことが分かる。図-5はN.P. 277の深さ10mにおけるX方向の相対変位の時刻歴応答波形を、3つの解析ケースで比較して示したものであるが、図-4の加速度応答波形の場合と異なり、全体的にケース(1)、(2)、

(3)の順に波形のピーク近くで変位が大きくなっている。したがって、不整形表層地盤の変位応答を求める場合でも、深い位置の応答に関しては、高次のせん断振動を考慮すべきケースがある。

4. まとめ

本論文では、擬似3次元地盤モデルをN次のせん断振動まで考慮できるよう拡張した。このような拡張により、高次のせん断振動が卓越するような土層構成の表層地盤においては、(1)地表面に近い比較的浅い位置の加速度応答の解析では有効であること、(2)比較的基盤に近い深さの変位応答の解析で有効であることが示された。一般には単一層地盤は希で、地表面からの深度が増すに従って地盤は固くなるので、現実の表層地盤でも2次あるいは3次のせん断振動モードはやすく、解析で示した表層地盤はとくにユニークなものではない。モデル化で必要とされる入力データは基本せん断振動のみ取り扱う従来の擬似3次元地盤モデルと変わらず、節点における土質構成と2次元メッシュのみであり、データ入力の手間や解析時間は3次元FEMに比較して格段に少なくできる。地盤の不整形性が地震動に与える影響が注目されている近年、本解析手法はますます重要になると考えている。

5. 参考文献

- 1) Tamura, C. and Suzuki, T.: A Quasi-three-dimensional ground model for earthquake response analysis of underground structures, Monthly Jour. Inst. Indust. Sci., Univ. of Tokyo, Vol. 39 No.1, pp.37-40, 1987
- 2) Suzuki, T. et al.: Earthquake observation and response analysis of a shield tunnel, Proc. 9th World Conf. Earthq. Eng., Vol.6, pp.563-568, 1988
- 3) Kiyomiya, S. et al.: Seismic response of submerged tunnel by a quasi-three-dimensional ground model, Proc. 8th Japan Earthq. Eng. Symp., Vol.2, pp.1287-1292, 1990

〒 300-22 つくば市鬼ヶ窪下山1043 (株)熊谷組技術研究所 (☎ 0298(47)7501)