

I-644

不整形性を有する沖積地盤の2次元非線形解析

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

1. まえがき

これまで表層地盤の強震時の非線形応答性状は、自然地盤について1次元で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が検討されてきた。これに対し自然地盤とは異なった応答性状を呈すると考えられる不整形性を有する沖積地盤を対象とし、地盤の傾斜不連続面が表層に及ぼす影響を考慮する場合は2次元で解析する必要がある。本報告では2次元非線形解析を荷重伝達法を用いた直接逐次積分で時刻歴FEMにより遂行し、種々の条件下でのケーススタディを1次元解析の結果と対比しながら行った結果について述べる。

2. 定式化

全体系の運動方程式は、

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + K(u)u = -M\ddot{u}_g \quad (1)$$

ここに M, C, K はそれぞれ質量、減衰、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。上式(1)の増分形式を採り、地盤の非線形分を外力項に移すと、

$$M\Delta\ddot{u}_{i+1} + C\Delta\dot{u}_{i+1} + K_0\Delta u_{i+1} = -M\Delta\ddot{u}_{gi+1} + \Delta K(\Delta u_i)\Delta u_{i+1} \quad (2)$$

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。

$$\Delta K(\Delta u_i)\Delta u_{i+1} = \int_A B^T(-\Delta\sigma_{i+1})dA \quad (3)$$

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す。 $\Delta\sigma$ 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、

$$\tau_{max,i+1}^l = (\sigma_{1,i+1}^l - \sigma_{3,i+1}^l) / 2 \quad (4)$$

ここに主応力 σ_1, σ_3 は次式により得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{1,i+1}^l \\ \sigma_{3,i+1}^l \end{array} \right\} = \frac{\sigma_{x,i+1}^l + \sigma_{y,i+1}^l}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,i+1}^l - \sigma_{y,i+1}^l}{2} \right)^2 + (\tau_{xy,i+1}^l)^2} \quad (5)$$

非線形時の最大せん断応力 τ_{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、

$$\Delta\tau_{max,i+1} = \tau_{max,i+1}^n - \tau_{max,i+1}^l \quad (6)$$

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。

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{x,i+1} &= -\Delta\tau_{max,i+1} \cos 2\psi \operatorname{Sgn}(\sigma_{x,i+1} - \sigma_{y,i+1}) \\ \Delta\sigma_{y,i+1} &= -\Delta\tau_{max,i+1} \cos 2\psi \operatorname{Sgn}(\sigma_{y,i+1} - \sigma_{x,i+1}) \\ \Delta\tau_{xy,i+1} &= \Delta\tau_{max,i+1} \sin 2\psi \end{aligned} \quad (7)$$

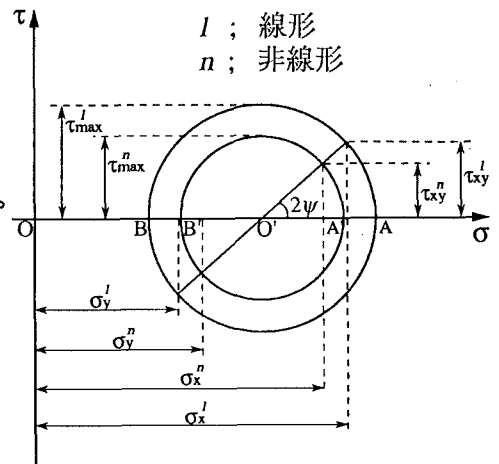


図1. 線形時と非線形時のMohrの応力円

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修正した修正Hardin-Drnevich型の応力-ひずみ関係を導入する。

$$\text{骨格曲線: } \tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + |\gamma/\gamma_r|} \quad (8)$$

$$\text{履歴曲線: } \frac{\tau \pm \tau_a}{2} = \frac{G_0 \left(\frac{\gamma \pm \gamma_a}{2} \right)}{1 + \left| \frac{\gamma \pm \gamma_a}{2\gamma_r} \right|} \quad (9)$$

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. 数値解析例と考察

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。ここでは表1. に挙げた地盤パラメータにより表される2つのケース例において解析した結果を示す。地震波はEL CENTRO 1940, NS の最大加速度を100galとして鉛直下方入射を設定した。最大変位応答の水平分布はこれまで著者らが行った解析結果¹⁾と同様な傾向を示している（図3.）。図4. , 図5. は逐次積分法と等価線形化法による1次元解析の結果と合わせて示している。これによると鉛直分布に関しては中央断面近くで2次元解析の応答値が他より大きくなっているが、2ケース間で最も差異が明らかなのは図中の V_3 断面においてであり、傾斜面の影響として注目されよう。

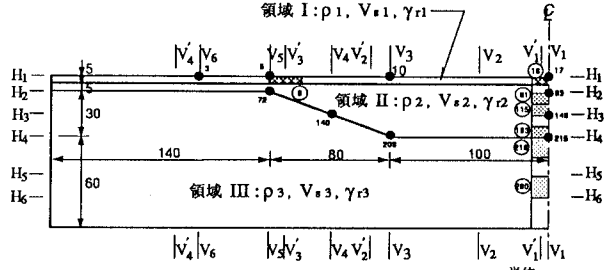


図2. 地盤モデル(左半分)

領域 I	$\rho_1(\text{t/m}^3)$	$V_{*1}(\text{m/s})$	$\gamma_{r1}(\times 10^3)$
Case-1	1.6	150	.15
Case-2	1.6	150	.0375

領域 II	$\rho_2(\text{t/m}^3)$	$V_{*2}(\text{m/s})$	$\gamma_{r2}(\times 10^3)$
Case-1	1.6	300	.075
Case-2	1.6	150	.0375

領域 III	$\rho_3(\text{t/m}^3)$	$V_{*3}(\text{m/s})$	$\gamma_{r3}(\times 10^3)$
Case-1	1.6	600	.0375
Case-2	1.6	600	.01875

表1. ケース例における地盤物性値

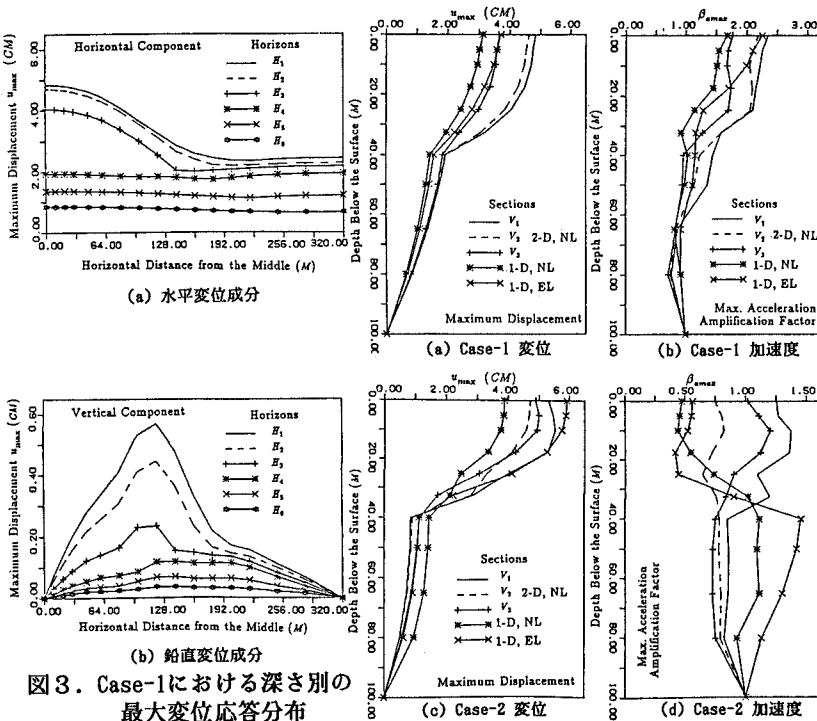


図3. Case-1における深さ別の最大変位応答分布

図4. 鉛直断面別の最大応答分布

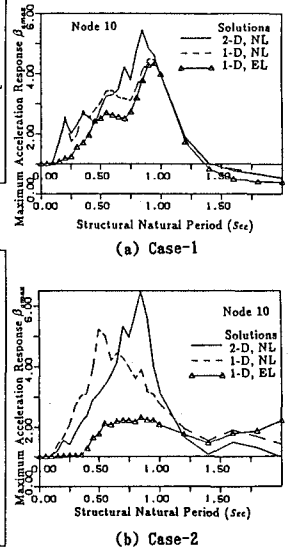


図5. 節点10における水平方向加速度応答スペクトル