

間隙水圧の蓄積・消散を考慮した液状化解析について

平 間 邦 興 鳥井原 誠
松 本 伸

Analysis of Liquefaction Including Generation and Dissipation of Pore Water Pressure

Kunioki Hirama Makoto Toriihara
Shin Matsumoto

Abstract

DESRA (Dynamic Effective Stress Response Analysis), a computer program on liquefaction, which includes the generation and dissipation of pore water pressure in saturated sandy ground, is being developed by Finn et al. This analytical system is a one-dimensional mass model, and the nonlinearity of the soil takes the Hardin-Drnevich model into account.

In this study, the authors analyzed liquefaction and examined application of the program for a certain ground, the properties of which were clearly known. As a result, it was made possible to more faithfully predict dynamic responses of horizontal layers during earthquake, such as the generation of pore water pressure during the liquefaction process, and the increases of strain with decreases in shear moduli, etc. And methods for selecting several suitable constants by experiments in the laboratory were established.

概 要

砂地盤内の間隙水圧の蓄積・消散を考慮した液状化解析手法の一例としてFinnらによって開発された解析プログラム「DESRA」(Dynamic Effective Stress Response Analysis)がある。これは地盤を一次元せん断型多質点系モデルで解析するものであり、土の応力～ひずみ関係の非線型性はHardin-Drnevichモデルで考慮されている。

この報告書は土質性状の明確なある砂地盤を対象として、上記プログラムを用いた液状化解析を行ない、その適用性を検討したものである。その結果、液状化過程における間隙水圧の上昇や、それに伴う剛性の低下によるひずみの増大など、地震時の地盤挙動をより忠実に予測することができるようになった。また、解析に必要な各種インプット定数を室内試験より適確に決定する手法も確立することができた。

1. まえがき

ゆるい砂地盤が地震時に液状化を起し、その上の構造物に多大の被害をもたらすことがあるのは、既によく知られた事実である。そのため、砂地盤上に構造物を建設する際には、事前に液状化の可能性を検討することが必要不可欠となってきつつある。

しかし、液状化の検討といっても、単に粒度分布やN値のみで判断する簡易法から、大型コンピュータによる地震応答解析をも行なう詳細法まで、非常に幅広いものがある。どの程度の検討を実施すれば良いのか、といった問題は、構造物の重要性や周辺の影響の度合などを

勘案して決定されるべきだと考えられるが、最近では、時代の趨勢として、地震応答解析を含む厳密な検討を要求される場合が増えてきたようである。

現在、土の応力～ひずみ関係の非線型性を考慮した地震応答解析法には、大きく分けて、等価線型化法と逐次積分法の2通りがある。この内、液状化のように間隙水圧が徐々に蓄積して、有効応力が時々刻々変化する現象を解析する場合には、逐次積分法を用いるのが有効である。

この解析手法の一例として、Finnら¹⁾によって開発された解析プログラム「DESRA」(Dynamic Effective Stress Response Analysis)がある。このプログラムでは

繰返し荷重による間隙水圧の蓄積とともに、透水による消散も考慮されている。

この報告は、土質性状のわかっているある砂地盤を対象として、上記プログラムを用いた解析を行ない、当解析手法の適用性を検討したものである。解析に必要な各種インプット定数も、可能な限り室内要素試験より決定している。

2. 解析手法

このプログラムは、水平な成層地盤を集中質点系に離散化した一次元せん断型多質点系モデルで、地震応答解析を行なうものである。このプログラムの特徴は、間隙水圧の蓄積、消散を考慮できる有効応力解析法であることと、土の応力～ひずみ関係を直接追跡することにより非線型性を考慮する逐次積分法であることの二つである。以下にその概要を示す。

2.1. 間隙水圧の蓄積・消散

液状化のような非排水せん断中に間隙水圧が蓄積する現象は、見方を変えれば、排水せん断中に体積が減少することと同じ意味を持っている。すなわち、排水せん断による体積変化と、非排水せん断による間隙水圧変化は表裏一体の関係を持つのである。このことを利用して液状化中の間隙水圧の蓄積量を予測する手法を、一般に体積ひずみモデルという。

いま、排水繰返しせん断の1サイクル中に生じる体積ひずみ増分を $\Delta\varepsilon_{vd}$ 、非排水繰返しせん断の1サイクル中に生じる間隙水圧を Δu とすると、両者の間には次のような関係がある²⁾。

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

ここで、 \bar{E}_r は除荷係数であり、有効鉛直応力を σ_v' 、初期有効鉛直応力を σ_{v0}' として次式で示されている。

$$\bar{E}_r = \frac{(\sigma_v')^{1-m}}{m \cdot K_2 \cdot (\sigma_{v0}')^{n-m}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

m, n, K_2 : 定数

体積ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{vd}$ は、ひずみ振幅一定排水繰返しせん断試験結果より、全体積ひずみ ε_{vd} 、せん断ひずみ振幅 γ を用いた次式で示されている。

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

$C_1 \sim C_4$: 定数

したがって、間げき水圧の蓄積・消散を考慮した方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \bar{E}_r \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \bar{E}_r \cdot \frac{\partial \varepsilon_{vd}}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 γ_w は水の単位体積重量、 k は透水係数である。

2.2. 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、Masing の法則に基づく次式で示されている。

$$\tau = \tau^* + \frac{G_{mt}(\gamma - \gamma^*)}{1 + G_{mt}|\gamma - \gamma^*|/2\tau_{mt}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

G_{mt} : 最大せん断剛性率

τ_{mt} : 最大せん断応力

初期載荷時の最大せん断剛性率を G_{m0} 、最大せん断応力を τ_{m0} とすると、繰返し載荷中の G_{mt} 、 τ_{mt} は間隙水圧の上昇による有効応力の低下や、体積変化によって次式のように表わされている。

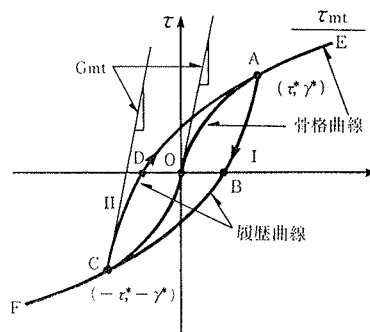


図-1 履歴曲線

$$G_{mt} = G_{m0} \left(1 + \frac{\varepsilon_{vd}}{H_1 + H_2 \cdot \varepsilon_{vd}} \right) \left(\frac{\sigma_v'}{\sigma_{v0}'} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\tau_{mt} = \tau_{m0} \left(1 + \frac{\varepsilon_{vd}}{H_3 + H_4 \cdot \varepsilon_{vd}} \right) \frac{\sigma_v'}{\sigma_{v0}'} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$H_1 \sim H_4$: 定数

3. 地盤条件

今回、解析を試みた地盤条件を図-2に示す。これは以前に土質調査を行なって、各種土質定数が既に求められている埋立砂地盤である。ただし、透水係数 k は一般値を採用している。

深度 (m)	柱状図	N 値	\bar{V}_p (m/sec)	\bar{V}_s (m/sec)	γ_t (t/m ³)	G_{m0} (kgf/cm ²)	τ_{m0} (tf/m ²)	k (m/sec)
0	[砂]	7	1,400	165	1.8	500	5.17	1.5×10^{-4}
10		20		225	1.8	930	7.10	3.0×10^{-3}
20	[砂]	7	1,700	170	1.7	500	13.4	4.5×10^{-6}
30		35		315	1.9	1,920	14.8	1.5×10^{-4}
35	6	170		1.7	500	7.8	4.5×10^{-6}	
40	50	400		1.9	3,100			

図-2 地盤条件

4. 各種定数の決定

式(1)~(7)に用いられている液状化解析に必要な各種定数 (m, n, K₂, C₁~C₄, H₁~H₄) は、すべて室内要素試験より求めることができる。本来ならば、原位置からサンプリングしてきた不カク乱試料で実施するのが望ましいが、今回はその試料が無かったため、先年の日本海中部地震の際、実際に液状化を起こした秋田産の砂を、図-2のN値より推定される相対密度になるように調整して試験を行なった。ただし、今回、実際に試験を行なって定数を決定したのはGL-12mまでの上部砂層のみであり、その下の層は推定値である。また粘性土層については、繰返しせん断による間隙水圧の発生は無いものとしている。

4.1. 試験方法

今回行なった試験は、飽和砂試料を用いた等方圧縮・除荷試験とひずみ振幅一定排水繰返しせん断試験の2種類であり、いずれも動的中空ねじりせん断試験機を使用している。繰返しせん断試験時の拘束圧は1.0 kgf/cm²、ひずみ振幅は0.5%、周波数は0.5 Hzである。

4.2. m, n, K₂ の決定

初期に有効鉛直応力 σ_{v0'} を受け、その後 σ_{v'} まで軽減された試料をさらに除荷すると、体積は膨張するが、この時の体積ひずみ ε_{vr} は次式で示される。

$$\epsilon_{vr} = K_2 (\sigma_{v0}')^n \left(\frac{\sigma_{v'}}{\sigma_{v0}'} \right)^m \quad \dots\dots\dots(8)$$

ε_{vr} は、除荷前の間隙比を e₀、除荷による間隙比の増分を Δe_r とすると、次式のようになる。

$$\epsilon_{vr} = \frac{\Delta e_r}{1 + e_0} \quad \dots\dots\dots(9)$$

したがって、圧縮・除荷試験による e~log σ_{v'} 関係が求めれば、ε_{vr}~σ_{v'} 関係が求まることになる。式(8)で σ_{v'}=σ_{v0'} とすると初期圧縮状態から一気に除荷した場合の体積ひずみ ε_{vr0} が次のように求まる。

$$\epsilon_{vr0} = K_2 (\sigma_{v0}')^n \quad \dots\dots\dots(10)$$

上式は ε_{vr0} と σ_{v0'} が両対数で直線関係にあることを示しているが、図-3の試験結果 (○) はこの関係を十分満足している。この直線より、n, K₂ を求めることができる。式(8)である σ_{v0'} から順次除荷していく場合を考えると、ε_{vr} と σ_{v'} も両対数で直線関係になるが、σ_{v0'}=6.4 kgf/cm² から除荷した図-3の試験結果 (●) もほぼこの関係を満足している。この直線より m を求めることができる。以上より、m, n, K₂ は次のようになる。

$$m = 0.402, n = 0.672, K_2 = 0.064$$

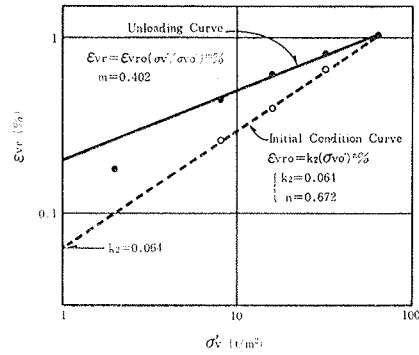


図-3 ε_{vr} と σ_{v'} の関係

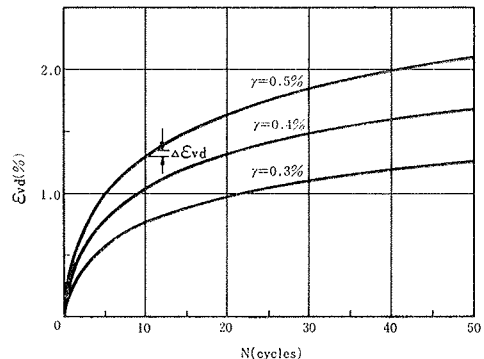


図-4 繰返しせん断試験中の体積ひずみ

4.3. C₁~C₄ の決定

ひずみ振幅一定排水繰返しせん断試験中の体積ひずみを繰返し回数に対してプロットすると図-4のようになる。この図で、γ=0.5%の曲線は試験結果であるが、他の2本は ε_{vd} は γ に比例すると仮定して求めた推定線である。この図より ε_{vd}, γ Δε_{vd} を求めてプロットしたのが図-

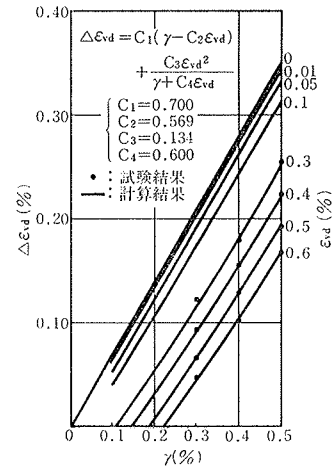


図-5 Δε_{vd} と γ, ε_{vd} の関係

5の(●)である。これらの点と最も良くフィットするように式(3)の C₁~C₄ を決定して求めた曲線群が図中の実線である。この時の C₁~C₄ は次のようになる。

$$C_1 = 0.700, C_2 = 0.569, C_3 = 0.134, C_4 = 0.600$$

4.4. H₁~H₄ の決定

ひずみ振幅一定排水繰返しせん断試験中の任意の ε_{vd} における1サイクルの履歴曲線から、その時点での G_{mt}, τ_{mt} を求めることができる。たとえば、図-6は ε_{vd}=0.5%における試験結果を実線で示したものである。これより G_{mt}=714 kgf/cm² が得られる。

また、図中の点線は Hardin-Drnevich モデルによる骨格曲線と履歴曲線を示したものであるが、この骨格曲

線の漸近線として $\tau_{mt} = 0.57 \text{ kgf/cm}^2$ が得られる。このようにして各 ε_{vd} で求めた G_{mt} , τ_{mt} と ε_{vd} の関係を示したのが図-7, 8 の(●)である。これらの点と最も良くフィットするように式(6), (7)の $H_1 \sim H_4$ を決定して求めた曲線が両図中の実線である。ただし、排水せん断試験であることを考慮して $\sigma_v' = \sigma_{v0}'$ すなわち、 $\sigma_v'/\sigma_{v0}' = 1$ としている。この時の $H_1 \sim H_4$ は次のようになる。

$$H_1 = 0.375, H_2 = 0.230, H_3 = 2.159, H_4 = 0.313$$

5. 解析結果

図-9 ~ 15は1968年十勝沖地震の八戸港記録を最大加速度 150 gal として基盤より入力した時の解析結果である。図-9は最大せん断応力、図-10は最大せん断ひずみ、図-11は最大応答加速度、図-12は最大間げき水圧比 (u/σ_{v0}') の深度分布を示したものである。

図-12の $u/\sigma_{v0}' = 1$ となった層で液状化が生じたといえることができる。この層では間隙水圧の上昇による剛性の低下によって、せん断ひずみが急激に大きくなることから、図-10で示されている。

図-11の最大応答加速度分布をみると、基盤で 150 gal を入力したにもかかわらず、地表面の最大応答加速度は 154 gal とあまり大きくない。一般に、同一の地盤条件で有効応力解析と全応力解析を行なうと、地表面最大加速度は有効応力解析の方が小さくなると言われている³⁾。このことは、間隙水圧の上昇による砂層の有効応力の低下により、下部からの振動が上部に伝わりにくくなるのが原因だと思われる。

図-13, 14は GL -8~12 m と GL -25~30 m の二つの砂層における各解析結果の時刻歴を示したものである。図-13は液状化した上部砂層、図-14は液状化しなかった下部砂層である。両者の加速度時刻歴にはその差が顕著に表われており、液状化した上部砂層の加速度は、

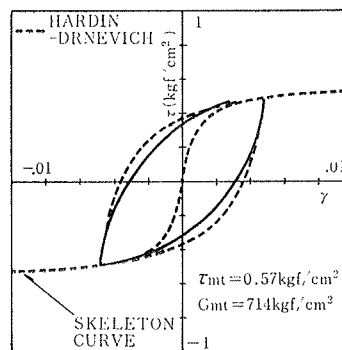


図-6 履歴曲線 ($\varepsilon_{vd} = 0.5\%$)

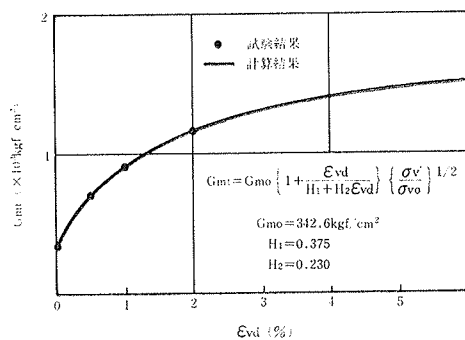


図-7 G_{mt} と ε_{vd} の関係

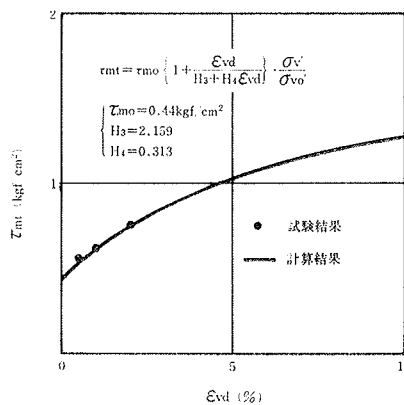


図-8 τ_{mt} と ε_{vd} の関係

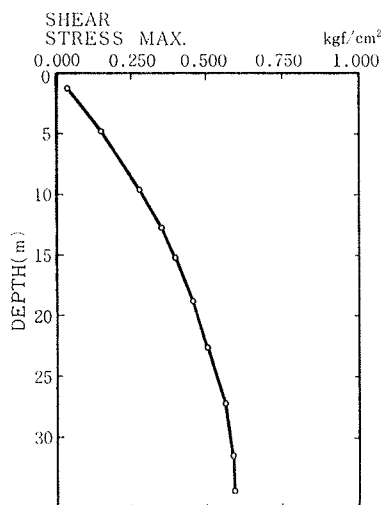


図-9 最大せん断応力

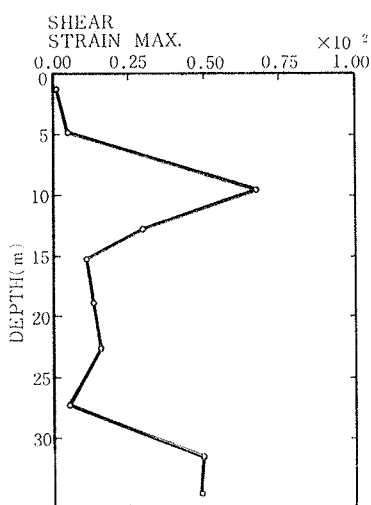


図-10 最大せん断ひずみ

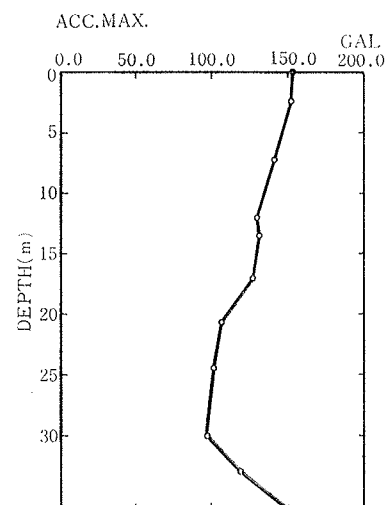


図-11 最大応答加速度

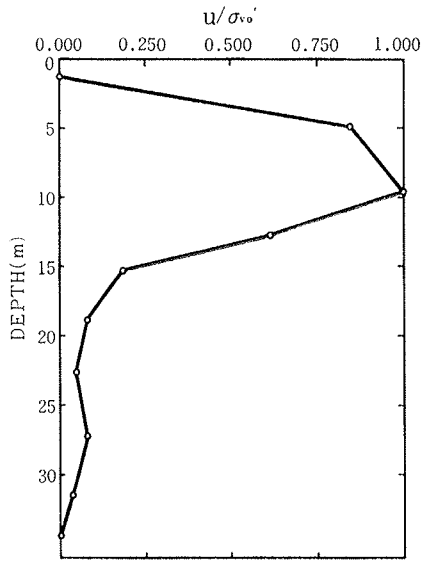


図-12 最大間隙水圧

間隙水圧の上昇に伴い相対的に加速度振幅が小さくなり、しかも、その周期が長くなっている様子が明らかである。また、 $u/\sigma'_{v0}=1$ 付近で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も明らかである。

図-15は、液状化した上部砂層のせん断応力～せん断ひずみ関係を示したものであるが、間げき水圧の上昇に伴うせん断剛性の低下が顕著である。

6. あとがき

今回の解析に用いた各種定数は、解析地点とは異なる場所で採取した試料を用いた試験結果より決定したのであるが、今後は、原位置で採取した不カク乱試料で各種定数を決定し、当解析手法の妥当性を検証していく必要がある。また、粘土層のモデル化についても検討していかねばならないだろう。

最後に、本研究を遂行するにあたって貴重な助言を賜った本社 土木本部 設計部関係各位に謝意を表します。

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, GT 5, (1975), pp. 432~438

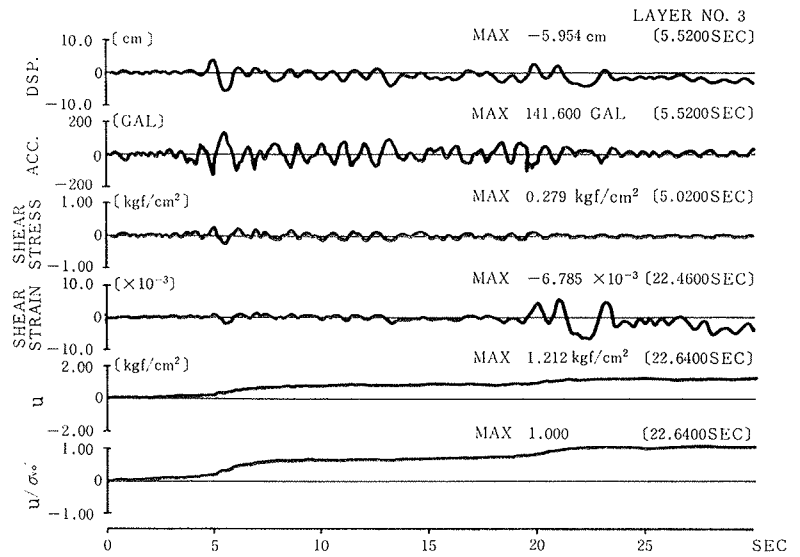


図-13 解析結果・時刻歴 (GL-8~12m)

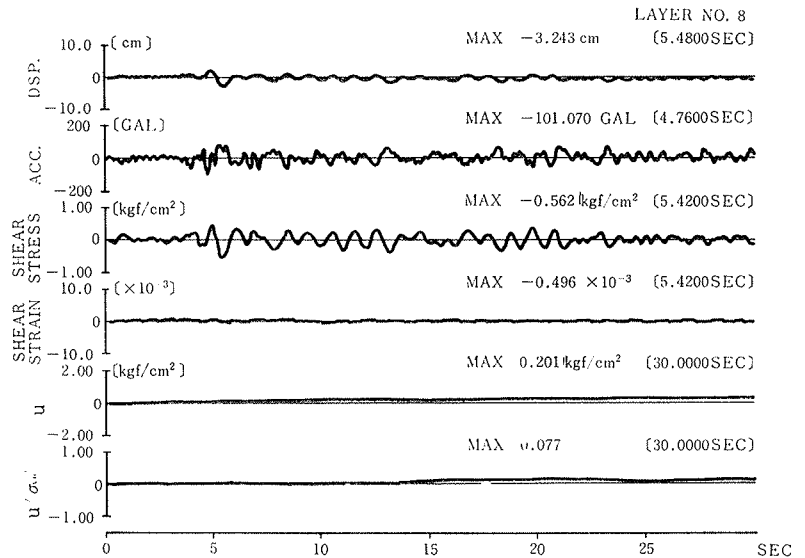


図-14 解析結果・時刻歴 (GL-25~30m)

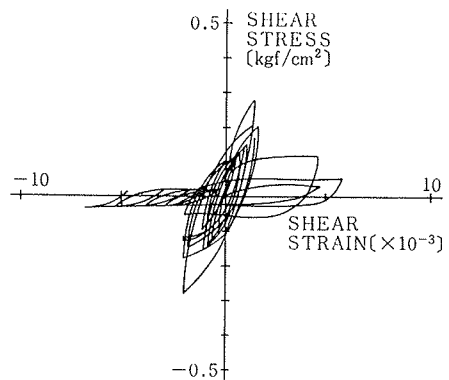


図-15 液状化砂層の履歴曲線

- 4) 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), pp. 85~91