

想定地震による名古屋市沖積地盤の液状化予測

山田 公夫*

東南海地震(1944, $M=8.0$)による名古屋市の液状化発生・非発生地域に対して、数量化理論Ⅱ類を適用して要因分析を行った結果、約80%の液状化判別率を持つ広域を対象とした液状化発生モデルが得られた。このモデルでは震度、地下水位の深さ、 N 値、飽和砂層厚、粘土・シルト層厚、地形の6要因が用いられている。このモデルを用いて、想定東海地震による名古屋市の液状化予測を試み、液状化の可能性の高い危険地区を示した。

Keywords : liquefaction potential, quantification theory, wide area

1. まえがき

地震時における砂地盤の液状化は、地下からの噴砂・噴水現象として、かなり古くから地震被害報告等に記録が残されているが、新潟地震(1964, $M=7.5$)が発生するまではほとんど注目されていなかった。この理由は新潟地震以前の地震、たとえば関東地震(1923, $M=7.9$)時に東京で、東南海地震(1944, $M=8.0$)時に名古屋で液状化が発生したが、当時は構造物が軽量であったことや今日の都市のように過密化、巨大化および臨海部の開発が進んでいなかったため、液状化による被害は都市機能に甚大な影響を与えるほど大きくなかった。したがって、液状化被害の重要性が十分に認識されなかったものと考えられる。新潟地震が契機となって液状化に関する研究が活発に行われ、液状化のメカニズムや性質が解明され、多くの成果が挙げられてきた。これらの研究成果により、現在ではいくつかの液状化予測法が提案されている¹⁾。

ある地盤が地震時に液状化するか否かの詳細な判定は、地盤の地震応答解析によってその地盤内に発生する応力を推定し、原位置で採取した不攪乱試料に対してその応力状態を与える動的試験を実施すれば可能である。この方法は対象とする地盤や地震が確定すればどのような場合にも適用し得る一般性はあるが、大都市の沖積地盤地帯のような広域全体を対象とする液状化予測では扱うデータが多いことから、このような詳細な判定法では膨大な時間や経費を必要とし、広域全体の液状化危険度を示すことは容易でない。

これに対して、液状化の簡易予測法として、ボーリング時に実施する標準貫入試験の N 値や粒度試験結果等を用いるいくつかの方法が提案されている。限界 N 値に

よる液状化発生の判別は、標準貫入試験が土質調査に広く利用されていることや N 値という1つの指標で判定できるという点において広域予測に適している。しかしながら、同一 N 値の地盤において液状化抵抗は細粒分含有率や地震動の強さによって異なることを考えると、 N 値のみで広域の液状化判定を行うことは不十分であると考えられる。また、粒度分布によって液状化のしやすさを判定することができるが、収集できる土質調査資料には粒径分布が示されていない場合が多いため、広域予測に利用できる機会は少ない。さらに、繰返しせん断抵抗率 F_r を用いる簡易法は液状化の可能性を連続量として定量的に表現できる長所を持つが、土質調査が必ずしも液状化判定を目的としていないため、判定に必要な土の粒径や密度などの土質情報を欠く資料が多く、広域全体の液状化判定を効率良くできるとは限らない。

一方、過去の地震による多くの液状化発生地域に対する地形・地質調査結果等より、沖積低地で地下水位が高く緩い砂層が堆積した地域、微地形的には現・旧河道や埋立地において、液状化が発生しやすいという定性的な性質が見いだされている^{2)~5)}。地形・地質情報を用いた液状化発生に対する広域予測は、地形分類図、表層地盤種別図、土地条件図等が凡例にしたがって分類されているため、地図上において情報の欠損がない。そのため、過去の地震による液状化発生・非発生地域と地質・地形情報の対比によって液状化の発生しやすい場所を示すことができるが、これらの情報のみでは定性的な判定しかできないため広域予測への利用にあたっては、あくまで概略判定の域を出ないものと考えられる。これらの情報に N 値や土質柱状図に示された土質名、地下水位等の工学的な地盤情報が付加されると、広域予測に対してより効果的な判定が可能になる。

以上のように液状化の発生は、既往の簡易判定法に用いられる N 値や粒径等の定量的要因のみならず、地形・

* 正会員 工博 中部大学助教授 工学部土木工学科
(〒487 春日井市松本町1200)

地盤条件などの定性的要因も関与している。したがって、将来の地震に対するより効率的な液状化予測のためには、液状化に影響する定量的ならびに定性的要因を広範囲に取り入れて、総合的に考えることが必要とされるが、このような立場からアプローチした予測法として確立されたものはない。

本研究は、液状化発生に影響する各種の定量的ならびに定性的要因を抽出し、多次元的な見地から要因分析を行い、広域を対象とした合理的でかつ取り扱い易い液状化発生モデルを得ることを目的としている。さらに得られたモデルを用いて、将来発生が予想される東南海地震(M=8.0)に対する名古屋市沖積地盤の液状化予測を試み、液状化発生に対する危険地区を示す。これによって、より詳細な液状化調査の重点をどの地区に置くべきかを明確にすることができ、耐震設計や地震防災対策の立案に有用なものとなる。

2. 東南海地震による名古屋市沖積地盤の液状化ならびに非液状化の推定地点と分析に用いた要因

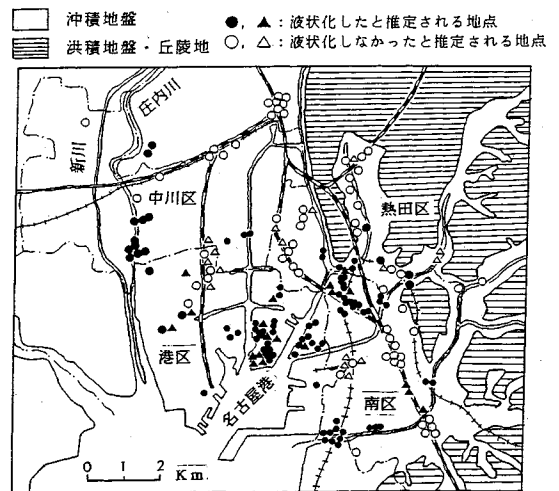
(1) 液状化ならびに非液状化の推定地点

名古屋市域では、過去に濃尾地震(1891, M=7.9)、東南海地震(1944, M=8.0)、三河地震(1945, M=7.1)などによって各所で液状化が発生した。本研究は、これらの地震のうち名古屋市において液状化被害の最も大きかった東南海地震を対象とした。

東南海地震は戦時中に発生したため、当時の社会情勢から詳しい被害資料の発表がされないまま、終戦とともにその多くが失われた。さらに、この地震は液状化現象が工学的に認識される以前の地震であり、液状化発生地域の分布の全貌は明白になっていない。これまでに東南海地震による名古屋市の液状化発生地域に関する資料がいくつか公表されている⁶⁾⁻⁸⁾。

井関⁷⁾は東南海地震によって住家が全壊または半壊したため、市民税の免除を申請した市民名簿に記載された全壊、半壊家屋の住所に基づき、被害家屋の分布を明らかにし被害住家分布図を作成し、これと土地条件との関係について検討を行った。その結果、住家被害が多く発生した地区は深さ10m程度までN値が概ね3以下で、沖積層厚が厚く、地下水位が高くかつ土地条件は新瀨地震(1964)の際の信濃川沿いの埋立地および旧河道に発生した液状化の分布地域と共通していることから、この被害は液状化によるものと推察している。また、飯田⁹⁾はこの地震による名古屋市の連区(≒学区)単位の家屋被害率を調べ、河川周辺や臨海部の埋立地など地形的に液状化が生じやすい地区で被害率が大きかったと述べている。

上述の井関らが調べた南区、港区の住家被害地区は、



図一1 東南海地震における名古屋市沖積地盤の液状化発生・非発生と推定される地点の分布

横尾⁶⁾および谷口⁸⁾が示した東南海地震による液状化履歴地域に含まれている。さらに、市民税が免除になった地域は、市原¹⁰⁾が土質力学的に判定して液状化の危険性が大であると指摘した地点が含まれている。

以上のことより、本研究では井関らの示した住家被害分布図に基づいて液状化が発生したと推定される地域に対して、沖積層基底面深さまで地盤調査が行われている地点を地盤資料^{11),12)}を用いて抽出した。その地点数は113箇所となった。

液状化発生・非発生の判別分析のためには、確実に液状化が発生しなかった地域の情報が不可欠である。しかしながら、地震後の各種調査は被害調査が主となり、無被害調査はほとんど行われていない。東南海地震においても同様である。そのため、本研究では住家被害が発生しなかった地域は被害を与えるような液状化が生じなかったものと考え、この地域を分析のために便宜上、非液状化地域とみなした。そして、井関らが示した住家被害分布図の範囲内で住家被害のみられなかった地区に対して、沖積層基底面深さまで地盤調査が行われている地点を地盤資料^{11),12)}を用いて抽出した。その地点数は77箇所となった。

抽出した各地点を図一1に示す。図中、●と▲印は液状化が発生したと推定される地点、○と△印は液状化が発生しなかったと推定される地点である。

東南海地震後、すでに40数年が経過しており、図一1に示した本研究の対象地域は地震当時と比較できないほど市街化が進んでいるが、戦後から埋立てが行われた臨海部を除いて、この地域は地形的改变をあまり受けていない。また、ここで利用した地盤資料は昭和30年代後半から40年代半ばにかけて行われた地盤調査結果を収録したものであるが、地震当時の地盤条件と大きな差は

ないと判断し、この資料を使用し以後の解析を行った。

(2) 分析に用いた要因

過去の震害事例の分析によって震害予測モデルを得ようとする場合、用いる要因は分析対象地域と予測対象地域において共通に取り上げることのできるものでなければならない。すなわち、分析対象地域で用いられた要因が予測対象地域で調査できない要因であると、分析で得られたモデルを予測モデルとして適用できないことになる。本研究では分析・予測対象地域はいずれも名古屋市を考えているが、他地域への適用も考慮して、一般的に調査可能な要因を選ぶこととした。

液状化発生に影響する要因として指摘されているものは1. で述べたように N 値、地下水位の位置、微地形等である。本研究では、これらの要因を含めて液状化発生に関係する要因として以下のものを考えた。まず、飽和砂層厚。これはその厚さが大きいほど液状化しやすいと考えた。つぎに、粘土・シルト層厚。これは液状化発生を抑制する方向に働くものと考えた。さらに、沖積層厚とその深さ方向の土質の堆積パターン。これは軟弱層厚のみならず、その層が砂層のみ、粘土層のみあるいはシルト層のみで構成される場合やこれらが互層になって堆積している場合では、それぞれ液状化発生の度合が異なると考えた。

ここでは、沖積層基底面までを対象深度とし、図—1の各地点に対して上述の要因を地盤資料等^{11)~13)}を利用して調べた。そして、各要因ごとに液状化発生地点数と非発生地点数の頻度を整理した。その結果、過去の事例で指摘されているように、液状化発生地点数は N 値が小さい場所、地下水位が高い場所、飽和砂層厚が大きい場所および河川周辺や埋立地において卓越していた。

以上のことより、本研究では液状化に影響する要因として、① 沖積層厚、② 地下水位の深さ、③ 地盤の平均 N 値、④ 飽和砂層厚、⑤ シルト・粘土層厚、⑥ 連続最大飽和砂層厚、⑦ 連続最大シルト・粘土層厚、⑧ 土質の堆積パターン、⑨ 地形の9要因を選んだ。これらのうち、③地盤の平均 N 値は液状化を対象とした場合、砂層部分について考慮することが一般的である。しかしながら、研究対象地域の地盤においては後述する土質の堆積パターンを整理した際、砂層と粘土、シルト層が互層になる場合がかなり多くみられ、粘土層、シルト層に挟まれる砂層厚も様々であった。したがって、不連続な砂層の平均 N 値を用いて地盤の強度を評価することはせず、土質を考慮しないで沖積層基底面深さまでの N 値の平均値を地盤強度の指標として用いることとした。

⑧土質の堆積パターンは、地表から沖積層基底面深さまで、1) 砂層が連続する場合、2) 粘土・シルト層が連続する場合、3) 地表からの第1層が砂層でその下位が

粘土・シルト層の場合、4) 地表からの第1層が粘土・シルト層でその下位が砂層の場合、5), 3) あるいは4) のパターンが互層となっている場合の5つに大別した。なお、砂層に対する細かい、粗い、均一等の物性については、利用した資料に明記されていない場合が多く、ここでは考慮していない。

⑨地形は液状化発生の可能性が高い、1) 河川周辺、2) 埋立地と、3) その他、の3つに大別した。河川周辺は土地条件図をもとに各河川の中心から兩岸までの幅を測り、これをそれぞれ兩岸から堤内地まで広げた範囲までを河川周辺とした。また、旧河道も河川周辺に含めた。

以上の要因のほかに、砂層の出現深度も液状化に関与すると考えられるが、研究対象地域においてこの深度は大半が2.0 m 以浅であったため、液状化と非液状化の判別には大きく寄与しないものと考え、要因としては考慮しなかった。

さらに、震害の分析において地震の強さは無視できない要因の1つである。地震を特定した場合、各地点の地震の強さは震央距離、地盤条件等によって異なるため、液状化発生の有無の分析においては、対象地点ごとの地震の強さを見積る必要がある。しかしながら、対象となる地点すべてに対する応答解析は、工学的地震基盤 (N 値 ≥ 50 の層) に相当する深さまで地盤調査が行われている例が少ないため困難である。それゆえ、本研究では名古屋市域の液状化発生、非発生地域を1 km 四方のメッシュに分割し、各メッシュにおける代表的地盤に対して、東南海地震を想定し重複反射理論による地盤応答解析をプログラム SHAKE¹⁴⁾を用いて行った。応答解析のための地盤のモデル化ならびに応答解析の詳細については、すでに報告した¹⁵⁾。基盤に入力した地震波は東南海地震 ($M=8.0$) と同規模の1968年の十勝沖地震 ($M=7.9$) の際に八戸港で観測された地震波を基盤に戻した波を用いた。

応答解析の結果、地盤の卓越振動数が高い、すなわち地盤が良好な場所ほど地表最大加速度は大きくなる傾向がみられた。また、沖積層厚が厚いほど卓越振動数と地表最大加速度はともに小さくなる傾向がみられた。このような傾向は、筆者がすでに報告した関東地震による東京や想定東海地震による名古屋の地盤応答解析においてもみられた^{16), 17)}。また、悪い地盤の加速度が良い地盤の加速度より大であると言えないことは以前から指摘されている¹⁸⁾。

以上の結果は、近年かなり大きな地表最大加速度が記録されたにもかかわらず、構造物の被害が小または無被害であったという事例がみられた^{19), 20)} ことと考え合わせると、地表最大加速度の大きさのみで地震動の強さを評価することは適切でないことを示唆している。ここでは、地震動の強さの評価には加速度の他に周期特性を考慮す

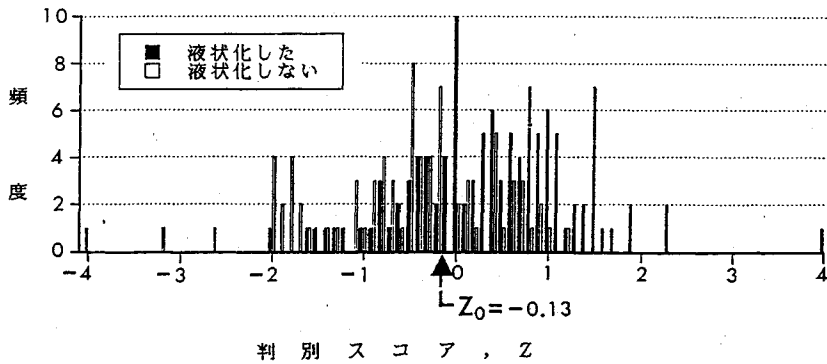


図-2 判別スコアの頻度分布と判別区分点（一次判別関数）

べきと考えた。

筆者は、関東地震後に今村²¹⁾が家屋被害状況等に基づいて示した東京市内の震度と関東地震に対する東京の地盤応答解析結果より、地震の強さの指標である震度を地盤の周期特性を考慮して推定する式をすでに提案した^{16), 22)}。

沖積層に対するこの提案式を以下に示す。

$$k_e = 0.0115 \left(\frac{\alpha_{\max}}{f} \right)^{0.488} \dots\dots\dots (1)$$

$$k_e = 0.0579 \left(\frac{\alpha_{\max}}{f^2} \right)^{0.200} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 α_{\max} は地表最大加速度、 f は地盤の卓越振動数である。これらの式には周期特性が考慮されている。 (α_{\max}/f) は速度の単位、 (α_{\max}/f^2) は変位の単位を持つが、ともに地震動の速度と変位を直接表す量ではないので、それぞれを擬似速度、擬似変位と呼んでいる。

東南海地震に対する名古屋市域の地盤応答解析によって得られた地盤の卓越振動数と地表最大加速度を用いて、式(1)、(2)より、液状化発生、非発生地域の震度をメッシュ単位で推定し、これらの式による k_e の大きい方を⑩震度として上述の要因に付け加えた。

図-1の各地点に対して、目的変数を液状化が発生した、または発生しなかったという2つのカテゴリーに分け、上記の①~⑩の要因を説明変数として一次判別関数ならびに数量化理論Ⅱ類を用いて要因分析を行った²³⁾。

3. 一次判別関数による液状化発生モデル

一次判別関数²⁴⁾は分析対象、すなわち目的変数が定性的変数で表され、一方、説明変数は定量的な変数で与えられている場合に適用される手法である。したがって、前述した①~⑩の要因のうち定性的要因である⑧土質の堆積パターンと⑨地形を除いた8つの定量的要因を、要因間の関連の強さを考慮して種々に組合せ、変数選択を施し分析を行った。

その結果、地盤の平均 N 値 x_3 、飽和砂層厚 x_4 および

表-1 一次判別関数による判別結果

		判別した群		計
		■	□	
もと の群	■	84	29	113
	□	23	54	77

的中率 = 72.6%

(■ : 液状化発生, □ : 液状化非発生)

震度 x_{10} の3要因を用いた場合の判別関数が³⁾、液状化発生の有無の判別の中率が最も高くなった。この判別関数を次式に示す。

$$Z = -0.077x_3 + 0.12x_4 + 33.0x_{10} - 5.5 \dots\dots\dots (3)$$

上式による判別スコア Z のヒストグラムを図-2(■は液状化地点、□は非液状化地点)に示す。図中の Z_0 は液状化発生・非発生の判別区分点であり、式(3)では $Z_0 = -0.13$ となった。式(3)を液状化発生モデルとして液状化の判定を行う場合、対象地点において地盤の平均 N 値 x_3 、飽和砂層厚 x_4 および震度 x_{10} の3要因を調べ、これらの値を式(3)に代入する。そして、得られた Z が Z_0 よりも大ならば液状化発生、小ならば液状化は発生しないと判定される。

分析対象とした名古屋市の190地点に対して、式(3)のモデルを用いた判別結果のクロス表を表-1に示す。表-1のものと群とは東南海地震による実例であり、判別した群とは式(3)による判別結果である。そして、■は液状化発生、□は非液状化を示し、数値はそれぞれの地点数である。すなわち、東南海地震で液状化が発生したと推定される113地点のうち84地点は液状化発生と判別されるが、29地点は非液状化と判別された。また、液状化が発生しなかったと推定される77地点のうち54地点で非液状化と判別され、23地点で液状化と判別された。したがって、190地点中、138地点で実例と判別結果が合致しており、このモデルによる液状化判別の的中率はおよそ70%となり、30%程度の誤判別が生じた。

つぎに、液状化に対する説明変数の影響力を評価するために、式(3)を正規化すると次式のようになる。

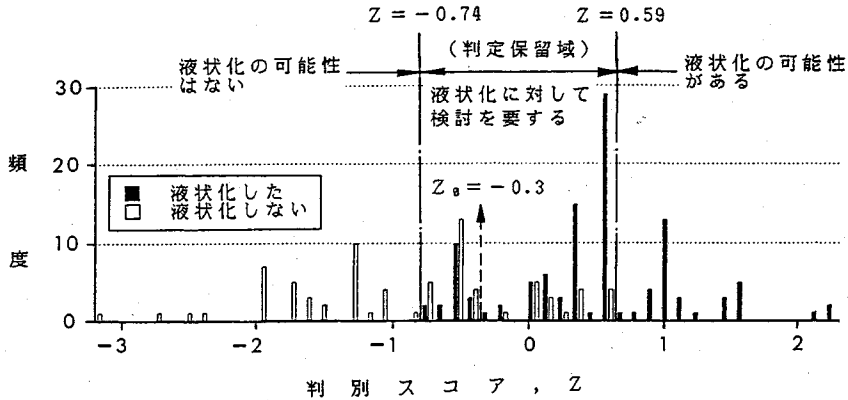


図-3 判別スコアの頻度分布と判別区分点(数量化理論Ⅱ類)

表-2 数量化理論Ⅱ類による分析結果

要因	カテゴリー	データ数	カテゴリースコア	レンジ
震度 k _e	0.0 < k _e ≤ 0.125	9	-0.7469	1.1637 (5)
	0.125 < k _e ≤ 0.175	112	-0.1968	
地下水位の深さ Z (m)	Z = 0.0	42	0.4909	1.2659 (3)
	0.0 < Z ≤ 3.0	128	-0.0400	
平均N値	0.0 < N ≤ 5.0	99	-0.4347	0.9077 (6)
	5.0 < N	91	-0.4730	
飽和砂層厚 D (m)	D = 0.0	22	-1.0950	2.2606 (1)
	0.0 < D ≤ 10.0	160	0.0923	
シルト・粘土層厚 B (m)	B = 0.0	8	0.8576	1.2176 (4)
	0.0 < B ≤ 5.0	123	0.1167	
地形	河川周辺	27	0.6027	1.9966 (2)
	埋立地その他	146	0.0509	

[相 関 比 $\eta^2 = 0.46$]

$$Z = -0.34x_3 + 0.37x_4 + 0.73x_{10} \dots \dots \dots (4)$$

式(4)の右辺の各係数の大きさより、このモデルの要因では震度 x_{10} が液状化発生に最も影響し、ついで飽和砂層厚 x_4 、平均N値 x_3 の順に影響している。

4. 数量化理論Ⅱ類による液状化発生モデル

数量化理論Ⅱ類⁽⁵⁾は、一次判別関数と同様に目的変数は定性的要因で表されるが、説明変数は定量的、定性的変数にかかわらず分析に用いることができる。一次判別関数で用いた8要因に、⑧土質の堆積パターンと⑨地形の定性的要因を加え、説明変数間の関連の強さを考慮して要因選択を行い、種々の組合せで分析を行った。なお、定量的要因に対するカテゴリー区分は幾通りも考えられる。そのため、これらの要因についてはカテゴリー間に液状化発生頻度の差があり、扱いやすい区分になることを配慮し、カテゴリー区分を幾通りも変えて、数多く試行を繰り返して分析を行った。

その結果、表-2に示した6要因を用いたモデルが液状化発生の有無の判別率が最も高くなった。表-2のカテゴリースコアは、各要因のカテゴリースコアからその要因のカテゴリースコアの平均値を差し引いたもので、正の場合はそのカテゴリーが液状化の発生を促す方

向に、負の場合は液状化を抑制する方向に働くことを示している。すなわち、表-2のモデルにおいて各要因のカテゴリースコアからわかるように、震度はその値が大きいほど、地下水位はその深さが浅いほど、N値はその値が小さいほど、飽和砂層厚はその厚さが大きいほど、シルト・粘土層厚はその厚さが小さいほど、地形は河川周辺や埋立地ほど液状化が発生しやすいという結果が得られている。このように各要因のカテゴリースコアは、通常考えられている液状化発生・非発生地盤の性質を工学的に説明できる順序性を持っている。カテゴリーによってはデータの個数が少ないものもあるが、表-2のモデルは概ね妥当なモデルであると言える。

つぎに、各要因のレンジの値はカテゴリースコアの最大値と最小値の差であり、レンジの値が大きい要因ほど液状化発生に及ぼす影響が大きいことを意味する。すなわち、この分析で得られた要因では、液状化発生には飽和砂層厚が最も大きく影響している。ついで、地形、地下水位の深さ、シルト・粘土層厚、震度、平均N値の順に影響を及ぼしている。

表-2のモデルによる判別スコアのヒストグラムと液状化発生・非発生の判別区分点 $Z_0 (= -0.3)$ を図-3(■は液状化地点、□は非液状化地点)に示す。表-2のモデルを用いて液状化の判定を行う場合、対象地点において、震度、地下水位の深さ、平均N値、飽和砂層厚、シルト・粘土層厚および地形の6要因を調べ、各要因に該当するカテゴリーのカテゴリースコアを加えることによって判別スコアZが得られる。そのうち、一次判別関数の場合と同様にこのZが Z_0 よりも大ならば液状化発生、小ならば液状化は発生しないと判定される。

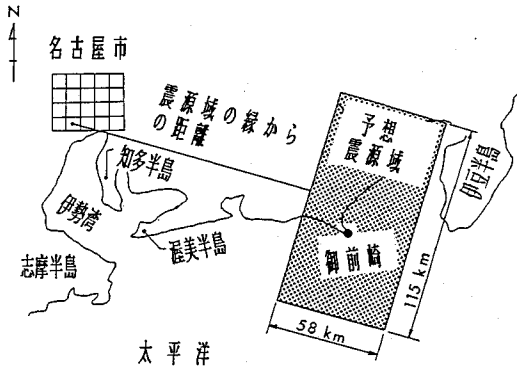
分析対象とした名古屋市の190地点に対して、表-2のモデルを用いた判別結果のクロス表を表-3に示す。東南海地震で液状化が発生したと推定される113地点のうち94地点は液状化発生と判別されるが、19地点は非液状化と判別され誤判別が生じた。この誤判別が生じた

表—3 数量化理論Ⅱ類による判別結果

		判別した群		計
		■	□	
もと の群	■	94	19	113
	□	16	61	77

的中率 = 81.6%

(■: 液状化発生, □: 液状化非発生)



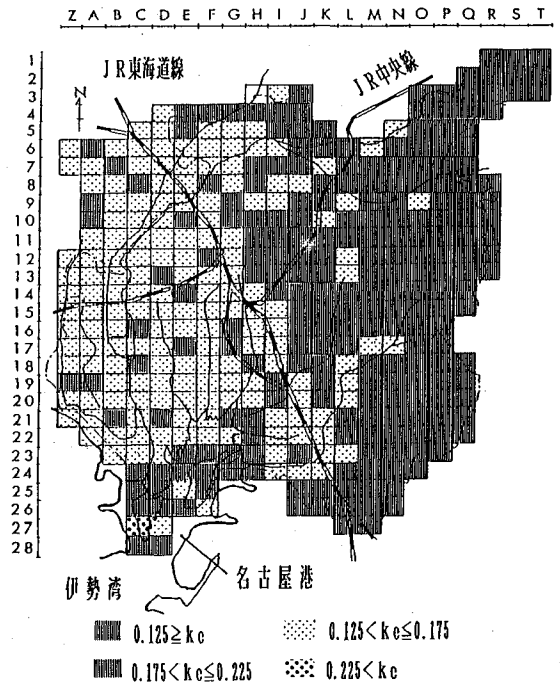
図—4 想定東海地震の予想震源域 (石橋による²⁶⁾)

地点は図—1に▲印で示した。一方、液状化が発生しなかったと推定される77地点のうち61地点で非液状化と判別され、16地点で液状化と判別された。この誤判別が生じた地点は図—1に△印で示した。したがって、190地点中、155地点で実例と判別結果が合致しており、このモデルによる液状化判別の的中率はおよそ80%となり、20%程度の誤判別が発生した。

表—3と表—1あるいは図—3と図—2の比較からわかるように、一次判別関数によるモデルよりも数量化理論Ⅱ類によるモデルの方が液状化発生の有無の判別精度が高いことがわかる。後者のモデルの判別率の的中率は80%程度あり、広域における液状化の危険地区を明確にし、より詳細な液状化調査の重点(二次判定)をどの地区に置くべきかを定めるための一次判定には実用上、十分利用できるものとする。したがって、表—2のモデルを用いて、想定東海地震による名古屋市沖積地盤の液状化予測を試みた。

5. 想定東海地震による名古屋市沖積地盤の液状化予測

予想される東海地震の震源域は、従来、漠然と遠州灘であると言われていたが、1976年に石橋²⁶⁾は、この地震の震源域は駿河湾であるとし、図—4のように予想震源域を示した。この図によると、名古屋市は想定東海地震の予想震源域から北西に90~110kmのところの位置し、この地震が発生した場合、過去の地震被害記録に基づく名古屋市域では気象庁震度階でV以上の震度が予



図—5 東海地震を想定した場合の名古屋市の推定震度分布

想される¹⁷⁾。

つぎに、名古屋市域を1km四方のメッシュに分割し、各メッシュの代表的な地盤に対して、東海地震を想定した地震応答解析を行い、2.で述べたと同様の方法で震度 k_c を求め、名古屋市域の震度のマイクロゾーニングを図—5のように示した。本研究のモデルによる液状化予測に必要な震度は、図—5に示した各メッシュ単位で評価した。

(1) 広域を対象とした液状化発生モデルの適用

前述したように、表—2に示した各要因のカテゴリースコアの和 Z が、判別区分点 Z_0 よりも大ならば液状化発生、小ならば液状化非発生と判定される。しかしながら、図—3から明らかなように、液状化(■表示)と非液状化(□表示)の頻度分布が重なり合っているため、 Z_0 で明確に液状化発生の有無を判別することはできない。したがって、頻度分布が重なり合った範囲は判定保留域として残し、液状化に対して検討を要することとした。液状化予測に際し、本研究では判別スコア Z の値によって、以下のように3つの判定ランクを設定した。

- ① $0.59 < Z$ 液状化の可能性はある
- ② $-0.74 < Z \leq 0.59$ 液状化に対して検討を要する
- ③ $Z \leq -0.74$ 液状化の可能性はない

これらの区分は、図—3にも示した。

(2) 名古屋市沖積地盤の液状化判定

想定東海地震による名古屋市沖積地盤の液状化判定の

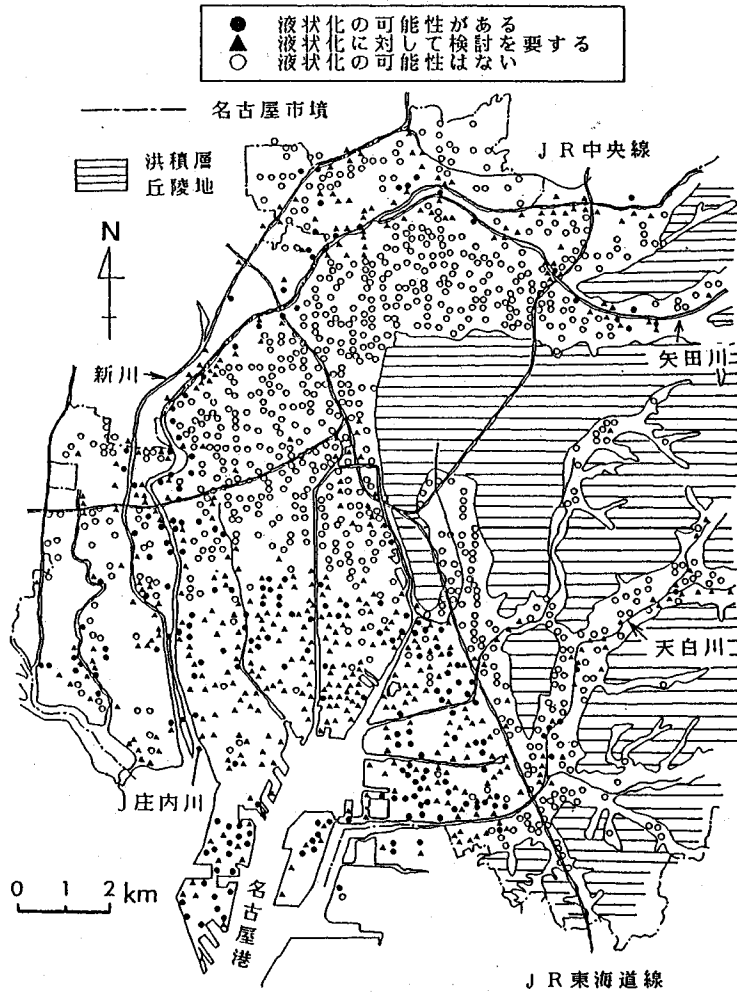


図-6 想定地震による名古屋市沖積地盤の液状化判定結果

ために、図-5の震度と名古屋市域の地盤資料等^{13), 27)}を用いて約2000箇所に対して表-2に示した6つの要因を調べた。つぎに、各地点ごとに6要因それぞれに対応するカテゴリーを決め、それらのカテゴリースコアの和Zを求めた。そのうち、上述した3つの判定ランクに従って液状化発生の判定を試みた²⁸⁾。

その結果を図-6に示した。図中、●印は液状化の可能性のある地点、▲印は液状化に対して検討を要する地点、○印は液状化の可能性のない地点を表している。この図からわかるように、液状化の可能性のある地点は、名古屋港臨海部の埋立地や河口付近に広範囲に分布している。さらに、市の北部から西部を流れる庄内川、矢田川、新川沿いや東部から南部に流れる天白川沿いにおいても液状化の可能性のある地点が多く点在していることがわかる。また、液状化に対して検討を要すると判定された地点のほとんどは、これら臨海部、河口付近ならびに河川周辺地域に含まれている。これに対して、河川周

辺を除く市の北部や西部の沖積地盤では、液状化の可能性がないと判定された地点が多い。

おおよそ2000箇所の調査地点のうち、液状化の可能性があると判定された地点は、およそ240箇所で全体の約12%であり、液状化の可能性はないと判定された地点はおおよそ1240箇所で全体の約62%である。また、液状化に対して検討を要すると判定された地点は、おおよそ520箇所で全体の約26%となっている。上述の液状化の可能性があると判定された箇所の多くは、過去の地震における液状化発生地域に含まれている²⁷⁾。

6. まとめ

地震時における地盤の液状化発生に関する要因分析の結果、広域を対象とした液状化発生モデルの1つを提案した。そして、このモデルを用いて東海地震を想定した場合の名古屋市沖積地盤の液状化予測を試み、液状化の可能性のある危険地区を示した。本研究で提案した液状

化発生モデルは、より詳細な液状化調査（二次判定）の重点をどの地区に置くべきかを定めるための一次判定に利用でき、耐震設計や地震防災対策の立案に役立つものとする。以下に、本研究で得られた結果を要約して述べる。

(1) 定量的要因のみを用いた一次判別関数によるモデルよりも、定性的要因をも考慮した数量化理論Ⅱ類によるモデルの方が高い判別率の中率が得られ、カテゴリースコアも液状化発生・非発生地盤の性質を矛盾なく説明できる結果が得られた。このモデルによる液状化発生の判別率の中率は82%であり、上述した一次判定には実用上、十分利用できるものとする。

(2) 数量化理論Ⅱ類による分析に用いた要因を、液状化発生に及ぼす影響度の大きいものから列挙すると、① 飽和砂層厚、② 地形、③ 地下水位の深さ、④ シルト・粘土層厚、⑤ 震度、⑥ 平均N値の順になる。

(3) 液状化発生モデルを用いて、液状化の判定基準を、① 液状化の可能性があり、② 液状化に対して検討を要する、③ 液状化の可能性はないの3ランクに分け、想定東海地震による名古屋市沖積地盤の液状化予測を試みた。判定対象とした約2000箇所のうち、およそ240箇所で液状化の可能性があると判定された。また、検討を要すると判定された地点はおよそ520箇所である。

(4) 液状化の可能性のある箇所は、名古屋港臨海部の埋立地や河口付近に広範囲に分布している。さらに、市の北部～西部および東部～南部を流れる河川沿いにおいても液状化の可能性のある箇所が点在している。また、液状化に対して検討を要すると判定された箇所のほとんどは、これら臨海部、河口付近ならびに河川周辺地域に含まれている。

この研究の計算は中部大学情報処理センターのFACOM M-360APと名古屋大学大型計算機センターのFACOM M-780/20によった。また、本研究は中部大学特別研究費ならびに(財)石田財団の研究助成による援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) たとえば、土質工学会：地盤の液状化，1984。
- 2) 栗林栄一・龍岡文夫・吉田精一：明治以降の本邦の地盤液状化履歴，土木研究所掌報，No.30，1974。
- 3) 古藤田喜久男・若松加津江：関東大地震の液状化地図，基礎工，Vol.6，No.11，pp.77～90，1978。
- 4) 久保慶三郎・杉山孝志・安田進：関東地震時の川崎市における液状化地点，第14回土質工学研究発表会講演集，pp.1289～1292，1979。
- 5) 岩崎敏男・常田賢一・安田進・佐藤弘行：液状化履歴地点における地形・地質の特徴，第17回土質工学研究発表会講演集，その2，pp.1921～1924，1982。
- 6) 横尾義貴・桑原徹・堀内孝英：名古屋付近の地盤と震害

- に関する研究，その3。東南海地震の被害状況について，日本建築学会東海支部研究報告，第4号，1965。
- 7) 井関弘太郎・日比澄夫：昭和19年12月7日東南海地震による被害住家の分布と地盤条件，名古屋市防災会議（地震対策専門委員会），1978。
- 8) 谷口仁士・飯田汲事：地震時住家被害予測法定式化への試み—主として、地盤液状化に起因する被害を中心に—，日本建築学会構造系論文報告集，第365号，pp.108～117，1986。
- 9) 飯田汲事：昭和19年12月7日東南海地震の震害と震度分布，愛知県防災会議，1977。
- 10) 市原松平・植下協・松澤宏：地震時における液状化現象に関する調査，名古屋市防災会議（地震対策専門委員会），1974。
- 11) 日本建築学会東海支部・土質工学会中部支部・名古屋地盤調査研究会：名古屋地盤図，コロナ社，1969。
- 12) 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。
- 13) 建設省国土地理院：2万5千分の1土地条件図，名古屋南部・同北部。
- 14) Schnabel, P.B., Lysmer J. and Seed H.B., : SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Site, EERC Report No.72-12, Univ. of California, Barkly, 1972.
- 15) Ichihara, M. and Yamada K., : Earthquake damage prediction for water-supply pipes, The journal of natural disaster science, Vol.1, No.2, pp.57～80, 1979.
- 16) 市原松平・山田公夫：想定地震による名古屋市水道管の相対的危険度，土木学会論文報告集，No.316，pp.51～63，1981。
- 17) 山田公夫：水道管ならびに木造家屋の震害予測に関する研究，名古屋大学学位請求論文，1986。
- 18) 金井清：地震工学，共立出版，1969。
- 19) 長橋純男・小林啓美：構造物の破壊作用を対象とした地震動の強さの評価，日本建築学会論文報告集，No.160，pp.25-34，1969。
- 20) 岡本舜三：耐震工学，オーム社，1974。
- 21) 今村明恒：関東地震調査報告，震災予防調査会報告第100号甲，1926。
- 22) 山田公夫：数量化理論による木造家屋震害予測モデルの東南海地震への適用，土と基礎，Vol.34，No.6，pp.59～65，1986。
- 23) 山田公夫：広域を対象とした液状化発生モデル，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，pp. I -790～791，1987。
- 24) たとえば，安田三郎・海野道郎：社会統計学，丸善，1977。
- 25) たとえば，林知己夫・村山孝喜：市場調査の計画と実際，日刊工業新聞社，1977。
- 26) 石橋克彦：東海地方に予想される大地震の再検討，地震予知連絡会会報，Vol.17，No.4，pp.126～132，1976。
- 27) 土質工学会中部支部編著：最新名古屋地盤図，1988。
- 28) 山田公夫：想定地震による名古屋市沖積地盤の液状化予測，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集，pp. I -806～807，1988。

(1990.11.14 受付)

LIQUEFACTION POTENTIAL FOR THE ALLUVIAL GROUND IN NAGOYA DURING THE PREDICTED EARTHQUAKE

Kimio YAMADA

In order to obtain a model predicting liquefaction potential in a wide area, the analyses based on Quantification Theory II were applied for the liquefied and unliquefied areas in Nagoya during the Tonankai earthquake (1944, $M=8.0$) by using the several items which were related to liquefaction. As a result, the author obtained a model which made a discrimination between the actual liquefied and unliquefied sites at the rate of 80%. The items used for this model, arranged in order of degree of influence on liquefaction, are thickness of saturated sand layer, topography, depth of groundwater level, thickness of clay and silt layers, seismic coefficient, and STP N value. The author tried to evaluate the liquefaction potential for the alluvial ground in Nagoya during the predicted Tokai earthquake by using this model and showed the dangerous regions which had high liquefaction potential.
