

間隙水圧の蓄積・消散を考慮した液状化解析について (その2)

平 間 邦 興 鳥 井 原 誠
松 本 伸

Analysis of Liquefaction Including Generation and Dissipation of Pore Water Pressure (Part 2)

Kunioki Hirama Makoto Toriihara
Shin Matsumoto

Abstract

Effective stress analyses, which also cover the generation and dissipation of pore water pressure are becoming the main techniques for liquefaction analyses of sand deposits. "DESRA", developed by Finn et al., is one of them. This analytical system is a one-dimensional shear beam, and generation of pore water pressure takes volumetric strain model into account. However, this is complex and requires many input constants, and accordingly, it appears not to be used very widely and generally.

In this report, the authors describe laboratory tests using Toyoura and Kinugawa sand in which constants of the two were obtained experimentally. The relations of these constants with kind of sand and relative density are described. As a result of analyses using these constants, the influences of relative density and kind of sand are explained, while effective stress analysis is compared with total stress analysis.

概 要

砂地盤の液状化の解析手法は、液状化過程における間隙水圧の蓄積・消散を考慮した有効応力解析が主流になりつつある。この手法の一つにFinnらによって開発された「DESRA」がある。これは地盤を一次元せん断型多質点系モデルとして計算を行なうものであり、間隙水圧の発生については体積歪モデルを用いているが、必要とする入力定数が非常に多く複雑であることから、広く一般に用いられるまでにはなっていないようである。

この報告は、豊浦砂と鬼怒川砂の2種類の砂で室内試験を実施し、各定数を実験的に求め、それらの定数と砂の種類や相対密度との関係をもとめたものである。また、得られた定数を用いて解析することによって、相対密度あるいは砂の種類の違いが、明確に解析結果に影響することを示すと同時に、有効応力解析と全応力解析の比較検討も併せて行なった。

1. まえがき

砂地盤の液状化の解析手法としては、これまで液状化するかどうかという二者択一的な手法が一般的であった。ところが、完全に安定な状態から完全に液状化している状態までのどの段階に至るかを示すことができないために、最近では、間隙水圧の蓄積・消散を考慮した有効応力解析が主流となりつつある。Finnら¹⁾によって開発されたプログラム「DESRA」(Dynamic Effective Stress Response Analysis)もその一つである。間隙水圧の発生については、体積歪モデルを用いているが、必要とする入力定数が非常に多く複雑であることから、広く一般

に用いられるまでにはなっていないようである。

この報告は、豊浦砂と鬼怒川砂の2種類の砂で室内実験を実施し、各種定数を実験的に求め、それらの定数と砂の種類や相対密度との関係をまとめたものである。また、得られた定数を用いて解析することによって、相対密度あるいは砂の種類の違いが明確に解析結果に影響することを示すと同時に、有効応力解析と全応力解析の比較検討も併せて行なった。

2. 解析手法

過剰間隙水圧の発生は、以下の体積歪モデルを用いる²⁾。

$$\Delta u = \bar{E}_r \cdot \Delta \varepsilon_{vd} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 Δu : 過剰間隙水圧 \bar{E}_r : 一次元除荷係数

$\Delta \varepsilon_{vd}$: 体積歪増分

$$\bar{E}_r = \frac{d\sigma_v'}{d\varepsilon_{vr}} = \frac{(\sigma_v')^{1-m}}{mk_2(\sigma_{v0}')^{n-m}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $\sigma_v'(\sigma_{v0}')$: (初期) 有効鉛直応力

ε_{vr} : 除荷による膨張体積歪 (%), m, n, k_2 : 定数

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2\varepsilon_{vd}) + \frac{C_3\varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4\varepsilon_{vd}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 γ : せん断歪 (%), ε_{vd} : 体積歪 (%)

$C_1 \sim C_4$: 定数

また、土の非線型性は、Hardin-Drnevich モデルで考慮されており、間隙水圧の上昇や体積変化によって次式のようなになる。

$$G_{mt} = G_{mo} \left(1 + \frac{\varepsilon_{vd}}{H_1 + H_2\varepsilon_{vd}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_v'}{\sigma_{v0}'}\right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\tau_{mt} = \tau_{mo} \left(1 + \frac{\varepsilon_{vd}}{H_3 + H_4\varepsilon_{vd}}\right) \cdot \frac{\sigma_v'}{\sigma_{v0}'} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $G_{mt}(G_{mo})$: (初期) 最大せん断剛性率

$\tau_{mt}(\tau_{mo})$: (初期) 最大せん断応力

$H_1 \sim H_4$: 定数

3. 試験方法

用いた試料は、図-1の粒度特性をもつ豊浦砂と鬼怒川砂である。試験には、これらの試料をバイブレータ(50 Hz)によって締固め、相対密度 D_r が 45, 60 および 80% になるように調整した後、飽和させて用いた。今回行った試験は、一次元の圧縮・除荷試験 ($\phi=10$ cm, $h=20$ cm) および動的中空ねじりせん断試験機を用いた歪振幅一定排水繰返しせん断試験である。繰返しせん断試験時の拘束圧は 2 kgf/cm^2 , 歪振幅は 0.1, 0.3 および 0.5% の 3 種類である。

4. 試験結果と考察

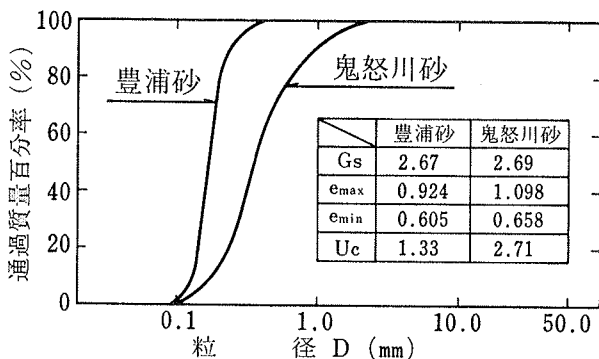


図-1 粒度特性

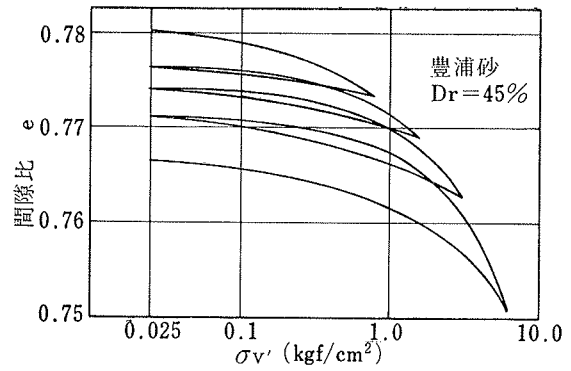


図-2 $e \sim \log \sigma_v'$ 曲線

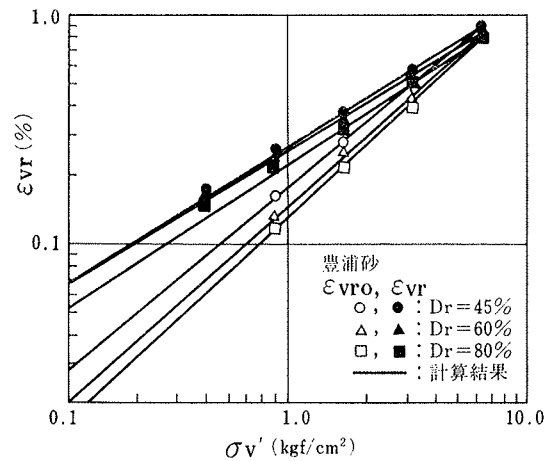


図-3 $\log \varepsilon_{vr} \sim \log \sigma_v'$ 曲線

4.1. 一次元除荷係数 (\bar{E}_r)

図-2は、一次元圧縮・除荷試験によって得られた $e \sim \log \sigma_v'$ 曲線である。除荷によって間隙比は増加し、膨張する傾向がわかる。なお、初期に σ_{v0}' を受けていた試料を一気に除荷したときの膨張体積歪を ε_{vro} とすると、その途中の σ_v' から除荷した場合の膨張体積歪 ε_{vr} は、次式で表わされる。

$$\varepsilon_{vr} = \varepsilon_{vro} \cdot \left(\frac{\sigma_v'}{\sigma_{v0}'}\right)^m \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\varepsilon_{vro} = k_2 \cdot (\sigma_{v0}')^n \quad \dots\dots\dots(7)$$

図-3は、豊浦砂の試験で得られた ε_{vro} および ε_{vr} をプロットしたものであり、これより式(2)の定数 m, n, k_2 が表-1のように求まる³⁾。ただし、 k_2 は ton, m 単

Dr (%)	豊浦標準砂			鬼怒川砂		
	45	60	80	45	60	80
m	0.62	0.61	0.65	0.56	0.61	0.62
n	0.84	0.89	0.92	0.84	0.88	0.92
k_2	0.028	0.021	0.017	0.028	0.023	0.020

表-1 m, n, k_2

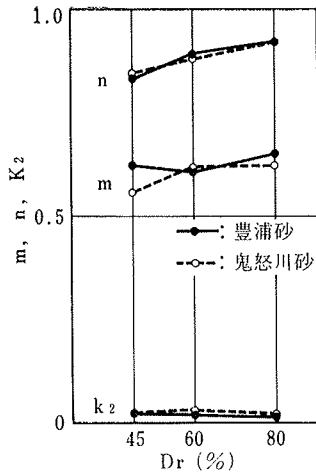


図-4 $m, n, k_2 \sim D_r$

位系での値である。また、図-4には、これらの定数と相対密度 D_r の関係を示してある。 D_r が増加するにつれて、 m, n はやや大きくなるが、 k_2 はやや小さくなる。

図-5は、これらの定数を用いて式(2)から \bar{E}_r を $\sigma'_{vo} = 2 \text{ kgf/cm}^2$ として求めたものであるが、 σ'_v の減少に伴って \bar{E}_r は著しく小さくなる。豊浦砂の場合、 D_r の増加とともに \bar{E}_r は大きくなるものの鬼怒川砂ではほとんど変わらない。

4.2. 体積歪増分 ($\Delta \epsilon_{vd}$)

図-6の実線は、豊浦砂 ($D_r = 45\%$) による歪振幅一定排水繰返しせん断試験より得られた ϵ_{vd} と繰返し回数 N との関係である。ここで、1サイクル当たりの体積歪増分 $\Delta \epsilon_{vd}$ に着目して、各相対密度で $\Delta \epsilon_{vd} \sim \gamma \sim \epsilon_{vd}$ 関係を求めたのが図-7~9である。これらの図から、式(3)の定数 $C_1 \sim C_4$ が表-2のように求まる。また、これらの定数を使って逆に ϵ_{vd} を計算したのが図-6の破線であり、試験結果と非常に良い対応を示している。 C_1 は、図-7~9で $\epsilon_{vd} = 0$ の時の直線の勾配であり、図-6では $\epsilon_{vd} \sim N$ 曲線の1波目の立ち上がりを支配する定数でもある。また、 $C_2 \sim C_4$ は ϵ_{vd} が発生した時の $\Delta \epsilon_{vd}$ の傾向を表わす定数である。

図-10は、 $C_1 \sim C_4$ と D_r の関係を示したものである。 D_r が増加するにつれて、すべての定数とも減少す

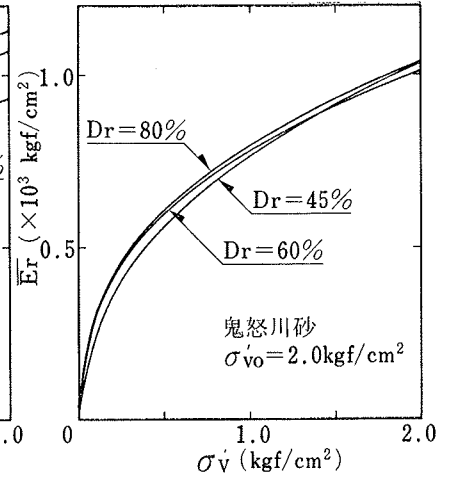
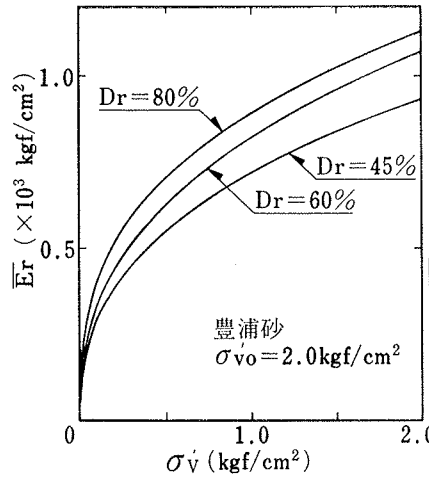


図-5 $\bar{E}_r \sim \sigma'_v$

$D_r(\%)$	豊浦標準砂			鬼怒川砂		
	45	60	80	45	60	80
C_1	0.40	0.30	0.23	1.40	1.25	0.80
C_2	2.33	1.78	1.59	0.81	0.82	0.63
C_3	2.94	1.58	0.42	0.92	0.72	0.23
C_4	3.31	4.01	1.40	0.85	0.71	0.55

表-2 $C_1 \sim C_4$

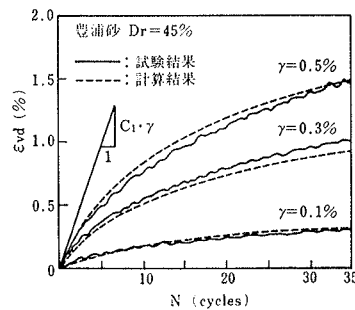


図-6 $\epsilon_{vd} \sim N$

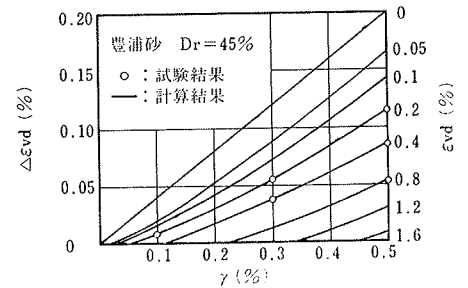


図-7 $\Delta \epsilon_{vd} \sim \gamma \sim \epsilon_{vd}$ ($D_r = 45\%$)

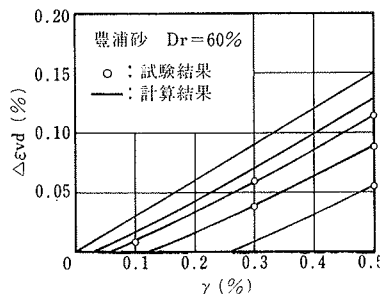


図-8 $\Delta \epsilon_{vd} \sim \gamma \sim \epsilon_{vd}$ ($D_r = 60\%$)

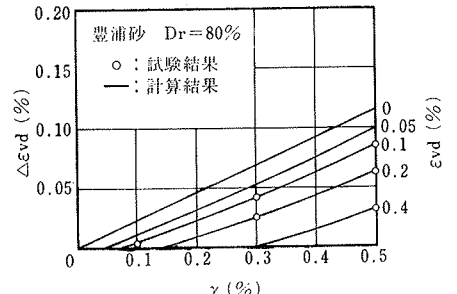


図-9 $\Delta \epsilon_{vd} \sim \gamma \sim \epsilon_{vd}$ ($D_r = 80\%$)

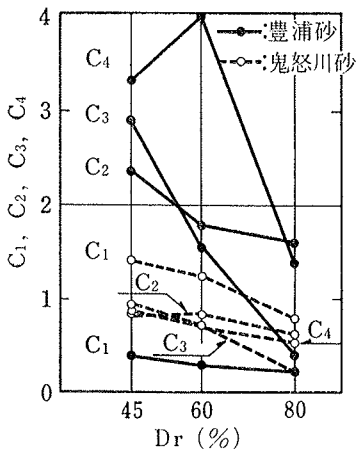


図-10 C₁~C₄~D_r

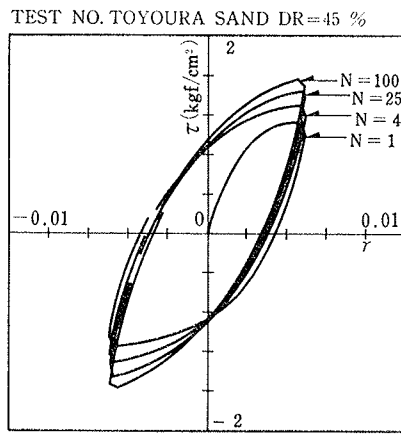


図-11 体積変化に伴う硬化

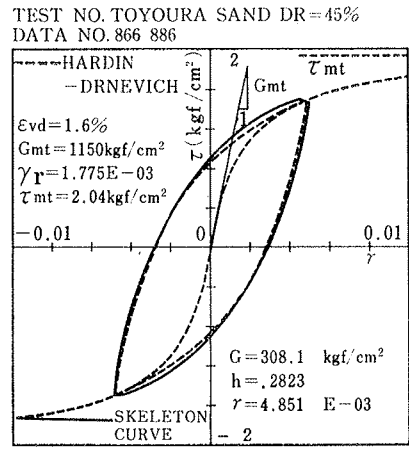


図-12 履歴曲線

るほど、 ϵ_{vd} ($\Delta\epsilon_{vd}$) も大きくなることは明らかであり、したがって、間隙水圧も発生しやすくなる。このようなことから、 C_1 に注目してみると、 D_r が増加するに伴って C_1 は減少し液状化しにくくなっている。また、豊浦砂に比べて鬼怒川砂の方が C_1 は大きく、液状化しやすい砂といえる。

なお、図-7~9をみてもわかるように、 D_r が大きくなると $\epsilon_{vd} = \text{const.}$ の曲線群は全体的に下がってくるが、曲線どうしの相対的な位置関係はそれほど変わらないようである。したがって、同じ砂の場合、 C_1 が得られると、 $C_2 \sim C_4$ をある程度の範囲で予想することも可能であろう。

4.3. 体積変化に伴う硬化

図-11は、豊浦砂 ($D_r=45\%$) による歪振幅一定排水繰返しせん断試験から得られた繰返し回数 $N=1, 4, 25, 100$ 回の時の履歴曲線である。繰返しに伴う体積変化によって G_{mt} , τ_{mt} は増大している。また、図-12の破線は試験結果に最も合うように求めた Hardin-Drnevich モデルの骨格曲線および履歴曲線である。このようにして得られる G_{mt} および $\tau_{mt} (=G_{mt} \times \gamma_r, \gamma_r: \text{規準歪})$ と ϵ_{vd} との関係を示したのが図-13, 14である。これらの図から、式(4), (5)の定数 $H_1 \sim H_4$ が表-3のように求まる。また、これらの定数と D_r の関係を示したのが図-15である。 D_r が増加するにつれて、 H_1, H_2 はかなり大きくなるが、 H_3, H_4 は余り変化しない。

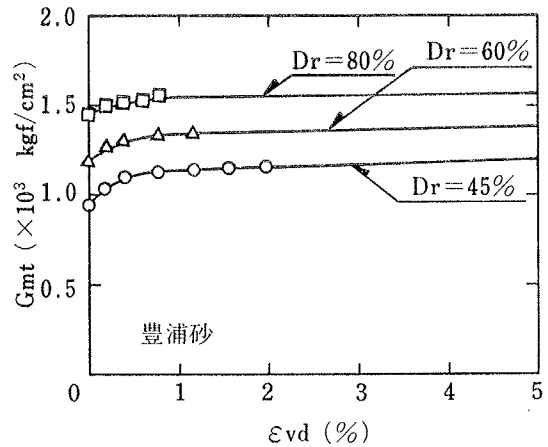


図-13 $G_{mt} \sim \epsilon_{vd}$

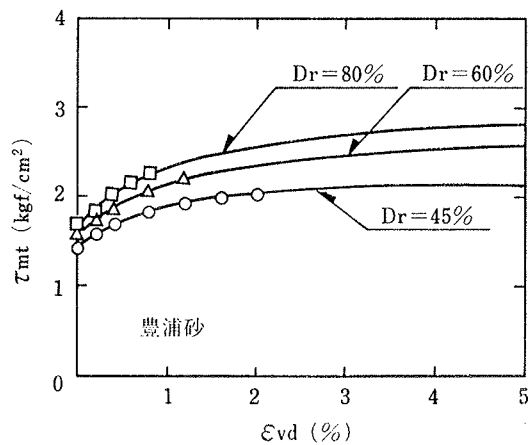


図-14 $\tau_{mt} \sim \epsilon_{vd}$

5. 数値解析結果

このようにして得られた定数を用いて、図-16の解析モデルに1968年十勝沖地震・八戸港記録を最大加速度120 galで基盤に入力した。透水係数は、その粒度特性から $k=1.5 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ とした。また、履歴減衰以外に粘性減衰 ($[C] = 0.005 [K]$) も考慮している。図-17は、過剰間隙水圧比 u/σ'_{v0} の深度分布を示している。

D _r (%)	豊浦標準砂			鬼怒川砂		
	45	60	80	45	60	80
H ₁	0.93	1.97	2.96	0.34	2.35	10.18
H ₂	3.93	5.70	10.53	3.94	6.63	10.08
H ₃	1.50	1.43	1.10	0.68	0.70	0.85
H ₄	1.59	1.20	1.08	0.65	0.49	0.49

表-3 H₁~H₄

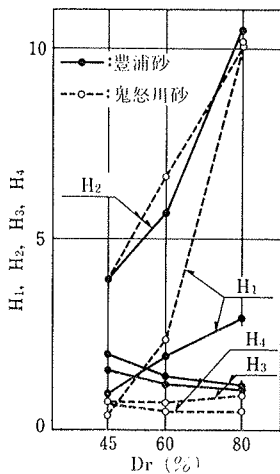


図-15 $H_1 \sim H_4 \sim D_r$

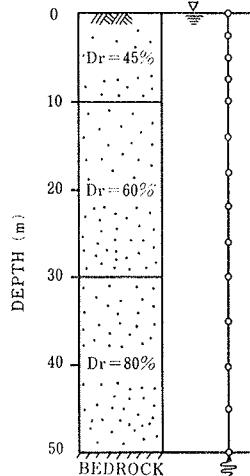


図-16 解析モデル

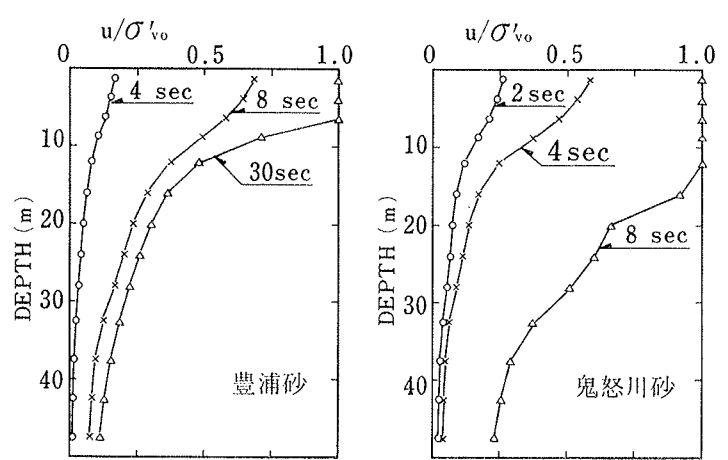


図-17 u/σ'_{vo} の深度分布

いずれの砂の場合も上層で液状化が生じているが、鬼怒川砂の方が間隙水圧の上昇速度は速い。これは前述したように C_1 の影響が現われたためである。

図-18は、間隙水圧の上昇を考慮した有効応力法および考慮しない全応力法による最大加速度の深度分布を示している。また、併せて等価線型化法の「SHAKE」(H-Dモデル, $h_{max}=0.4$)による解析結果も示してあるが、「DESRA」による解析に比べて、大きな地表面最大加速度を示している。

豊浦砂の有効応力解析では、入力地震波の最大加速度発生時刻 ($t=5$ sec) に間隙水圧の蓄積量が小さいこともあって、全応力解析と最大加速度は余り変わらない。ところが、鬼怒川砂の有効応力解析では、全応力解析に比べて液状化層で急激な最大加速度の低下がみられ、地表面では85.1 galと入力加速度よりも小さくなっている。これは、液状化によって地盤の剛性が低下し、せん断力が上層に伝達されないため、このような現象は、振動台を用いた模型実験によっても確認されている⁴⁾。ただし、この時に地盤に発生するせん断歪は非常に大きくなっている。

このように、地震時に地盤の剛性が低下していく液状化現象を適確に表現することのできる有効応力解析は、今後ますます重要となってくるであろう。

6. あとがき

「DESRA」は、間隙水圧の蓄積・消散を考慮した有効応力解析として十分適用できることが明らかになった。今後、「DESRA」に関しては、より実用的なものとするために、試験データを集積し、各定数と一般的な地盤の特性値(N値、粒度分布など)との関係を明確にしておくことが必要であろう。また、有効応力法による液状化

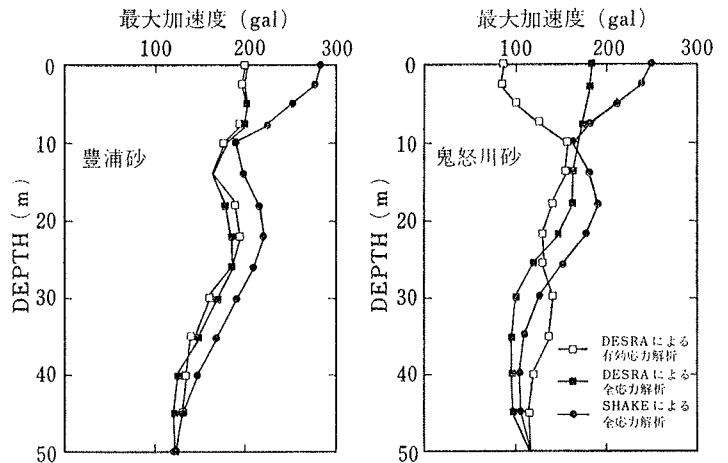


図-18 最大加速度の深度分布

解析にはこの他にも多くの手法が提案されており、それらについても検討を進めていくつもりである。

最後に、この研究を進めるにあたって、実験などを手伝って頂いた法政大学卒論生・斉藤達哉君に、記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Finn, W. D. L., Lee, K. W., Martin, G. R.: An Effective Stress Model for Liquefaction, Proc. ASCE, GT6, (1977), pp. 517~533
- 2) Martin, G. R., Finn, W. D. L., Seed, H. B.: Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading, Proc. ASCE, GT5, (1975), pp. 432~438
- 3) 平間, 鳥井原, 松本: 間隙水圧の蓄積・消散を考慮した液状化解析について, 大林組技術研究所報, No. 31, (1985), pp. 94~98
- 4) 岩崎, 龍岡, 坂場, 野間: 砂層の流動化に与える入力周波数の影響に関する模型振動実験, 第12回土質工学研究発表会講演集, (1977), pp. 957~960