

ロジットモデルによる広域を対象とした液状化予測モデルの構築

中部大学工学部 山田 公夫
中部大学工学部 杉井 俊夫
中部大学大学院 上田 剛

1. まえがき

兵庫県南部地震(1995, M=7.2)により阪神地域では、ポートアイランドや六甲アイランドの埋立地を中心に広い範囲で液状化による噴砂現象が発生したことは記憶に新しい。地震時における地盤の液状化現象については、新潟地震(1964, M=7.5)を契機として活発な研究活動が行われ、現在ではいくつかの予測法が提案されている。東海沿岸地域は大地震の発生域として古くから知られているが、安政地震(1854)以来、大地震が発生していない地震の空白域があり、近い将来、M=8 クラスの大地震の発生が懸念されている。著者らは、このような地震に備えて、広範囲な地域の液状化発生の有無を容易でかつ合理的に判定し、液状化危険度の高い地区を明確に表現できる液状化予測法の開発を行っている。

本研究では、液状化予測のための1つの手法として、液状化発生の判別を確率で表現できる二項ロジットモデルを用いている。この手法を用いて、新潟地震による液状化・非液状化地域に対して、液状化発生に関与するいくつかの定性的および定量的な地盤要因を用いて、液状化予測モデルの構築を試みた²⁾。構築したモデルを東南海地震(1944, M=8.0)による愛知県西部の液状化発生・非発生地域に適用したところ、液状化判別の的中率は新潟地域へのモデルの再現時に比べ、かなり低下した。これは新潟と愛知両地域の地盤特性の違いによるものと考えられる。本研究は、東南海地震による愛知県西部の液状化・非液状化地域を対象に、ロジットモデルを用いて液状化予測モデルの構築を試みたものである。

2. ロジットモデルの概要

ロジットモデルは、一般に個人の選択行動を分析・予測するものとして用いられてきた。本研究では地盤を個人と見なし、これが地震時に液状化するか否かの選択行動をとるものとして、二項ロジットモデルを適用している。

地盤 n が「液状化する」を選択する確率を液状化確率 P_n として、これを液状化と非液状化の両事象間の判別指標とする。ここで、「液状化しやすさ」を表すものとして地盤 n の液状化ポテンシャル関数 U_n を考える。地盤 n は、 $U_n > 0$ のとき液状化し、 $U_n < 0$ のとき液状化しないとする液状化ポテンシャル関数を次式で定義する。

$$U_n = V_n (\text{確定項}) + \varepsilon_n (\text{確率項}) \quad \dots (1)$$

ここで、 V_n は得られている地盤要因などで説明される液状化ポテンシャル関数の確定項であり、 ε_n は明らかにされていない要因及びデータのばらつきによる誤差を含んだ確率項(誤差項)である。これより、地盤 n の液状化確率 P_n は、

$$P_n = \text{Prob}(U_n > 0) = \text{Prob}(V_n + \varepsilon_n > 0) = \text{Prob}(-\varepsilon_n < V_n) \quad \dots (2)$$

となり、確率項 $-\varepsilon_n$ に Gumbel 分布を仮定すると、次式のロジットモデルが導かれる。

$$P_n = 1 / \{1 + \exp(-V_n)\} \quad \dots (3)$$

確定項 V_n は、様々な形が考えられるが、操作性を勘案して次に示す線形式と仮定した。

$$V_n = \theta_0 + \theta_1 X_{n1} + \theta_2 X_{n2} + \dots + \theta_k X_{nk} \quad \dots (4)$$

ここで、 $X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nk}$ は、地盤 n の特性要因であり、 $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ は、最尤推定法により決定される未知の定数パラメータである。 θ_0 は定数項であり、式(4)には取り上げられていない様々な要因を包含した定数(ダミー定数)としている。

Construction of liquefaction potential model for a wide area by logit model :

K. YAMADA (Chubu Univ), T. SUGII (Chubu Univ), T. UEDA (Chubu Univ Graduate-student)

液状化確率 P_n は式 (2) に示すように、液状化ポテンシャル関数の確率項が確定項の差よりも大きくならない確率、すなわち確定性の確からしさを表す。このように、 P_n は不明確な要因の特定化、情報データ不足の問題で液状化するか否かを明確に表現することが困難である液状化判定を確率的に表現するものである。モデルの検定には次の2つの値が用いられる。

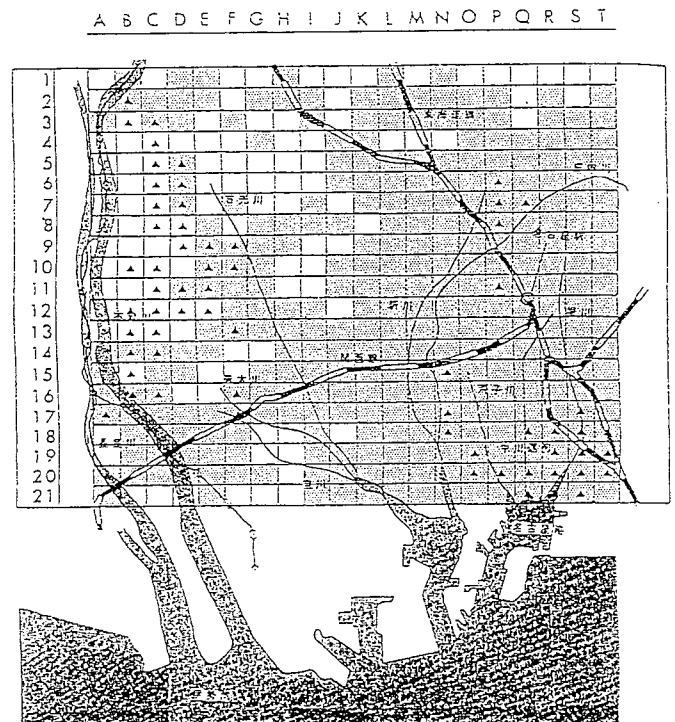
- 1) 的中率 (%) …液状化確率 50% ($P_n=0.5$) を基準に的中したデータ数の割合。
- 2) 尤度比 $\rho^2 \dots \rho^2$ の値は、相関係数の2乗と同じように0と1の間にあり、1に近いほどモデルの適合度が良いことを示す指標である。0.2~0.4でも十分高い適合度を持つと判断される。

3. 液状化予測モデルの構築

3.1 モデル構築対象地域

図一1は研究対象地域である愛知県西部を1km四方のメッシュに分割したものである。各メッシュを個々の地盤として取り扱うため、メッシュ毎に地盤データを収集した^{3),4)}。そして、各メッシュの代表ボーリングデータを選んだ。次に「日本の地盤液状化履歴図」⁵⁾を用いて、東南海地震時に対象地域内で液状化したと推定される地区を調べ、メッシュ単位で液状化発生・非発生の判定を行った。

図一1のうち、網掛けで示した所がモデル構築対象メッシュであり、その数は液状化発生メッシュ(同図の▲印)が46、非発生メッシュが261の合計307メッシュである。□(▲印も含む)で示したメッシュは地盤資料が入手できないために分析対象外である。分析対象となった307メッシュ中、地表面下第1層が粘土層の地盤は167メッシュ(液状化23メッシュ、非液状化144メッシュ)である。また、第1層が砂層の地盤は140メッシュ(液状化23メッシュ、非液状化117メッシュ)である。



地盤データメッシュ総数(307)「液状化メッシュ数(46) 非液状化メッシュ数(261)」

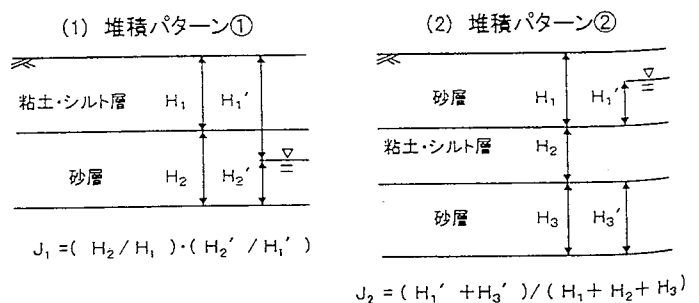
図一1 構築対象地域(愛知県西部)

表一

No	要因	No	要因
1	固有ダミー変数	11	飽和砂層厚
2	地下水位	12	第1層の砂層厚
3	換算N値	13	第2層の粘土層厚
4	実効震度	14	第3層の砂層厚
5	旧河道・河川	15	第1, 2層比
6	埋立地	16	第2, 3層比
7	全層砂層	17	被圧地下水の有無
8	第1層が粘土層	18	第1層の飽和砂層厚
9	第1層が砂層	19	第1層の粘土層厚
10	全層粘土層	20	地盤に関する値 J_1 or J_2

3.2 分析に用いた説明要因

ロジットモデルによる分析に用いた要因は表一1に示す2~20までの19要因である。このうち、4, 5, 6以外は沖積層の基底面までを対象としている。後述する要因分析において、土の堆積パターンを考慮しない場合は、13~16, 18, 20を除いて分析した。また、堆積パターンを考慮した場合の分析では地表面下第1層が粘土・シルト層の場合は7~9と12~13を砂層の場合は8~10を除いた。表中の「地盤に関する値 J_1 or J_2 」とは、それぞれ図一2に示す地表面下第1, 2層または3層までの各層厚と地下水位の位置を考慮して、図中に示した式 J_1 or J_2 として与えた。



図一2 堆積パターンと「地盤に関する値 J_1 or J_2 」

3.3 要因分析とモデルの構築

図一1に示すモデル構築の対象地域において、新潟地

盤と同じ堆積パターンを持つ地盤のみを抽出して分析した結果と対象地域全体に対する分析結果を比較したところ、土の堆積パターンによって液状化発生に対する要因の効き方が異なることが明らかになった²⁾。そのため、土の堆積パターンとその層厚などの関係を考慮して、分析する必要があると考えられる。本研究では、土の堆積パターンを考慮しない場合と考慮した場合について要因分析を行い、両者の分析結果を比較した。堆積パターンは図一2の(1)、(2)に示すように、地表面下第1層が粘土・シルト層(第2層は砂層)の場合と砂層(第2層は粘土・シルト層)の場合に分けてモデルの構築を試みた。なお、後者のパターンでは、第2層の粘土・シルト層の下位にある砂層の存在が液状化発生に関与すると考えられることから、第3層の砂層も考慮に入れて分析を行った。

(1) 土の堆積パターンを考慮しない場合の液状化予測モデル

表一2が堆積パターンを考慮しない場合のモデルである。表には分析によって抽出された要因(t検定で信頼度90%)とそのパラメータ推定値 θ_k ならびに弾性値 E_{xk} が示してある。 θ_k はロジットモデルの定義より+の場合には液状化を発生させる側に、-の場合には液状化を抑制する側に働くと解釈される。 E_{xk} はその絶対値が大きいほど、液状化発生に対する寄与率が高いことを示す。表の最下欄に示した的中率は、このモデルを構築対象地域(愛知県西部)に再現した時の的中率を表す。なお、表中の固有ダミー変数のパラメータは液状化発生・非発生の判別を液状化発生確率50%で行うように修正してある。

表一2 堆積パターンを考慮しない場合

要因	パラメータ θ_k [t値]	弾性値 E_{xk}
固有ダミー変数	-3.606 [4.081]	—
実効震度	3.480 [1.673]	1.19
旧河道・河川	0.875 [2.053]	0.18
埋立地	1.626 [4.028]	0.30
第1層の粘土層厚	-0.087 [1.843]	-0.09
再現的中率/尤度比 (液状化的中率/非液状化的中率)	63.5% / 0.445 (73.9% / 61.7%)	

表一2からわかるように、液状化発生要因として「旧河道・河川」、「埋立地」など、一般的に液状化しやすいとされている砂層が卓越した地形要因が選択された。また、定量的な要因では「実効震度」、「第1層の粘土層厚」が選択され、弾性値の数値比較から「実効震度」はこのモデルで最も液状化発生に影響を与えている要因であることを示している。このモデルを図一1の地域に再現した場合の液状化判別的中率は63.5%である。

(2) 土の堆積パターンを考慮した場合の液状化予測モデル

表一3に堆積パターンを考慮した場合のモデルを示す。表の(a)は図一2の堆積パターン①、(b)は同図の堆積パターン②の場合の結果である。(a)のモデルでは、表一2のモデルと同様に、「旧河道・河川」、「埋立地」などが液状化発生要因として選択された。弾性値の大きさより、「地下水位の位置」が液状化発生に最も影響を与えていることがわかる。これに対して、表一3の(b)のモデルでは「埋立地」以外は(a)と共通な要因は無く、「実効震度」「全層砂層」、「第2層の粘土層厚」、「第3層の砂層厚」、「地盤に関する値 J_2 」が選択された。モデル構築地域への再現による液状化判別の中率はモデル(a)で64.7%、モデル(b)で73.6%である。

表一3 堆積パターンを考慮した場合

(a) 第1層が粘土・シルト層 (第2層が砂層) (b) 第1層が砂層 (第2層が粘土・シルト層)

要因	パラメータ θ_k [t値]	弾性値 E_{xk}	パラメータ θ_k [t値]	弾性値 E_{xk}
固有ダミー変数	-1.793 [3.761]	—	-5.820 [3.193]	—
地下水位	-0.551 [2.042]	-0.83	—	—
実効震度	—	—	37.526 [2.609]	5.71
旧河道・河川	1.079 [1.898]	0.23	—	—
埋立地	1.240 [2.167]	0.24	1.754 [3.016]	0.35
全層砂層	—	—	2.283 [2.014]	0.23
第2層の粘土層厚	—	—	-0.114 [2.138]	-0.68
第3層の砂層厚	—	—	0.166 [1.728]	0.54
地盤に関する値 (J_1 or J_2)	—	—	-5.801 [2.967]	-2.86
再現的中率/尤度比 (液状化的中率/非液状化的中率)	64.7% / 0.475 (60.9% / 65.3%)		73.6% / 0.491 (73.9% / 73.5%)	
全体の再現的中率	68.7% (液状化的中率 = 67.4% / 非液状化的中率 = 69.0%)			

表一2と表一3の再現的中率を比較すると、堆積パターンを考慮しない表一2のモデルの的中率は

63.5%、堆積パターンを考慮した表一3(a)、(b)の両モデルによる全体の的中率は68.7%となり、後者の方が若干、的中率が高い。なお、液状化と非液状化に対するそれぞれの的中率は後者の方が前者よりもバランスがとれている。これらのモデルの適用性を検討するため、新潟地震(1964, M=7.5)および関東地震(1923, M=7.9)による新潟、東京の液状化・非液状化地域へ表一2、表一3のモデルを適用した結果を以下に述べる。

4. 既往地震への液状化予測モデルの適用

4.1 新潟地震への適用

(1) 適用対象地域

若松⁵⁾によって調べられた新潟地震時に新潟地域で液状化が発生したと推定される地域を図-3に網掛けで示す。本研究では、新潟地域を図-3に示したようなメッシュ（約600m×700m）に分割した。そして、図-1に示したモデル構築対象地域同様、各メッシュを個々の地盤として取り扱うため、メッシュごとに地盤データ⁶⁾を収集し、それぞれの代表ボーリングデータを選んだ。

図-3の★印は、地盤資料が入手できなかったため、周辺メッシュのボーリング柱状図と地盤断面図を用いて仮想地盤断面を作成したメッシュである。液状化予測モデルの適用対象としたメッシュ数は、仮想地盤断面によるメッシュを除く、液状化82メッシュ、非液状化75メッシュの合計157メッシュである。このうち、地表面下第1層が粘土層のメッシュは53（液状化13メッシュ、非液状化40メッシュ）であり、砂層のメッシュは104（液状化69メッシュ、非液状化35メッシュ）である。

(2) 適用結果

新潟地震による新潟地域の液状化・非液状化地域へ3.3で述べた堆積パターンを考慮しないモデルと考慮したモデルを適用した。その結果を表-4、表-5の(a)、(b)に、被災確率を図-4、5に示した。図-4は堆積パターンを考慮しないモデルによる被災確率、図-5は堆積パターンを考慮したモデルによる被災確率である。図-4、5の横軸はメッシュの通し番号を表す。モデルの適用に際して、液状化発生・非発生を液状化発生確率（＝被災確率）50%で判別するために固有ダミー変数のパラメータを修正した。

表-4、表-5に示したように、堆積パターンを考慮しないモデルによる液状化発生に対する的中率は、液状化的中率（実地震で液状化したメッシュのうち、モデルで液状化と判定されたメッシュの割合）が69.5%、非液状化的中率（実地震で液状化しなかったメッシュのうち、モデルで非液状化と判定されたメッシュの割合）が90.7%となり、全体の的中率は79.6%となった。これに対して、堆積パターンを考慮した場合は、表-5より第1層が粘土・シルト層のときの的中率は液状化的中率が76.9%、非液状化的中率が92.5%となり、全体の的中率は88.7%となった。一方、第1層が砂層のときの的中率は、それぞれ58.0%、68.6%、61.5%となった。これら2つのケースを合わせた場合の的中率は、表-5に示したように液状化的中率が61.0%、非液状化的中率が81.3%、全体の的中率が70.7%となった。

以上のように、それぞれのモデルでの的中率に差が見られた理由として、つぎのようなことが考えられる。モデルの適用対象とした新潟地域は、図-3からわかるように信濃川を中心とした現河川・旧河道とその周辺地域あるいは埋立地で形成され、液状化地域が広範囲に広がっている。また、新潟地域の地下水位は地表面付近にあり、

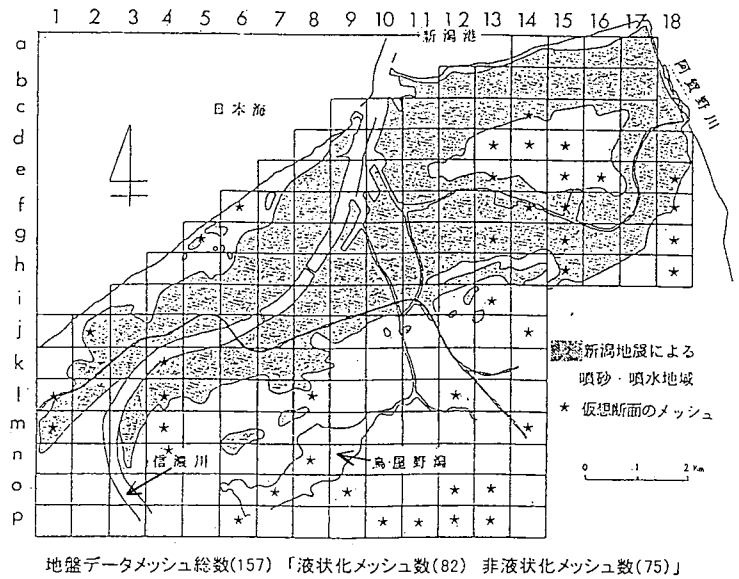


図-3 適用対象地域(新潟)

表-4 愛知県西部モデルの適用結果
(堆積パターンを考慮しない場合)

適用的中率/(新潟)	79.6%
(液状化的中率/非液状化的中率)	(69.5% / 90.7%)
全体の適用的中率/(新潟)	

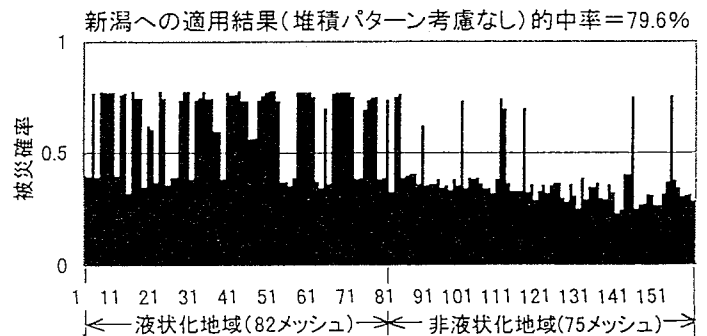


図-4 各メッシュの被災確率

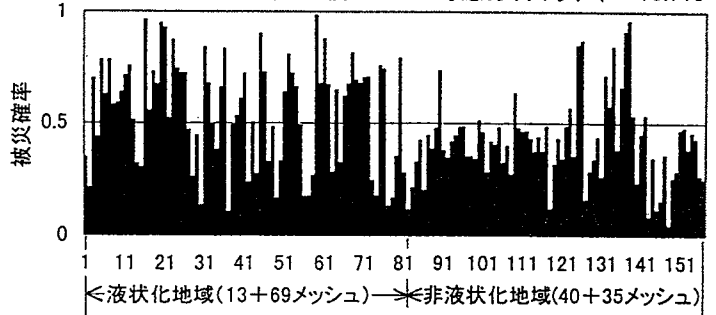
その深さは液状化・非液状化地域ともほぼ均一である。さらに、地表面下第1層にある粘土・シルト層厚は極めて薄く、地盤は砂層が卓越している。

これらのことより、「河川」、「埋立地」のような液状化を発生させる要因が含まれている堆積パターン①や堆積パターンを考慮しないモデルでは、液状化発生に対する判別的中率が高くなったと考えられる。これに対して、堆積パターン②のモデルでは、地形の要因として「埋立地」が抽出されているが、比較的単純な堆積構造の新潟地域では、地表面下第3層に砂層が存在する 경우가少なく、この要因が活かされないための中率が低くなったと考えられる。したがって、新潟のような砂層が卓越している地域では堆積パターンを考慮する必要がないものと考えられる。

表一五 愛知県西部モデルの適用結果 (堆積パターンを考慮した場合)

	(a) 第1層が粘土・シルト層 (第2層が砂層)	(b) 第1層が砂層 (第2層が粘土・シルト層)
適用的中率/(新潟)	88.7%	61.5%
(液状化的中率/非液状化的中率)	(76.9% / 92.5%)	(58.0% / 68.6%)
全体の適用的中率/(新潟)	70.7% (液状化的中率=61.0% / 非液状化的中率=81.3%)	

新潟への適用結果(堆積パターン考慮あり)的中率=70.7%



図一五 各メッシュの被災確率

4.2 関東地震への適用

(1) 適用対象地域

図一六は適用対象地域である東京を500m四方のメッシュに分割したものである。各メッシュを個々の地盤として取り扱うため、メッシュごとに地盤データ⁷⁾を収集し、各メッシュの代表ボーリングデータを選んだ。次に、関東地震時に対象地域内で液状化したと推定される地区⁸⁾を調べ、メッシュ単位で液状化発生・非発生の判定を行った。

判定対象となったメッシュは図一六に■印と▣印で示したところであり、■印は液状化地域で22メッシュ、▣印は非液状化地域で57メッシュの合計79メッシュである。このうち、地表面下第1層が粘土層のメッシュは54(液状化12メッシュ、非液状化42メッシュ)、砂層のメッシュは25(液状化10メッシュ、非液状化15メッシュ)である。

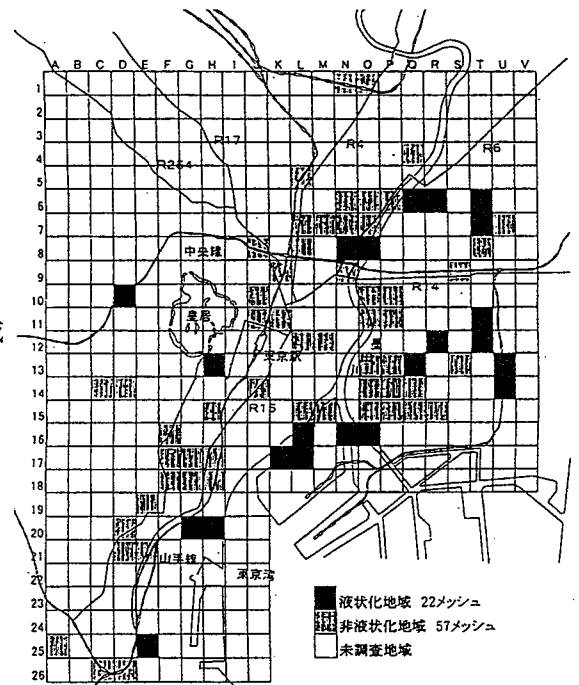
(2) 適用結果

関東地震による東京の液状化・非液状化地域へ、3.3で述べた堆積パターンを考慮しないモデルと考慮したモデルを適用した。その結果を表一六、表一七に、また、被災確率を図一七、八に示した。図一七は堆積パターンを考慮しないモデルによる被災確率、

図一八は堆積パターンを考慮したモデルによる被災確率である。図一七、八の横軸はメッシュの通し番号を表す。

表一六、表一七において、液状化的中率(実地震で液状化したメッシュのうち、モデルで液状化と判定されたメッシュの割合)に着目すると、堆積パターンを考慮しない場合は77.3%、考慮した場合は90.9%となり、後者の方が高くなった。これに対して、非液状化的中率(実地震で液状化しなかったメッシュのうち、モデルで非液状化と判定されたメッシュの割合)は堆積パターンを考慮しない場合は56.1%、考慮した場合は45.6%となり、前者の方が高くなった。

これらの結果をもとに得られた全体の的中率は堆積パターンを考慮しない場合が62.0%、考慮した場合が58.2%となり、前者の方がわずかながら高くなった。なお堆積パターンを考慮した場合、第1層が粘土・シルト層が



図一六 適用対象地域(東京)

砂層かにかかわらず液状化的中率(83.0~100%)が、非液状化的中率(45~47%)を大幅に上回っている。一方、堆積パターンを考慮しないときの的中率は上述したように、液状化地域が77.3%、非液状化地域が56.1%である。全体の的中率が多少低下しても、液状化発生に対する的中率が高い方が安全側の判定となることを考えると、表一2, 3に示したモデルを関東地震へ適用する場合は、堆積パターンを考慮したモデルの方が妥当だと思われる。

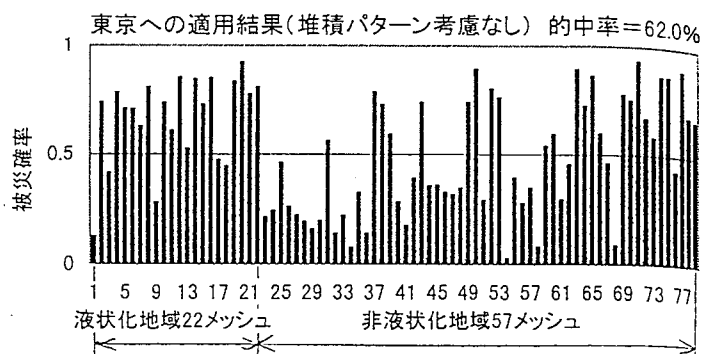
5. まとめ

東南海地震による愛知県西部の液状化発生・非発生地域に対して、土の堆積パターンを考慮しない場合と考慮した場合について要因分析を行い、広域を対象とした液状化予測モデルを構築した。その結果、モデル構築地域への再現的中率は堆積パターンを考慮したモデルが約70%となり、考慮しないモデルの的中率(約65%)を若干上回った。

つぎに、構築した液状化予測モデルを新潟地震と関東地震による新潟、東京の液状化発生・非発生地域に適用し、他地域へのモデルの適用性を検討した。その結果、砂層が卓越している新潟地域では、堆積パターンを考慮しないモデルの方が液状化判別の的中率が高くなった。これに対して、東京では堆積パターンを考慮したモデルの方が考慮しないモデルよりも液状化発生に対して、安全側の判定結果を与えることが示された。他地域への適用性がより高いモデルを構築することが今後の課題である。

表一6 愛知県西部モデルの適用結果
(堆積パターンを考慮しない場合)

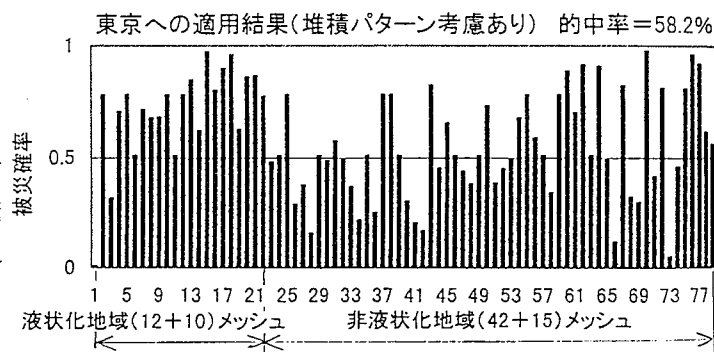
適用的中率/(東京)	62.0%
(液状化的中率/非液状化的中率)	(77.3% / 56.1%)
全体の適用的中率/(東京)	



図一7 各メッシュの被災確率

表一7 愛知県西部モデルの適用結果
(堆積パターンを考慮した場合)

	(a) 第1層が粘土・シルト層 (第2層が砂層)	(b) 第1層が砂層 (第2層が粘土・シルト層)
適用的中率/(東京)	53.7%	68.0%
(液状化的中率/非液状化的中率)	(83.3% / 45.2%)	(100% / 46.7%)
全体の適用的中率/(東京)	58.2% (液状化的中率=90.9% / 非液状化的中率=45.6%)	



図一8 各メッシュの被災確率

「参考文献」

- 1) (社) 土木学会：非集計型行動モデルの理論と実際、PP.33-62, 1995.
- 2) 山田公夫・杉井俊夫・植村千恵子：ロジットモデルによる愛知県西部における液状化予測モデルの構築、第8回 地盤工学シンポジウム論文集、PP.109-112、地盤工学会中部支部、1996.
- 3) 建設省中部地方建設局中部技術事務所：濃尾平野の地盤資料、1978.
- 4) (社) 土質工学会中部支部：最新名古屋地盤図、1988.
- 5) 若松加寿江：日本の地盤液状化履歴図、東海大学出版会、PP.101, 1991.
- 6) 新潟県平野部の地盤図集：建設省北陸地方建設局北陸技術事務所、1981.
- 7) 東京都土木技術研究所：東京都総合地盤図、技報堂、1977.
- 8) 東京都土木技術研究所：東京低地の液状化予測、1987.