

# 細粒分を含む砂質地盤の液状化強度の推定法

## A METHOD OF ESTIMATING THE LIQUEFACTION STRENGTH OF SANDY GROUNDS CONTAINING FINES

草野 郁\*  
By Kaoru KUSANO

The investigation of liquefaction-induced ground failures during the Kanto earthquake in Tokyo lowland shows that the sandy deposits containing only a small amount of fines were more prone to liquefy rather than those containing considerable amount of fines. The undrained cyclic strength of undisturbed specimens containing fines is considerably strong in spite of small SPT  $N$ -values. The formula estimating liquefaction strength proposed herein is formed not only with SPT  $N$ -values, effective overburden pressure and mean diameter, but also with fines contents and confining stress. The grounds which consist of liquefiable sandy deposits within surface layers are generally likely to induce severe ground failures. So a criterion of liquefaction susceptibility with  $F_L$  values of surface layers is proposed herein in order to estimate liquefaction potential for wide area. According to the comparison between the liquefaction analysis for boring records in actually liquefied sites and unliquefied sites during the earthquake, combination of  $F_L$  values on sandy surface layers and  $P_L$  values gives more reasonable estimation.

*Keywords*: liquefaction, fines content ratio, mean diameter, liquefaction potential index

### 1. まえがき

東京低地の表層には細粒分を含む軟弱な砂質土が広く分布している。この地域で採取した不攪乱試料の繰り返し三軸試験によると、細粒分を多く含む砂質土では標準貫入試験の  $N$  値が小さいにもかかわらず液状化強度は大きくなる結果が得られた<sup>1)</sup>。一方、東京低地を対象とした関東地震の液状化履歴調査によると、現河川沿いや旧河川筋に分布する細粒分をあまり含まない砂地盤では液状化が発生しやすく、現・旧河川から離れた地域に分布する細粒分を多く含む地盤では液状化が発生しにくい結果が得られ<sup>1), 2)</sup>、試験結果と符合する傾向がみられた。

この研究は、東京都が地震被害想定の一環として“東京低地の液状化予測<sup>1)</sup>”を行った際に、このような東京低地の液状化特性を反映させた予測手法を作成することを目的として行ったものである。不攪乱試料の繰り返し三軸試験結果から細粒分と試験時の拘束応力が液状化強度に及ぼす影響について検討し、平均粒径、細粒分含有率、拘束応力の補正を加えた液状化強度の推定法を求めた。この結果をもとに液状化予測式を作成して関東地震の液状化発生・非発生地域の解析を行い、地域被害想定

のような広域を対象とする液状化予測法について検討し、関東地震規模の地震動の襲来を想定した東京低地の液状化予測を領域図によって表わした<sup>1)</sup>。

### 2. 細粒分を含む不攪乱試料の液状化強度特性

東京低地で採取した不攪乱試料を用いた繰り返し三軸試験結果から、細粒分を含む砂質土の液状化強度特性について検討する。試験時の有効拘束応力  $\sigma'_0$  は地盤中の有効上載圧  $\sigma'_v$  に近い値としてその比  $\sigma'_0/\sigma'_v$  が 0.75～1.25 の試験条件のデータだけを採用し、20 回の繰り返し回数で軸ひずみ両振幅が 5% に達するときの繰り返しせん断応力比を液状化強度  $R_L$  とする。

土質工学会の土質試験法で定められた砂の最大・最小密度を求める試験法<sup>3)</sup>は、細粒分含有率  $F_c$  が 5% 以下の砂を対象としたものであり、細粒分を多く含む砂質土に対して決められたものではないが、ここでは、細粒分を多く含む砂質土についてもこの試験法により最大間隙比と最小間隙比を求め、この値を使用し不攪乱試料の相対密度とする。

圧密後の供試体の相対密度を  $D_r$  とし、試験時の拘束応力が小さな  $\sigma'_0 = 0.3 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  と、それより大きな  $\sigma'_0 = 0.75 \sim 1.25 \text{ kgf/cm}^2$  の試験データから得られる  $R_L$  と  $D_r$  の関係を、それぞれ黒ぬり印と白ぬき印によ

\* 正会員 工修 東京都土木技術研究所  
(〒108 港区港南 1-1-18)

て図-1に示す。σ'₀=0.3~0.5 kgf/cm²の黒めり印のR<sub>L</sub>は、σ'₀=0.75~1.25 kgf/cm²の白めき印のR<sub>L</sub>より上位に分布する傾向がみられる。攪乱砂の液状化試験では、同一相対密度の繰り返しせん断応力は拘束応力に比例し、その比R<sub>L</sub>は一定の値を示すとされている<sup>4)</sup>が、これに対して不攪乱砂の繰り返し三軸試験では、類似した相対密度でσ'₀≐σ'₀の試験条件であっても、図-1に示すように拘束応力の小さい方がR<sub>L</sub>は大きくなる。

液状化強度に及ぼす拘束応力の影響を少なくするために、試験条件としてσ'₀<0.5 kgf/cm²とσ'₀>1.5 kgf/cm²のデータを除き、σ'₀=0.5~1.5 kgf/cm²のデータからR<sub>L</sub>とD<sub>r</sub>の関係を求め図-2に示す。この図によると、ばらつきはあるがD<sub>r</sub>が大きくなるに伴いR<sub>L</sub>が増加することがわかる。

次に、図-2に示すデータにF<sub>c</sub>>60%のデータを加え、R<sub>L</sub>/D<sub>r</sub>とF<sub>c</sub>の関係を図-3に示す。R<sub>L</sub>/D<sub>r</sub>とF<sub>c</sub>の関係はばらつきは大きいですが、R<sub>L</sub>/D<sub>r</sub>はF<sub>c</sub>の大小によ

らずほぼ一定な値を示す傾向がみられ、細粒分の多少によらずD<sub>r</sub>が同じ値であれば、R<sub>L</sub>の大きさはほぼ類似した値になることがわかる。

### 3. 液状化強度の推定法

#### (1) 推定法の考え方

標準貫入試験のN値と有効上載圧σ'₀(kgf/cm²)から推定される相対密度D\*<sup>\*</sup>に、攪乱砂を使用した繰り返し三軸試験のD<sub>r</sub>=50%における平均的な液状化強度を乗じて得られる強度応力比R<sub>1</sub>は式(1)で表わされる。

$$R_1 = 0.42 D_*^* = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_0 + 0.7}} \dots\dots\dots (1)$$

岩崎・龍岡ら<sup>5)</sup>はこのR<sub>1</sub>に平均粒径D<sub>50</sub>による補正項DR<sub>L</sub>を加え、繰り返し振動三軸試験による不攪乱砂の液状化強度R<sub>L</sub>を式(2)で表わした。

$$R_L = R_1 + DR_L \dots\dots\dots (2)$$

不攪乱試料の採取時における相対密度を原位置相対密度D<sub>rr</sub>で表わし、D\*<sup>\*</sup>との比D\*<sup>\*</sup>/D<sub>rr</sub>とF<sub>c</sub>の関係を図-4に示す。この図によると、N値、σ'₀から推定されるD\*<sup>\*</sup>と実測値D<sub>rr</sub>との関係は、細粒分をほとんど含まない砂地盤に限りD\*<sup>\*</sup>がD<sub>rr</sub>に近い値になるだけで、細粒分を多く含む砂質地盤ではD\*<sup>\*</sup>はD<sub>rr</sub>より著しく小さくなるがわかる。

一方、図-3によると、R<sub>L</sub>と圧密後の供試体の相対密度との比R<sub>L</sub>/D<sub>r</sub>はF<sub>c</sub>の大小に関係なく一様な値を示すことから、D<sub>rr</sub>がわかればR<sub>L</sub>を推定することが可能である。したがって、式(2)のDR<sub>L</sub>は、細粒分の増加に伴いD\*<sup>\*</sup>が実際の相対密度より小さな値を示す傾向を補正する項であると考えられることもできる。

このような液状化強度R<sub>L</sub>に及ぼす細粒分の影響、および図-1に示すR<sub>L</sub>に及ぼす拘束応力の影響を考慮し、ここではDR<sub>L</sub>を、式(2)に示すように平均粒径D<sub>50</sub>だけで表わすのではなく、D<sub>50</sub>による補正項R<sub>2</sub>のほか

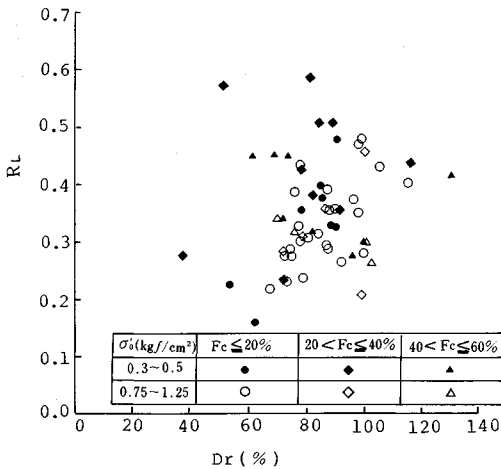


図-1 R<sub>L</sub>とD<sub>r</sub>の関係

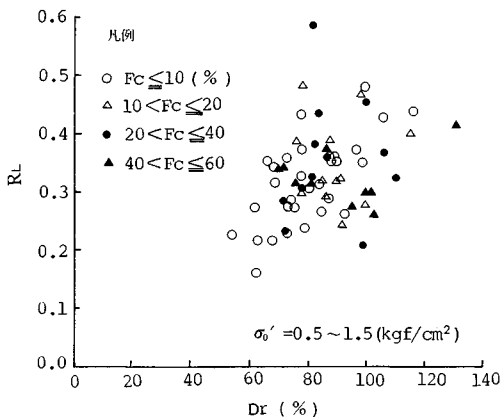


図-2 R<sub>L</sub>とD<sub>r</sub>の関係

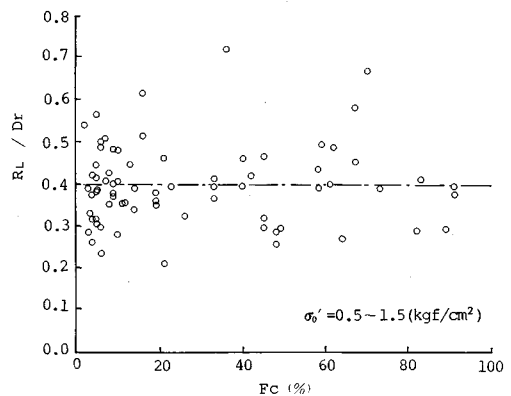


図-3 R<sub>L</sub>/D<sub>r</sub>とF<sub>c</sub>の関係

に  $F_c$  による補正項  $R_3$ , 拘束応力による補正項  $R_4$  を加え,  $R_L$  を次式で表わす.

$$R_L = R_1 + DR_L = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \dots \dots \dots (3)$$

(2) 平均粒径と細粒分による補正

液状化強度に及ぼす拘束応力の影響を少なくするため,  $\sigma'_v < 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  と  $\sigma'_v > 1.5 \text{ kgf/cm}^2$  のデータを除き,  $\sigma'_v = 0.5 \sim 1.5 \text{ kgf/cm}^2$  の試験条件のデータを使用し,  $F_c = 0 \sim 5\%$ ,  $0 \sim 20\%$ ,  $10 \sim 30\%$ ,  $20 \sim 40\%$ ,  $30 \sim 50\%$ ,  $40 \sim 60\%$  の各区分ごとの  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を図-5に示す. 図中の破線は岩崎・龍岡ら<sup>5)</sup>が提案した  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を示したものであり, 実線は破線と傾きが同じになると仮定し, 試験値から  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を求めたものである. この図によると, 同じ大きさの  $D_{50}$  に対し  $F_c$  が大きいほど  $DR_L$  は大きな値を示す. このことから,  $N$  値と  $\sigma'_v$  から推定される  $D^*$  が同じ値であっても, 液状化強度  $R_L$  は  $D_{50}$  だけでなく  $F_c$  の大きさによっても左右され, 細粒分を多く含むほど  $R_L$  は大きくなることわかる.

図-5に示す  $F_c$  の区分から, 各区分の中心値をそれぞれ 2.5, 10, 20, 30, 40, 50% とする. 図中の実線で示す  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係から,  $D_{50} = 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40 \text{ mm}$  の  $DR_L$  を読み取り, 各  $D_{50}$  ごとに  $DR_L$  と  $\log_{10}(F_c + 1)$  の関係を直線で表わし図-6に示す.

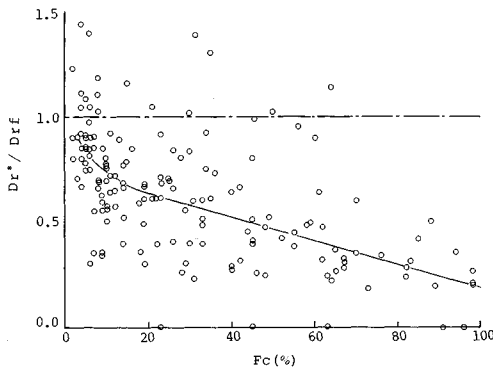


図-4  $D^*/D_{rf}$  と  $F_c$  の関係

図中の直線群から外挿される縦軸切片は  $F_c = 0\%$  における  $DR_L$  を表わし, 凡例に示す  $D_{50}$  の区分ごとに  $F_c = 0\%$  の  $DR_L$  を求める.  $F_c = 0\%$  の  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係は,  $D_{50}$  の変化に対する  $DR_L$  の変化量, すなわち  $D_{50}$  の補正項  $R_2$  を示す.  $R_2$  と  $D_{50}$  との関係は図-7に示すようにほぼ直線で表わされ,  $R_2$  は次式によって表わされる.

$$R_2 = 0.22 \log_{10} \frac{0.20}{D_{50}} \dots \dots \dots (4)$$

図-6に示す各区分の  $D_{50}$  における  $DR_L$  と  $\log_{10}(F_c)$

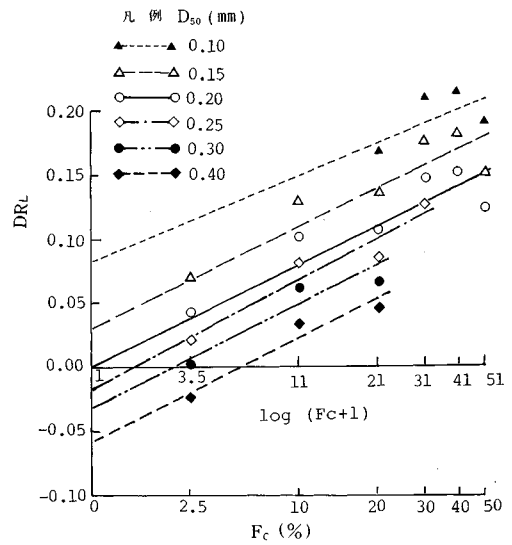


図-6  $DR_L$  と  $F_c$  の関係

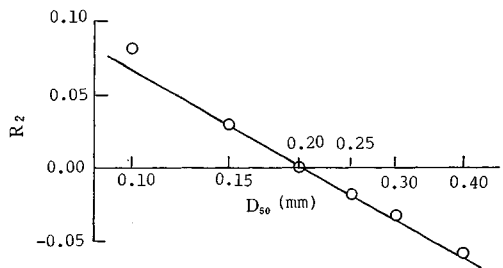


図-7  $R_2$  と  $D_{50}$  の関係

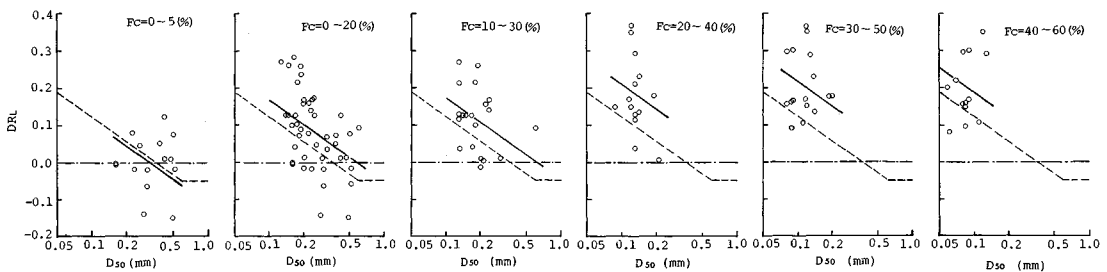
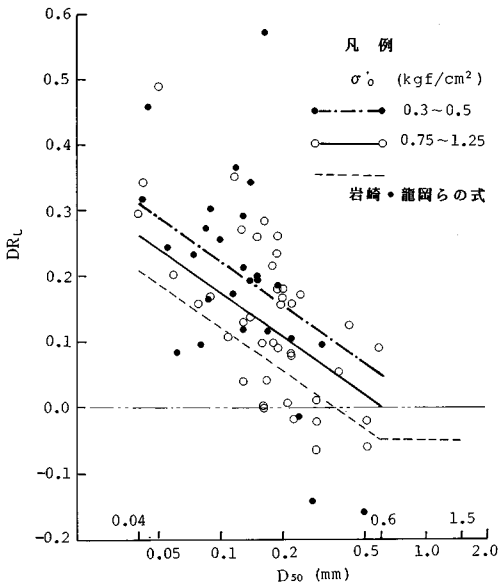
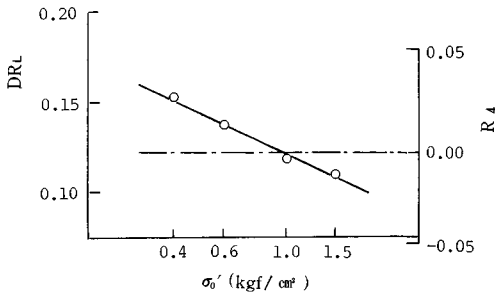


図-5  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係



図—8  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係



図—9  $DR_L$  と  $\sigma'_0$  の関係

+1) の関係は、 $F_c$  の増分に対する  $DR_L$  の増分，すなわち  $F_c$  による補正項  $R_3$  を表わす。ここでは、これら直線群の平均的な勾配を使用して  $R_3$  を次式で表わす。

$$R_3 = 0.085 \log_{10}(F_c + 1) \dots \dots \dots (5)$$

(3) 拘束応力による補正

拘束応力  $\sigma'_0$  が  $0.3 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  のデータを黒丸印で、 $\sigma'_0$  が  $0.75 \sim 1.25 \text{ kgf/cm}^2$  のデータを白丸印で表わし、 $D_{50} \geq 0.04 \text{ mm}$  の範囲におけるそれぞれの  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を図—8 に示す。図中の破線は岩崎・龍岡ら<sup>5)</sup> が提案した  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を示し、一点鎖線と実線は図—5 と同様な方法によって求めた  $\sigma'_0$  が  $0.3 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  と  $0.75 \sim 1.25 \text{ kgf/cm}^2$  の  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を示す。この図によると、 $\sigma'_0$  が  $0.3 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  と小さいときの  $DR_L$  は、 $\sigma'_0$  が  $0.75 \sim 1.25 \text{ kgf/cm}^2$  の  $DR_L$  より大きくなり、 $D_{50}^*$  が同じ値の  $DR_L$  は  $\sigma'_0 = \sigma'_0$  の試験であっても、拘束応力が小さいほど大きくなることがわかる。

$\sigma'_0 = 0.4 \sim 0.8 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $1.2 \sim 1.8 \text{ kgf/cm}^2$  のデータに

ついても図—8 と同様に  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を求め、 $\sigma'_0$  が  $0.3 \sim 0.5$ 、 $0.4 \sim 0.8$ 、 $0.75 \sim 1.25$ 、 $1.2 \sim 1.8 \text{ kgf/cm}^2$  の各区分の中心値を、それぞれ  $0.4$ 、 $0.6$ 、 $1.0$ 、 $1.5 \text{ kgf/cm}^2$  とする。拘束応力の区分ごとに求めた  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係から、 $D_{50} = 0.20 \text{ mm}$  における  $DR_L$  を読み取り、 $DR_L$  と  $\sigma'_0$  の関係を片対数グラフ上で表わすと、図—9 に示すように、 $DR_L$  と  $\log_{10} \sigma'_0$  の関係はほぼ直線で表わされる。

$\sigma'_0$  が任意の値における  $DR_L$  と  $\sigma'_0 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の  $DR_L$  との差を  $R_4$  で表わし、図中右側の縦軸に示す。 $R_4$  は  $\sigma'_0 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  を液状化強度の基準値としたときの拘束応力の補正項となる。 $\sigma'_0 = \sigma'_0$  の条件下の液状化試験データであることから、 $R_4$  は次式で表わされる。

$$R_4 = -0.07 \log_{10} \sigma'_0 \dots \dots \dots (6)$$

(4) 試験値による液状化強度の推定式

式 (4)、(5) を求めるにあたり、 $\sigma'_0 = 0.5 \sim 1.5 \text{ kgf/cm}^2$  の試験データを使用した。この範囲の拘束応力の中心値を  $1.0 \text{ kgf/cm}^2$  とみなすと、式 (4) の  $R_2$  と式 (5) の  $R_3$  はそれぞれ  $\sigma'_0 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の  $D_{50}$  および  $F_c$  の補正項に相当する。したがって、今回使用した図—5 に示す試験データによると、 $F_c$  が  $60\%$  以下の砂質土に対しては、 $R_L$  は式 (1) に式 (4)、(5)、(6) を加え次式によって表わされる。

$$R_L = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_0 + 0.7}} + 0.22 \log_{10} \frac{0.20}{D_{50}} + 0.085 \log_{10}(F_c + 1) - 0.07 \log_{10} \sigma'_0 \dots \dots \dots (7)$$

(5) 地盤の液状化強度の推定

地盤の液状化強度  $R$  は、繰り返し三軸試験による液状化試験強度  $R_L$  を使用し、 $R \approx R_L$  で表わされる<sup>5)</sup>。不攪乱試料を用いた繰り返し三軸試験では、サンプリングと試験時における乱れにより緩い砂は密度が増し、締まった砂は密度が減少する可能性がある。東京低地は浅い層に緩い砂層が堆積している場合が多いことから、ここで使用した試験データもこの種の試験誤差を含んでいると考えられる。したがって、拘束応力の小さい浅い層の試験値  $R_L$  は過大な値を示し、これに対し、細粒分が少なく  $N$  値が大きい砂層の試験値  $R_L$  は過小な値を示す可能性がある。そのため、地盤の液状化強度  $R$  の推定に際しては、今回の試験結果から求められる補正項  $R_3$  と  $R_4$  の変動を小さくする必要がある。

4. 広域を対象とする液状化予測法

地域防災計画をたてる際に使用する液状化予測のように広域的な液状化予測を行う場合は、使用するボーリング資料は膨大な数に及ぶが、その多くは液状化調査を目的としたものでないことから、解析に必要な砂層の粒度試験を欠くものが多い。このような欠落データは柱状図

に記されている土質名称から推定することになる。土質名称や粒径によって液状化対象層を限定すると、粒度試験の結果では対象層に入るが土質名称からの推定では対象層に入らない場合、あるいは、その逆の場合も考えられ、類似した地盤であっても粒度試験のデータの有無で液状化の評価に大きな差が生じることがある。広域的な予測作業ではこの種の問題点をなくす必要がある。

ここでは、細粒分を含む液状化強度特性と広域予測に伴うこの種の問題を考慮した予測式と予測法を作成し、東京低地の液状化予測を行った結果について述べる。

(1) 予測式

東京低地のボーリングデータから土質名称ごとに平均粒径  $D_{50}$  と細粒分含有率  $F_c$  を集計し、その最頻値から土質名称ごとの  $D_{50}$  と  $F_c$  を求めたが、データのばらつきからレンジの幅が大きくなった<sup>1)</sup>。このため、液状化対象層・非液状化層を粒径で限定すると、類似した地盤であるにもかかわらず粒度試験の有無によって液状化の評価に大きな違いが生じる可能性があり、したがって広域を対象とした地盤の液状化強度の推定式には粒径による制限を加えないことにした。

繰り返し三軸試験結果を  $N$  値の大きさごとに区分し、 $R_L$  と  $F_c$  の関係を図-10 に示す。この図によると、 $F_c$  が 20% 以上の場合には  $N$  値の大小にかかわらず  $R_L$  はほぼ 0.25 以上の値を示し、さらに、 $F_c$  が 50% 以上になると  $R_L$  はほぼ 0.3 以上の値を示す。また、 $N$  値が 0 であっても  $F_c$  が大きい場合は  $R_L$  が 0.3 以下になる例はない。このことは、 $N$  値が 0 で表わされるような軟弱層の液状化強度の推定に対して式 (1) では  $R_1=0$  になり、試験値に比較し  $R_L$  を極端に小さく評価する結果になる。このような矛盾を避けるため、ここでは式 (7) に示す  $R_L$  の推定値を液状化試験値に近づけることを目的として、式 (1) の  $N$  値に 0.5 を加え  $R_1$  を次式で表わすことにした。

$$R_1 = 0.0882 \sqrt{\frac{N+0.5}{\sigma'_v+0.7}} \dots\dots\dots (8)$$

式 (8) では、 $N$  値が 0 や 1 といったごく小さい場合に限り式 (1) と比較して  $R_1$  に大きな差が生じるが、 $N$  値が大きくなると式 (1) との差は小さい。

拘束応力を狭い範囲に制限し、 $\sigma'_v=0.75\sim 1.25$  kgf/cm<sup>2</sup> の試験データから、式 (8) を使用し  $DR_L (=R_L - R_1)$  を定義し、 $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を図-11、 $DR_L$  と  $F_c$  の関係を図-12 に示す。 $F_c$  が小さい場合は図-12 に示すように、 $DR_L$  は  $F_c$  との関係だけでは表わせないが、 $F_c$  が大きい場合の  $DR_L$  は、図-11 に示す  $D_{50}$  との関係より図-12 に示す  $F_c$  との関係の方がばらつきが小さく、この場合の  $DR_L$  は  $F_c$  を使用した方が適切に表わせる。

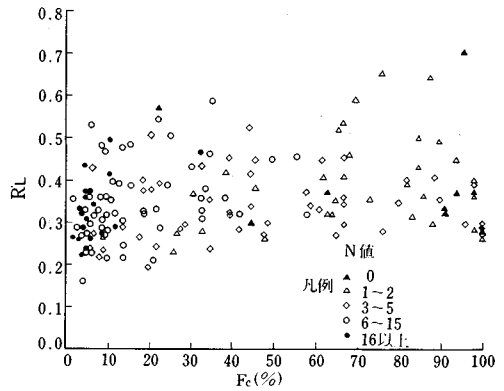


図-10  $R_L$  と  $F_c$  の関係

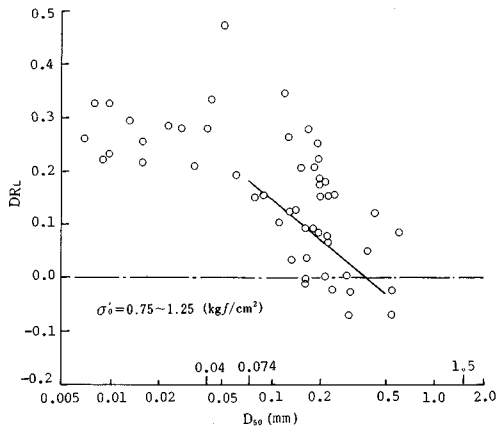


図-11  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係

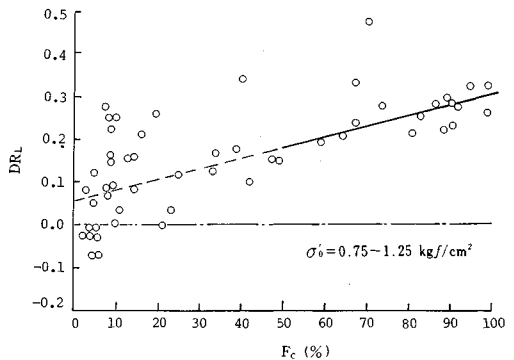


図-12  $DR_L$  と  $F_c$  の関係

$F_c > 50\%$  の範囲では、図-12 に示す  $DR_L$  と  $F_c$  の関係を使用して  $DR_L$  を次式で示す図中の実線で表わす。

$$DR_L = 0.0025 F_c + 0.055 \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) は、拘束応力が  $\sigma'_v=0.75\sim 1.25$  kgf/cm<sup>2</sup> の範囲の中心値である  $\sigma'_v=1.0$  kgf/cm<sup>2</sup> における粒度に関する補正項となり、 $F_c$  のほかに  $D_{50}$  の補正も含まれる。

$F_c \leq 50\%$  の場合は、図-11 における  $D_{50} \geq 0.074$  mm の  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を使用し、 $D_{50}$  の補正項のほかに  $F_c$  の補正項を加える。図-11 に示すデータ ( $\sigma'_v=0.75$

~1.25 kgf/cm<sup>2</sup>) から図一5と同様な考え方で  $F_c$  を区分し、各区分ごとに式 (8) による  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を求める。これより、 $\sigma'_v=1.0$  kgf/cm<sup>2</sup> における  $DR_L$  と  $\log_{10}(F_c+1)$  の関係から、式 (7) と同様に  $D_{50}$  による補正項  $R_2$  と  $F_c$  による補正項  $R_3$  を求めた。式 (7) の  $R_2$  と  $R_3$  を求める際に使用したデータ ( $\sigma'_v=0.50\sim 1.50$  kgf/cm<sup>2</sup>) よりも拘束応力が  $\sigma'_v=0.75\sim 1.25$  kgf/cm<sup>2</sup> と狭い範囲のデータに限定したこと、および、式 (8) の  $R_1$  は  $N$  値に 0.5 を加えており式 (1) による  $R_1$  よりも大きな値を示すことから、式 (8) を使用し求めた  $R_2$  と  $R_3$  は式 (7) とは差が生じ、 $R_2=0.20 \log_{10}(0.20/D_{50})$ 、 $R_3=0.081 \log_{10}(F_c+1)$  になった<sup>1)</sup>。

ここでは、不攪乱試料の繰り返し三軸試験におけるサンプリングと試験時の試料の乱れが液状化強度  $R_L$  に及ぼす影響を考慮し、さらに、図一11の  $D_{50}=0.074$  mm における  $DR_L$  と、図一12の  $F_c=50\%$  における  $DR_L$  を同一な値になるとして  $D_{50}\geq 0.074$  mm と  $D_{50}<0.074$  mm で  $R_L$  に連続性をもたせることにし、繰り返し三軸試験結果から求められる液状化強度の補正項  $R_2$  と  $R_3$  の係数に修正を加え、次式によって  $R_L$  を表わし提案式とする。

$D_{50}<0.074$  mm ( $F_c>50\%$  に相当)

$$R_L = 0.0882 \sqrt{\frac{N+0.5}{\sigma'_v+0.7}} + 0.0025 F_c + 0.055 - 0.055 \log_{10} \sigma'_v \dots\dots\dots (10)$$

$0.074 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0.5 \text{ mm}$

$$R_L = 0.0882 \sqrt{\frac{N+0.5}{\sigma'_v+0.7}} + 0.20 \log_{10} \frac{0.20}{D_{50}} + 0.055 \log_{10}(F_c+1) - 0.055 \log_{10} \sigma'_v \dots\dots\dots (11)$$

$D_{50}>0.5$  mm

$$R_L = 0.0882 \sqrt{\frac{N+0.5}{\sigma'_v+0.7}} - 0.08 + 0.055 \log_{10}(F_c+1) - 0.055 \log_{10} \sigma'_v \dots\dots\dots (12)$$

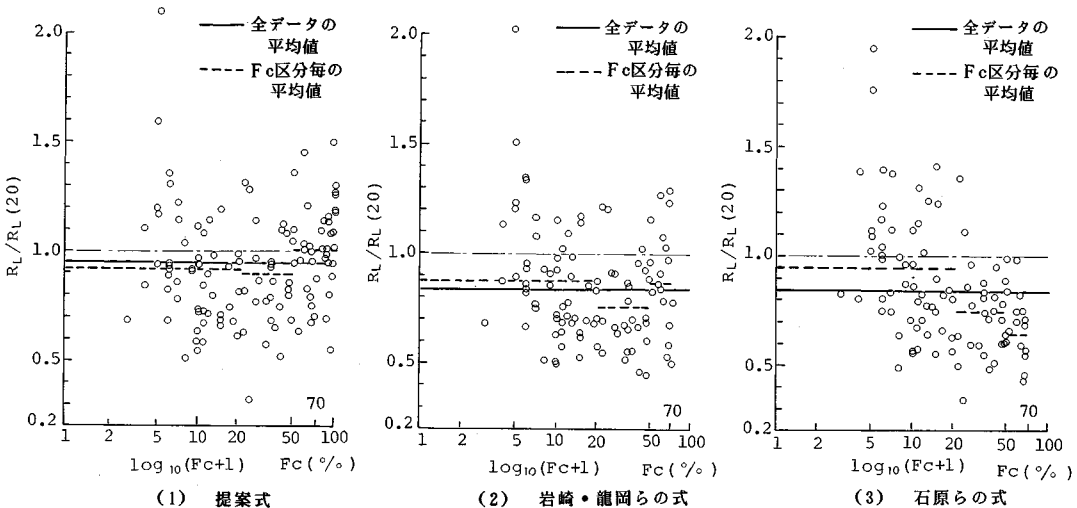
図一11に示す実線は、土質名称から求められる  $D_{50}$  と  $F_c$  を使用し<sup>1)</sup>、式 (11) により  $\sigma'_v=1.0$  kgf/cm<sup>2</sup> における  $DR_L$  を求め、その平均的な  $DR_L$  と  $D_{50}$  の関係を示したものである。

提案式の作成に使用した液状化試験データから、繰り返し三軸による液状化試験値を  $R_L(20)$  とし、式 (10) ~ (12) の提案式による推定値  $R_L$ 、平均粒径だけの補正を加えた岩崎・龍岡ら<sup>5)</sup>の式、および、細粒分含有率だけの補正を加えた石原ら<sup>6)</sup>の式による  $R_L$  との比を求め、 $F_c$  の対数座標上に  $R_L/R_L(20)$  をプロットし図一13に示す。液状化対象層としては、岩崎・龍岡らの式では  $D_{50}=0.04\sim 1.5$  mm、石原らの式では土質名称で砂質土に限定して  $R_L$  を推定している。図一13では、 $F_c \leq 70\%$  を砂質土として扱った。

提案式では、 $R_L/R_L(20)$  の平均値は 1.0 以下となり推定値は試験値より若干小さな値を示すが、他の2つの式に比べ試験値に最も近い値となる。細粒分が少ない場合は提案式と、岩崎・龍岡らの式と石原らの式とで推定値にほとんど差は生じないが、細粒分が多くなると岩崎・龍岡らの式と石原らの式による推定値は提案式による推定値よりかなり小さく、試験値との差は大きくなる。この傾向は石原らの式に顕著に現われている。

液状化強度の調査事例として、液状化試験値と式 (10) ~ (12) の提案式、岩崎・龍岡らの式、石原らの式による推定値  $R_L$  の深度分布を図一14(1) ~ (3) に示す。

細粒分が少なく、深さが 5~6 m より深い砂層の液状



図一13 推定値  $R_L$  と試験値  $R_L(20)$  の関係

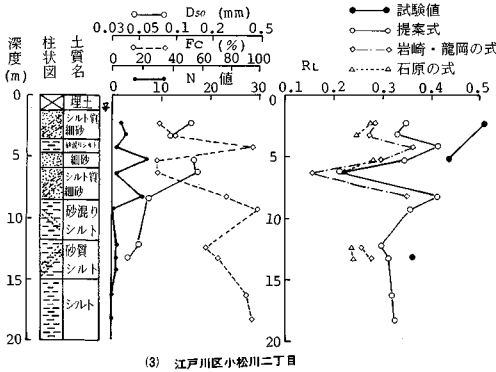
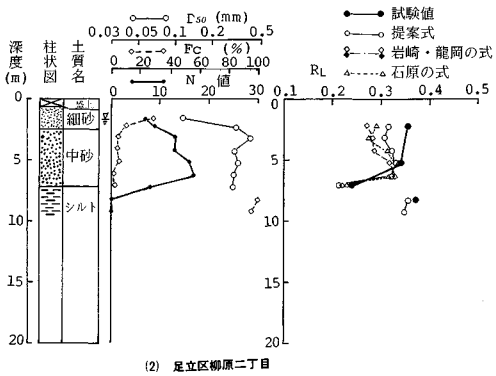
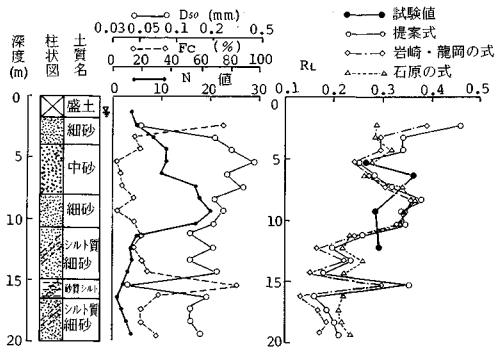


図-14 液状化調査・試験例

化強度については、提案式と他の2つの式では  $R_L$  に差は少なく、いずれも試験値に近い値となる。細粒分を多く含んでいたり、地表から5~6mより浅い層の液状化強度については、提案式による  $R_L$  は他の2つの式の  $R_L$  より大きく、試験値と比較するとほぼ同じ値になるか若干小さな値になる。

図-13, 14 から、提案式は粒径の大小、細粒分含有量の多少、上載圧の大小いずれの領域においても、他の2つの式より試験値に近い値を示し、特に細粒分を多く含む浅い層における液状化強度の推定には適しており、細粒分を多く含む砂層が堆積する東京低地の液状化予測には有効であることがわかる。

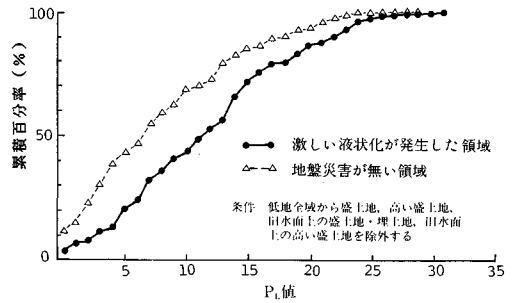


図-15  $P_L$  値の累積頻度曲線

次に、東京低地全域から地盤特性に偏りが生じないように配慮して78か所の解析地点を選定し地震応答解析 (SHAKE<sup>7)</sup>) を行った。十勝沖地震 (1968年5月) のマグニチュード  $M$  は7.8で、今回の予測で想定した関東地震 ( $M=7.9$ ) の規模に近いことから、入力地震波形として、十勝沖地震の際に青森県八戸港で観測された強震記録八戸 N-S を、観測地点の柱状図を使用し基盤の入射波に変換した加速度波形<sup>8)</sup> を解析に使用した。解析では東京層の上面を基盤面とし、この入力地震波形の最大振幅を100, 150, 200 gal に調整した波形を基盤入力波形として地震応答解析を行った。

この解析結果から、深さ方向のせん断応力の低減係数  $r_d$ <sup>5)</sup> を次式で表わし、地震時荷重  $L$ <sup>5)</sup> の推定式を作成した。

$$r_d = 1 - 0.025z \quad (z; m) \dots \dots \dots (13)$$

式 (13) の  $r_d$  は、岩崎・龍岡<sup>5)</sup> が提案した値 ( $r_d = 1 - 0.015z$ ) より深さ方向に低減しやすい結果になっているが、これは東京低地の表層に堆積する砂層が比較的薄く、かつ細粒分を含み軟弱な場合が多いためである。

(2) 予測法と予測結果

東京都防災会議<sup>9)</sup> では、関東地震規模の地震に対する液状化予測に使用する地表最大加速度として0.25gを設定しており、今回の解析でもこの考え方を準用した。

八戸 N-S の入射波形を使用した基盤入力最大加速度100, 150, 200 gal の解析結果から、軟弱層 (沖積層と七号地層) の厚さと応答倍率の関係を求めると、軟弱層が厚いほど応答倍率は減少する傾向がみられた<sup>1)</sup>。軟弱層厚と地表面最大応答加速度の関係から、東京低地全域の平均的な地表面最大応答加速度が0.25gの値を示すような基盤入力最大加速度を求めると170 gal になる<sup>1)</sup>。

ここでは、低地全域で一律に170 gal の基盤入力最大加速度を設定し、解析対象地点の軟弱層厚から地表最大加速度を推定し液状化指数  $P_L$  値を計算した。

関東地震における液状化発生地域と非発生地域についての液状化解析結果を図-15に示す。関東地震液状化履歴図<sup>1)</sup>と土地条件図<sup>10)</sup>を地図情報として数値化し、そ

の重ね合わせによって、土地条件図の凡例で関東地震以降に人工改変が進んだと考えられる盛土地、高い盛土地、旧水面上の高い盛土地にある解析値を除外する。このような操作から、震災当時の地形と大きな変化がない地域の  $P_L$  値を選び出し、激しい液状化が発生した領域<sup>1)</sup>と液状化や地割れなどの地盤災害がない領域<sup>1)</sup>の  $P_L$  値の累積頻度曲線を求めた。激しい液状化が発生した領域の  $P_L$  値と地盤災害がない領域の  $P_L$  値とでは、両者を

区別することが可能な差が生じており、 $P_L$  値により液状化発生・非発生を区分することができる。

図-15 から、 $P_L$  値による判定として、次に示す岩崎・龍岡ら<sup>5)</sup>が提案した液状化の被害程度と  $P_L$  値の区分を今回の予測にも採用できることがわかる。

- ： $P_L \geq 15$  液状化の可能性大
- △： $5 \leq P_L < 15$  液状化の可能性いくらかあり
- ×： $P_L < 5$  液状化の可能性なし

関東地震の液状化履歴調査によると、表層の砂層が厚い地域では液状化が発生しやすい結果が得られた<sup>1)</sup>。表層の砂層が厚いほど、また  $F_L$  値が 1.0 を割る液状化層の出現深度が浅いほど液状化による地盤災害が発生しやすいと考え、ここでは表層厚を 6 m として、その層内の砂層の厚さと  $F_L$  値に注目し、表-1 に示す“表層砂層の  $F_L$  値による判定法”を作成した<sup>1)</sup>。

ここで使用した  $P_L$  値による液状化判定は、対象層の粒度を制限していないことから、シルト層も含めた地表下 20 m の地盤の強度低下を表わす指標と考えられる。表層砂層の  $F_L$  値による判定法は、噴砂・噴水の現象や、浅い層の液状化による影響を受けやすい家屋やライフライン等の被害の可能性を表わす指標と考えられる。地域被害想定のような広域的な液状化予測では、液状化によって引き起こされる災害は多種・多様であり、地盤がもつ複雑さに対してどのように対処していくかが問題となる。そのため、ここでは単一な考えに基づく判定法を避けて、異なる 2 つの判定法として、 $P_L$  値による判定結果と表-1 の表層の情報による判定結果を使用し、表-2<sup>2)</sup> に示すクロステーブルによって総合的な判定を行い、ボーリング資料に基づく液状化解析の最終予測値とした。

予測結果の事例として中川沿いの葛飾区青戸、高砂、奥戸、立石の判定結果を図-16 に示す。関東地震の液状化履歴調査<sup>1), 2)</sup>によると図中の高砂一丁目、奥戸は激

表-1 表層砂層の  $F_L$  値による判定法

液状化層の出現深度	$F_L < 1.0$ , $F_L < 0.8$ の出現深度 $Z$ (m)				
	1	2	3	4	5
表層砂層厚	$Z \leq 3$ $F_L < 0.8$	$Z \leq 3$ $0.8 \leq F_L < 1.0$	$3 < Z \leq 6$ $F_L < 0.8$	$3 < Z \leq 6$ $0.8 \leq F_L < 1.0$	$Z > 6$ $F_L < 1.0$
表層砂層の厚さ $l$ (m)	a $3 \leq l$	b $2 \leq l < 3$	c $1 \leq l < 2$	d $0 \leq l < 1$	
	○	○	○	◇	△
	○	◇	◇	△	×
	◇	△	△	△	×
	△	△	△	×	×

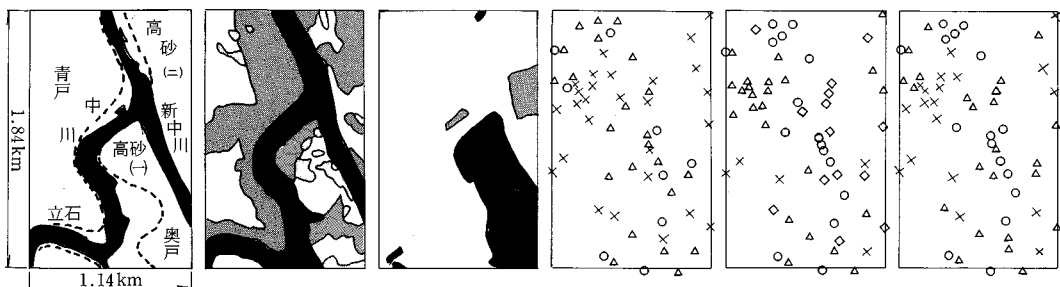
- ：表層砂層の  $F_L$  判定による液状化の可能性大
- ◇：表層砂層の  $F_L$  判定による液状化の可能性中
- △：表層砂層の  $F_L$  判定による液状化の可能性小
- ×

表-2 液状化判定のクロステーブル

判定値	液状化の		
	可能性大	可能性いくらかあり	可能性なし
液状化の可能性大	○	○	△
液状化の可能性中	○	△	△
液状化の可能性小	△	△	×
液状化の可能性なし	△	×	×

組合せで得られる  
ランク

- 液状化の可能性大
- △ 液状化の可能性いくらかあり
- ×



(1)地形図 (2)土地条件図 (3)液状化履歴図 (4) $P_L$ 法の判定結果 (5)表層砂層の $F_L$ 判定結果 (6)予測結果

図-16 液状化判定結果



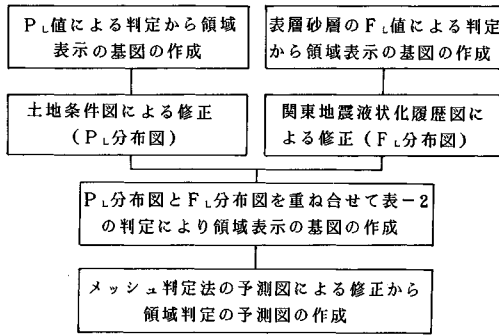


図-17 領域判定のフロー

しい液状化が発生した地域で、自然堤防に分類されるところでも当時は地盤が低く、地下水位は高く豊富であった。一方、青戸、立石は確定的な情報が不足していることから、液状化履歴図では判断保留・未調査としたが、無被害と判断できる情報もあり、比較的地盤災害が少なかったと考えられる地域である。

液状化発生地域に注目すると、図-16(4)の  $P_L$  値による判定結果では、△印の中間ランクの判定値が多く、液状化発生・非発生地域の区分がつけにくい結果になっている。一方、図-16(5)の表層砂層の  $F_L$  値による

判定結果では○印、◇印の液状化可能性が高いランクの判定値が多くなる。表-2のクロステーブルにより両判定値を総合させて判定した図-16(6)の予測結果は○印が多くなり、図-16(3)に示す液状化履歴図と符合する。また、青戸、立石は、図-16(6)の予測結果でも液状化の可能性が低い結果になっている。このように、広域的な予測に際しては1つの判定法だけでなく、考え方の異なる他の判定法を併用することにより、適切な解が得られることがわかる。

(3) 領域表示による東京低地の液状化予測

広域的な液状化予測には、ボーリング地点の液状化解析のほかに過去の地震での液状化履歴や地形・地質など多くの情報を利用するが、領域表示では重ね合わせられる情報には限界がある。ここでは図-17に示すように、ボーリング地点の液状化解析のほかに、土地条件図と関東地震液状化履歴図だけを使用した。

図-17に示すように、 $P_L$  値の分布から共通領域を括り出し、 $P_L$  値の判定による領域表示の基図を作成する。この図に土地条件図を重ね合わせ、液状化しやすい地形分類、液状化しにくい地形分類の境界線を参考にして、基図を修正し  $P_L$  分布図を作成する。表-1に示す表層砂層の  $F_L$  値による判定結果から領域表示の基図を作成

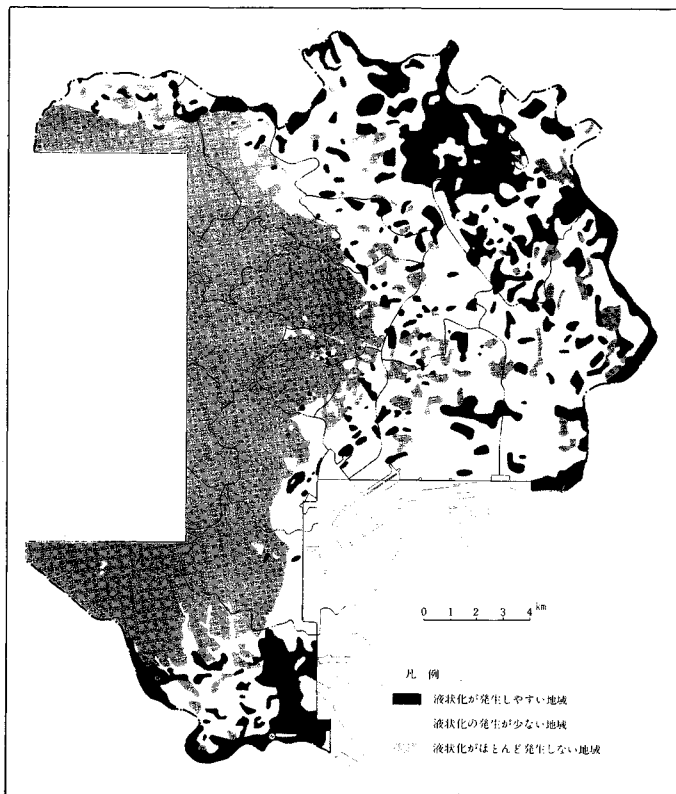


図-18 領域判定による東京低地の液状化予測

し、液状化履歴図を重ね合わせる。履歴図の液状化発生領域は表層砂層の判定値を発生しやすい方に1ランク上げ、非液状化領域は逆に1ランク下げて基図を修正し $F_L$ 分布図を作成する。さらに、表-2の判定法により $P_L$ 分布図と $F_L$ 分布図を重ね合わせて領域表示の基図を作成する。ボーリング資料が不足する地域は判定結果の信頼性が欠けることから、多種類の情報を総合させた判定が可能であるメッシュ判定の結果<sup>1)</sup>によってこの図を修正し、最終の判定結果として図-18の液状化予測図を作成した。

湾岸部の最近埋立てた地域については東京都港湾局で調査中であったことから、予測対象地域から除外した。

## 5. あとがき

東京低地は細粒分を多く含んだ軟弱な砂層が広く分布している。この地域で採取した不攪乱試料を使用した繰り返し三軸試験結果において、細粒分を多く含んだ砂質土は、 $N$ 値が小さいにもかかわらず液状化強度は大きくなる傾向がみられた。そのため、ここでは $N$ 値、有効上載圧、平均粒径のほかに細粒分含有率と試験拘束応力を考慮した液状化強度の推定式を提案した。この提案式は岩崎・龍岡らの式、石原らの式より試験値に近い値を示し、特に細粒分を多く含む砂層の液状化強度の推定に適しており東京低地の液状化強度特性を適切に表わしている。

関東地震における液状化発生・非発生地域に対してこの式により $P_L$ 値を求めると、 $P_L$ 値に有意な差が生じ、液状化発生・非発生地域を $P_L$ 値により区分できた。

表層だけに注目した液状化判定法を作成し、この判定値と $P_L$ 値による判定値を総合させた判定結果は液状化発生・非発生地域をより明瞭に判別することが可能で

あった。地域被害想定のような広域的な予測には、単一な予測法より異なる考えによる方法を加え総合的に判定する方が適切な結果が得られることがわかった。

最後に、この研究をまとめるにあたり、東京都土木技術研究所研究員の阿部 博、小川 好の両氏に協力していただき謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 東京都土木技術研究所：東京低地の液状化予測，土質工学会，1987.
- 2) 草野 郁：関東地震における東京低地の液状化履歴，土木学会論文集，No.406，pp.213~222，1989.
- 3) 土質工学会編：土質試験法，砂の最大密度・最小密度試験，土質工学会，pp.172~188，1979.
- 4) Seed, H. B. and Lee, K. L. : Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading, ASCE, Vol.95, SM6, pp.105~134, 1966.
- 5) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田 進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例，第5回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.641~648，1978.
- 6) Ishihara, K. and Perlea, V. : liquefaction-Associated Ground Damage during the Vrancea Earthquake of March 4, 1977, Soils and Foundations, Vol. 24, No.1, pp.90~112, 1984.
- 7) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Univ. of California, Report No.EERC 72-12, 1972.
- 8) 高速道路調査会・橋梁構造研究会：耐震設計に関する調査研究，日本道路公団，pp.57~62，1979.
- 9) 福岡正巳・石原研而：地震による地盤変動と土質構造物への影響に関する調査，東京都防災会議，1972.
- 10) 建設省国土地理院：1：25 000 土地条件図（東京東北部，東京東南部，東京西北部，東京西南部），1970.

(1989.4.25・受付)