

榊大林組技術研究所

鳥井原 誠

平 間 邦 興

松 本 伸

1. まえがき 地震時に砂地盤内に発生する間げき水圧の蓄積・消散を考慮した液状化解析手法の一例として Finn 等¹⁾ によって開発された解析プログラム「DESRA」がある。この報告は図-1に示す地盤条件を持つ砂地盤を対象として行なった上記プログラムによる解析結果を示したものである。解析に必要な各種定数は可能な限り室内要素試験によって決定している。

2. 解析手法 このプログラムは一次元せん断型多質点モデルで計算を行なうものであり、その特徴は間げき水圧の蓄積・消散を考慮できることと、土の非線型性を逐次積分法で考慮できることの2点である。

(1) 間げき水圧の蓄積・消散 非排水繰返しせん断の1サイクル中に生じる間げき水圧 ΔU は、排水繰返しせん断の1サイクル中に生じる体積ひずみ $\Delta \epsilon_{vd}$ によって次のように示されている。

$$\Delta U = \bar{E}_r \cdot \Delta \epsilon_{vd} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{E}_r$ は有効鉛直応力 σ_v' 、初期有効鉛直応力 σ_{v0}' を用いて次式で示されている。(m, n, k_2 : 定数)

$$\bar{E}_r = (\sigma_v')^{1-m} / m \cdot k_2 (\sigma_{v0}')^{n-m} \quad (2)$$

$\Delta \epsilon_{vd}$ はひずみ振巾 γ 一定排水繰返しせん断試験によって次式で示されている。($C_1 \sim C_4$: 定数)

$$\Delta \epsilon_{vd} = C_1 (\gamma - C_2 \cdot \epsilon_{vd}) + C_3 \cdot \epsilon_{vd}^2 / (\gamma + C_4 \cdot \epsilon_{vd}) \quad (3)$$

また、間げき水圧の消散は圧密方程式に基づいている。

(2) 土の非線型性

土の非線型性は Hardin-Drnevich モデルで考慮されており、その履歴曲線は (τ^*, r^*) を頂点とすると最大せん断剛性率 G_{mt} 、最大せん断応力 τ_{mt} によって次式で示される。

$$\tau = \tau^* + \frac{G_{mt} (r - r^*)}{1 + G_{mt} |r - r^*| / 2 \tau_{mt}} \quad (4)$$

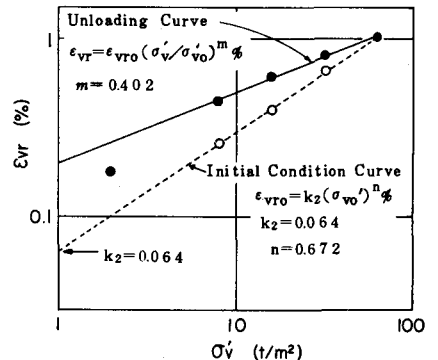
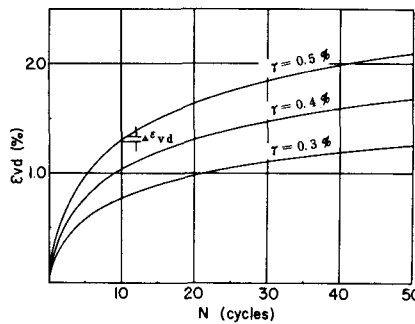
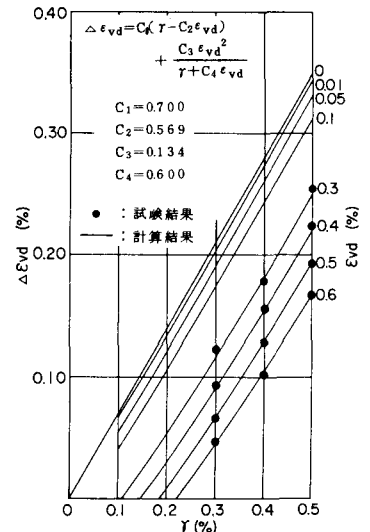
G_{mt}, τ_{mt} は繰返し载荷中の有効応力低下や体積変化によって初期値 G_{m0}, τ_{m0} から次のように変化する。($H_1 \sim H_4$: 定数)

$$G_{mt} = G_{m0} \left(1 + \frac{\epsilon_{vd}}{H_1 + H_2 \cdot \epsilon_{vd}} \right) \left(\frac{\sigma_v'}{\sigma_{v0}'} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$\tau_{mt} = \tau_{m0} \left(1 + \frac{\epsilon_{vd}}{H_3 + H_4 \cdot \epsilon_{vd}} \right) \frac{\sigma_v'}{\sigma_{v0}'} \quad (6)$$

層深 (m)	N	$\bar{V}_p$ (m^3/sec)	$\bar{V}_s$ (m^3/sec)	γ_1 ($1/m^3$)	G_{m0} (kg/cm^2)	τ_{m0} (kg/cm^2)	k
0	7	1400	165	1.8	500	5.17	15×10^{-4}
10	20		225	1.8	930	7.10	15×10^{-4}
20	7		170	1.7	500	13.4	4.5×10^{-4}
30	35	1700	315	1.9	1920	14.8	15×10^{-4}
40	6		170	1.7	500	7.8	4.5×10^{-4}
50	50		400	1.9	3100		

図-1 地盤条件

図-2 $\epsilon_{vr} \sim \sigma_v'$ 図-3 $\epsilon_{vd} \sim N$ 図-4 $\Delta \epsilon_{vd} \sim \gamma \sim \epsilon_{vd}$

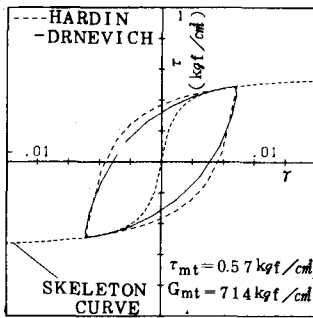


図-5 履歴曲線 ($\epsilon_{vd}=0.5\%$)

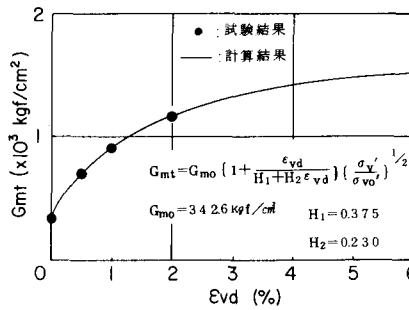


図-6 $G_{mt} \sim \epsilon_{vd}$

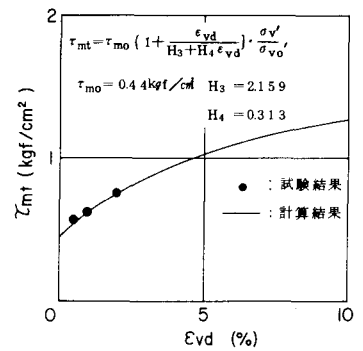


図-7 $\tau_{mt} \sim \epsilon_{vd}$

3. 各種定数の決定 動的中空ねじりせん断試験機を用いた等方圧縮・除荷試験とひずみ振巾一定排水繰返しせん断試験 ($\gamma=0.5\%$) によって各種定数を決定した。ただし、供試体は日本海中部地震の際に液状化発生地点で採取した砂を図-1のN値より推定される相対密度になるように調整したものである。

(1) m, n, k_2 : 初期に σ_{v0}' を受け σ_v' まで軽減された試料をさらに除荷した時の体積ひずみ ϵ_{vr} は次式で示される。 $\epsilon_{vr} = k_2 (\sigma_{v0}')^n / (\sigma_v' / \sigma_{v0}')^m$ (7)
 $\sigma_v' = \sigma_{v0}'$ すると体積ひずみ ϵ_{vr0} は次のようになる。 $\epsilon_{vr0} = k_2 (\sigma_{v0}')^n$ (8)
 式(7), (8)は $\epsilon_{vr}, \epsilon_{vr0}$ と σ_v', σ_{v0}' が両対数で直線となることを示しているが、図-2の試験結果もほぼこの関係を満足している。 m, n, k_2 を図中に示す。

(2) $C_1 \sim C_4$: ひずみ振巾一定排水繰返しせん断中の ϵ_{vd} を示すと図-3のようになる。ただし、 $\gamma=0.3, 0.4\%$ は推定値である。この図より $\gamma, \epsilon_{vd}, \Delta \epsilon_{vd}$ を求めてプロットしたのが図-4の(●)である。 $C_1 \sim C_4$ を図中に示す。

(3) $H_1 \sim H_4$: 図-5は $\epsilon_{vd}=0.5\%$ における履歴曲線を示したものである。実線は試験結果、点線はH-Dモデルである。これより G_{mt}, τ_{mt} を求めることができる。図-6, 7はこうして求めた G_{mt}, τ_{mt} と ϵ_{vd} の関係である。 $H_1 \sim H_4$ を図中に示す。

4. 解析結果 図-8~10は1968年十勝沖地震八戸港記録を最大加速度150galとして基盤より入力した時の解析結果である。図-8は最大加速度 (ACC・MAX) と最大間げき水圧比 (u/σ_{v0}') の深度分布を示したものである。同図で $u/\sigma_{v0}'=1$ となった層で液状化が生じたといえる。また、地表面最大加速度は154galとなっており、基盤入力加速度に比べてあまり大きくない。一般に、有効応力解析法は全応力解析法に比較して地表面最大加速度が小さくならないとされているが、²⁾

今回の解析結果もその傾向を表わしているようである。図-9は図-8で $u/\sigma_{v0}'=1$ となった完全液状化層における各解析結果の時刻歴を示したものである。間げき水圧の上昇とともに、せん断応力がゼロに近くなりせん断ひずみが急激に増大している様子が明らかである。この現象を応力~ひずみ関係で表わしたのが図-10である。

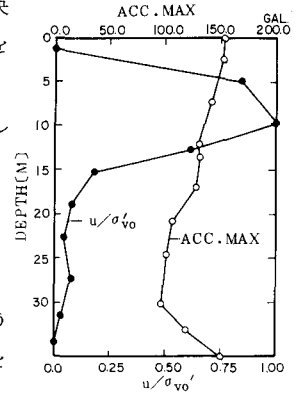


図-8 u/σ_{v0}' , 加速度

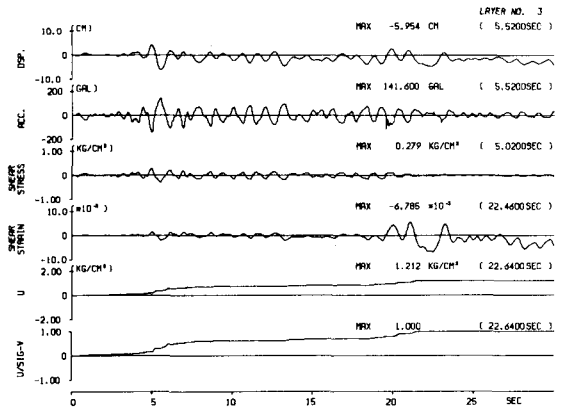


図-9 時刻歴 (GL-8~12m)

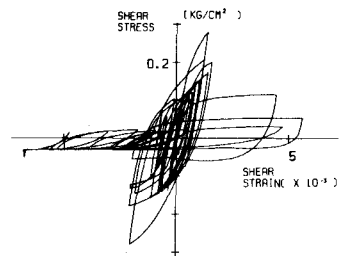


図-10 応力~ひずみ曲線

参考文献 1) Finn, Lee, Martin: An Effective Stress Model for Liquefaction, Proc. ASCE, GT6 (1977) 2) 石原: 液状化を考慮した地盤の応答解析法, 土と基礎, Vol. 29, No. 11 (1981)