

# 有効応力に基づく簡易液状化判定法の開発

岐阜大学	正会員	八嶋 厚
京都大学	正会員	岡 二三生
岐阜大学	学生会員	稲本昌也
株式会社本間組		上村徳良

## 1. はじめに

現在、飽和砂質地盤の液状化を判定する方法として、動的応答計算を必要としない簡便法や全応力に基づく方法が各種提案されている。しかし、液状化現象は地盤中の間隙水圧の挙動に深く関わっているため、これらの方法では液状化のメカニズムを忠実に表現することができず、液状化判定法の精度がかなり悪くなることも考えられる。このことは兵庫県南部地震のような大きな地震のもとで指摘されてきた。一方、有効応力に基づく繰り返し構成式を導入した液状化解析手法では、地盤の初期状態から液状化に至るまでの過程をある程度忠実に表現することができる。しかしながら、この解析手法で用いられる繰り返し弾塑性構成式の材料定数の決定方法は難しく、所定の液状化強度曲線や繰り返し応力-ひずみ関係を的確に再現するためには、ある程度の経験が必要と考えられてきた。そこで本研究では、有効応力解析を実施するユーザーが、所定の液状化強度曲線や繰り返し応力-ひずみ関係を、与えられた構成式を使って再現できる手順を構築した。ここで、提案する手順は、ボーリング調査によって土層構造、N値、せん断波速度程度の情報量しかない場合に、またはかなりの室内実験結果が用意されている場合に、それぞれどのように構成式の材料定数を求めていけばよいのかをまとめたものである。材料定数決定手順のケーススタディとして、中部地方の2地点について、ボーリングデータと室内実験データに基づいて構成式の材料定数を決定した。ついで、液状化解析プログラム「LIQCA」(Okara, 1994)を用いて、実際の有限要素解析も行い、検討地盤の液状化判定を試みた。

## 2. 解析パラメータの決定方法

本研究においては、Okara (1992)が提案し、Tateishiら (1995)が改良した繰り返し弾塑性構成式を用いて液状化解析を実施する。繰り返し弾塑性構成式に含まれる材料定数は、各種原位置調査・室内試験に基づいて決定されるべきである。しかしながら、決定されるべき材料定数が多く、またその決定過程は、ある程度経験を有するものしか理解できなかつたりすることが多い。さらには、すべての材料定数を決定論的に求めるためには、多くの精度よい実験データが必要とされるが、それらが十分に与えられていない場合も多い。本章では、ある程度試験データが用意されている場合、試験データ量がかなり限られている場合について、材料定数の決定過程を紹介する。ここで紹介する決定方法は、最善のものであるとは判定できないが、現時点で良好な結果を与える一手法として紹介する。今後、構成式の拡張・改良、室内試験法の改良等が行われれば、当然材料定数の決定手順も変更されていくべきである。

以下に、各種原位置試験および室内試験が実施されている場合、もしくはそれらの試験データがほとんどない場合の両ケースについて、材料定数の決定手順を紹介する。

### 密度 $\rho$ もしくは単位体積重量 $\gamma$

密度は、不攪乱サンプリングにより採取された試料を用いた密度試験、もしくはボーリング孔を利用した密度検層で求めることが望ましい。一方、密度試験や密度検層が実施されていない地盤については、たとえば道路橋で紹介されている表を用いることもよいであろう(道路橋示方書, 1990)。

### 間隙比 $e$

間隙比は、不攪乱サンプリングにより採取された試料を用いた間隙比試験より求めることが望ましい。一方、不攪乱サンプリングが実施されていない場合には、たとえばよく実務で用いられる経験的な下記の値を用いてもよい。

「砂質土」 埋土： $e=0.8 \sim 0.9$ 、沖積層： $e=0.75 \sim 0.8$ 、洪積層： $e=0.7 \sim 0.75$

「粘性土」 沖積層： $e=1.2 \sim 1.5$ 、洪積層： $e=1.0 \sim 1.2$

---

Development of a simplified liquefaction analysis method based on the effective stress concept (A.YASHIMA and M.INAMOTO, Gifu University, F.OKA, Kyoto University and N.KAMIMURA, Honma-gumi Co.Ltd.)

### せん断波速度 $V_s$

せん断波速度は、ダウンホール法もしくはサスペンション法などを用いたP S検層によって決定されることが望ましい。一方、P S検層が行われていない場合には、たとえば道路橋示方書(1990)で推薦している下記の経験式を用いてもよい。

$$\text{砂質土層: } V_s \text{ (m/sec)} = 80 N^{1/3}, \quad \text{粘性土層: } V_s \text{ (m/sec)} = 100 N^{1/3}$$

### 初期せん断弾性定数 $G_0$

土の密度とせん断波速度を用いて、次式で求める。

$$G_0(tf/m^2) = \rho V_s^2$$

### 破壊角 $\phi_f$

破壊角は、三軸圧縮試験等の室内試験によって決定されることが望ましい。一方、室内試験結果がない場合には、標準貫入試験のN値を用いて、経験的に決定することもできる(大崎, 1958)。

$$\phi_f(^{\circ}) = \sqrt{20N} + 15$$

### 破壊応力比 $M_f^*$

破壊応力比  $M_f^*$  は破壊角との関係から次式によって求められる。

$$M_f^* = \sqrt{2/3} \frac{6 \sin \phi_f}{3 - \sin \phi_f}$$

### 変相角 $\phi_m$

変相角は、三軸圧縮試験等の室内試験によって決定されることが望ましい。しかし、室内試験結果がない場合には、上記破壊角との経験的な関係(Ishihara and Towhata, 1982)を用いることもできる。

$$\tan \phi_m(^{\circ}) = 0.875 \tan \phi_f$$

### 変相応力比 $M_m^*$

変相応力比  $M_m^*$  は変相角との関係から次式によって求められる。

$$M_m^* = \sqrt{2/3} \frac{6 \sin \phi_m}{3 - \sin \phi_m}$$

### 圧縮指数 $\lambda$

等方もしくは異方圧縮・膨潤試験から求める。一方、室内試験が行われていない場合には、下記の標準的な値を用いることも考えられる。

$$\lambda \quad \text{砂質土 } 0.02 \sim 0.03, \quad \text{粘性土 } 0.2 \sim 0.3$$

### 膨潤指数 $\kappa$

等方もしくは異方圧縮・膨潤試験から求める。一方、室内試験が行われていない場合には、たとえば圧縮指数の1/10程度の値を用いることも考えられる。

### ポアソン比 $\nu$

本構成式においては、膨潤指数と  $B_0^*$  を与えれば、ポアソン比は前述の式を用いて従属的に決定される。一方、ポアソン比として、たとえば、砂質土 0.25、粘性土 0.30程度の値をあらかじめ設定した場合には、膨潤指数の値がかなり小さな値として決定される場合もある。本研究では、ポアソン比として砂質土 0.25、粘性土 0.30を設定した。

### 透水係数 $k$

実験室において透水試験を実施することにより求まる。一方、透水試験が行われていない場合には、粒径・粒度分布により一般的な値を推定することもできる。一例として、Milligan(1975)の図表を用いて決定することが可能である。

### 移動硬化パラメータ $B_0^*, B_1^*, C_f^*$

液状化強度曲線や繰返し応力ひずみ関係等とのフィッティングから求められるパラメータである。繰返し三軸圧縮試験等の室内試験が行われている場合には、それらの実験結果とのフィッティングから求めればよ

い。一方、N値程度の情報しかない場合には、次のように液状化強度曲線を推定した上で、フィッティングを行うことができる。

N値から砂の相対密度を求める経験則として、たとえばMeyerhof(1956)の表や道路橋示方書に書かれている

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}}$$

を用いることができる。次に、粒度配合の良い砂、悪い砂について与えられている代表的な液状化強度曲線(Tatsuokaら, 1982)を用いて液状化強度曲線を推定する。

本研究としては、移動硬化パラメータのフィッティングのための初期値として次のような値を設定した。

$$B_0^* = 2,000 \sim 10,000 \quad B_1^* = B_0^*/10 \quad C_f^* = 2,000$$

液状化強度を小さくしたい場合には、 $B_0^*$ の値を小さくする。一方、液状化強度を大きくしたい場合には、 $B_0^*$ の値を大きくするといった手順でフィッティングを行っていく。 $B_0^*$ の値に対する $B_1^*$ の値、および $C_f^*$ の値については規定しているが、液状化強度曲線のフィッティングがどうしてもうまくいかない場合には、この規定をはずしても差し支えない。

ダイレイタンス係数  $D_0^*, n$

ダイレイタンス係数は、液状化強度曲線や有効応力経路等とのフィッティングによって求める。ダイレイタンス係数の値として、通常は  $0 < D_0^* < 1$  および  $n \leq 10$  の範囲で変動させる。過剰間隙水圧の蓄積を促進させたければ、 $D_0^*$ の値を大きくしてやればよい。繰り返し回数とせん断応力比の関係として求まる液状化強度曲線の傾きを小さくさせたいければ、 $n$ の値を大きくしてやればよい。

せん断ひずみを大きく再現するための規準ひずみ  $\gamma_{DAr}^{E*}, \gamma_{DAr}^{P*}$

繰り返し応力-ひずみ関係のせん断ひずみの蓄積過程をフィッティングすることによって求める。これらの値は、応力が変相角を越えた後の弾性せん断剛性および塑性せん断剛性を、応力反転時から双曲線的に減少させるための規準ひずみを表すものである。変相角をいったん越えた後のひずみの発生量を増加させたいければ、これらの規準ひずみを小さくしてやればよい。初期の設定値として、

$$\gamma_{DAr}^{E*} = 0.05\%, \quad \gamma_{DAr}^{P*} = 0.1\%$$

程度の値を用いればよい。この関係からもわかるように、通常は $\gamma_{DAr}^{P*} = 2\gamma_{DAr}^{E*}$ 程度の大小関係を用いている。

### 3. 中部地区2地点におけるケーススタディ

本章では前章の手順に従って中部地方の2地点の砂質地盤について得られているボーリング試験・原位置試験・室内試験におけるそれぞれの情報に基づき材料定数を決定した。入力地震動として、図-1に見られる位置関係にある天白河口断層を南西側から破壊させた時に発生する工学的基盤の地震動を非定常地震動予測法(Sugito and Kameda, 1985)に基づいて計算し、これを解析基盤に与えて液状化解析を行った。

#### 3.1 A地点におけるケーススタディ

A地点における地盤の物性と解析モデル(P S検層による $V_s$ ・単位体積重量 $\gamma$ など)を表-1に示す。この表をもとにA地点の層の中から液状化の起こる可能性が高いであろうと思われる細砂層(G.L.-4.25~9.15m)と砂質シルト層(G.L.-9.15~15.65m)の2層の材料定数を求めることにした。表-2に決定したすべての材料定数を表示した。決定した材料定数を用いて繰り返し三軸試験をシミュレートした。その結果を、細砂層と砂質シルト層について図-2および図-3に示した。図中には実際に行われた実験により求められた液状化強度曲線も示されているが、両層の解析結果とも実験により得られた液状化強度曲線を良好に再現していることがわかる。

砂質シルト層下部のシルト層(G.L.-15.65~32.25m)については、非線形性を考慮するためにやはり同様の構成式を用いてモデル化した。動的変形試験による結果に近づくように材料パラメータを設定した。

図-1に見られる位置関係にある天白河口断層を南西側から破壊させた時に発生する工学的基盤の地震動を非定常地震動予測法に基づいて計算し、これを解析基盤に与えて液状化解析を行った。A地点の解析基盤において入力する地震動波形は図-4のようであり、最大加速度 282.5 gal、時間ステップ 0.02 sec、継続時間 30.0 secの条件で解析した。図-5~7に解析結果を示す。この入力地震動のもとでは細砂層は液状化に至っており、一方砂質シルト層は、間隙水圧比が最大で0.3程度となっている。

### 3.2 K地点におけるケーススタディ

K地点については詳細な土質試験データが得られていないので、標準貫入試験のN値に基づいて、材料パラメータの多くを推定した。調査地付近は標高0m以下の地帯で、20年程度前に埋立てられた場所である。地盤の物性と解析モデルを表-3に示した。

これらの図表をもとにK地点の層の中から液状化の可能性が高いと思われるシルト質砂層(G.L.-5.9~8.7m)、細砂層(G.L.-8.7~10.7m)の2層を弾塑性構成式でモデル化し、材料定数を求めた。推定した材料定数を表-4にまとめて示した。またシルト層(G.L.-1.5~5.9m)、シルト質粘土層(G.L.-10.7~34.8m)については、やはり弾塑性構成式によってモデル化した。平均N値から相対密度を想定し、液状化強度曲線を求め、その液状化強度を再現できるように数値シミュレーションを行った結果が、図-8と図-9である。

図-1に見られる位置関係にある天白河口断層を南西側から破壊させた時に発生する工学的基盤の地震動を非定常地震動予測法に基づいて計算し、これを解析基盤に与えて液状化解析を行った。K地点の解析基盤において入力する地震動波形は図-10のようであり、最大加速度212.6 gal、時間ステップ0.02 sec、継続時間30.0 secの条件で解析した。図-11に30秒までの入力加速度と地表面応答加速度を併記して示す。液状化の発生によって地表面加速度応答がかなり長周期化している様子がわかる。図-12と図-13に、シルト質砂層(A s層上部)と細砂層(A s層下部)の間隙水圧比時刻歴と有効応力経路を示す。この図からもわかるように両層ともかなりはやい時間に液状化に至ることがわかる。

### 4. おわりに

本研究では、提案している繰り返し弾塑性構成式において用いられている材料定数の決定手順について詳しく検討した。また得られた材料定数を用いて中部地方の2地点について有効応力に基づいた液状化解析を実施した。液状化を検討する地点において、十分な情報量の実験結果が提供される場合は少なく、限られた情報量のもとで、有効応力解析を実施する必要がある。このような状況下において、どのように材料定数を決定していけばよいのかを検討したものである。

A地点については、通常のボーリング、P S検層、液状化強度試験が行われている、比較的情報量の豊富な地点であり、材料定数はかなり精度よく決定された。1次元の有効応力液状化解析を行った結果、考察対象とした細砂層が液状化に至ることがわかった。

K地点については、ボーリングデータ(N値)とP S検層の結果のみが与えられていた。したがって、材料定数はN値に基づいて多くが決定された。液状化解析の結果、天白河口断層の破壊によって発生すると想定される地震動のもとでは、沖積層は液状化に達することが予想される。

### 参考文献

- Ishihara, K. and Towhata, I. (1982) : Dynamic response analysis of level ground based on the effective stress method, *Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads*, John Wiley and Sons, Chapter 7.
- Meyerhof, G.G. (1956) : Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils, *Proc. of ASCE*, Vol. 82, No. SM1, pp. 1-9.
- Milligan, V. (1975) : Field measurement of permeability in soil and rock, *Proc. of ASCE Special Conf. on In-situ Measurement of Soil Properties*, Vol. 2, pp. 3-36.
- 日本道路協会 (1990) : 道路橋示方書・同解説, V耐震設計編.
- Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R. (1994) : FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, *Applied Scientific Research*, Vol. 52, pp. 209-245.
- 大崎順彦 (1958) : 建築地盤調査法, オーム社.
- Sugito, M. and Kameda, H. (1985) : Prediction of nonstationary earthquake motion on rock surface, *Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol. 2, No. 2, pp. 149-159.
- Tateishi, A., Taguchi, Y., Oka, F. and Yashima, A. (1995) : A cyclic elasto-plastic model for sand and its application under various stress conditions, *Proc. 1st Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering*, (ed. K. Ishihara), Tokyo, Vol. 1, Balkema, pp. 399-404.
- Tatsuoka, F., Muramatsu, M. and Sasaki, T. (1982) : Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 2, pp. 55-70.

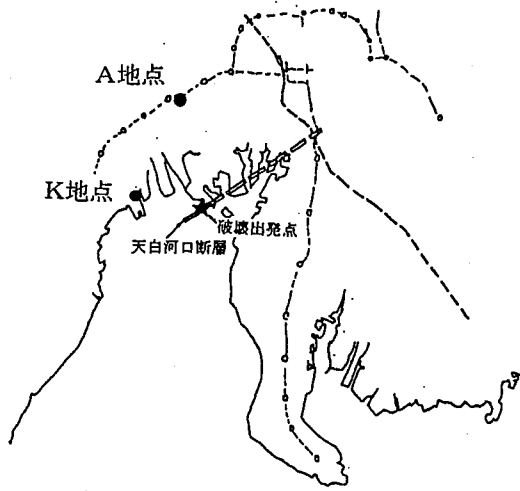


図-1 天白河口断層と2地点の位置関係

表-2 A地点地盤の材料定数

	細砂層	砂質シルト層
N値	11.0	7.8
e	0.8	1.0
Vs	96	1260
G0	1520	3150
φf	30.0	40.0
Mf	0.980	1.336
φm	26.8	36.3
Mm	0.865	1.204
λ	0.03	0.05
ν	0.25	0.30
E <sub>0</sub> <sup>*</sup>	2000	5000
E <sub>1</sub> <sup>*</sup>	200	500
C <sub>f</sub> <sup>*</sup>	2000	2000
D <sub>0</sub> <sup>*</sup>	0.8	0.6
n	2.2	8.0
γ <sub>DAR</sub> <sup>E*</sup>	0.001	0.001
γ <sub>DAR</sub> <sup>P*</sup>	0.01	0.0005

表-4 K地点地盤の材料定数

	細砂層	砂質シルト層
N値	10.0	5.0
e	0.8	0.9
Vs	160	160
G0	4960	4960
φf	29.1	25.0
Mf	0.948	0.803
φm	25.9	22.2
Mm	0.837	0.706
λ	0.03	0.04
ν	0.25	0.25
E <sub>0</sub> <sup>*</sup>	200	4000
E <sub>1</sub> <sup>*</sup>	200	400
C <sub>f</sub> <sup>*</sup>	2000	2000
D <sub>0</sub> <sup>*</sup>	1.0	1.0
n	10.0	0.0
γ <sub>DAR</sub> <sup>E*</sup>	0.001	0.001
γ <sub>DAR</sub> <sup>P*</sup>	0.01	0.0005

表-1 A地点における地盤の特性と解析モデル

区分	番号	深度 (m)	層厚 (m)	単位体積重量 (tf/m <sup>3</sup> )	S波速度 (m/sec)	規準ひずみ	最大減衰定数	せん断剛性定数 (tf/m <sup>2</sup> )
砂礫	1	1.15	1.15	1.77	94	7.31E-05	0.2	1.60E+03
	2	2.35	1.2	1.77	94			1.60E+03
	3	3.25	0.9	1.77	94			1.60E+03
シルト	4	4.25	1.0	1.77	94	4.00E-03	0.22	1.60E+03
細砂	5	5.85	1.6	1.62	94	1.20E-03	0.24	1.46E+03
	6	7.45	1.6	1.62	96			1.52E+03
	7	9.15	1.7	1.62	113			2.11E+03
砂質シルト	8	10.75	1.6	1.84	127	1.40E-03	0.22	3.03E+03
	9	12.35	1.6	1.84	126			2.98E+03
	10	13.95	1.6	1.84	133			3.32E+03
シルト	11	15.65	1.7	1.84	138	1.80E-03	0.22	3.58E+03
	12	17.25	1.6	1.72	129			2.92E+03
	13	18.85	1.6	1.72	129			2.92E+03
	14	20.45	1.6	1.72	127			2.83E+03
	15	22.05	1.6	1.52	125			2.42E+03
	16	23.75	1.7	1.52	122			2.31E+03
	17	25.45	1.7	1.52	125			2.42E+03
	18	27.15	1.7	1.56	132			3.32E+03
	19	28.85	1.7	1.59	143			3.80E+03
	20	30.55	1.7	1.59	153			5.43E+03
砂混じりシルト	22	33.45	1.2	1.77	179	4.00E-03	0.22	5.79E+03
	23	34.65	1.2	1.77	174			5.47E+03
砂質シルト	24	36.15	1.5	1.77	177	4.00E-03	0.22	5.66E+03
	25	37.65	1.5	1.77	193			6.73E+03
	26	39.15	1.5	1.77	189			6.45E+03
シルト質細砂	27	40.75	1.6	1.77	200	9.63E-04	0.24	7.22E+03
	28	42.45	1.7	1.77	227			9.31E+03
細砂	29	44.05	1.6	1.80	218	9.92E-04	0.24	8.73E+03
砂質シルト	30	45.75	1.7	1.72	226	4.00E-03	0.22	8.96E+03
	31	47.25	1.5	1.79	267			1.30E+04
砂礫	32	48.75	1.5	1.85	266	2.74E-04	0.2	1.34E+05
	33	50.25	1.5	1.90	343			2.28E+04
	34	51.75	1.5	1.90	343			2.28E+04
	35	53.25	1.5	1.90	335			2.28E+04
	36	54.85	1.6	1.90	335			2.18E+04
	37	59.35	4.5	1.90	361			2.53E+04
	38	64.35	5.0	1.90	361			2.53E+04
	39	69.35	5.0	1.90	361			2.53E+04
	40	74.35	5.0	1.90	361			2.53E+04

表-3 K地点における地盤の特性と解析モデル

地質記号	番号	深度 (m)	層厚 (m)	分割した層厚 (m)	単位体積重量 (tf/m <sup>3</sup> )	P波速度 (m/sec)	S波速度 (m/sec)	ポアソン比
BS	1	0.75	1.5	0.75	1.9	500	80	0.481
	2	1.5		0.75				
BC	3	2.75	2.5	1.25	1.65	500	80	0.481
	4	4		1.25				
BC	5	4.95	1.9	0.95	1.65	1280	160	0.488
	6	5.9		0.95				
AS	7	8.3	4.8	2.4	1.9	1280	160	0.488
	8	10.7		2.4				
AC1	9	12.6	8.3	1.9	1.75	1280	160	0.488
	10	14.5		1.9				
	11	19		4.5				
AC2	12	22.95	15.8	3.95	1.75	1280	160	0.488
	13	26.9		3.95				
	14	30.85		3.95				
	15	34.8		3.95				
	16	36		1.2				
ASF	17	37.2	3.7	1.2	1.75	1280	160	0.488
	18	38.5		1.3				
	19	39.4		1.8				
DC1	20	40.3		0.9				
	21	42.6	4.6	2.3	1.75	1760	370	0.466
DG1	22	44.9		2.3				
	23	45.95	2.1	1.05	1.75	1760	370	0.466
DC1	24	47		1.05				
	25	52.6		5.6				
	26	58.2	16.7	5.6	1.75	1760	370	0.466
DG1	27	63.7		5.5				
	28	64.75	2.1	1.05	1.75	1760	370	0.466
DC1	29	65.8		1.05				
	30	66.25	0.9	0.45	1.75	1760	370	0.466
DC1	31	66.7		0.45				
	32	67.35	1.3	0.65	1.75	1760	370	0.466
	33	68		0.65				
DS1	34	70.25	4.5	2.25	1.75	1760	370	0.466
	35	72.5		2.25				
	36	78.9		6.4				
DC2	37	85.3	19.1	6.4	1.75	1520	240	0.481
	38	91.6		6.3				
	39	91.6						

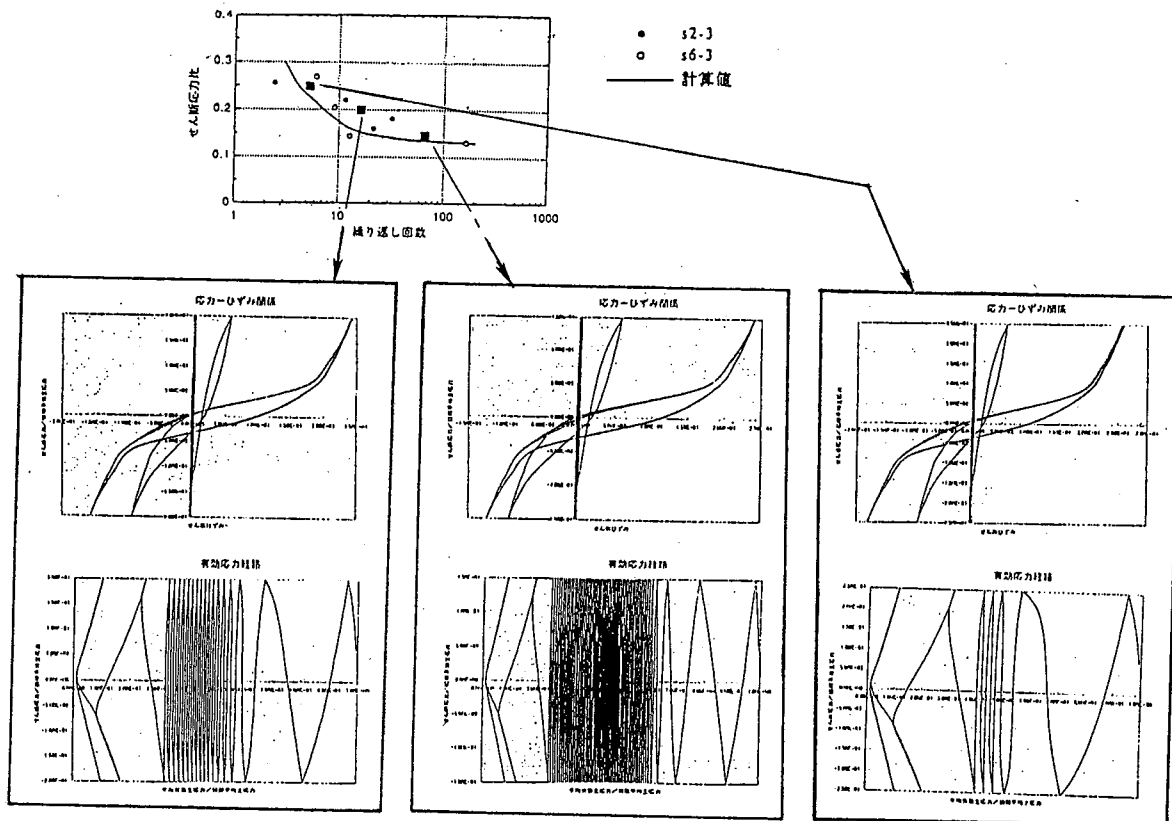


図-2 細砂層における液状化強度試験結果と数値シミュレーション

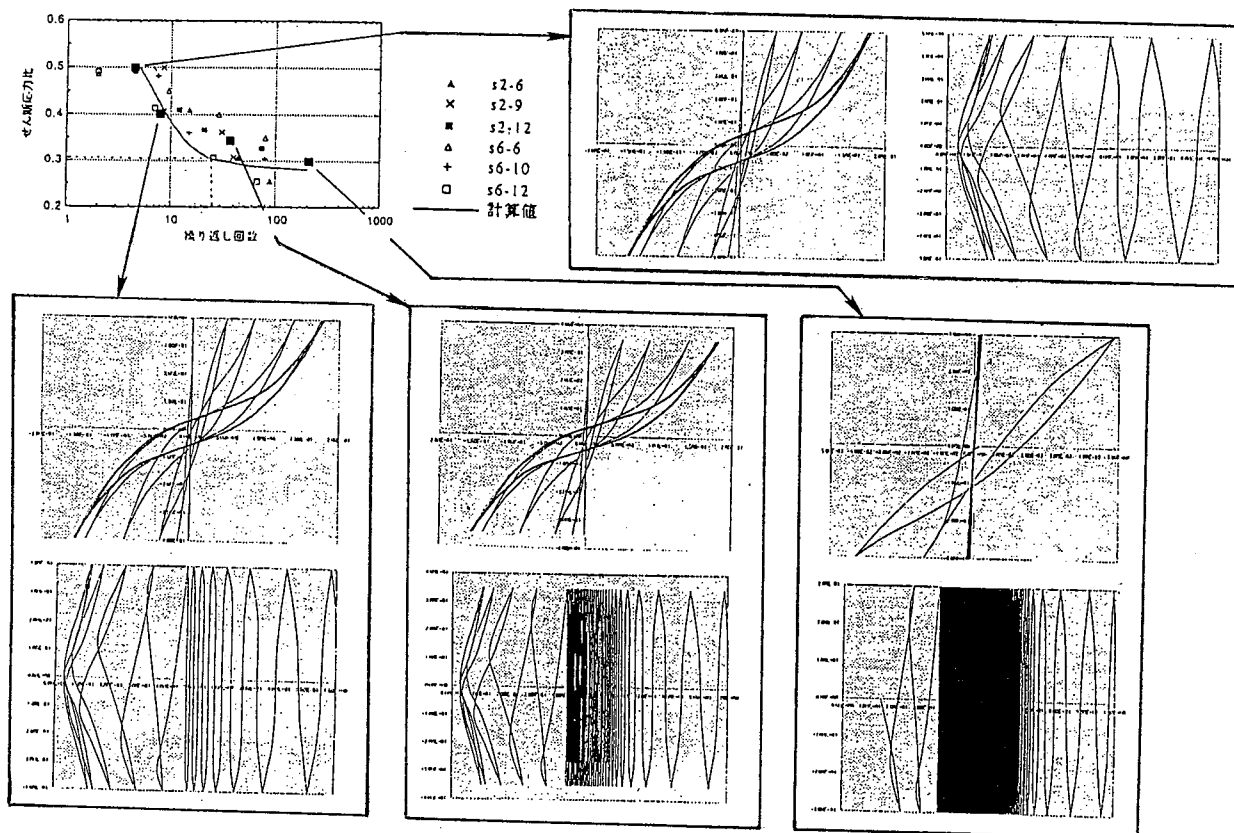


図-3 砂質シルト層における液状化強度試験結果と数値シミュレーション

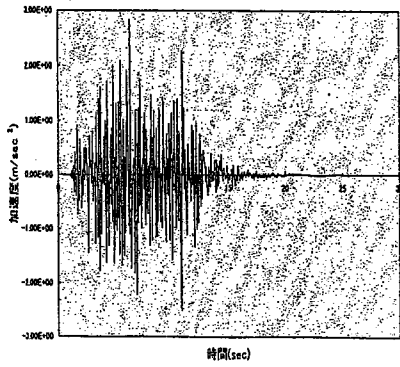


図-4 入力加速度の時刻歴

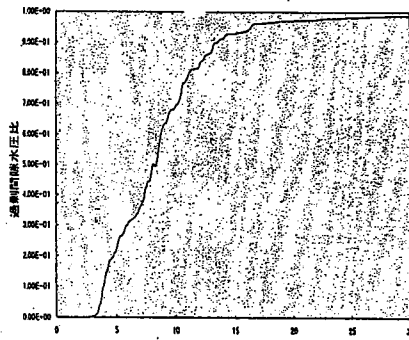


図-6 細砂層の間隙水圧比時刻歴と有効応力経路

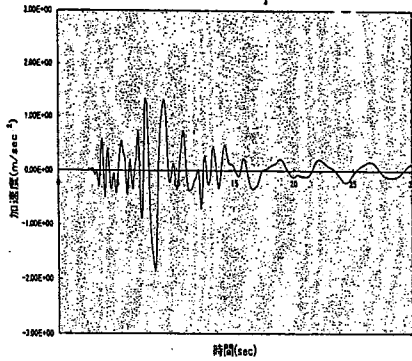
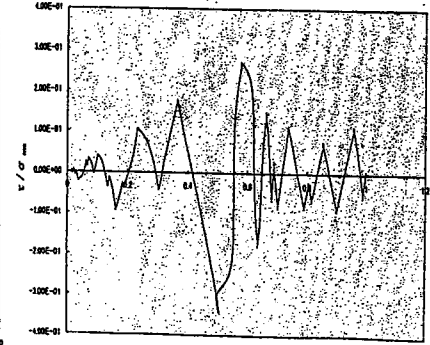


図-5 地表面加速度の時刻歴

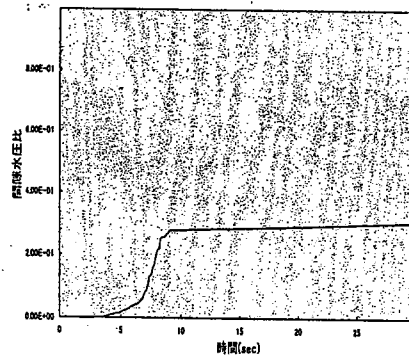
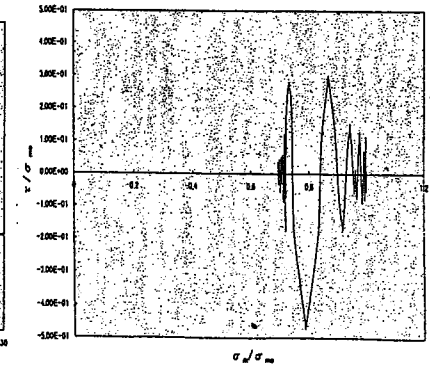


図-7 砂質シルト層の間隙水圧比時刻歴と有効応力経路



粒度配合の良い砂 (浅間山土)  
(平均N値=5程度)

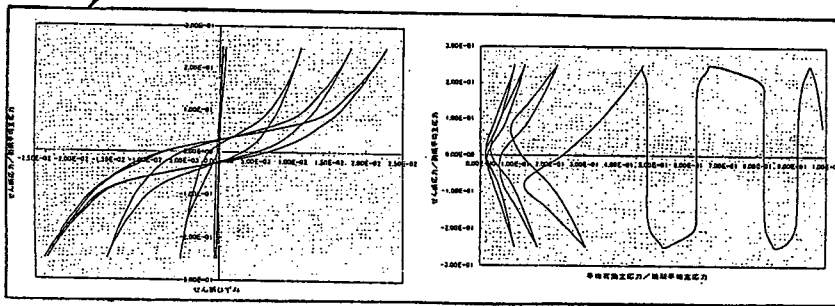
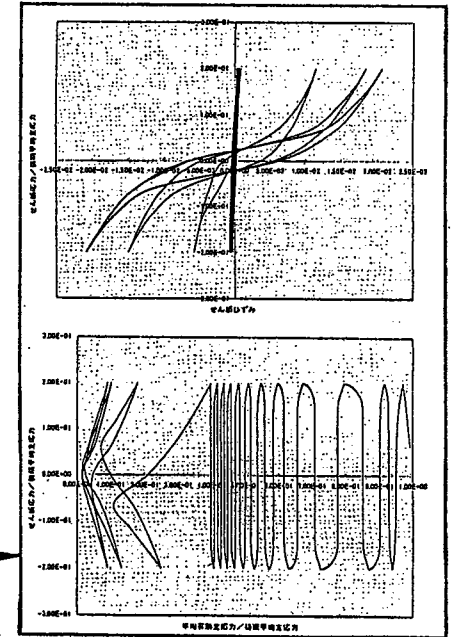
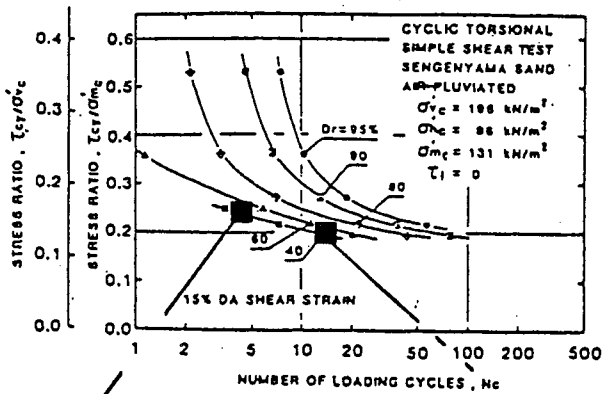


図-8 シルト質細砂の想定液状化強度と数値シミュレーション

粒度配合の悪い砂（豊浦砂）  
（平均N値=15程度）

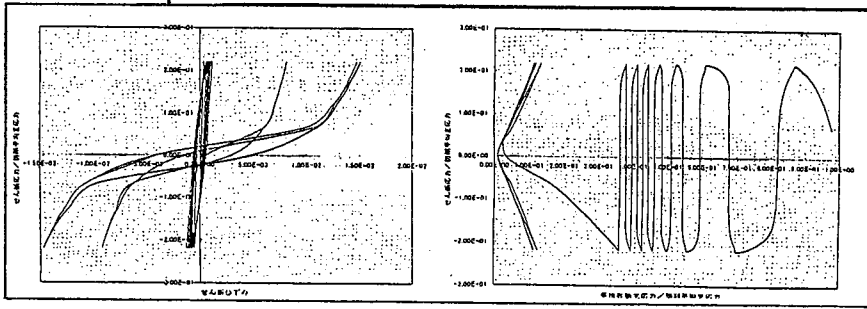
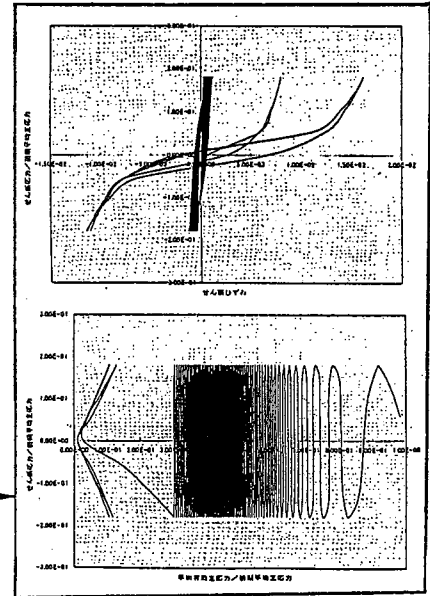
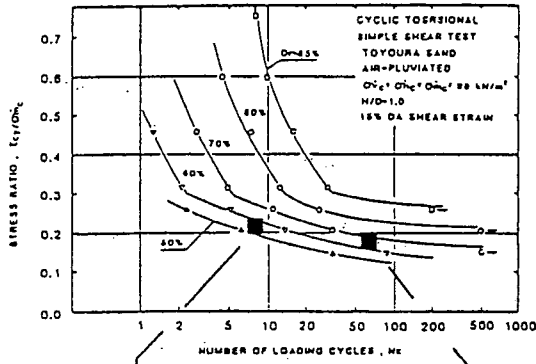


図-9 細砂の想定液状化強度と数値シミュレーション

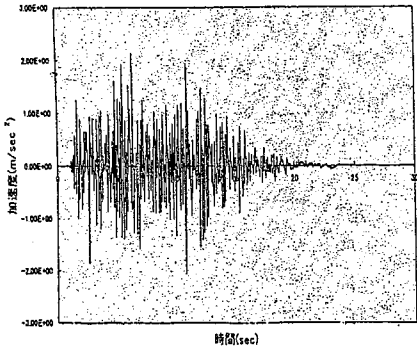


図-10 入力加速度の時刻歴

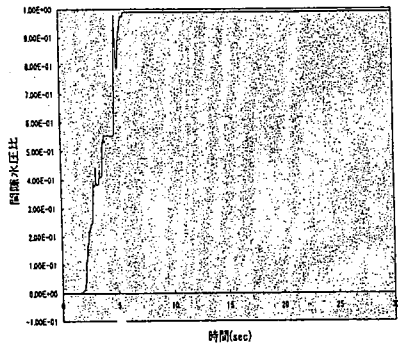


図-12 As層上部の間隙水圧比時刻歴と有効応力経路

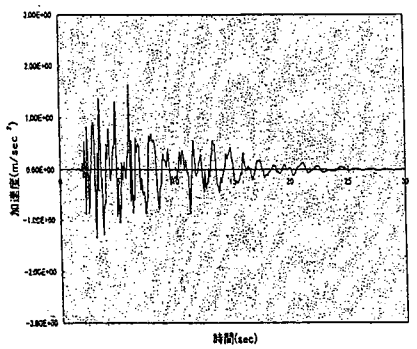
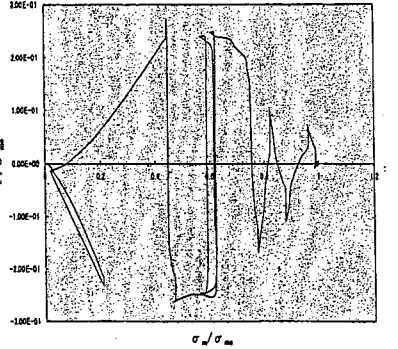


図-11 地表面加速度の時刻歴

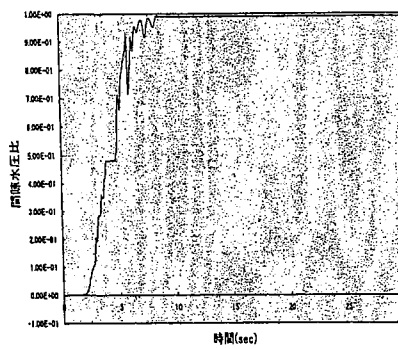


図-13 As層下部の間隙水圧比時刻歴と有効応力経路

