

九州大学工学部 正 員 山内豊聡

東海大学工学部 正 員 兵動正幸

九州大学工学部○学生員 佐々木伸也

1. まえがき

軟弱な飽和砂地盤が地震外力を受ける場合、地中の間隙水圧が上昇し、液状化が起こる可能性がある。この液状化過程において地盤が時間経過に従って軟化し振動性状が変化するために、初期からは予測し難い挙動が現われるものと考えられる。本研究では、液状化過程をとらえるために有効応力の変動に伴いせん断剛性を変化させ、さらに弾塑性理論を適用して応答解析を行った。また、この解析方法を用いて間隙水圧を上昇させず解析を行い前者と比較して間隙水圧上昇がもたらす応答特性の相違について検討を行った。

2. 解析手法

水平な飽和砂地盤の地震時の挙動は、飽和砂と間隙水の2相に関して次のような増分型の運動方程式¹⁾で表わされる。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}(t) \\ \ddot{w}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_s & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} \\ K_{sf}^T & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_s I \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g(t) - R(t-\Delta t) \quad \text{----- (1)}$$

ここに u : 飽和砂の変位, w : 間隙水の砂に対する相対変位, M_s, M_f : 飽和砂、間隙水の集中質量マトリックス, D_s : 飽和砂の粘性マトリックス, H : 間隙水の発散抵抗マトリックス, K_{ss}, K_{ff}, K_{sf} : 飽和砂、間隙水、飽和砂と間隙水の連成を表わすそれぞれの剛性マトリックス, $\ddot{u}_g$: 地震加速度, I : 単位マトリックス, $R(t-\Delta t)$: 前ステップの内部応力ベクトル。飽和砂地盤が地震外力を受けると間隙水圧が上昇し有効応力が低下してゆくが、地中の応力状態は次式で表わされる有効応力径路に従うと仮定した。

$$f_1 = (\sigma' - \sigma'_f)^2 + \tau^2 / \lambda^2 - (\sigma'_f - \sigma'_i)^2 = 0 \quad \text{----- (2)}$$

ここに σ' : 有効応力, σ'_f : 破壊時の有効応力, τ : せん断力, λ : 横円偏平率, σ'_i : 初期有効応力。式(2)は、地震開始時から初期液状化時点までの応力径路を示すものである。初期液状化は応力の作用に対して、これまで上昇が続いていた間隙水圧の挙動が突然逆転し、いわゆる飛び出し現象を生ずる時点ととらえられ、 σ' - τ 平面上において変相角²⁾で表わされるものとした。また初期液状化以後の応力径路は、次式²⁾を用いた。

$$\sigma' = \tau / \alpha \tan \phi + k_r \cdot \tau \cdot \theta^2 \cdot (1 - \tau / \tau_r) / \tau_r \cdot \alpha \tan \phi, \quad \alpha \tan \phi = \tan \theta \quad \text{----- (3)}$$

ここに θ : 変相角, ϕ : 内部摩擦角, α : 定数, τ_r : 液状化時の変相線上の応力, τ_r : 液状化時の変相線上の応力。なお、有効応力の低下は、 $\sigma' = 0.01 \text{ tf/m}^2$ を下限とし、この時点を終極液状化とした。このように、液状化に至るまでの有効応力の変動に対応した解析法を有効応力法と呼び、有効応力の変化を無視して全応力のみで解析を行う方法を全応力法と呼ぶ。ここでは、この両者についての解析を行い、それぞれの特徴について考察を加えた。

3. 対象地盤

対象地盤は図1に示す層厚30mの単層地盤で、10層の集中質量に置換して解析を行った。この地盤に最大加速度150 GalのEl Centro波を入力する。図2は初期せん断剛性率を示

表-1 対象地盤の入力土質定数

したものである。初期せん断剛性率は有効応力に比例し、Richart式に地下15mの点で一致するようにした。他に、地盤に関する条件は表1に示している土質定数を入力した。

飽和砂の質量	m_s	0.213 t/m ³
間隙水の質量	m_f	0.102 t/m ³
1/4横円の偏平率	λ	1.50
土粒子の体積圧縮係数	E_s	1350 m ² /tf
間隙水の体積圧縮係数	E_w	208000 m ² /tf
応力ベクトルの方向定数	k_r	0.95
破壊線と変相線の勾配比	α	0.95
破壊角	ϕ	45°
間隙比	e	0.5
飽和砂最大せん断応力比	R_{max}	1.0
透水係数	k	0.0001 m/s

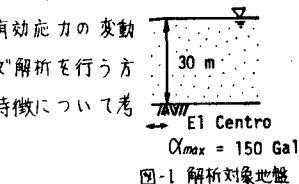


図-1 解析対象地盤

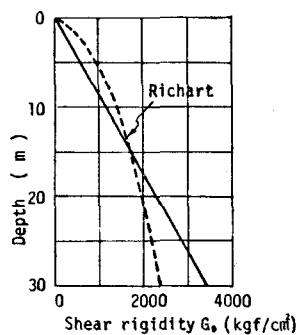


図-2 初期せん断剛性率深さ方向分布

4. 解析結果

図3に地表面における応答加速度を示す。(a)が有効応力法による結果であり、(b)は全応力法によるものである。両者はかなり異った応答を示し、特に有効応力法による結果は6秒付近を境に、振幅が急減する形となっている。これは、地盤内に液化が発生したためであり、その後のせん断波の伝播を妨げたために生じたものと考えられる。図

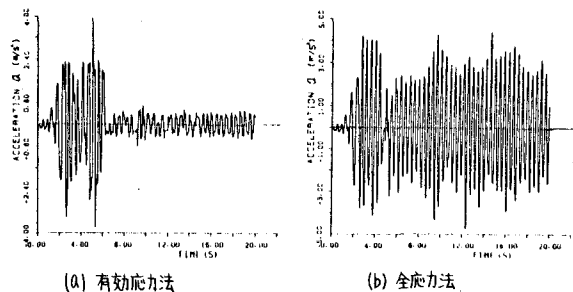


図-3 最上層における応答加速度時刻歴

4は、最上層における有効応力経路を描いたものである。(a)、(b)はそれぞれ有効応力法、全応力法の結果である。(a)のように有効応力法による結果は、有効応力の減少、初期液化化への到達、さらに最終液化化に至るまでの状態を表わしているが、(b)のように全応力法においては、有効応力の値は終始変動することなく、せん断応力のみが増減している。図5は最上層のせん断応力・せん断ひずみ関係を表わすものであり、(a)、(b)はそれぞれ有効応力法及び、全応力法によるものである。有効応力法による結果においては、液化化過程でのせん断応力の減少とひずみが増

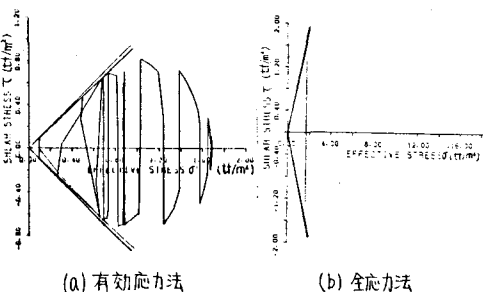


図-4 最上層における有効応力経路

大する傾向が認められる。また有効応力法による応力・ひずみ履歴ループは、全応力によるそれに比して、かなり大きなものとなり液化化過程において大きな履歴減衰を伴うことが現われている。図6に応答加速度、せん断応力、せん断ひずみの最大値の深さ方向分布を示している。それぞれ有効応力法と全応力法による結果の対比がなされている。これらの図から、加速度、及びせん断応力は有効応力法による結果の方が幾分小さい値となっており、せん断ひずみは、特に液化化を起した最上層において著

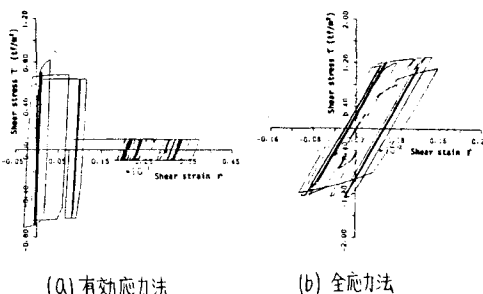
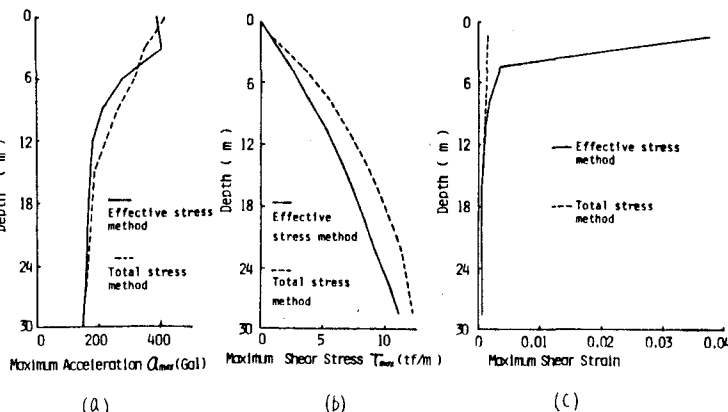


図-5 せん断応力・せん断ひずみ関係

しく大きな値となり、総じて全応力法による結果よりも大きな値となっている。

以上有効応力法と全応力法による応答結果の比較を行ってきたが、両者にはかなりの差異が認められ、今後は有効応力の変動を伴うような現象の解析には有効応力法の必要性があるものと考えられる。



(a)

(b)

(c)

参考文献：1) Ghaboussi J. et al, Proc. ASCE Vol. 104, No. GT-3,

図-6 最大加速度、最大せん断応力、最大せん断ひずみ深さ方向の分布

PP. 341-356, Mar., 1978 2) Ishihara K. et al, Soil and Foundations, Vol. 16, No.1 PP. 1-16, Mar., 1976