

## (29) 細粒分を含む自然堆積地盤の液状化特性

東京都建設局 ○草野 郁 阿部 博 岩本恵一

1. はじめに 東京低地の表層には細粒分を含む軟弱な砂質土や砂混りのシルト層が広く分布している。道路橋示方書<sup>1)</sup>では液状化対象層にシルト系の土を含めていることから、液状化の可能性を検討する際には細粒分を含む砂質土の液状化特性を明らかにする必要がある。ここでは、東京低地の自然堆積地盤で採取した不攪乱土の液状化試験結果から細粒分を含む砂質土の液状化特性を検討し、東京低地に適用しうる液状化強度推定式を提案した。”液状化強度～繰返し回数の関係”と”累積間隙水圧～繰返し回数の関係”について整理した上で、図-1の位置図に示す都内東北部No.1～No.3地点について、有効応力法に基づく液状化解析プログラム”EFFCTD”による液状化解析を行い、細粒分を含む自然堆積地盤の液状化特性を検討した。さらに、同一入力波形を用いた全応力解析を行い、液状化抵抗係数 $F_L$ 値を求めて”EFFCTD”から得られた累積間隙水圧比と比較した。

### 2. 細粒分を含む自然堆積不攪乱土の液状化特性

(1)液状化強度推定式 有効拘束圧と上載圧の比 $K_c(=\sigma'_o/\sigma'_v)$ が0.75～1.25の試験条件のデータから、繰返し回数 $N=20$ 回で両ひずみ振幅 $DA=5\%$ に至る液状化強度を $R_L(20)$ としたとき、 $R_L(20)$ と実測された試料の相対密度 $D_{r,f}$ の関係は、細粒分の含有量によらず $R_L(20)/D_{r,f} \approx 0.40$ となることをみいだした<sup>2)</sup>。一方、 $N$ 値から推定される相対密度 $D_r^*(=21\sqrt{N}/(\sigma'_v+0.7))$ と $D_{r,f}$ の関係は細粒分含有率 $F_o$ が5～10%以下と小さいときに限り $D_r^* \approx D_{r,f}$ が成り立つことも示した<sup>2)</sup>。これは、 $N$ 値から $R_L$ を推定する場合、細粒分の含有量によって $R_L$ が大きく変化することを意味している。このことから、 $R_L$ は次式で推定できるとした<sup>2)</sup>。

$$R_L = R_1(N, \sigma'_v) + R_2(D_{50}) + R_3(F_o) + R_4(\sigma'_v) \quad \dots (1)$$

$F_o < 60\%$ の砂質土については、東京低地の液状化予測<sup>3)</sup>で使用したデータの分析によると(1)式で表される $R_L$ は次式となった<sup>2)</sup>。

$$R_L = 0.0882 \sqrt{N/(\sigma'_v+0.7)} + 0.22 \cdot \log_{10} 0.2/D_{50} + 0.085 \cdot \log_{10}(F_o+1) - 0.07 \cdot \log_{10} \sigma'_v \quad \dots (2)$$

予測作業後に得られた液状化試験値を追加し、 $K_c = 0.75 \sim 0.125$ 、 $\sigma'_o = 0.75 \sim 1.25 \text{ kgf/cm}^2$ の試験値について、 $DR_L (=R_L(20)-R_1)$ と $D_{50}$ 、 $F_o$ の関係を求め図-2、図-3に示す。図-2から、 $D_{50}$ のみの補正では $DR_L$ のばらつきは大きい、図-3からは、 $F_o > 50\%$ について $F_o$ だけでも $DR_L$ を近似できることがわかる。図-3の $F_o > 50\%$ の範囲で $DR_L$ を表すと次式のようになる。

$$DR_L \approx 0.0027 \cdot F_o + 0.065 \quad \dots (3)$$

$F_o \leq 50\%$ については粒度による補正項として(1)式に示す $R_2$ と $R_3$ を含める。ここでは、 $F_o = 50\%$ で(3)式と(2)式で $R_L$ が同じ値を示すように推定式に連続性をもたせること、浅層での予測値を若干小さな値に抑えることなどを配慮して(1)式に示す $R_2$ と $R_3$ 、 $R_4$ の各係数を修正した。(3)式と以下に示す(4)、(5)式を砂質土および細粒分を含む自然堆積地盤の液状化強度推定式とし、提案式と呼ぶ。

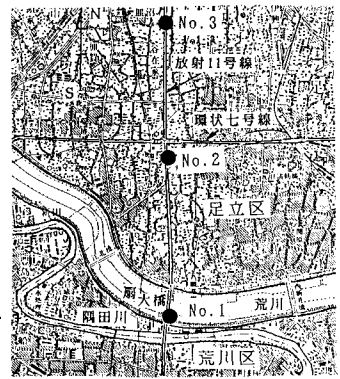


図-1 調査・解析位置図

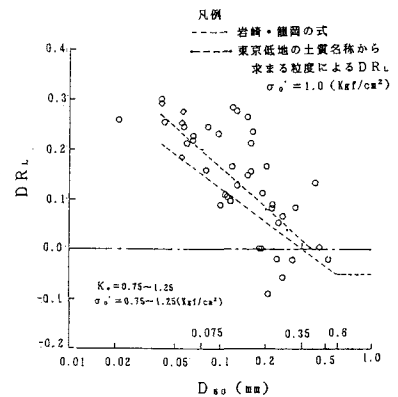


図-2  $DR_L$ と $D_{50}$ の関係

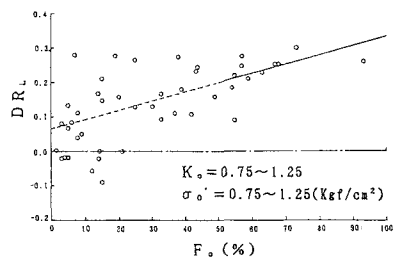


図-3  $DR_L$ と $F_o$ の関係

$$0.075 \leq D_{50} \leq 0.50 \text{mm}$$

$$R_L = 0.0882 \sqrt{N/(\sigma'_v + 0.7)} + 0.21 \cdot \log_{10} 0.2/D_{50} + 0.065 \cdot \log_{10}(F_c + 1) - 0.065 \cdot \log_{10} \sigma'_v \quad \dots (4)$$

$$D_{50} > 0.50 \text{mm}$$

$$R_L = 0.0882 \sqrt{N/(\sigma'_v + 0.7)} - 0.084 + 0.065 \cdot \log_{10}(F_c + 1) - 0.065 \cdot \log_{10} \sigma'_v \quad \dots (5)$$

(3)~(5)式による推定値 $R_L$ と道路橋示方書の式による推定値 $R_L$ を試験値 $R_L(20)$ から、 $R_L/R_L(20) \sim F_c(\%)$ の関係で整理し図-4に示す。図から、両手法ともに推定値と試験値の関係にはばらつきが見られるが、細粒分を含む砂質土に関しては道路橋式は試験値との差が大きく、提案式の方が適切な推定値を示すといえる。

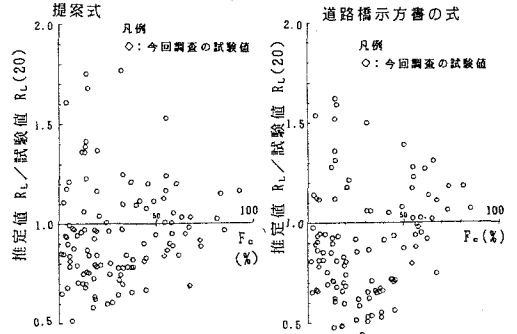


図-4 推定値と試験値の関係

(2) 液状化強度と繰返し回数の関係 20回の繰返し回数で軸ひずみ両振幅 $DA$ が5%に至るときの液状化強度応力比を $R_L(20)$ とし、 $N$ 回で $DA=5\%$ に至るときの液状化強度応力比を $R_L(N)$ とする。 $K_0=0.75 \sim 1.25$ の試験条件の液状化試験から、 $R_L(N)/R_L(20)$ と $N$ の関係を両対数座標上にプロットしてその傾きを求めた。細粒分含有率 $F_c$ が20%以下の細砂で、 $N$ 値と $\sigma'_v$ から求まる相対密度 $D_r^*$  ( $=21 \sqrt{N/(\sigma'_v + 0.7)}$ )が60%以下のゆるい試料の $R_L(N)/R_L(20) \sim N$ の関係を図-5(a)に、 $D_r^* > 60\%$ の密な試料について図-5(b)に示す。図-5(a)と(b)を比べると、僅かであるが $D_r^*$ が大きくなると $R_L(N)/R_L(20) \sim N$ の勾配 $a$ は急になる傾向が見られる。 $F_c > 70\%$ のシルト系試料の $R_L(N)/R_L(20) \sim N$ の関係を図-5(c)に示すが、勾配 $a$ は緩くなる傾向がある。 $F_c$ と $D_r^*$ の大小で試験データを区分し、得られた勾配の逆数を $\eta (=1/a)$ として求め表-1に示す。

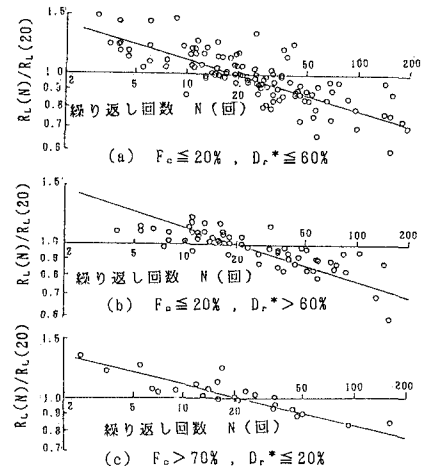
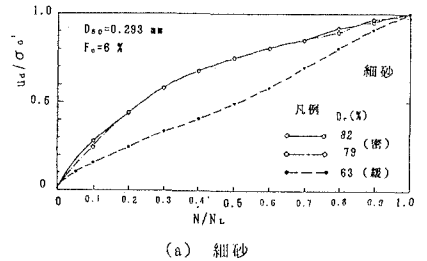
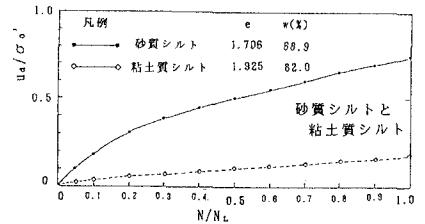


図-5  $R_L(N)/R_L(20)$ と $N$ の関係

(3) 累積間隙水圧と繰返し回数の関係 中空ねじり試験において、 $N_L$ 回の繰返し回数でせん断ひずみ振幅 $\gamma_{DA}$ が、振動三軸の軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ に相当する7.5%に達したときを液状化とみなし、累積間隙水圧比 $u_d/\sigma'_0$ と液状化に至る繰返し回数比 $N/N_L$ の関係を求める。細粒分の少ない細砂の試験結果を図-6(a)、砂質シルトと粘土の試験結果を図-6(b)に示す。図-6(a)によると、密な砂は少ない繰返し回数比で水圧上昇が大きくなる傾向を示し、ゆるい砂は繰返し回数が多くなるに従い水圧が急増する傾向を示す。一方、図-6(b)によると、繰返し回数比 $N/N_L$ が増加するに従い緩やかに $u_d/\sigma'_0$ は上昇するが、 $\gamma_{DA}=7.5\%$ では $u_d/\sigma'_0$ は70%前後にとどまり水圧は有効拘束圧に至らない。粘土での $u_d/\sigma'_0$ は20%以下にとどまる。これらの試験結果をSeedら<sup>4)</sup>の過剰間隙水圧上昇の実験式から得られる $u_d/\sigma'_0 \sim N/N_L$ 関係式に照合させてパラメータを決定した。得られた表-1に示す。



(a) 細砂



(b) 砂質シルトと粘土質シルト

図-6  $u_d/\sigma'_0$ と $N/N_L$ の関係

### 3. 有効応力解析

(1) 有効応力解析プログラム"EFFCTD"<sup>5), 6)</sup> "EFFCTD"は水平地盤や盛土地盤を解析対象にした直接積分時刻歴液状化解析プログ

ラムである。土の動的応力～ひずみ関係には修正Rambert-Osgoodモデルを用いている。弾性法に基づく手法であることから、ダイレタンシーが評価できないため、国生ら<sup>7)</sup>の方法(累積損傷度理論<sup>8)</sup>にSeedら<sup>4)</sup>の提案した過剰間隙水圧上昇式を組み込みこむ方法で、 $R_L(20)$ と表-1に示した $\eta$ と $\xi$ を使用する)で累積過剰間隙水圧を求めている。

表-1 土質パラメータ

土質名称	疎密の状況 Dr' (%)	10m未満 N値	10m以上 N値	$\eta$ (1/a)	$\xi$	$u_0/\sigma'_v$ の 設定最大値(t)	有効応力表示 $\sigma'(\text{t})$ $\phi_{ex}(\text{t})$
細砂～中砂	緩い	< 60	< 10	< 15	-7.0	100	40 28
	密	60～80	10～20	15～25	-6.0	100	42 28
	極めて密	> 80	> 20	> 25	-5.0	100	44 28
シルト混じり細砂 ～シルト質細砂	緩い	≤ 40	≤ 5	≤ 10	-6.5	100	40 28
	密	> 40	> 5	> 10	-5.5	90	41 28
砂質シルト～ 砂混じりシルト	緩い	≤ 30	≤ 2	≤ 3	-7.0	80	38 28
	密	> 30	> 2	> 3	-6.5	70	39 28
シルト	緩い	≤ 1	≤ 1	≤ 2	-7.5	50	36 28
	密	> 1	> 1	> 2	-7.0	40	39 28
粘土					-7.5	20	38 28

(2) 解析条件 入力基盤面はN値 50以上の洪積層上面とした。入力地震波形には、1968年十勝沖地震(M=7.9)の際に青森県の八戸港で観測された地表加速度波形のN-S成分を、地震応答解析によって観測地点の基盤に戻した波形(以降八戸波と呼ぶ)と1978年宮城沖地震(M=7.4)の際に宮城県の大船渡港の岩盤上で観測された加速度波形E-W成分である(以降大船渡波と呼ぶ)。それぞれの波形の最大振幅を170と220 galに調整し地震継続時間を15秒間の入力波形とした。図-7に入力波形( $\alpha_{E, \max}=170$ )を示す。地盤モデルは次元とし、Lysmerのダッシュポットを使い解放基盤の加速度(入射加速度の2倍の値)を3地点の基盤に作用させている。側方境界は、左右のX, Y 方向の変位が等しくなるようにタイイングを作用させた。過剰間隙水圧は各モデルの地下水位以下で発生すると考え、地下水位以上では応力～ひずみの非線形性だけを考慮している。直接積分法には初期剛性法を用いた Newmark -  $\beta$ 法を使い、積分時間間隔を入力地震波の時間増分である 0.01 secとかなり粗くとした。解析の安定性を保つためレーレー減衰を使い、 $\alpha=0.0$ 、 $\beta=0.0005$  を与えている。有効応力解析に使用する液状化強度 $R_L$ は推定式(3)～(5)から求めたが、密な砂地盤については国生らが提案した液状化強度算定式<sup>9)</sup>から  $D_{50}$ の補正項を除いた式を $R_L$ とした。内部摩擦角は砂質土に対しては圧密排水試験(CD)、粘性土は圧密排水試験(CU)から求めている。さらに、修正 R-0

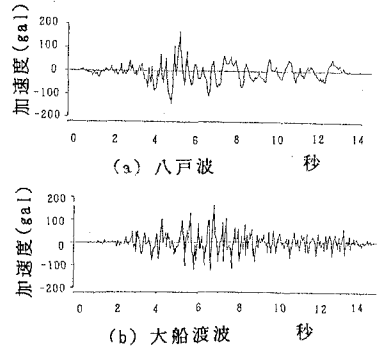


図-7 入力地震波形

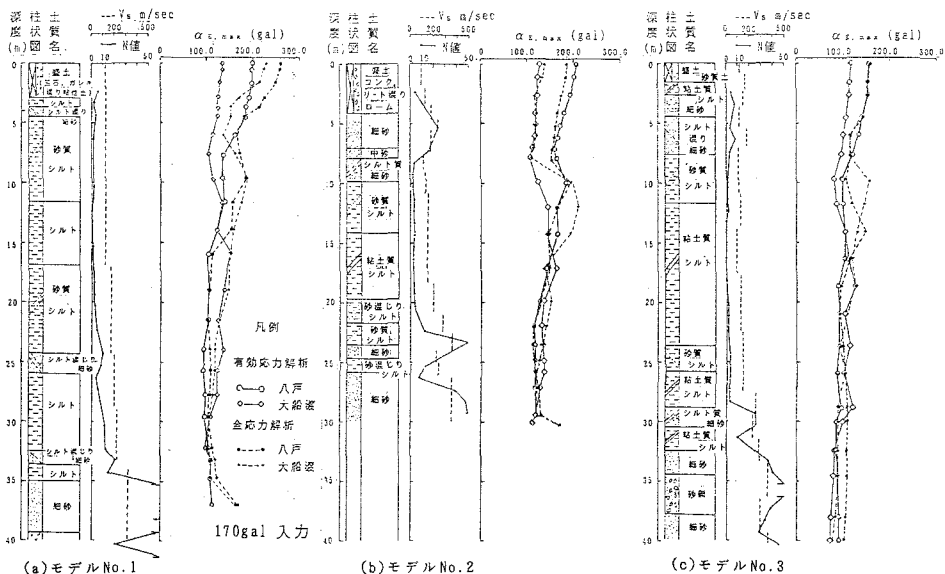


図-8 最大応答加速度深度分布

モデルの非線形パラメータは、東京低地の液状化予測に使用した減衰比 $\beta$ -せん断ひずみ曲線<sup>3)</sup>をモデルNo.1~3での土質名称と有効拘束圧から選り最大減衰比 $h_{max}$ から推定している。モデルNo.1~3での有効応力解析と全応力解析から求められた最大応答加速度 $\alpha_{E,max}$ の深度分布を図-8(a)、(b)、(c)に示す。最大せん断応力比 $\tau_{E,max}/\sigma'_v$ と有効応力解析から得られた累積間隙水圧比 $u_d/\sigma'_v$ 、全応力解析での $F_L$ 値の深度分布を図-9(a)、(b)、(c)に示す。

### (3) 有効応力解析結果

モデルNo.1 (シルト系地盤)とモデルNo.2 (シルト系土層の表層に密な砂層が堆積している地盤)、モデルNo.3 (細粒分を多く含むゆるい砂層が堆積している地盤)の有効応力解析から、入力規模および入力地震波形の違いが地盤の液状化現象に及ぼす影響が大きいことが確認できた。同一入力加速度振幅の比較から、八戸波は大船渡波より液状化を生じやすい波形といえる。累積間隙水圧に着目すると、細粒分を多く含む自然堆積地盤の液状化特性として、細粒分を多く含む砂質土や砂質シルトでは液状化の可能性が少ないが、極端に軟弱な場合には地震時の弱体化現象や液状化の可能性がありうることを示唆する結果が得られた。また、シルトでは累積間隙水圧の上昇は少なく液状化現象は生じない結果が得られた。有効応力解析と同一入力での"SHAKE"を用いた全応力解析を行ったが、累積間隙水圧が少ないモデルNo.3では両解析法の加速度とせん断応力値はほぼ一致する。逆に液状化に近い状態を示すモデルNo.1では、全応力解析の結果である加速度、せん断応力が過大となる。また、中間層に液状化層があるモデルNo.2では、有効応力解析の挙動は複雑で全応力結果と単純に比較できない結果となった。

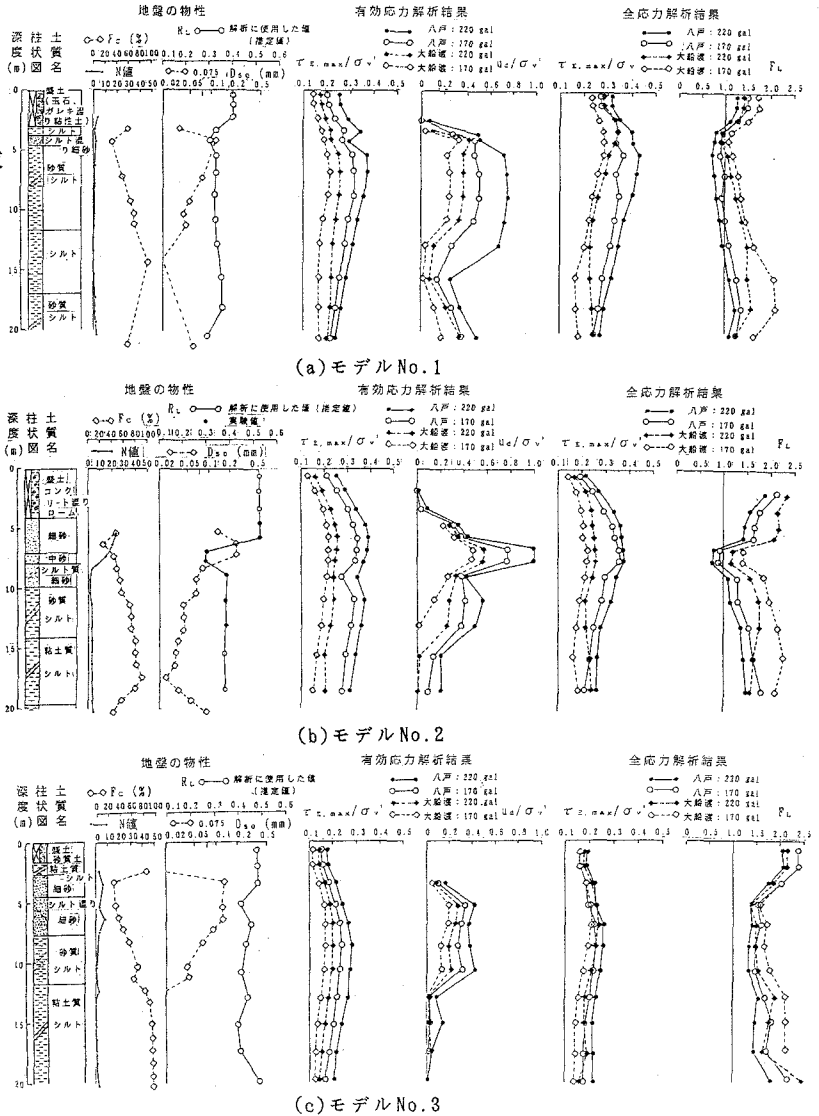


図-9 液状化解析結果

参考文献 1)日本道路協会(1980):道路橋示方書V耐震設計編  
 2)草野部(1980):細粒分を含む砂質土の液状化強度の推定法、土木学会論文集 第418号/Ⅲ-13 55-64  
 3)東京都土木技術研究所(1987):東京低地の液状化予測、土質工学会  
 4)Seed, H. B. et al.(1976): Pore Water Pressure changes during Soil Liquefaction, Proc. ASCE, Vol. 102, GT4, 323-348  
 5)阿部博、草野部(1980):水田地盤の液状化解析、平2、都土木技研年報、293-308  
 6)阿部博、草野部(1981):水田地盤の液状化解析、平3、都土木技研年報、287-278  
 7)国生剛治、江刺靖行、桜井彰雄(1992):砂層の液状化現象についての数値シミュレーション、電中研報告、No.381023  
 8)Annak, M. and Lee, K. L. (1977): Equivalent Uniform Cycle Concept for Soil Dynamics, Proc. ASCE, Vol. 103, GT84, 549-564  
 9)国生剛治、吉田保夫、長崎清(1984):密な砂地盤のN値による液状化判定法、第19回土質工学研究発表会、559-582