

(18) 不整形沖積地盤の2次元非線形解析

岡山大学 正員 竹宮 宏和
岡山大学 学生員 石山 基
大連理工大学 Luan Maotian

1. まえがき

これまで強震時の表層地盤の非線形応答性状については、自然地盤について1次元重複反射理論を用いた等価線形化手法や、せん断型多質点系振動モデルの逐次積分等による解析結果から検討されてきた。これに対し層状地盤とは異なった応答性状を呈する不整形沖積地盤に注目した場合、地盤の傾斜不連続面が表層応答に及ぼす影響を考慮する2次元で解析の必要がある。本研究では時刻歴FEMにより、不整形沖積地盤の特徴を捉えた2次元非線形応答性状について検討を行った。

2. 定式化

支配方程式における質量マトリックスは、分布質量と整合質量の平均を採り、減衰マトリックスについては、サブスペース法により求まる固有振動数を用いたRayleigh比例減衰とする。逐次積分にはNewmark- β を採用した。ある時刻 t において支配方程式を増分形式で表現し、地盤の非線形分を外力項に移すと、

$$M\Delta\ddot{u}_{i+1} + C\Delta\dot{u}_{i+1} + K_0\Delta u_{i+1} = -M\Delta\ddot{u}_{gi+1} + \Delta K(\Delta u_i)\Delta u_{i+1} \quad (1)$$

ここに M, C, K_0 はそれぞれ質量、減衰、初期剛性マトリックスであり、 $u, \ddot{u}_g$ はそれぞれ応答変位、基盤入力加速度を表す。下添字 i は荷重伝達法における反復回数を示す。右辺の後部は不釣り合い荷重項であり、各要素内の不釣り合い応力を用いて次のように表現される。

$$\Delta K(\Delta u_i)\Delta u_{i+1} = \int_A B^T(-\Delta\sigma_{i+1})dA \quad (2)$$

ここに B は変位-ひずみマトリックス、 $\Delta\sigma$ は不釣り合い応力ベクトルを表し、これが収束条件を満足するまで反復計算を行う。 $\Delta\sigma$ は以下の様に求められる。

図1. は $(i+1)$ ステップにおける、1要素内の応力状態を表すMohrの応力円である(ここでは直応力成分は正とする)。前ステップからの線形仮定時、最大せん断応力は、

$$\tau_{\max,i+1}^l = (\sigma_{1,i+1}^l - \sigma_{3,i+1}^l) / 2 \quad (3)$$

ここに主応力 σ_1, σ_3 は次式により得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{1,i+1}^l \\ \sigma_{3,i+1}^l \end{array} \right\} = \frac{\sigma_{x,i+1}^l + \sigma_{y,i+1}^l}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,i+1}^l - \sigma_{y,i+1}^l}{2} \right)^2 + (\tau_{xy,i+1}^l)^2} \quad (4)$$

非線形時の最大せん断応力 $\tau_{\max}^n$ は非線形モデルの応力-ひずみ関係により求められ、最大のせん断応力差は、

$$\Delta\tau_{\max,i+1} = \tau_{\max,i+1}^n - \tau_{\max,i+1}^l \quad (5)$$

従って図1. より、不釣り合い応力の成分はそれぞれ次の通り計算される。

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{x,i+1} &= -\Delta\tau_{\max,i+1} \cos 2\psi \operatorname{Sgn}(\sigma_{x,i+1} - \sigma_{y,i+1}) \\ \Delta\sigma_{y,i+1} &= -\Delta\tau_{\max,i+1} \cos 2\psi \operatorname{Sgn}(\sigma_{y,i+1} - \sigma_{x,i+1}) \\ \Delta\tau_{xy,i+1} &= \Delta\tau_{\max,i+1} \sin 2\psi \end{aligned} \quad (6)$$

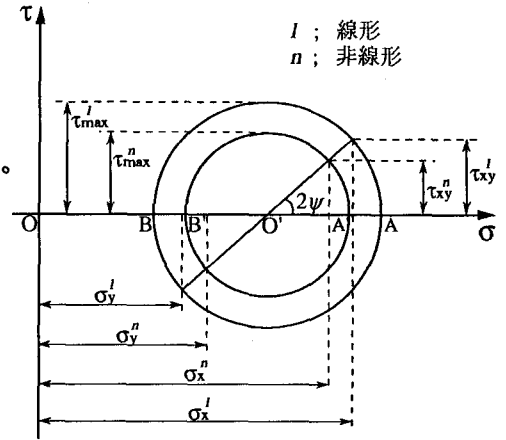


図1. 線形時と非線形時のMohrの応力円

3. 地盤の非線形特性

土の非線形特性に関して、Masing則によって履歴曲線を規定した修正Hardin-Drnevich型の応力-ひずみ関係を導入する。

骨格曲線：
$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + |\gamma / \gamma_f|} \quad (7)$$

$$\text{履歷曲線: } \frac{\tau \pm \tau_a}{2} = \frac{G_0 \left(\frac{\gamma \pm \gamma_a}{2} \right)}{1 + \left| \frac{\gamma \pm \gamma_a}{2 \gamma_r} \right|} \quad (8)$$

ここに G_0 は初期せん断弾性係数、 γ_r は規準ひずみである。

4. 数值解析例と考察

図2. に示すような領域Ⅱと領域Ⅲとの境界に傾斜面が存在する地盤を対象とし、これを要素数 328 の有限要素モデルとした。メッシュを図3. に示す。今回は表1. に挙げた地盤パラメータにより表されるケース例において解析した。地震波はEL CENTRO 1940, NS の最大加速度を0.1g, 0.2g, 0.3gの3種とし鉛直下方入射を設定した。数値解析上の時間ステップは、0.01秒である。なお中央断面と同一の諸元で1次元解析も行い、その結果と併せて考察する。

図4. は節点番号 6, 10, 17における最大0.1g入力での時刻歴変位であり、それぞれ沖積地盤の不連続面上端・下端及び中央の地表面での応答を示している。3.0secまでをみると主要動に

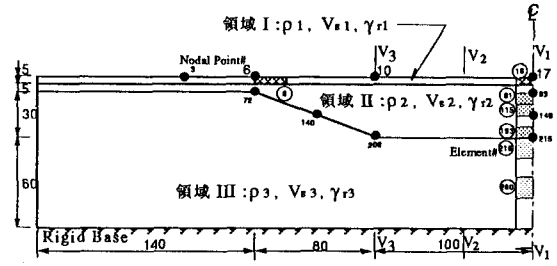


図2. 地盤モデル(左半分)

表 1. 地盤物性データ

	領域 I	領域 II	領域 III
$\rho(\text{t/m}^3)$	1.6	1.8	2.0
$V_s(\text{m/s})$	100	200	600
$\gamma r(\times 10^{-2})$	.15	.20	.03
v	0.35	0.35	0.35
η	0.02	0.02	0.02

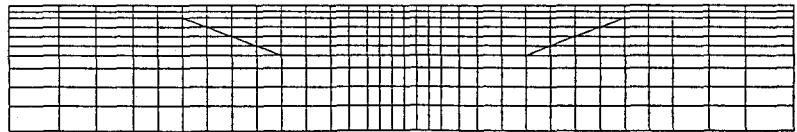


図3. 有限要素メッシュ

よる応答が沖積地盤中央において遅れて発生し、それは顕著な増幅を伴っていることが判る。そこで中央断面と同一の物性での1次元(成層地盤)解析との結果と比較してみると(図5(a).)、両者はほぼ同一周期であるが2次元のほうがかなり大きな振幅を呈している。図5(b)は時刻歴加速度の比較であるが、これをみても応答倍率は2次元解析のほうが大きい。次に深さ別の最大応答分布を図2中の V_1 、 V_2 、 V_3 断面において1次元解析の結果と共に示したものが図6(a),(b)であり、それぞれ変位、加速度である。表層における増幅は2次元において著しく、1次元解析との違いは明らかである。図7. は2次元解析によって得られた地表面の最大応答の水平分布であり、最大入力0.1g, 0.2g, 0.3gに対して、水平方向成分と鉛直方向成分の両者について示した。水平方向は、変位、加速度共に地盤中央で最大となる。加速度の入力に対する応答倍率は入力加速度が大きいほど非線形性の影響を受けて小さくなっている。それと共に節点10においても1つのピークを生じているが、これも入力強度が増すほどに明確になっていることから非線形性の影響であると考えられる。図8. は非線形性の現れの程度を地盤内部での分布状況として捉えるために、各要素の最大せん断ひずみと規準ひずみとの比を6段階のレベルに分けて表示したものである。併せて1次元解析によって得られた同比も示した。これによると、地盤の不整形性に起因するひずみレベルのばらつきが明確に認められ、沖積層中央下部など1次元解析では得られていないような局所的に剛性低下が著しくなっている箇所が存在することが判る。

以上のような結果から、対象とした形状の不整形冲積地盤における非線形応答性状は2次元解析を行うことによりある程度明らかとなり、ある特定断面の1次元解析の不備が指摘されよう。

図4.
沖積層表面における
時刻歴変位応答
(節点 6, 10, 17)

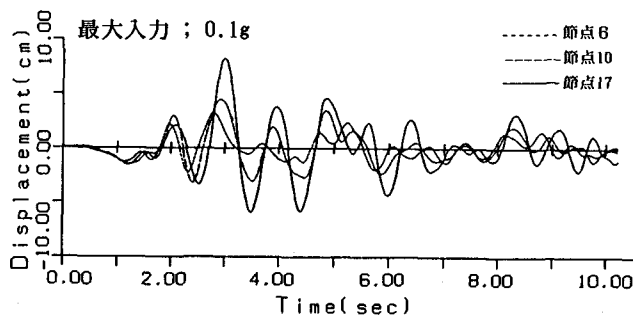


図5.
節点17における
時刻歴応答
(2次元, 1次元)

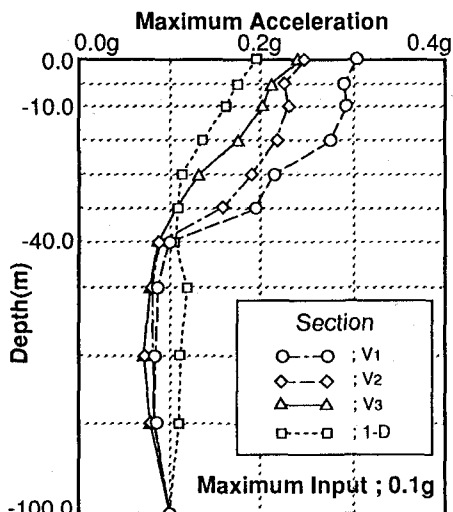
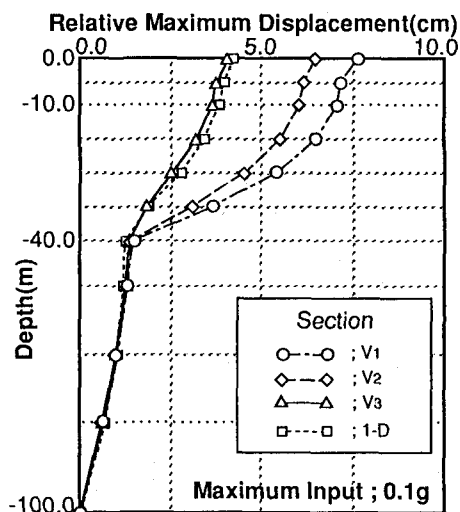
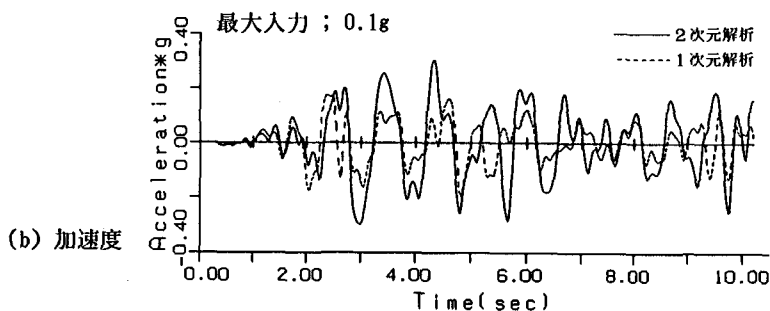
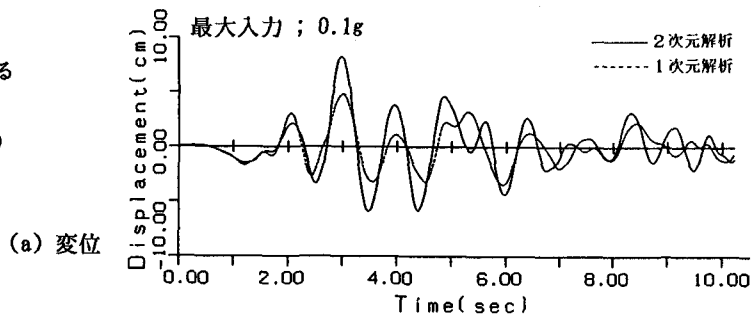
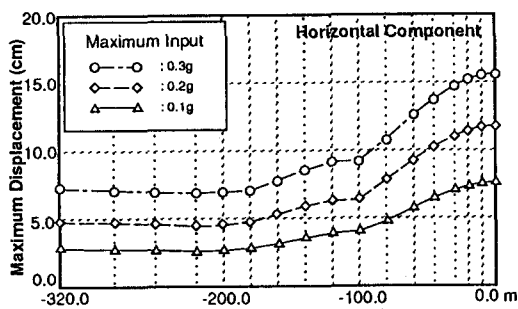
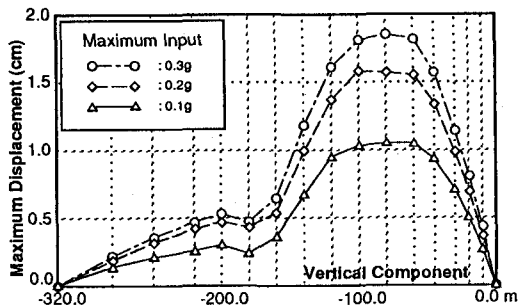


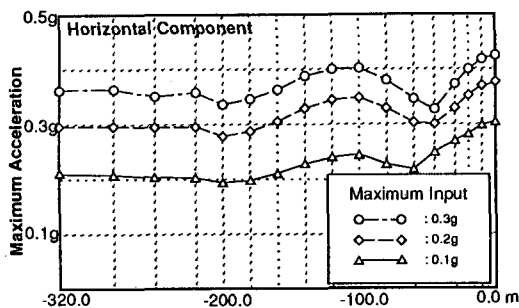
図6. 深さ別の最大応答分布(V₁, V₂, V₃断面)



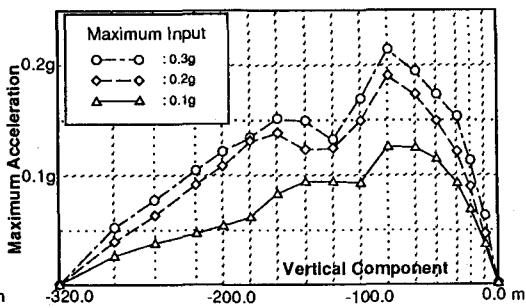
(a) 水平変位成分(相対変位)



(b) 鉛直変位成分



(c) 水平加速度成分



(d) 鉛直加速度成分

図7. 2次元解析による地表面の最大応答分布

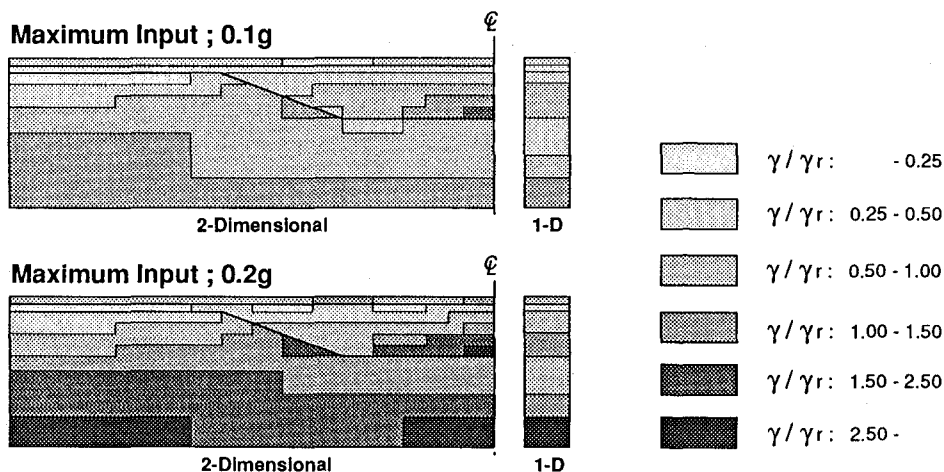


図8. 最大せん断ひずみ/規準ひずみ の地盤内分布

参考文献 1)竹宮宏和他；不整形基盤を有する沖積地盤層の振動性状；第20回地震工学研究発表会；1989
 2)Takemiya H, Luan Maotian, Lin Gao；2-D Nonlinear Seismic of Soil Structures with Emphasis on Local Topography；A Research Report for the Monbusho International Scientific Research Program #010440094；1991