

# 強い直下地震動を想定した東京低地の液状化・地盤流動予測

東京都土木技術研究所 草野 郁、小川 好、森 洋、岡田 佳久、中村 正明

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降に改訂された耐震設計法にしたがい、東京都が管理する道路橋基礎や河川堤防・護岸などの都市施設の耐震の検討と対策が進められている。これら構造物の液状化・地盤流動による被害予測と対策を目的として、阪神大震災のような強い地震動（レベルⅡタイプⅡ）を想定した東京低地の液状化予測図と地盤流動予測図を作成した。

## 2. 東京低地の特性を反映した液状化強度推定式

東京低地の表層に分布する砂層は、粒径が細かく細粒分を多く含み、N値が小さい場合が多い。東京低地で採取した不覚乱試料の繰返し三軸試験のうち、拘束圧 $\sigma_o'$ が上載圧 $\sigma_v'$ に近い（ $\sigma_v'/\sigma_o'=0.7\sim 1.3$ ）試験結果を選び、繰返し回数20回で軸ひずみ両振幅5%に至る繰返し三軸強度比RL(20)の推定式RLを作成した<sup>1)</sup>。

RLはN値と有効上載圧 $\sigma_v'$ (kPa)から求まるR1に、平均粒径D50(mm)による補正項R2、細粒分含有量Fc(%)による補正項R3、さらに、 $\sigma_v'$ による補正項R4を加え、次式で表した。

$$RL=RL(20)=R1+R2+R3+R4 \quad (1)$$

攪乱砂の繰返し三軸試験結果によると、相対密度 $D_r$ が60%以下の緩い試料に対してはRL(20)は $D_r$ に比例するが、 $D_r$ が60%以上の密な場合、 $D_r$ の増加に伴いRL(20)は急激に大きくなる。換算N1値を次式で表す。

$$N1=170 N / (\sigma_v'+70) \quad (2)$$

$N1=14$ は、 $D_r=60\%$ に相当する。 $N1$ が14より小さい場合は、従来の推定法と同様にRL(20)は $D_r$ に比例する。これに対し、 $N1$ が14以上の密な地盤に対しては、改訂後の道路示方書の細粒を含まない試料の“Na~RL”の関係式を使用しR1を定義した。

$$R1=0.0882 (N1/1.7)^{1/2} \quad (N1 \leq 14) \quad (3)$$

$$=0.0882 (N1/1.7)^{1/2} + 1.6 \times 10^{-6} \times (N1-14)^{4.5} \quad (N1 > 14)$$

$$R2=0.21 \log_{10} (0.20/D50) \quad (0.075 \leq D50 \leq 0.50) \quad (4)$$

$$=-0.084 \quad (0.50 < D50)$$

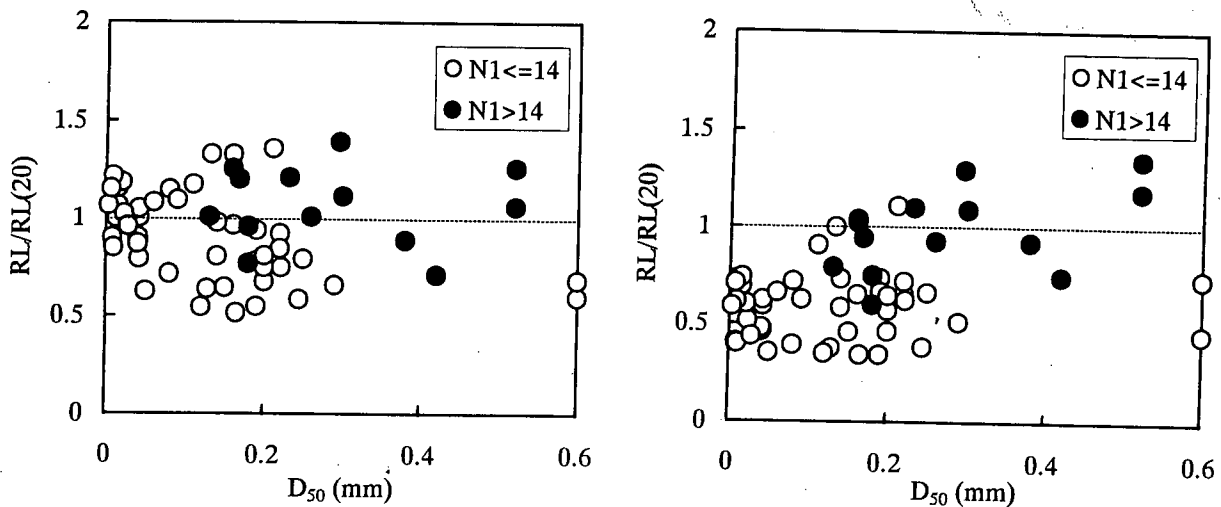
$$R3=0.065 \log_{10} (Fc+1) \quad (Fc \leq 50) \quad (5)$$

$$R2+R3=0.0027 Fc+0.065 \quad (Fc > 50) \quad (6)$$

$$R4=-0.065 \log_{10} (\sigma_v'/98) \quad (49 \leq \sigma_v' \leq 147 \text{ kPa}) \quad (7)$$

$$\sigma_v' < 49 \text{ kPa} : R4=0.020, \quad 147 \text{ kPa} < \sigma_v' : R4=-0.011$$

試験値RL(20)と、推定式と道路橋示方書<sup>2)</sup>の式によるRLの関係をRL/RL(20)~D50の関係で表し図-1に示す。



(1) 提案する推定式

(2) 道路橋示方書の式

図-1 RL/RL(20)~D50の関係

東京都江東区新砂1-9-15 東京都土木技術研究所

キーワード：液状化、液状化強度応力比RL、液状化指数PL、地盤流動、タイプⅡ・タイプⅡ地震動

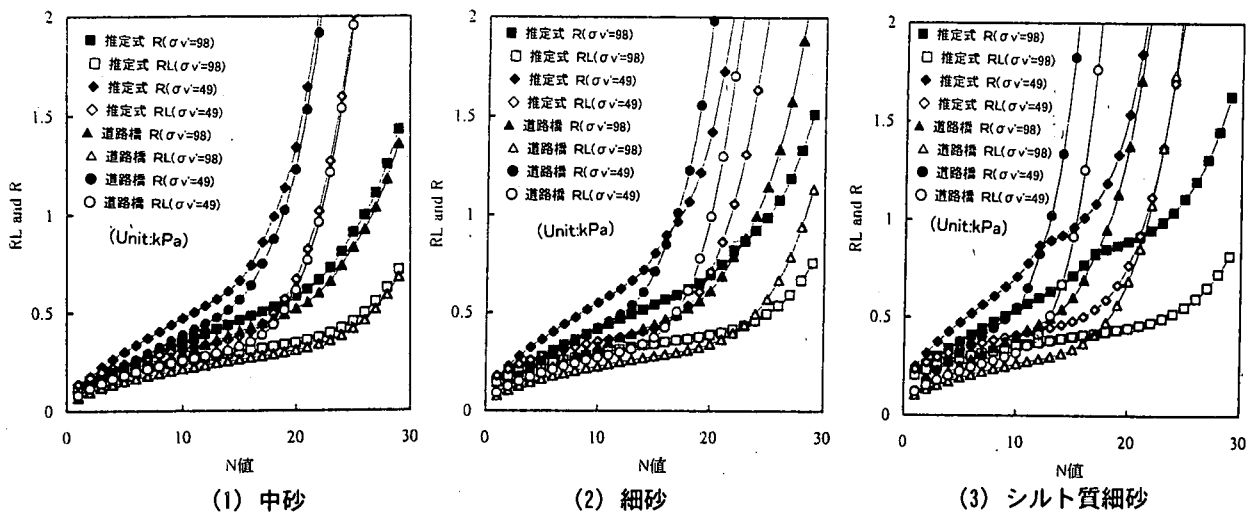


図-2 推定値RL、RとN値との関係

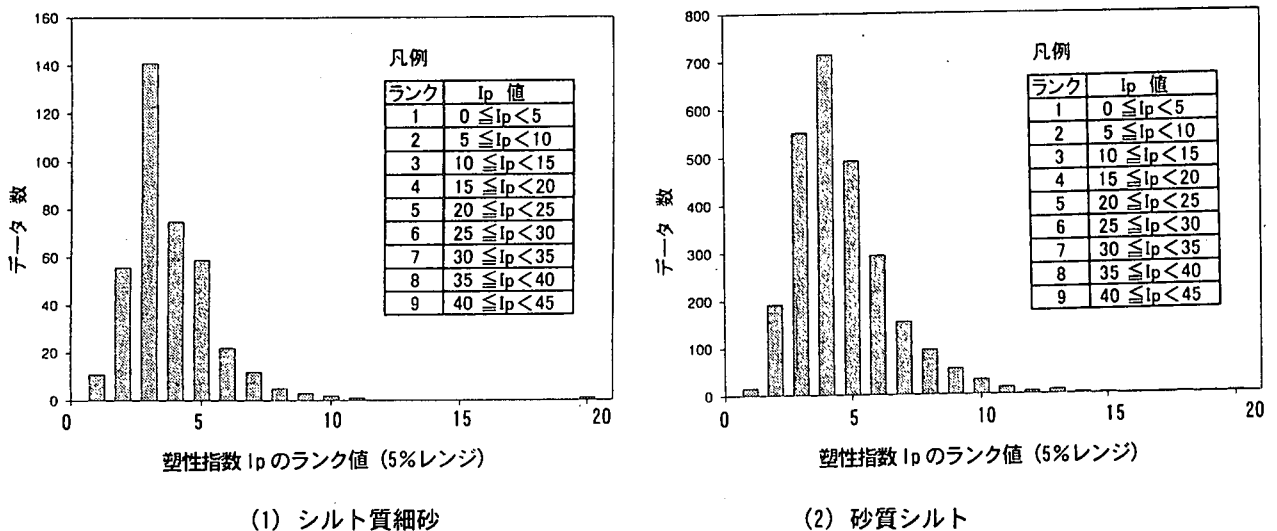


図-3 Ip の頻度分布

図-1(1)によると、推定式では、RL/RL(20)の値はD50の大小によらず、約1.0の値を示す。一方、道路橋示方書の式では、RL/RL(20)の値は1.0より小さく、D50が小さくなるに従いRL/RL(20)は小さくなる傾向が見られる。道路橋示方書の液状化強度式は、東京低地の表層に分布する砂層に対しては液状化強度を過小に評価することになる。

タイプ1のRLとタイプIIの動的せん断応力比Rの関係は、道路橋示方書の補正係数Cwを使用し、次式で表す。

$$R = C_w \cdot RL \quad (8)$$

東京低地のボーリングデータの統計処理から土質名称と物性値の関係を求め<sup>3)</sup>、この物性値を使用し中砂層(D50=0.28mm, Fc=10%)、細砂層(D50=0.20mm, Fc=15%)、シルト質細砂(D50=0.20mm, Fc=30%)について、推定式と道路橋示方書の式による $\sigma_v' = 49, 98 \text{ kPa}$ の推定値RL,  $R = C_w \cdot RL$ とN値との関係を図-2(1)(2)(3)に示す。

東京低地の表層に分布する砂層の多くは、GL-2~10m程度の深さに堆積していることから、砂層中の $\sigma_v'$ は約40~100kPa程度の値となり、図-2のRL, RとN値の関係は、 $\sigma_v' = 49 \text{ kPa}$ の強度が上限値、98kPaの強度が下限値のためやすを表している。東京低地では、中砂層のN値は10~15以上、細砂層のN値は5~15、シルト質細砂層のN値は10以下の場合が多い。図-2によると、中砂の場合、推定式と道路橋示方書の式では推定値に大きな差は現れないが、細砂やシルト質細砂のように粒径が小さい場合、東京低地の表層砂層で見られる通常のN値の範囲では、道路橋示方書の式は試験値に比べ極端に小さな推定値を示すことになる。

### 3. 液状化予測

道路橋示方書<sup>2)</sup>では、液状化対象層を塑性指数Ipから判定していることから、東京低地のボーリングデータの統計処理から、土質名称とIpの関係を求めた。シルト質細砂と砂質シルトのIpの頻度分布を図-3(1)(2)に示す。

シルト質細砂では、Ipの中央値は10~15%を示し、全体の2/3はIpが15以下になる。砂質シルトでは、Ipの中央値は15~20%を示し、全体の2/3はIpが15以上になる。ここでは、シルト質細砂・シルト混じり細砂、粘土

混じり細砂など砂質土の土質名称は $I_p$ が15以下とし液状化の対象土層とする。砂質シルト・砂混じりシルト、砂混じり粘土などの土質名称は $I_p$ が15より大きく、液状化の検討の対象から除外した。

広域的な液状化予測を行う場合は、液状化調査を目的としていない通常のボーリングデータを使用する。このため、液状化計算に必要な物性値を土質名称から推定することになる。ここでは、液状化解析に使用したボーリングデータのうち、物性値のある柱状図はそのデータを使用し、土質名称だけで試験値のない柱状図は東京低地のボーリングデータの統計処理から求めた物性値を使用し液状化計算を行った。

推定式と改訂後の道路橋示方書による動的せん断強度比 $R$ と、地表面加速度600 gal (タイプII)から求められる地震時せん断応力比 $L$ により、液状化指数 $PL$ 値を計算した。

ここでは、道路橋示方書で側方流動の目安としている $PL$ 値20を考慮し、 $20 < PL$ を液状化の可能性大、 $5 < PL \leq 20$ を可能性いくらかあり、 $PL \leq 5$ を可能性なしの3ランク色分けし、色分けした $PL$ 値の数値を1/25,000の縮尺でマイラー上に出力した。

関東地震の液状化履歴調査結果<sup>4)</sup>と、地形・地質の情報、液状化計算結果の3つの情報を統

合作成した「東京低地の液状化予測図<sup>5)</sup>」を下図にし、今回計算した出力図を重ね合わせ、3ランクに区分し括り出し、領域表示の液状化予測図を作成した<sup>6)</sup>。

予測図は、道路橋示方書で定めるレベルII・タイプIの地震動を対象とし、ここで提案する推定式と道路橋示方書の式を使用し、強い直下地震動を想定した液状化予測図を作成した。千代田区・中央区区・江東区・墨田区・荒川区・葛飾区・江戸川区の予測結果を図-4 (推定式)と図-5 (道路橋示方書の式)に示す。

東京低地の液状化特性を配慮した推定式の予測結果では、現・旧河川沿い、および、関東地震において液状化が発生した地域<sup>4)</sup>に液状化の可能性大の判定領域が多く分布する結果が得られた (図-4)。

道路橋示方書の式を使用した場合は、低地の大半の地域が液状化の可能性大の判定結果になった (図-5)。低地の大半で $PL$ 値が20以上となり、地盤流動の可能性のあるような激しい液状化現象が生じる予測結果は、埋立て後の経過年数の少ない若齢な埋立地域を除くと、関東地震や安政江戸地震の被害事例<sup>4)</sup>から考えにくい。このことから、東京低地に限って見れば、道路橋示方書の式は、液状化の強度を過少に評価すると考えられる。

ここで提案する推定式を使用した液状化予測結果 (図-4)のうち、 $5 < PL \leq 20$ の判定領域を $5 < PL \leq 15$ と $15 < PL \leq 20$ に2分し、 $PL \leq 5$  (液状化の可能性なし)、 $5 < PL \leq 15$  (いくらか有り)、 $15 < PL \leq 20$  (可能性有り)、 $20 < PL$  (可能性大)に4区分し、東京低地全域を領域表示した予測結果を図-6に示す。

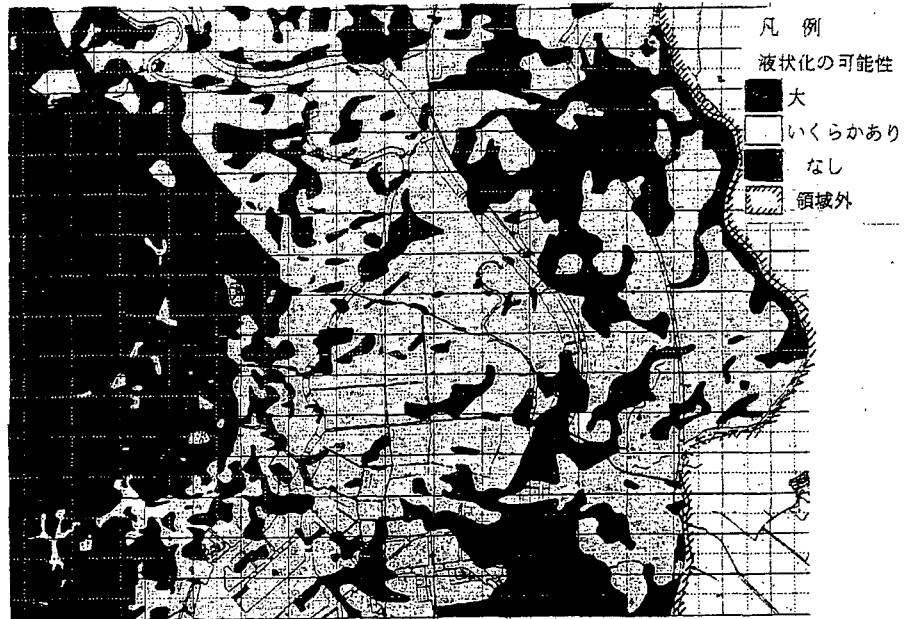


図-4 提案する推定式によるレベルII・タイプIIの液状化予測



図-5 道路橋示方書の式によるレベルII・タイプIIの液状化予測

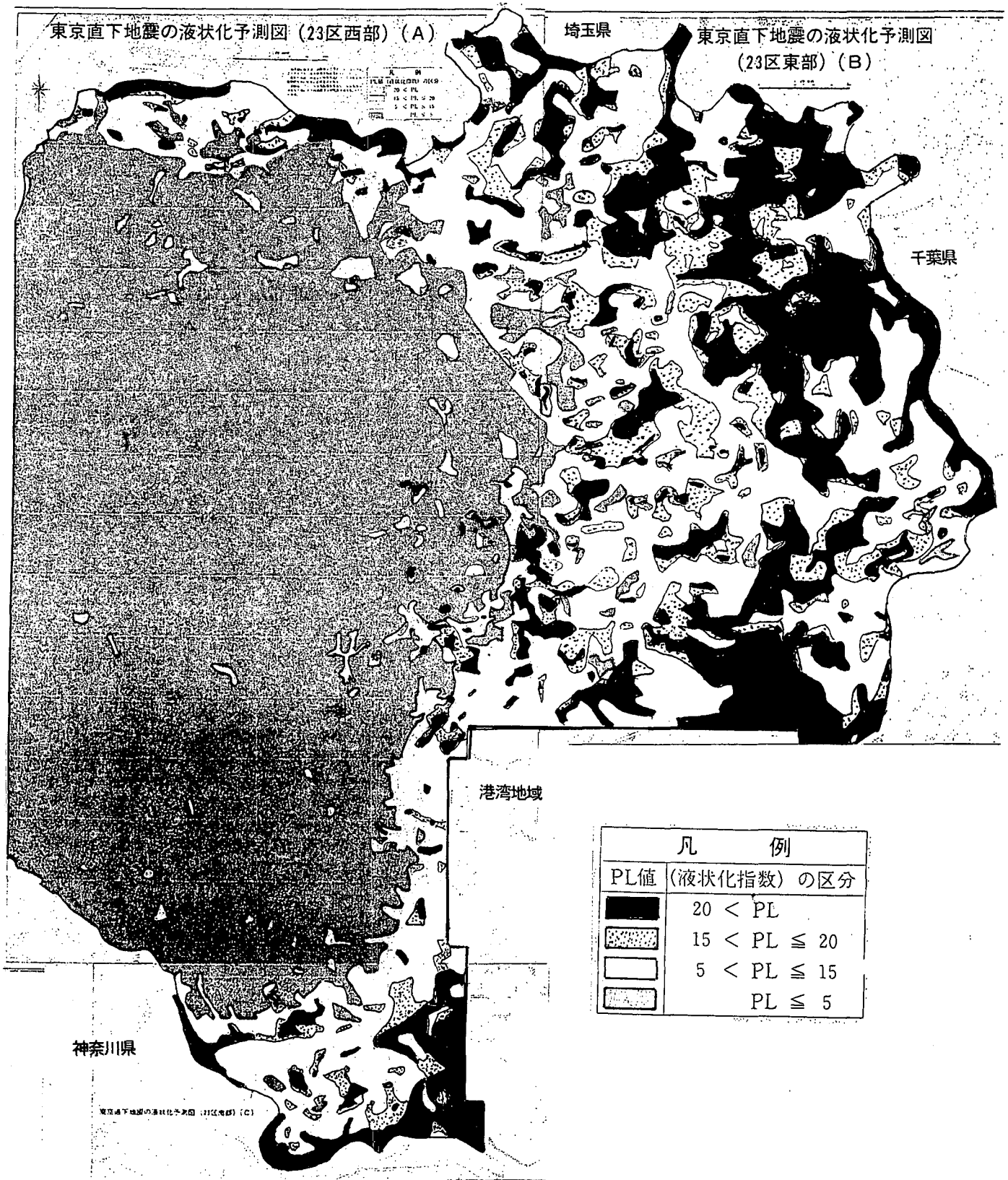


図-6 提案する推定式による強い地震動(レベルII・タイプII)に対する東京低地全域の液状化予測図

兵庫県南部地震で阪神地区を襲った強い直下地震動が、東京低地全域を襲うとした場合、PLが15より大きい液状化の可能性があると判定された地域は、荒川以東と荒川沿いの地域、多摩川下流・河口沿いの地域に広く分布している。

PL値が20より大きく地盤流動の可能性もある「液状化の可能性が大」と判定された地域は、昔、利根川が東京湾に流れ込んでいたときの川筋である中川・古隅田川・江戸川沿い、荒川河口、多摩川河口、江戸川区・江東区・大田区、および、東京湾岸の江戸時代に干拓された地域と埋立後の経過年数の少ない若齢な埋め立て地に分布している。

### 3. 地盤流動予測

道路橋示方書では、側方流動は水際線沿い地盤の液状化の程度（PL 値）と液状化する砂層の厚さ、地盤高の差によって定義されている<sup>2)</sup>。ここでは、東京の地盤特性を反映した液状化強度推定式を用いて、レベルⅡ・タイプⅡで液状化計算（14,000本のボーリングデータ）を行い、液状化指数 PL 値により液状化の可能性を4ランク（ $20 < PL$ 、 $15 < PL \leq 20$ 、 $5 < PL \leq 15$ 、 $PL \leq 5$ ）で領域表示した液状化予測図（図-6）を地盤流動に対する液状化の評価基準とした。

東京低地は、表層の液状化しやすい砂層（上部有楽町層）の下位に軟弱なシルト層（下部有楽町層）が堆積している。この層内の比較的深い層（地表から深さ G.L. 15m～25m）に、シルト分を含む砂層が互層状に分布している場合がある。ここでは、粘性土層の深い層に堆積する互層状の砂層は、液状化安全率 FL が1以下であっても液状化被害に及ぼす影響は少ないと考え、地盤流動に及ぼす影響から除外する目的で、10m以深を液状化層厚に加算する対象から除外した。液状化する砂層の厚さの情報として、当所の「地盤情報システム」に収録された低地の約4万本のボーリングデータを使用し、地表面から10m以浅でN値20以下の砂層の合計層厚D(m)を4ランク（ $7.5 < D$ 、 $5 < D \leq 7.5$ 、 $2.5 < D \leq 5$ 、 $D \leq 2.5$ ）で表示した表層砂層厚分布図を作成し、地盤流動に対する液状化層厚の評価基準とした。

東京低地のなかで関東地震の震源から最も近い東京南部に位置する大田区を対象にして、関東地震の被害との比較をもとに地盤流動の判定法を作成した。4区分で領域表示した液状化予測図と表層砂層圧分布図を使用し、両図の組み合わせから東京低地の地盤流動予測を作成した。

東京低地は平坦で地盤の高低差はほとんどなく、水際線からの距離だけが、地盤流動に影響を与える。ここで境界条件を考慮せずに地盤の液状化特性として地盤流動を引き起こす可能性を表す地盤流動予測図を作成した。

#### 1) 地盤流動判定法

大田区の低地を解析の事例として扱い、地盤流動の予測法について検討する。Kanamori(1971)<sup>7)</sup>が提案した関東地震の断層モデルにおいて、マグニチュードを8.03とし、Molas・山崎の式<sup>8)</sup>から推定される地表最大加速度を使用し、タイプⅡに対する液状化強度式Rを用いてPL値を計算した。なお、PL値の集計などの検討は低地部に限定する。

震災予防調査会調査会（1925）の関東地震調査報文<sup>9)</sup>によると、関東地震における大田区低地における「地盤が沈下・陥没した地域」「家屋被害の程度が大きかった地域」「家屋被害の程度がやや大きかった地域」「その他の地域」が図示されている。大田区の低地における震災履歴とPL値の分布状況を図-7に示す。

関東地震の液状化履歴調査によると<sup>4)</sup>、多摩川沿いでは、河川敷において川に平行して数条の大きな地割れが生じ、護岸の流出や川岸の杭が沖に移動するなどの地盤の動きが見られ、堤防が形状を残さないような大きな陥没が発生している。海老取川の橋梁が大破するなどの被害が発生している。海岸沿いの埋立地と干拓地では、防潮堤の沈下や海側への大きな変位や、掘割り河川が狭まる・浅くなる・両岸から押されて木橋の中央部が盛り上がるなどの被害が聞き取り調査で得られている。多摩川河口や海岸沿いの地域では随所で地割れから砂水が噴出し、河川や堀、海岸の堤防・護岸は全線にわたり沈下や滑り出し・破壊、決壊などの被害が生じ、広範囲にわたり地盤が沈下し、震災後出水しやすくなった。

被害の状況から、この地域では広範囲で地盤流動が発生したと思われる。これらの被害地域は図-7の地盤の陥没・沈下の地域に含まれている。

関東地震における家屋被害と液状化の関係は、東京低地全域での比較では相関は見られなかった<sup>10)</sup>。このため、ここでは図-7の履歴図で家屋被害の地域を除外し、地盤流動に関連する地域として「地盤陥没・沈下地域」と「その他の地域」を選び、両地域に分布するPL値の累積頻度を集計し、その結果を図-8に示す。累積百分率50%のPL値は、「地盤の陥没・沈下地域」で約21、「その他の地域」で約12の値になった。

大田区の低地部の表層砂層分布図を図-9に示す。

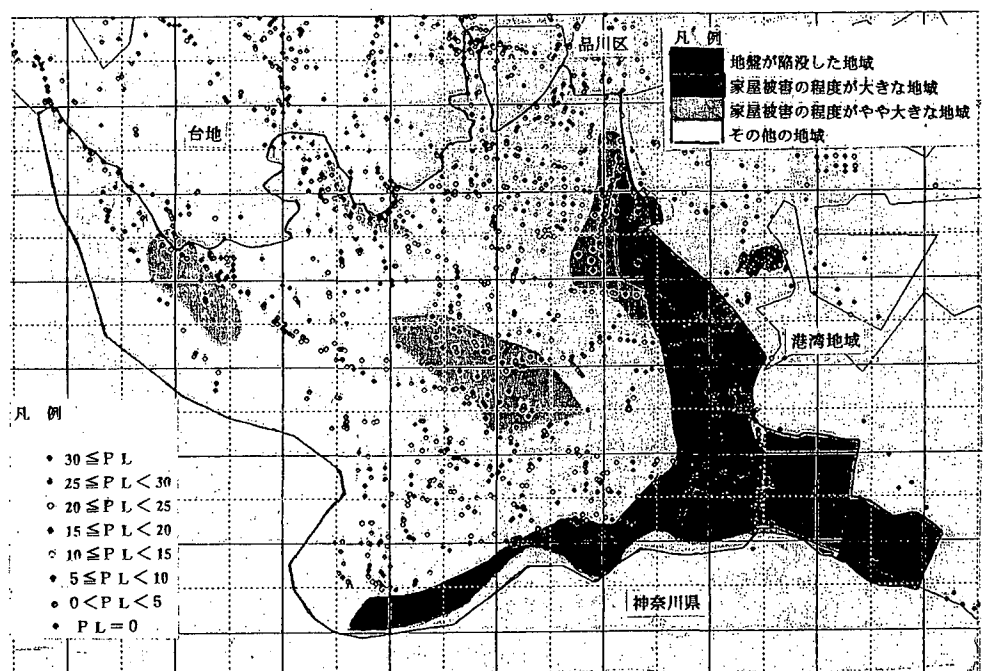


図-7 関東地震における家屋被害の震災履歴図とPL値の分布

表層砂層厚分布図と図-7の震災履歴図と比較すると、地盤の陥没・沈下が生じた地域は表層の砂層は厚く、5~7.5m以上を示すところが多い。

道路橋示方書の側方流動に対する地盤の液状化についての評価法では、傾斜や境界条件を除き地盤の液状化だけを取り上げると、液状化層厚が5m以上から側方流動による橋梁基礎への影響を配慮し、PL値5以上から側方流動の影響が現れ、PL値20以上からは流動状態として扱っている。図-8によると、地盤流動の可能性が大きいと考えられるPL値は20より大きい。

2) レベルII・タイプII地震動を対象とした

地盤流動予測

地表面加速度を600galの直下地震(レベルII・タイプII)の地震動における、PL値を4ランクに区分した大田区低地の液状化予測図を図-10に示す。

図-9の表層砂層厚分布図と図-10と重ね合わせると、砂層厚Dが7.5m以上で括られる領域とPL値が20以上で括られる領域が重なる領域は、図-7の地盤流動が発生したと判断できる「地盤の陥没・沈下地域」と符合する結果が得られた。

ここでは、液状化の程度が激しく、かつ、表層の液状化層が厚い場合は地盤流動が生じやすいことを評価の基準として、表-1に示すPL値の4区分表示(20<PL、15<PL≤20、5<PL≤15、PL≤5)と、表層砂層厚D(m)の4区分表示(7.5<h、5<h≤7.5、2.5<h≤5、h≤2.5)との16とおりの組み合わせから、地盤流動の可能性をI(きわめて大)II(大)、III(ややあり)、IV(少ない)、V(なし)の5ランクで表し地盤流動を予測した。

大田区の低地について、図-9の表層砂層厚分布図と図-10の液状化予測図を重ね合わせ、表-1の判定法に従い地盤流動を予測した結果を図-11に示す。

図-11によると、地盤流動の可能性きわめて大・可能性大の地域が湾岸沿いと多摩川沿いに広く分布する予測結果が得られ、関東地震の液状化履歴図と類似した傾向を示している。

港湾局管理地域を除く区部の表層砂層厚分布図(液状化対象砂層厚で4区分)と同じ領域におけるレベルIIタイ

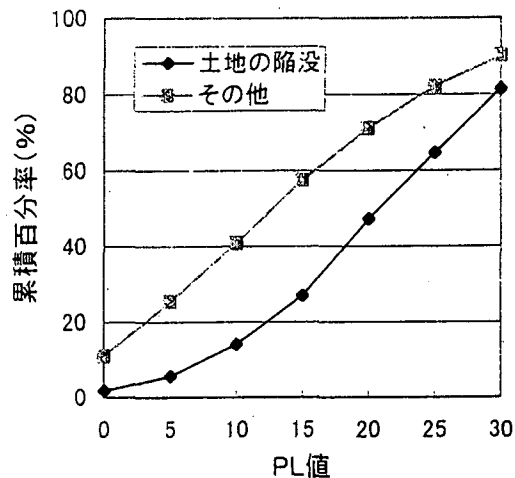


図-8 PL値の累積頻度曲線

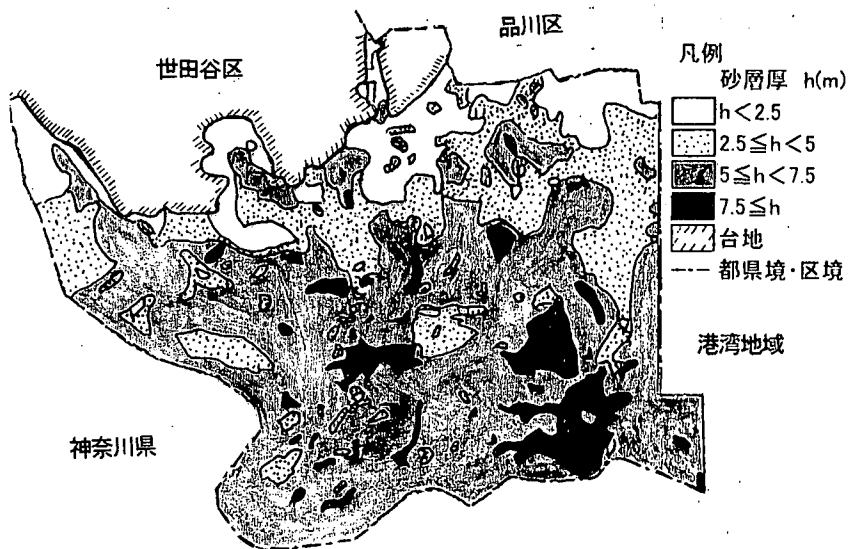


図-9 表層砂層厚分布図(大田区の低地)

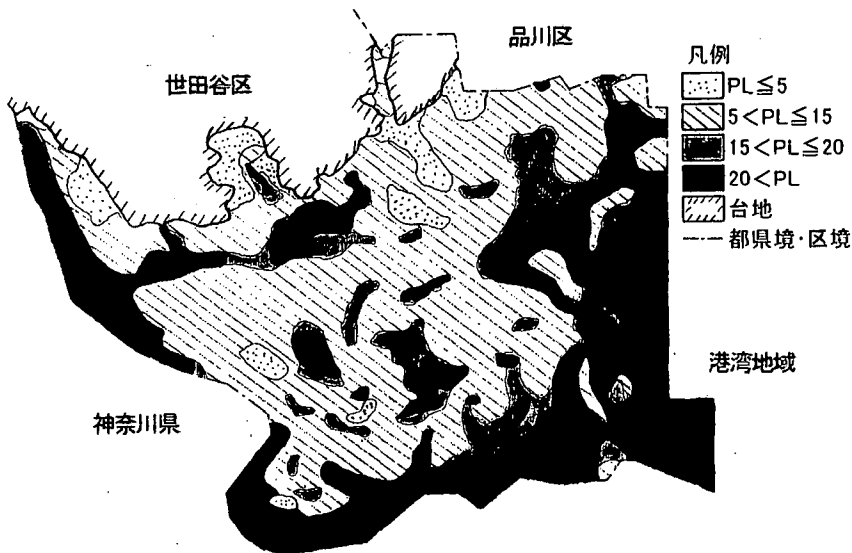


図-10 レベルII・タイプIIの液状化予測図(太田区の低地)

プIIの液状化予測図（PL値で4区分）を重ね合わせ、表-1に示す地盤流動判定法により東京低地の地盤流動予測図を作成し図-12に示す。

図-12によると、利根川が東京湾に流入していた年代の古い川筋である古利根川・中川・旧中川、古隅田川、江戸川・旧江戸川沿い、旧荒川河道の新川・隅田川・荒川上流沿い、多摩川沿いと、湾岸の干拓地・埋立地に、地盤流動の可能性大きい地域が広く分布している。

区別に見ると、地盤流動の可能性が大きい地域は、足立区、葛飾区、江戸川区に広く分布している。墨田区では隅田川沿いに、江東区、大田区では河口周辺と埋立地・干拓地に地盤流動の可能性が大きい地域が分布している。

特に、葛飾区では地盤流動の可能性がきわめて大きい地域が広範囲に分布している。

#### 4 おわりに

ここでは、境界条件（水際線の条件）を考慮せず、地盤の構成として地盤流動の潜在性を表す「地盤流動の可能性」について検討した。

橋梁や河川構造物の多くは水際線に位置しており「地盤流動」の目安として使用することができる。

ただし、河川堤防・護岸などの水際線の構造物が地盤流動を生じない構造の場合は、橋梁基礎は側方流動の影響を受け難い。より詳細な側方流動の可能性を表す「地盤流動予測図」を作成するためには、

河川堤防・護岸の構造や耐震性について検討した水際線の境界条件を考慮した検討が必要となる。

また、ここでは、港湾地域の埋め立て地については、液状化・地盤流動の検討は行わなかった。港湾地域の若齢な埋め立て地は、自然地盤と異なり地震履歴や年代効果（セネンティション）を受けいないため、ここで提案した液状化強度推定式から求められる液状化強度より小さくなる可能性がある。埋立後の経過年数が少ない若齢な埋立地盤では、シルトを多く含む地盤も液状化する可能性があり、土質名称では砂質シルト層を液状化対象層に含めるかの検討と、液状化強度については埋め立て層の液状化試験値の分析が必要である。

#### 「参考文献」

- 1) 草野 郁、阿部 博、岩本恵一：細粒分を含む自然堆積地盤の液状化特性、第22回地震工学研究発表会、1993
- 2) 道路橋示方書 耐震設計編、日本道路橋協会、2001
- 3) 東京都土木技術研究所、東京低地の液状化予測、東京都土木技術研究所、1988
- 4) 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、第406号/III-11、1989
- 5) 草野 郁、阿部 博、小川 好、中山俊雄：東京低地の液状化予測、土木学会論文集、第418号/III-11、1990
- 6) 草野 郁、小川 好、森 洋：レベルII地震動を想定した東京低地の液状化予測、地震工学シンポジウム、1999
- 6) H. Kanamori : Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, Bull. Earthq. Res. Inst., 49, 1971

表-1 PL値と表層砂層厚による地盤流動予測法

PL値と表層砂層厚 D(m)	20 < PL	15 < PL ≤ 20	5 < PL ≤ 15	PL ≤ 5
7.5 < D	I	II	III	IV
5 < D ≤ 7.5	II	III	IV	V
2.5 < D ≤ 5	III	IV	IV	V
D ≤ 2.5	IV	V	V	V

- 凡例 I：地盤流動の可能性きわめて大  
 II：地盤流動の可能性大  
 III：地盤流動の可能性ややあり  
 IV：地盤流動の可能性少ない  
 V：地盤流動の可能性なし

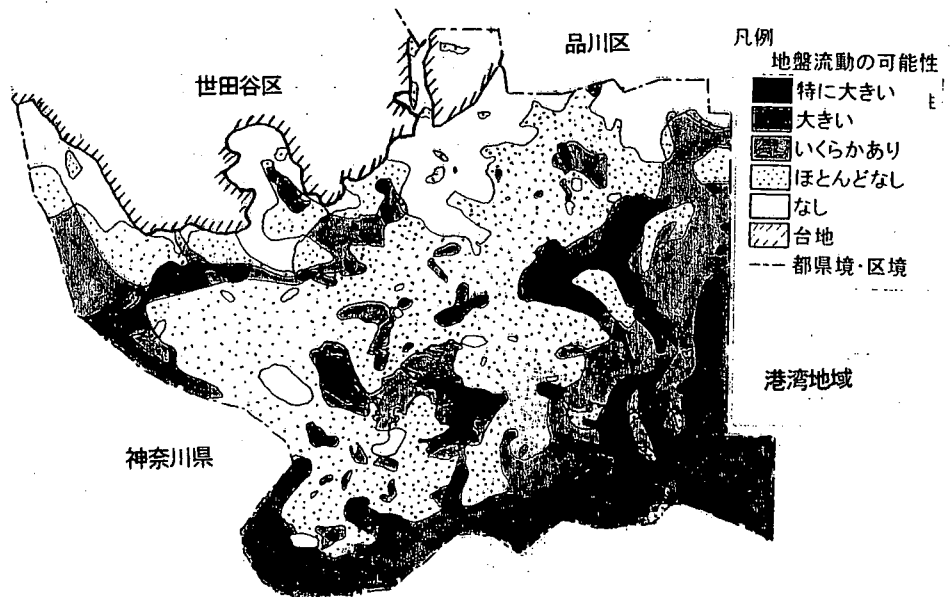


図-11 大田区の低地におけるレベルII・タイプIIの地盤流動予測図

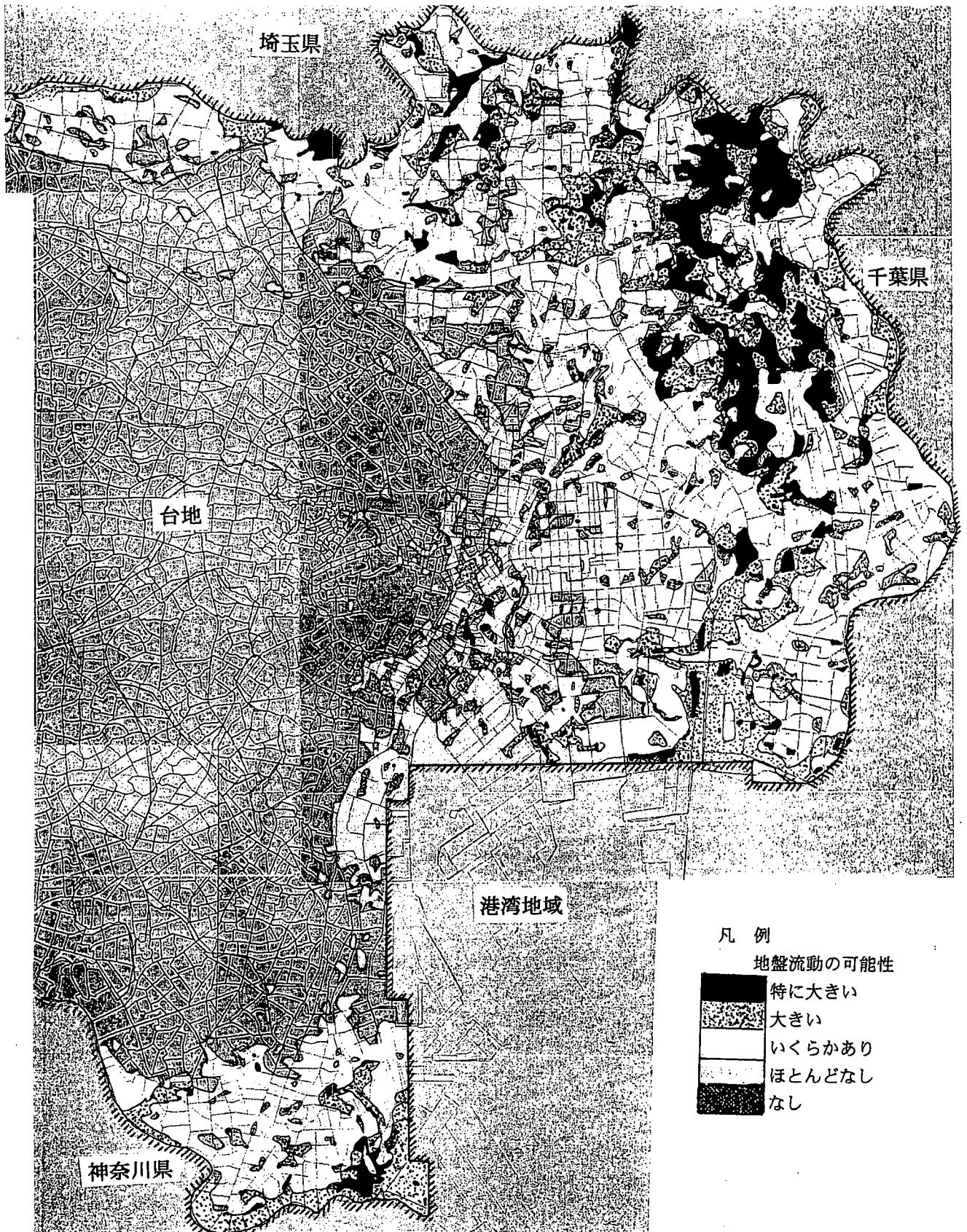


図-12 レベルII・タイプIIの地震動を対象とした東京低地の地盤流動予測図

- 8) G. L. Molas, F. Yamazaki : Attenuation of Earthquake Ground Motion in Japan Including Deep-Focus Events, Bull. of Seismological Society of America, 1995
- 9) 震災予防調査会：関東地震調査報文 地震編 震災予防調査報告、第100号甲、1925
- 10) 小川 好：地図／ボーリング情報のデータベース化とその地震被害予測への応用、東京大学工学博士論文、1992