

(73) 埋立人工島の地震記録に対する有効応力解析

(株)大林組技術研究所 正会員 ○伊藤浩二
 正会員 江尻讓嗣

1. まえがき

本研究では、地震、波浪等の変動荷重に対して、地盤の非線形挙動が構造物ならびに地盤の動的安定性に与える影響や構造物に作用する動的外力を評価しうる応答解析手法として、新たに動的有効応力解析プログラムEFECTを開発し、その適用性の検討を行っている。

本報では、EFECTによる実地盤の液状化解析において、要素試験で得られる液状化強度特性を適切に反映させるために、要素試験で設定した地盤構成モデルのパラメータから実地盤で用いるパラメータの設定手法を示す。

次に、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震で埋立人工島(神戸市ポートアイランド)で観測された加速度記録に対して、提案したパラメータ設定法に基づく一次元有効応力解析によるシミュレーションを行い、加速度応答波形の比較から解析手法の適用性を検討した。

2. 地盤構成モデル

EFECTに導入した構成モデル(松岡が提案したモデルを応用した繰り返し載荷のモデル¹⁾)の塑性ひずみ増分の比例定数 λ は、せん断、主応力回転、異方圧密、等方圧密の各応力変動(降伏関数に相当)に対して(1)~(4)式で算定される。ここに添字s、r、ac、icは、せん断、主応力回転、異方圧密、等方圧密を意味し、 ϕ_i は内部摩擦角、 C_c 、 C_s は圧縮指数と膨張指数、 e_0 は初期間隙比、 k_s 、 k_c ($=0.44C_c/1+e_0$)は硬化パラメータ、 ϕ_{mo} はモービライズド角、 α は一般軸と主応力軸のなす角、 σ_m は平均応力、 σ_a は大気圧、 m は σ_m のべき係数で $m=0.5$ を仮定する。

応力-ダイレイタンスー関係と比例定数 λ は、(5)、(6)式で表現され、 λ 、 μ はダイレイタンスーパラメータ、 ζ ($=\pm 1$)は荷重パラメータである。

3. 液状化解析で用いるモデルパラメータの設定

任意の初期有効応力を有する実地盤の液状化解析では、要素試験で得られる液状化強度特性が適切に反映される必要がある。そこで、要素試験から設定したモデルパラメータから実地盤の液状化解析で用いるパラメータの設定手法を誘導する。

3.1 非排水条件の要素釣り合い式

非排水条件の要素釣り合い式と残差不平衡力は、通常のFEMで用いるマトリクス表示により(7)~(9)式で表現される²⁾。ここに[K]、[B]は剛性、ひずみマトリクス、 $\{dF\}$ 、 $\{dQ\}$ 、 $\{d\delta\}$ 、 $\{L\}$ は荷重増分、残差不平衡力増分、節点変位増分、影響係数ベクトル、 dp は過剰間隙水圧増分である。また収束計算は、 $\{dQ\}$ を $\{dF\}$ に代入し、所定の許容誤差が得られるまで行う。

3.2 パラメータ設定法

$$\lambda_s = \frac{k_s \sin^2 \phi_i \cos \phi_{mo}}{(\sin \phi_i - \sin \phi_{mo})^2} d\phi_{mo} \quad (1)$$

$$\lambda_{ac} = \frac{k_c \sin \phi_i \sin \phi_{mo}}{(\sin \phi_i - \sin \phi_{mo}) \sigma_m} d\sigma_m \quad (2)$$

$$\lambda_{ac} = \frac{k_c \sin \phi_i \sin \phi_{mo}}{(\sin \phi_i - \sin \phi_{mo}) \sigma_m} d\sigma_m \quad (3)$$

$$\lambda_{ic} = \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{\sigma_m^{m-1}}{\sigma_a^m}\right) \left(\frac{C_c - C_s}{1 + e_0}\right) d\sigma_m \quad (4)$$

$$\frac{d\epsilon_1^p + d\epsilon_3^p}{d\epsilon_1^p - d\epsilon_3^p} = \frac{2\mu}{\lambda} \cos \phi_{mo} \zeta - \frac{2 - \lambda}{\lambda} \sin \phi_{mo} \quad (5)$$

$$\lambda_s, \lambda_r, \lambda_{ac} = (d\epsilon_1^p - d\epsilon_3^p) \zeta \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} dF \\ d\epsilon_v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K & L \\ L^T & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\delta \\ dp \end{Bmatrix} \quad (\because d\epsilon_v = 0) \quad (7)$$

$$\{dQ\} = \int_{\Omega} [B]^T [D^e] \{d\epsilon_p^e\} d\Omega \quad (8)$$

$$\{L\} = L_i = \int_{\Omega} [B_{ii} + B_{2i} + B_{3i}] d\Omega \quad (9)$$

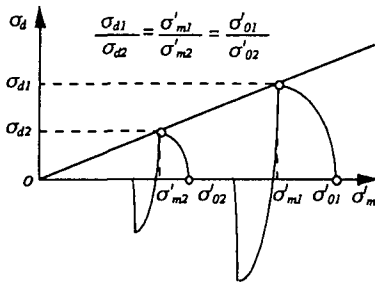


図-1 有効応力経路の模式図

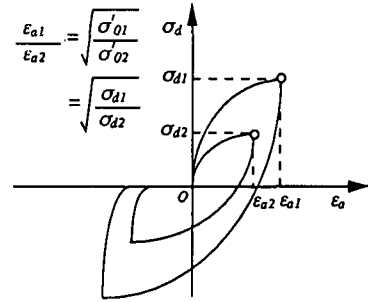


図-2 応力-ひずみ関係の模式図

非排水条件で初期平均有効応力 σ'_{o1} が異なる場合の有効応力経路の $\sigma_d - \sigma'_m$ 関係、応力-ひずみ関係の $\sigma_d - \epsilon_a$ 関係の模式図を図-1、2に示す。ここに σ'_m 、 σ_d 、 ϵ_a は平均有効応力、軸差応力、軸ひずみである。

同じ相対密度の材料の液状化強度比 $\sigma_d / 2\sigma'_o$ は、 σ'_o が σ'_{o1} 、 σ'_{o2} と異なる場合でも同様という特性から、図-1の有効応力経路の相似関係と同様に、過剰間隙水圧増分 dp も(10)式で表現されると仮定する。

(8)式の $|dQ|$ は、 $[D^*]$ が骨格弾性係数 E 、 $|de_{11}|$ が非排水条件で硬化パラメータ k_s を比例定数とすることから、 dp は(11)、(12)式で表現される。ここに α は、同じ相対密度の材料で一定である。

硬化パラメータ k_s は、(11)、(12)式を(10)式に代入すると、(13)式の関係が得られる。したがって同じ相対密度の材料で σ'_o が異なる場合、(13)式の関係から k_s を設定することにより、有効応力経路の相似関係が満足される。

軸ひずみ ϵ_a は、(13)式を用いた場合、 ϵ_a が k_s を比例定数とすることから(14)式の関係が得られ、図-2に示すように、 σ'_o あるいは σ_d の平方根に比例する関係を示す。

3.3 解析結果

非排水単純せん断条件 ($r_{xy} / \sigma'_o = 0.14$) の解析から、(13)式の適用性を検討する。要素試験の初期平均有効応力 $\sigma'_{o2} = 98 \text{ kPa}$ 、要素試験で設定した硬化パラメータ $k_{s2} = 0.1\%$ による $r_{xy} - \sigma'_m$ 関係、 $r_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係を図-3に示す。次に、想定した実地盤の初期平均有効応力 $\sigma'_{o1} = 49 \text{ kPa}$ において、実地盤

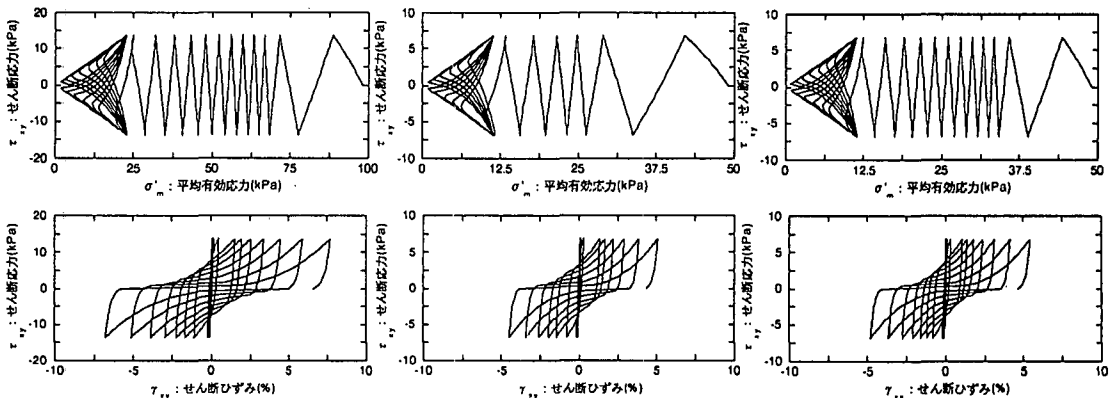


図-3 要素試験 ($k_{s2} = 0.1\%$)

図-4 実地盤 ($k_{s1} = 0.1\%$)

図-5 実地盤 ($k_{s1} = 0.071\%$)

の硬化パラメータが $k_{s1} = k_{s2} = 0.1\%$ の場合、(13)式で設定した $k_{s1} = 0.071\%$ の場合の $r_{xy} - \sigma'_0$ 関係、 $r_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係を図-4、5に示す。

図-5と図-3の $r_{xy} - \sigma'_0$ 関係は相似関係、図-5と図-3の $r_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係は、 γ_{xy} を0.5の平方根で縮小した関係となり、(10)式、(14)式を反映した結果を示す。

図-4と図-3の $r_{xy} - \sigma'_0$ 関係は、相似関係と異なり、実地盤の液状化強度が要素試験の液状化強度と比較して過小に評価される結果を示す。

以上から、液状化解析で用いる実地盤の硬化パラメータ k_{s1} は、要素試験で設定した硬化パラメータ k_{s2} と初期平均有効応力 σ'_{02} 、実地盤の初期平均有効応力 σ'_{01} を用いて(13)式で設定することにより、要素試験で得られる液状化強度特性を適切に反映した液状化解析が可能である。

4. 埋立人工島の有効応力解析

兵庫県南部地震の際に神戸市ポートアイランドの鉛直アレーで観測された加速度記録に対して、一次元重複反射理論のアルゴリズムを基に分離した工学的基盤(ここでは、 $V_s=320\text{m/sec}$ の第二洪積層)における入射波を用いて、一次元有効応力解析によるシミュレーションを行った。

4.1 ポートアイランド鉛直アレー観測と記録の特徴

ポートアイランドの鉛直アレー観測は、神戸市により実施されており、兵庫県南部地震の地震観測記録は関西地震観測研究協会を通じて公表されている。加速度計の設置状況ならびに地盤特性を図-6に示す。

3成分(NS, EW, UD)加速度計は、地表、地表から-16m、-32m、-83m(工学的基盤)の4地点に設置されておりすべての加速度計で記録が得られている。

-83mにおける水平方向の2成分の観測記録を用いて求めたRMS値が最大となる主軸方向(N12W)へ各深度の記録を合成した波形を図-7に示す。ここで図-7は、加速度計の設置されている地盤が比較的良好な地盤であることから、地中の波形にみられたパルス状の鋭いピークを観測時のノイズと考え、目視等により除去している。地震動の加速度レベルは、基盤から表層へと深度が浅くなっても増幅しておらず、特に地表の波形は、工学的基盤波に比べて高振動数成分が少なく、地盤の非線形化または液状化の影響を強く受けているものと思われる。

4.2 工学的基盤入射波の分離

ノイズを消去した合成波から地表/-16m、地表/-32m、地表/-83mの周波数伝達関数を求め、この周波数伝達関数を満たすように、一次元重複反射理論のアルゴリズムを用いて、地盤を線形弾性材料とした場合の等価な剛性と減衰を各層について同定した。浅い地盤から深い地盤へと順次同定し、最後に地表と工学的基盤間の周波数伝達関数を満足する地盤の等価な剛性と減衰を求めた。³⁾次に、同定した等価な剛性と減衰を初期値として、地震動の各周波数成分ごとのひずみを算定しそれに相当する剛性ならびに減衰を用いる等価線形化法により地盤の非線形応答解析を一次元重複反射理論により実施した。ここで地盤の非線形特性は、既往の研究結果を地盤に応じて用いた。^{4),5)}

最終的に求められた工学的基盤における入射波形(2E)を図-8示す。最大加速度は、610galであり、20m程度の小山の頂上にある神戸海洋気象台の洪積地盤地表面での最大加速度観測値が800gal程度、花崗岩の地表面とされる神戸大における最大加速度観測値が300gal程度であることを考慮するとほぼ妥当な値と思われる。

4.3 解析条件

解析モデルは、地表から-13m、-17m、-28m、-37m、-60m、-82mを埋土上部層、埋土下部層、沖積粘土層、沖積砂れき層、上部洪積互層、洪積粘土層、下部洪積互層の境界、地下水位は地表から-2.3mを仮定し、地表から-83mに工学的基盤での波動逸散を考慮する粘性要素を用いた。

埋土上部層、埋土下部層は、液状化強度比 R_{20} をそれぞれ0.2、0.3と仮定した二相の非線形材料、沖積粘土層は、過剰間隙水圧が発生しにくい条件を仮定した二相の非線形材料、沖積砂れき層と洪積層は、二相の線形材料でモデル化した。ここで、埋土上部層、埋土下部層の構成モデルの硬化パラメータ k_s は、(13)式より、各要素の初期平均有効応力 σ'_0 の平方根に比例した値を設定している。また初期有

効応力は $K_0 = 0.5$ を仮定し、解析時間間隔 0.002 秒を用いた。

4.4 解析結果

地表、地表から $16m$ 、 $32m$ 、 $83m$ (工学的基盤) の4地点の加速度応答の経時変化を図-9に示す。

解析による最大加速度応答、最大過剰間隙水圧の深度分布を検討した結果、埋土上部層、埋土下部層で液状化が生じ、最大加速度応答は、埋土下部層と沖積粘土層の境界から急激に低減する結果を示した。その結果、解析による地表の加速度応答は、典型的な液状化における応答波形を示している。

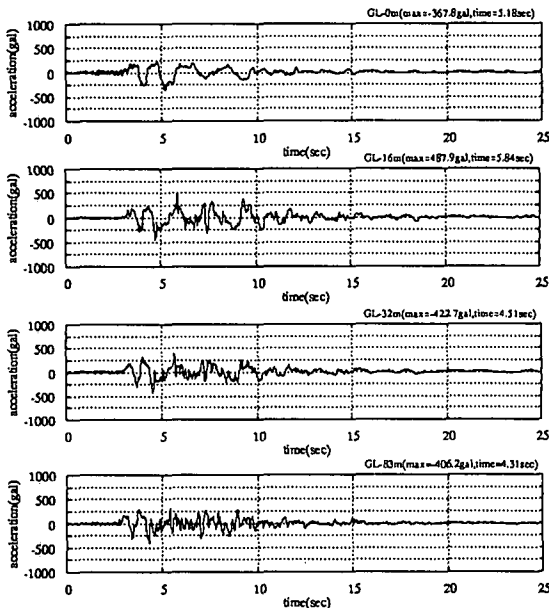


図-7 加速度応答波形(観測)

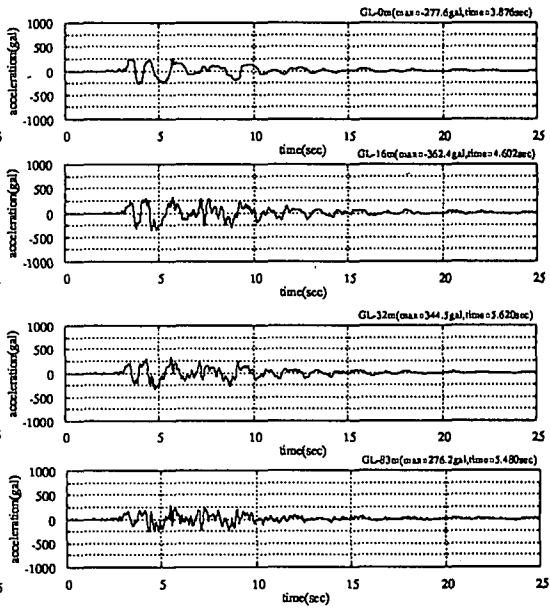


図-9 加速度応答波形(解析)

5. まとめ

要素試験で観測される液状化強度特性を適切に反映した実地盤の液状化解析を行うために、要素試験で設定したパラメータから実地盤のパラメータを設定する手法を示した。またポートアイランドの鉛直アレー観測の加速度記録に対して、提案したパラメータ設定法に基づく一次元有効応力解析によるシミュレーションを行った結果、概ね対応する結果が得られた。

参考文献

- 1) 伊藤他: 液状化解析で用いる地盤構成則に関する考察, 土木学会第49回年次学術講演会, 1994
- 2) 赤井他 (1978): 弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析, No. 269, 土木学会論文報告集, 1978
- 3) 太田: 地震工学への最適化法の適用1, 八戸港SMAC設置地点の地下構造推定, 日本建築学会論文報告集, 1975
- 4) 北澤他: 沖縄県および奄美諸島の大地震時における地盤加速度, 港湾技研資料, No. 396, 1981
- 5) 緒方他: 礫を含んだ不覚乱土の動的変形特性, 第17回土質工学研究発表会講演集, 1982

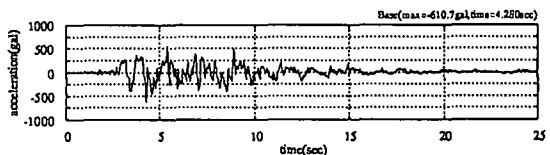


図-8 工学的基盤における入射波形(2E)

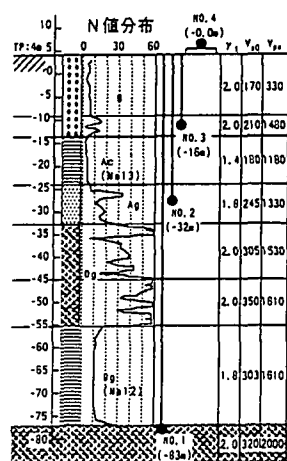


図-6 計器設置状況と地盤特性