

(96) 不整形地盤における2次元建屋地盤系液状化解析

清水建設(株) 大崎研究室 正員 大槻 明
 清水建設(株) 大崎研究室 正員 渡辺 浩平
 清水建設(株) 大崎研究室 正員 竹脇 尚信

1. はじめに 近年、我国の国土事情を反映して水平方向に大きく変化した地層構成を有する地盤に重要構造物の建設が余儀なくされているが、この種の不整形地盤では日本海中部地震に代表される様に、沖積層と洪積層との境界部付近での液状化が数多く報告されている。このため、不整形地盤における液状化現象や液状化がその周辺構造物に与える影響についての定量的検討は、構造物等の耐震性を考える上で極めて重要である。しかしながら、液状化過程を表現し得る解析手法としては、近年になって有効応力解析法が開発され、種々の構成式を用いた解析^{1)~3)}が活発に行われるようになったが、これらの研究の多くは成層地盤を対象としたものであり、液状化過程における不整形地盤やその周辺構造物の地震時挙動に関してはいまだ十分な定量的議論がなされていない。そこで、本研究では不整形地盤における液状化特性およびその周辺構造物に与える影響を明らかにするための解析手法として、2次元液状化解析の一手法を提案し、その適用性を検討した。

2. 液状化解析手法の概要 陽解法による定式化 土の骨格のみに着目して運動方程式をたて、以下に示す様に空間領域については有限要素法により、また、時間軸については中央差分により定式化した⁴⁾。

$$[M_{ej}] \cdot \{\ddot{U}_{ej}\}^n + [C_{ej}] \cdot \{U_{ej}\}^n + \{P_{ej}\}^n = 0 \quad (1)$$

$$\{U_{ej}\}^{n+1} = \left([M_{ej}] + [C_{ej}] \cdot \frac{\Delta t}{2} \right)^{-1} \cdot \left[-\Delta t^2 \cdot \{P_{ej}\}^n + 2 \cdot [M_{ej}] \cdot \{U_{ej}\}^n - \left([M_{ej}] - [C_{ej}] \cdot \frac{\Delta t}{2} \right) \cdot \{U_{ej}\}^{n-1} \right] \quad (2)$$

ここで、 $[M_{ej}]$: 陽解法領域の節点 j に集中した質量 $[C_{ej}]$: 陽解法領域の節点 j に集中した減衰(レイリー減衰) $\{\ddot{U}_{ej}\}_n, \{\dot{U}_{ej}\}_n, \{U_{ej}\}_n$: 陽解法領域の節点 j における時刻 t_n の加速度、速度および変位 $\{P_{ej}\}_n$: 時刻 t_n における陽解法領域の節点 j に作用する力 Δt : 時間増分 節点jに作用する要素kからの等価節点力は、次の様になる。

$$\{P_k\}^n = \int_v [B_k]^T \cdot \{\sigma_k\}^n \cdot d(vol) \quad (3)$$

したがって、節点jを囲む要素すべてから作用する等価節点力は、(4)式で表される。

$$\{P_{ej}\}^n = \sum_{k=1}^m \{P_k\}^n \quad (4)$$

陰解法による定式化 周辺地盤を含む建屋モデルを有限要素法で離散化し、(1)式に対応して(5)式に示す様な運動方程式を考える。ここで、 $[M_i], [C_i]$ は、それぞれ陰解法領域における全体質量マトリックスおよび減衰マトリックスである。また、 $[K_i]$ は、全体剛性マトリックスで、 $n+1$ は時刻 t_{n+1} である。

$$[M_i] \cdot \{\ddot{U}_i\}^{n+1} + [C_i] \cdot \{\dot{U}_i\}^{n+1} + [K_i] \cdot \{U_i\}^{n+1} = 0 \quad (5)$$

陽解法との結合を考えるため、陰解法領域が陽解法領域に接している節点変位 $\{\tilde{U}\}$ とそれ以外の陰解法領域の節点変位 $\{U_i\}$ に分け、(5)式を変形すると(6)式の様になる。

$$\begin{bmatrix} M_i & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{U}_i \\ \ddot{\tilde{U}} \end{Bmatrix}^{n+1} + \begin{bmatrix} C_i & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{U}_i \\ \dot{\tilde{U}} \end{Bmatrix}^{n+1} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U_i \\ \tilde{U} \end{Bmatrix}^{n+1} = 0 \quad (6)$$

さらに、 $\{\tilde{U}\}^{n+1}$ が既知として(6)式を変形すると(7)式の様になる。(7)式の右辺の項は、陰解法領域が陽解法領域に接している節点 $\{\tilde{U}\}$ より作用する等価節点力で、この等価節点力を外力として、Wilson 0法等により(7)式を解くことができる。

$$[M_I] \cdot \{\ddot{U}\}^{n+1} + [C_I] \cdot \{\dot{U}\}^{n+1} + [K_{11}] \cdot \{U\}^{n+1} = -[K_{12}] \cdot \{\tilde{U}\}^{n+1} \quad (7)$$

陰解法と陽解法の結合方法は、両手法の領域を2重に重ね合わせることで処理した⁵⁾。土の構成式としては西モデル⁶⁾を用い、各時間ステップで使用される応力~ひずみマトリックス[D^p]は、前ステップでの有効応力より計算した。間隙水圧は、全体積ひずみ零の非排水条件により図-1,2に示す方法で求めた。なお、図-3には陽解法と陰解法との融合による全体解析モデル図を示した。

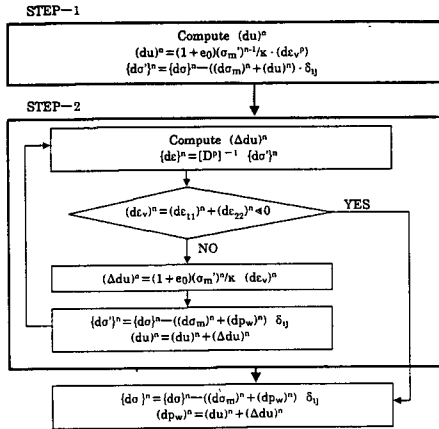


図-1 有効応力と間隙水圧の計算に用いた解析手法の流れ図

3. 間隙水圧推定方法の妥当性の検討 図-1,2に示した間隙水圧推定方法の妥当性を検討するため、松岡ら⁷⁾によって行われた豊浦砂の単純せん断試験結果(図-4)との比較を行った。解析は、等方応力で正規圧密された供試体($\sigma'_{m0} = 20\text{tf/m}^2$)が振幅一定の繰り返しせん断応力($\tau_{xy} = 2.5\text{tf/m}^2$)を受ける場合について行った。材料定数は、 $\alpha = 0.20$, $\lambda = 0.018$, $\kappa = 0.004$, $\phi_r = 45^\circ$, $\phi_m = 23^\circ$, $G_0' = 150\text{tf/m}^2$ を用いた。なお、構成式として用いた西モデルにおける塑性挙動は、非排水条件下においては、せん断に関する規準のみにより規定される。従って、この時用いられる規準式を示すと表-1のようになる。図-5a), b)には、解析によって求められた有効応力経路($\tau_{xy} \sim \sigma'_m$)およびせん断応力~せん断ひずみ関係($\tau_{xy} \sim \gamma_{xy}$)を示した。有効応力経路については、実験結果の傾向をほぼ示しており、この事より図-1,2に示した間隙水圧推定方法は、ほぼ妥当と認められる。ただし、せん断応力~せん断ひずみ関係については、ある繰り返し回数以上でせん断ひずみの進行が停止し閉じたループとなっており、なんらかの工夫が必要であると思われる。

表-1 西モデルに用いられている規準

規準	せん断に関する規準	
	初期液状化前($\eta_0 < M_m$)	初期液状化後($\eta_0 \geq M_m$)
降伏規準	$f = \eta - \eta_y$, $\eta_y = (\tau_{oc}/\sigma'_m) \geq \eta_1$ η_1 平衡状態線による規準 $\eta_1 = \alpha M_m \left(\frac{\sigma'_{m0}}{\sigma'_m} - 1 \right)^{0.5}$	$f = \eta - \eta_y$ 常に、降伏規準が満たされている。
塑性ポテンシャル	$g = \eta + M_m \ln \sigma'_m$	$g = \eta - \eta_0 + M_m \ln \sigma'_m$
硬化則	$\frac{d\eta_y}{d\tau_{oc}^p} = G'(1 - \frac{\eta}{M_r})^2, G' = (\text{OCR})^{0.5} G_0'$	$\frac{d\eta_y}{d\tau_{oc}^p} = G'(1 - \frac{\eta - \eta_0}{M_r - \eta_0})^2, G' = (\text{OCR})^{0.5} G_0'$

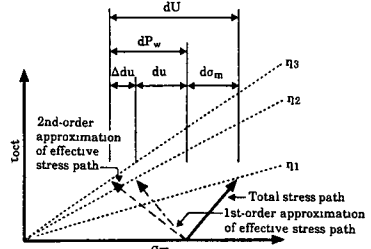


図-2 有効応力経路の推定法

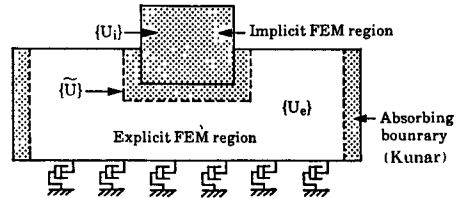


図-3 陽解法と陰解法との融合による解析モデル

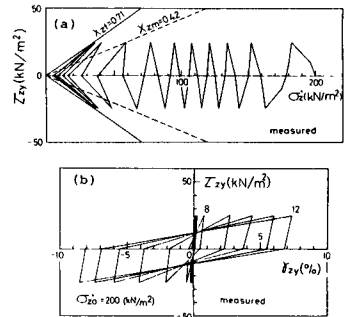
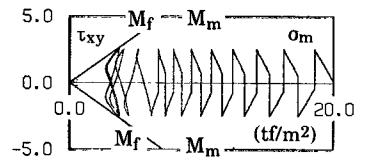
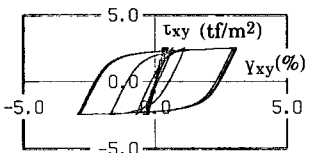


図-4 液状化試験の実測値 (松岡ら⁷⁾による)



a) 有効応力経路



b) せん断応力~せん断ひずみ関係

図-5 液状化試験の計算値

4. 不整形性を有する建屋地盤系の液状化解析

解析モデルは図-6に示す通りで、表層は、中詰砂とし地盤定数は文献6を参考に決定した($\alpha=0.57, \lambda=0.018, \kappa=0.004, \phi_f=35^\circ, \phi_m=30^\circ, G'=400\text{tf/m}^2$)。なお、表層地盤の初期せん断剛性分布は、図-7に示す定数を用い、基盤は弾性体($G=3.2 \times 10^4\text{tf/m}^2$)とした。また、建屋は剛体モデルとして剛性の高い定数を仮定した。入力波としては、El Centro波を考え、時間間隔0.002秒で4秒間応答計算を行った。まず、弾性解析した結果についてみると、図-8に示す様に基盤(NOD285)で水平方向131galの加速度に対し、地表(NOD6)では213galの加速度が生じている。一方、建屋上部(NOD1)では、水平方向127 gal

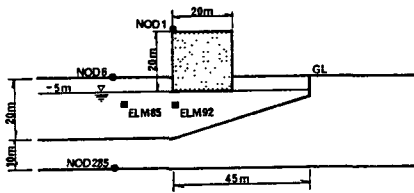


図-6 解析モデル

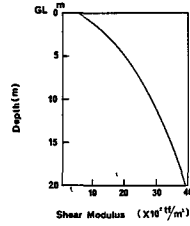


図-7 初期せん断剛性分布

鉛直方向108galの加速度が生じている。地盤の加速度波形は建屋の加速度波形に比べ短周期成分が支配的であるが、建屋の固有周期は比較的長周期側にあるものと考えられることから、建屋の加速度は地盤の加速度よりも小さくなっている。次に、表層地盤の液状化を考えた解析結果について示すと、図-9に示す様に基盤(NOD285)で水平方向131galの加速度に対し、地表(NOD6)では168galの加速度が生じている。この地表の加速度波形は、図-8に示した弾性計算の加速度波形に比べるとかなり異なっている。非線形解析によって求められた加速度波形は、弾性計算による加速度波形に比べ3秒以後において周期がかなりのびており、また、振幅もおさえられる傾向が認められる。最大加速度値についてみると非線形解析によって得られた加速度(168gal)は、弾性解析によって求められた加速度(213gal)よりも小さくなっている。これらの結果は、地表付近での液状化を反映しているものと考えられる。一方、建屋では地盤の加速度の周期がのびたことにより、建屋の応答は弾性解析によるものよりも大きくなり、水平方向で275gal、鉛直方向で202galとなった。図-10には、建屋周辺地盤の最大せん断ひずみの分布を示した。当図より建屋基礎コーナー部付近に大きなひずみが集中して発生しており、そのひずみ量は 4×10^{-3} 程度である。このため、間隙水圧も図-11に示す様に建屋基礎コーナー部付近に 8tf/m^2 程度の最大間隙水圧が発生しているのが認められる。初期液状化が発生した位置を調べてみると図-12に示す様に基礎底部近傍の地表付近に発生する傾向が認められる。建屋のロッキング振動が基礎コーナー部付近に発生するせん断ひずみ、間隙水圧に与える影響は大きいものと考えられる。建屋周辺地盤のせん断応力波形、せん断ひずみ波形、間隙水圧波形を図-13、14に示した。せん断ひずみは、2秒付近で大きくなり、間隙水圧の上昇も2秒以後に顕著となっている。要素85では 5.0tf/m^2 の間隙水圧が、また、要素92では 6.4tf/m^2 の間隙水圧が発生している。図-15と図-17には、要素85および要素92についてせん断応力とせん断ひずみの関係を、図-16と図-18には

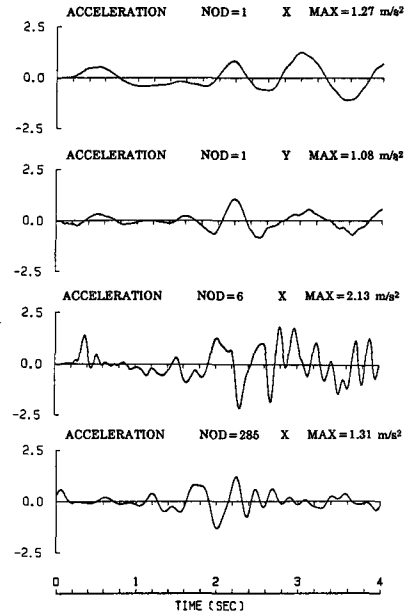


図-8 応答加速度波形(弾性解析)

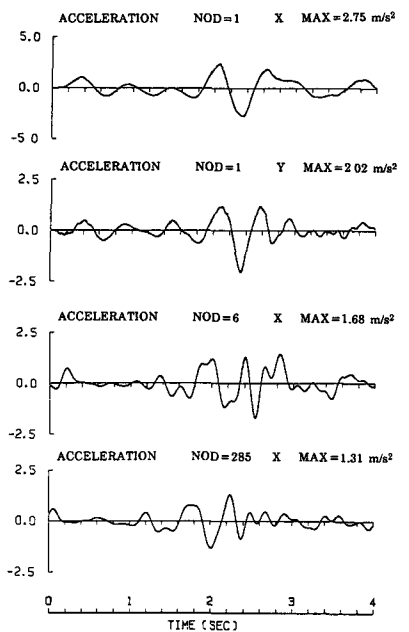


図-9 応答加速度波形

せん断応力(τ_{oct})と平均応力との関係をプロットした。これらの図より間隙水圧の上昇に伴い有効応力の減少、せん断剛性の低下が認められ、おおむね妥当な挙動を示しているといえる。

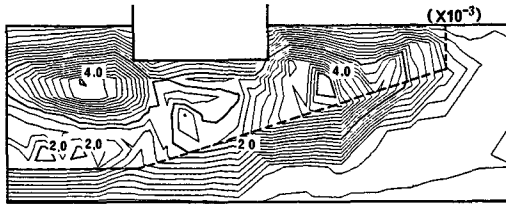


図-10 最大せん断ひずみ分布

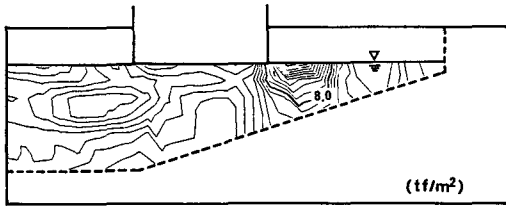


図-11 最大間隙水圧分布

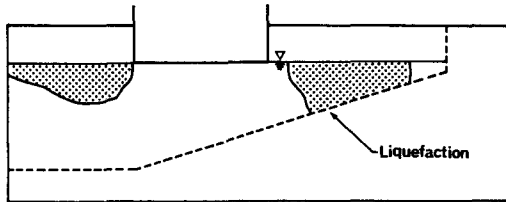


図-12 初期液状化した位置

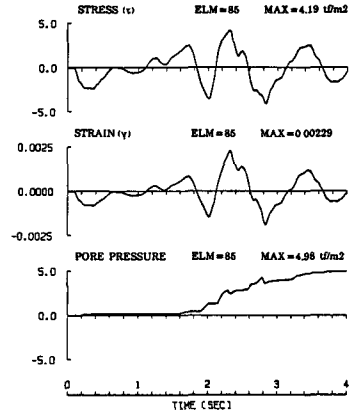


図-13 応答波形(ELM85)

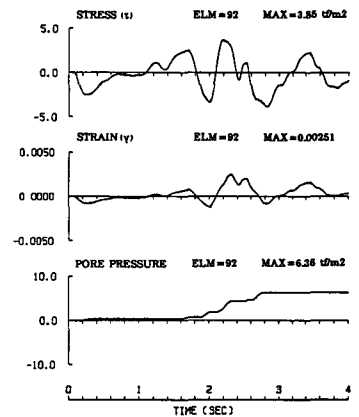


図-14 応答波形(ELM92)

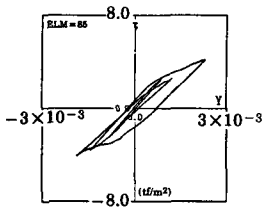


図-15 応力とひずみの関係 (ELM85)

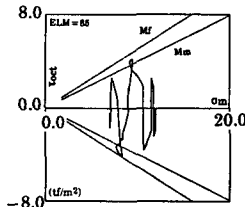


図-16 応力経路 (ELM85)

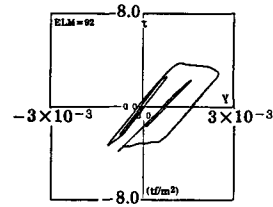


図-17 応力とひずみの関係 (ELM92)

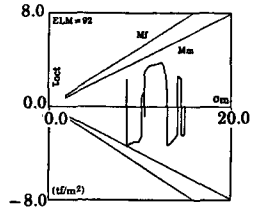


図-18 応力経路 (ELM92)

5. まとめ 提案した2次元建屋地盤系液状化解析手法を用い、建屋を含む不整形地盤の液状化特性を検討した。その結果、本解析結果は、液状化過程における建屋を含む周辺地盤の挙動を基本的に表現しており、本手法の建屋地盤系の液状化解析への適応が有効であると考えられる。しかし、本解析結果は一解析例であり、今後実験結果との比較等による詳細な実証的検討が必要である。

参考文献 1) S.U.Dikmen, et al., "Effective stress analysis of seismic response and liquefaction", A.S.C.E., G.E., vol.110, pp628~644, 1984 2) Finn, W.D.L., Lee, K.W. and Martin, G.R., "An effective stress model for liquefaction", ASCE, Vol.103, No. GT6, pp517~533, 1977 3) 柴田徹・佐藤忠信・小坂正明「砂地盤の液状化解析例」第14回土質工学研究発表会講演集, pp1313~1316, 1979 4) 大槻明, 渡辺浩平「2次元非線形解析による不整形地盤の地震時挙動の検討」, 第19回土質工学研究発表会, pp703~707, 1984 5) 大槻明他「レーリー波による不整形地盤の挙動」, 土木学会論文報告集第337号, pp27~36, 1983 6) 西好一「非排水繰り返し荷重下における飽和砂の弾塑性挙動と構成式」, 土木学会論文報告集第319号, pp115~128, 1982 7) 松岡元・山崎浩之・松原義仁・青木康・原康彦「粒子構造の変化に着目した再液状化現象の解析」第20回土質工学研究発表会講演集, pp625~626, 1985