

# 地形分類を用いた広域を対象とした液状化モデルの構築

中部大学工学部 正会員 山田 公夫  
中部大学工学部 正会員 杉井 俊夫  
オオバ技術サービス 正会員 上田 剛  
中部大学大学院 学生員 岩村 陽子

## 1. まえがき

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<sup>1)</sup>。これらの予測法を用いて、大都市域の沖積地盤地帯のような広域を面的にかつ小領域単位で液状化判定を試みる場合、ほとんどの判定法が土質試験結果や土質柱状図を必要としているため、地盤調査が行われていない地区は液状化判定の対象外となる。そのため、これらの地区は液状化判定の空白域として残る。

本研究は地盤調査資料に頼らないで地形分類のみを考えた場合、どの程度まで液状化発生・非発生を把握できるかという点に着目し、面的に情報が欠けていない土地条件図の地形分類を説明要因として、東南海地震(1944, M=8.0)による濃尾平野の液状化履歴地域に対して要因分析を行い、液状化予測モデルの構築を試みた。ここでは、液状化が起こりうる確率を被災確率として表現し、ロジットモデル<sup>2)</sup>を用いて要因分析を行った。

## 2. 被災確率モデルの概要

ロジットモデルによれば、液状化のしやすさを示す被災ポテンシャル関数  $U_n$  は次式で示される。

$$U_n = V_n + \varepsilon_n \quad (1)$$

$U_n$  は説明できる地区  $n$  の地形要因を表す被災ポテンシャル関数の確定項であり、 $\varepsilon_n$  は明らかにされていない要因とデータのばらつきによる誤差を含む確率項である。これより、地区  $n$  に対する液状化の被災確率は次式で表される。

$$P_n = \frac{1}{1 + \exp(-V_n)} \quad (2)$$

確定項  $V_n$  は、液状化のしやすさを示す被災ポテンシャル関数として様々な形が考えられるが、本研究では操作性を勘案して次に示す線形式と仮定している。

$$V_n = \theta_0 + \theta_1 X_{n1} + \theta_2 X_{n2} + \dots + \theta_k X_{nk} \quad (3)$$

ここで、 $X_{n1}, X_{n2}, \dots$  は地区  $n$  の地形要因(河川周辺地区、盛土地、平坦化地、自然堤防など)であり、 $\theta_0, \theta_1, \dots$  は最尤推定法により決定される未知のパラメータである。なお、モデルの検定には、次の2つの値が用いられる。

① 的中率(%right または Hit Ratio) … 被災確率 50% を基準に的中したデータ数の割合。

② 尤度比  $\rho^2 \dots 1$  に近いほどモデルの適合度がよいが、0.2~0.4 でも十分高い適合度をもつ。

要因の影響度(感度)を測るには要因の次元の違いにより次の弾性値分析が必要となる。弾性値とは「説明変数の元の値に対する比率とそれがもたらす被説明変数の変化量の比率の比」であり、その絶対値が大きい

*Liquefaction potential model for a wide area by using topographical classification: K. Yamada, T. Sugii (Chubu Univ.), T. Ueda (Ohba Engineering Service Co. LTD.), Y. Iwamura (Chubu Univ. Undergraduate)*

ほど影響度が強いと解釈できる。いま要因を  $X_{ni}$ 、被災確率を  $P_n$  とする。

$$P_n = f(X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{ni}, \dots, X_{nk}) \quad (4)$$

ここで、 $X_{ni}$  が  $\Delta X_{ni}$  だけ変化したときの  $P_n$  の変化量を  $\Delta P_n$  とすると、

$$\Delta P_n = f(X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{ni} + \Delta X_{ni}, \dots, X_{nk}) - f(X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{ni}, \dots, X_{nk}) \quad (5)$$

となり、弾性値  $E_{xk}$  は次式で定義され、その絶対値が大きい要因ほど影響度が高いことがわかる。

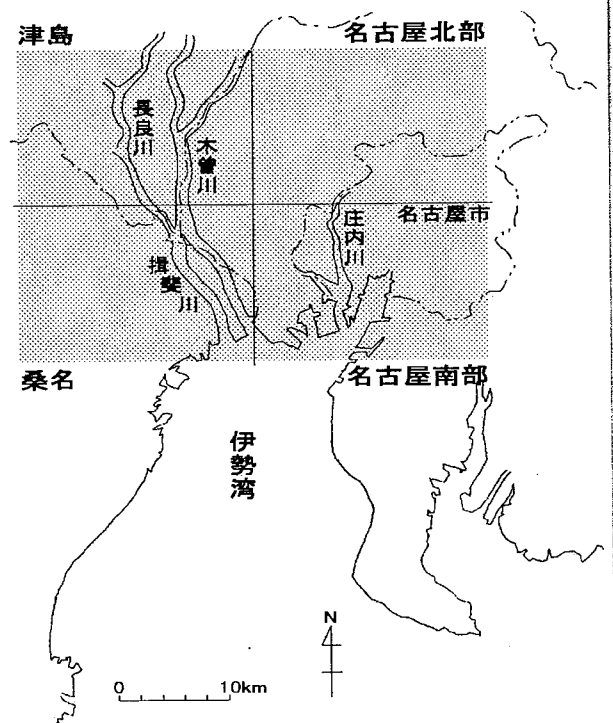
$$E_{xk} = \frac{\Delta P_n / P_n}{\Delta X_{ni} / X_{ni}} \quad (6)$$

### 3. 研究対象地域

本研究の対象地域は図・1に網かけで示した範囲で、土地条件図(1:25000)<sup>3)</sup>に記載された図名でいうと、「桑名」、「津島」、「名古屋北部」、「名古屋南部」の4地域(1地域:20km×20km)である。これらの地域は、若松によって示された「日本の地盤液状化履歴図(1:50000)<sup>4)</sup>」によれば、過去に宝永地震(1707, M=8.4)、安政地震(1854, M=8.4)、濃尾地震(1891, M=8.0)、東南海地震などで液状化が発生している。これらの地震のうち、本研究では東南海地震を取り上げ、若松による液状化履歴図を用いて、液状化が発生したと推定される場所を調べた。要因分析のために図・1の地域を500m四方のメッシュに分割し、メッシュ内に少しでも液状化履歴がある場合は液状化メッシュ、液状化の履歴が全くない場合は非液状化メッシュとし、メッシュ単位で液状化発生・非発生の区別をした。

4面の土地条件図の総メッシュ数6400のうち、1メッシュ全体が台地・丘陵地で占められる地区は、既往地震の経験より液状化の可能性は無いものとして分析対象から除外した。

以上のような整理の結果、4面の土地条件図に対して分析対象となったメッシュ数は3314であり、そのうち液状化メッシュ数は251となった。4面の土地条件図それぞれに対するメッシュ数と液状化メッシュ数を表・1に示した。



図・1 研究対象地域

表・1 地域別のメッシュ数と液状化メッシュ数

地域名	桑名	津島	名古屋北部	名古屋南部	計
メッシュ数	550	1058	1016	690	3314
液状化メッシュ数	80	105	15	51	251

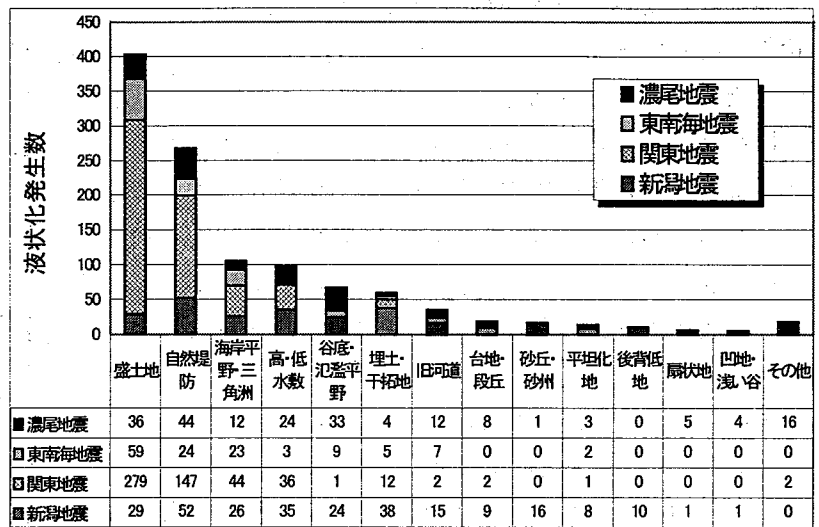
(注) 液状化メッシュ数は内数

### 4. 分析に用いる要因の選定

分析に用いる要因の選定をおこなうにあたり、既往地震による液状化の発生個所と地形分類の関係を調べた。既往地震のうち、濃尾地震、東南海地震、関東地震(1923, M=7.9)、新潟地震(1964, M=7.5)による液状化履歴を日本の地盤液状化履歴図<sup>4)</sup>と土地条件図<sup>3),5)</sup>を対比させて液状化箇所の地形要因を数え、図・2のように整理した。図・2に示した地形分類ごとの数値は、メッシュ内に液状化発生の履歴がある場合、その履歴地域に含まれるすべての地形要因を拾い上げたものである。たとえば、図・3のようなメッシュにおいて網掛けが液状化地域であるとすると、「盛土地」と「自然堤防」を拾い上げた。

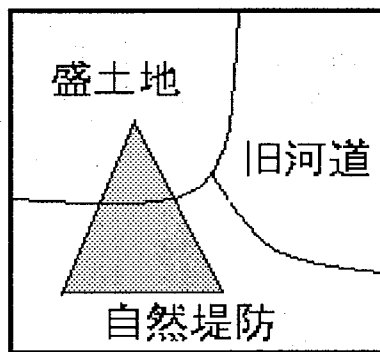
図・2からわかるように、盛土地、自然堤防、海岸平野・三角州、高水敷・低水敷、谷底平野・氾濫平

野、埋土地・干拓地、旧河道などでは液状化が発生しやすく、台地・段丘、凹地・浅い谷では液状化が発生しにくい。液状化の要因分析を行うにあたり、台地、段丘、山地は他の要因と比べ、液状化発生数がわずかであったため、これらの地形は液状化の可能性はないものと考え、分析要因から除いた。つぎに、高水敷、低水敷は堤外地のため、河川、旧河道に含め、「河川、旧河道、高水敷、低水敷」をまとめて1つの要因とした。さらに、盛土地、高い盛土地、埋土地、干拓地は土を盛るなどとした造成地なので、「盛土地、高い盛土地、埋土地、干拓地」をまとめて1つの要因とした。



図・2 既往地震による液状化発生数と地形分類の関係

以上の結果、分析には表・2に示す②～⑨までの地形に関する8要因と⑩震央距離および⑪標高1m未満か否かの計10要因を説明要因として分析に用いることとした。一方、目的変数は液状化発生の有無とし、液状化メッシュを1、非液状化メッシュを2とした二項判定による解析を



図・3 地形分類と液状化履歴

表・2 分析に用いた要因

要因
① 固有ダミー変数
② 河川・旧河道・高水敷・低水敷
③ 平坦化地・農耕平坦化地・階段耕作地
④ 盛土地・高い盛土地・埋土地・干拓地
⑤ 扇状地・緩扇状地
⑥ 自然堤防・天井川沿いの微高地
⑦ 谷底平野・氾濫平野
⑧ 海岸平野・三角州
⑨ 砂丘・砂堆・砂州
⑩ 震央距離
⑪ 標高1m未満

ロジットモデルを用いて行った。1つのメッシュにおいて、表・2の②～⑨の要因が複数含まれる場合は次のように要因を選んだ。液状化メッシュでは、図・3に示したように、液状化の履歴がある地形要因をすべて取り上げた。一方、非液状化メッシュではそのメッシュに占める面積割合の大きい地形要因から順次取り上げ、それらの地形要因の占める面積の合計がメッシュ全体の50%を超えるまで複数個の地形要因を選んだ。

## 5. 分析結果と構築モデル

### (1) 研究対象地域全体に対する分析結果と構築モデルの再現

表・2の要因を用いて、図・1に網掛けで示した地域全体に対して行った分析の結果、表・3に示したモデルAを得た。このモデルには、t検定で信頼度95%(t値 $\geq 1.96$ )を満足する要因、すなわち②河川・旧河道、高水敷・低水敷、④盛土地、干拓地、埋土地、⑥自然堤防、天井川沿いの微高地の3要因が抽出されている。各要因のパラメータの符号はプラスの場合には液状化を発生させる側に、マイナスの場合は液状化を抑制する側に作用することを示す。また、弾性値は式(6)で示したように、その絶対値が大きい要因ほど液状化発生の有無に大きく寄与することを示す。モデルAの3要因はいずれも液状化を発生させる側に作用し、液状化発生に最も寄与する要因は④、ついで、⑥、②の順となっている。図・1に示した分析対象地域へモデルAを再現した場合の的中率が表・3の下欄に示してある。モデルの再現時に、液状化発生・非発生を判別する被災確率は、研究対象地域の液状化メッシュ数/全メッシュ数(251/3314=0.075)を基準と

する。ここでは、再現時の被災確率が0.075以上ならば液状化、0.075未満ならば非液状化と判定される。液状化的中率とは実地震で液状化したメッシュのうち、モデルAの再現結果が液状化と判定されたメッシュの割合を示す。同様に、非液状化的中率とは実地震で液状化しなかったメッシュのうち、モデルAの再現結果が非液状化と判定されたメッシュの割合である。また、全体の的中率とは液状化と非液状化を合わせて、判定が的中したメッシュの割合を示す。

次に、モデルAの再現結果を「桑名」、「津島」、「名古屋北部」、「名古屋南部」の各地域別に整理して求めた的中率を表・4に示す。再現結果は各地域で異なるものとなった。すなわち、「津島」は全体の的中率、液状化的中率、非液状化的中率ともに80%以上となり、良好な再現結果が得られた。また、「桑名」は全体の的中率、液状化的中率、非液状化的中率が67~70%となり、「津島」より20%程度低い結果となった。一方、「名古屋北部」では液状化的中率が90%以上となったが、非液状化的中率、全体の的中率は「桑名」と同様の70%程度にとどまった。「名古屋南部」は液状化的中率が100%となったが、全体の的中率、非液状化的中率は30%以下となった。

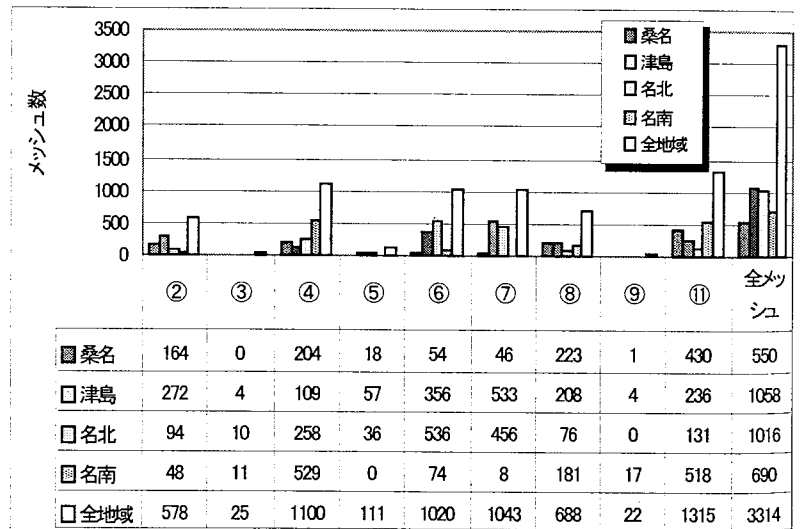
表・4の的中率と表・3の的中率を比較すると、名古屋南部を除いた各地域のそれぞれの的中率は対象地域全体に対する的中率とほぼ同等の値を示し、「名古屋南部」のみ構築したモデルAの再現結果が良好とはいえない。この原因として考えられることは、図・4に示す地域別の要因数の比較において、名古屋南部では表・3のモデルAに示された④の要因「盛土地・高い盛土地・埋土地・干拓地」が占める割合が他地域と比べて格段に高いことである。これは名古屋南部は名古屋港に面しており、江戸時代より埋立・干拓が行われてきたことによる。名古屋南部の各メッシュの要因の組合わせとそれらの組合わせによる被災確率を表・5に示した。表・5より、④の要因のみの場合の被災確率は0.093であり、上述した再現時の判定基準(0.075以上で液状化発生)によれば、液状化と判定される。要因④を含

表・3 解析モデルA

	全地域 (t≥1.96)	
	パラメータ	弾性値
	t値	
①固有ダミー変数 (補正前)	-5.355 26.412	
②河川・旧河道 高水敷・低水敷	1.668 9.528	0.793
④盛土地 干拓地・埋土地	2.956 16.13	0.937
⑥自然堤防 天井川沿いの微高地	1.951 12.239	0.844
全体の的中率%	68.9	
液状化的中率%	83.3	
非液状化的中率%	67.7	

表・4 モデルAの各地域別の再現結果

	桑名	津島	名古屋北部	名古屋南部
全体の的中率 (%)	68.0	91.9	71.8	30.3
液状化的中率 (%)	70.0	83.8	93.8	100.0
非液状化的中率 (%)	67.7	92.8	71.4	24.7



図・4 各要因②~⑩における地域別要因数

表・5 要因の組合せによる被災確率と実地震による液状化メッシュ数および全メッシュ数 (名古屋南部)

要因	被災確率	液状化メッシュ数	全メッシュ数
②	0.039	0	12
④	0.093	44	468
⑥	0.041	0	39
②④	0.411	3	29
②⑥	0.226	0	3
④⑥	0.423	2	28
②④⑥	0.833	2	4
データ無し	0.006	0	107
合計		51	690

むメッシュは名古屋南部の 690 メッシュ中、529 メッシュである。これが非液状化的中率を大きく低下させた原因である。一方、東南海地震による名古屋南部の液状化メッシュ数は 51 であり、これらの液状化メッシュに対する要因の組合せとその被災確率は表・5 のように示されているように、いずれのメッシュも液状化発生と判定されることより、液状化的中率は 100% となった。

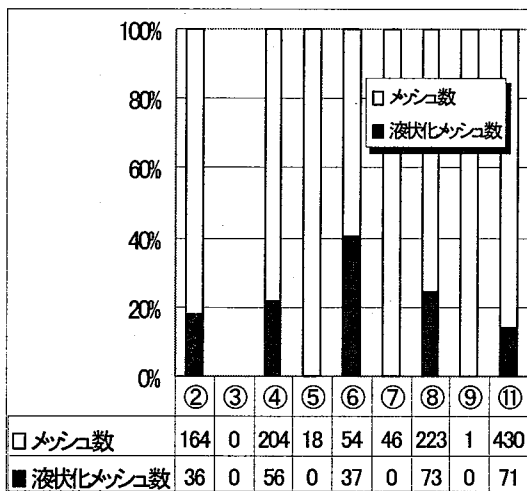
(2) 地域ごとの分析結果とモデルの構築

対象地域にモデル A を再現させたところ「桑名」、「津島」、「名古屋北部」、「名古屋南部」のそれぞれの地域において、再現結果が異なった。したがって、液状化履歴と地形分類の関係が濃尾平野において地域的な特徴があるかどうかを検討するため、これらの 4 地域

(桑名、津島、名古屋北部、名古屋南部) に対して表・2 の要因を用いてそれぞれ個別に分析を行った。図・5～図・8 は、これらの 4 地域に対して表・2 に示した分析要因(②～⑨、⑪)ごとのメッシュ数と液状化メッシュ数(内数)を下欄に数値で示し、要因ごとの液状化メッシュ

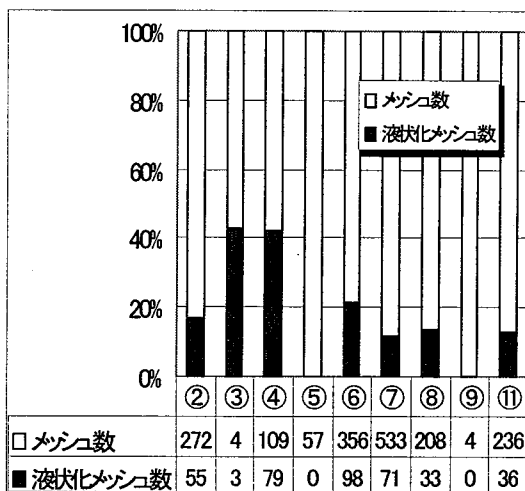
の割合(液状化メッシュ数/メッシュ数)を棒グラフで表したものである。図・5 の要因③、図・7 の要因⑥、図・8 の要因⑤はいずれも該当するメッシュが存在しなかった。これらの図の比較で特徴的なことは、本研究の対象地域の西側(桑名、津島)と東側(名古屋北部、名古屋南部)では、同じ要因でも液状化の発生頻度に差が見られることである。西側は木曾川、長良川、揖斐川の三大河川が北から南に向かって流れており、地形的には自然堤防が発達し、河口付近は干拓によって土地が造成されていることが液状化発生の頻度を高めたものと考えられる。

要因分析の結果を表・6 のモデル a～c に示す。個々の地域の分析においては、前述したように抽出される要因が t 検定で信頼度 95% を満足することを念頭においたが、この条件を満たす地域は桑名(モデル a)と津島(モデル b)となった。これに対して、名古屋北部では信頼度を 90%(t 値 $\geq 1.96$ )に下げることによりモデル c が得られたが、名古屋南部では信頼度を 90% に下げてもこれを満足するモデルは得られなかった。



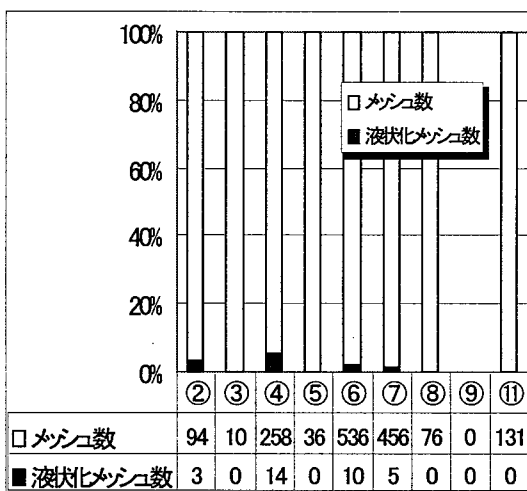
(液状化メッシュ数は内数である。)

図・5 桑名の要因別頻度



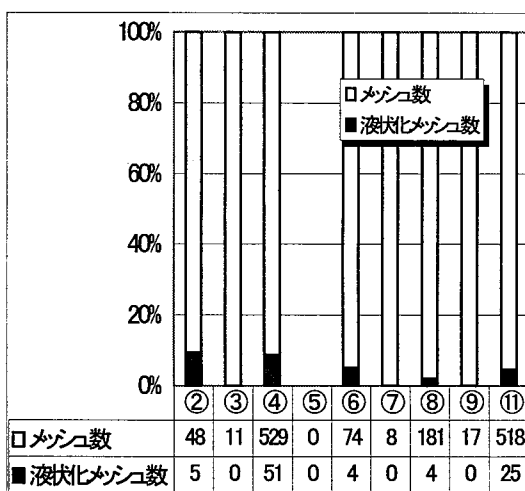
(液状化メッシュ数は内数である。)

図・6 津島の要因別頻度



(液状化メッシュ数は内数である。)

図・7 名古屋北部の要因別頻度



(液状化メッシュ数は内数である。)

図・8 名古屋南部の要因別頻度

表・3に示したモデルAと表・6に示した3つのモデルa~cを比較すると、全地域と桑名および名古屋北部のモデルはいずれも同じ要因が抽出されているが、各モデルのそれぞれの要因の弾性値の大きさから分かるように、液状化への影響度は同じ要因でも地域によって異なっている。表・6の下欄に示してある的中率は、表・3の場合と同様に各モデルをそれぞれの分析対象地域へ再現させた場合のものである。これら3地域のモデルを再現したときの判別的中率と対象地域全域に対する判別の中率を比較すると、全地域と桑名はほぼ同等の値を示しているのに対して、名古屋北部は各的中率とも10%程度高くなっている。一方、津島モデルbは④盛土地、干拓地、埋土地の代わりに、⑧海岸平野、三角州が抽出され、モデル再現時の液状化判別の中率は名古屋北部と同等の値を示している。

表・6 地域別解析モデル

		モデルa	モデルb	モデルc
		桑名 ( $t \geq 1.96$ )	津島 ( $t \geq 1.96$ )	名北 ( $t \geq 1.645$ )
①固有ダミー変数 (補正前)	パラメータ	-4.056	-6.126	-7.670
	t値	11.117	13.215	6.787
② 河川・旧河道 高水敷・低水敷	パラメータ	1.217	1.770	1.550
	t値	3.692	6.651	2.174
	弾性値	0.665	0.818	0.786
④ 盛土地 干拓地・埋土地	パラメータ	2.320		4.108
	t値	6.437		2.174
	弾性値	0.870		0.983
⑥ 自然堤防 天井川沿いの微高地	パラメータ	3.640	4.301	1.034
	t値	8.649	9.794	1.824
	弾性値	0.920	0.981	0.643
⑧ 海岸平野 三角州	パラメータ		2.085	
	t値		5.884	
	弾性値		0.863	
全体的中率%		68.0	75.0	75.9
液状化的中率%		83.8	93.3	95.3
非液状化的中率%		65.3	72.9	75.6

つぎに、表・6に示した地域別の分析で得られたモデルの再現時の的中率と表・4に示したモデルAの再現時の地域別の的中率を比較すると、桑名と名古屋北部はほぼ同等な値を示した。これに対して、津島ではモデルAの再現時の場合の方が良好な結果を示している。これらのことより、桑名、津島、名古屋北部の3地域においては個々の地域に対する分析で得られたモデルa~cでも、全地域を対象にした分析で得られたモデルAでも、液状化発生・非発生に対する再現的中率は、モデルの違いによる大きな差はみられない。

## 6.まとめ

面的に情報が欠けていない土地条件図の地形分類と東南海地震時の濃尾平野における液状化履歴地域を対比させ、ロジットモデルを用いて液状化発生・非発生の要因分析を行った。その結果、液状化履歴と本研究で用いた地形的な要因の間には、地域によって液状化発生に関係する要因とその寄与率が幾分異なるという結果が得られた。一方、液状化発生の有無に対する判別の中率は研究対象地域全体に対するモデルと地域別のモデルの間で大きな差は見られなかった。今後、地形分類の再整理やメッシュの大きさなどの検討を行い、液状化の一次判定に利用可能なモデルの構築を行う。

### [参考文献]

- 1)例えば、日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、1996。
- 2)森杉壽芳：非集計行動モデルの推定と検定、土木計画学講習会テキスト15、1984。
- 3)建設省国土地理院：土地条件図、1:25000、「桑名」、「津島」、「名古屋北部」、「名古屋南部」
- 4)若松加寿江：日本の地盤液状化履歴図、東海大学出版会、1991。
- 5)建設省国土地理院：土地条件図、1:25000、「東京西北部」、「東京西南部」、「東京東北部」、「東京東南部」、「中条」、「三条」、「新潟」、「新津」