

想定地震による名古屋市の水道管の被害危険度

中部大学 正会員 山田公夫
中部大学 正会員 杉井俊夫
可児市役所 正会員 日置晴彦

1. まえがき

筆者らの一人は、これまでに関東地震（1923、 $M=7.9$ ）による旧東京市の水道管の管体被害を数量化理論Ⅰ類を用いて分析し、水道管の定量的な震害予測モデルを提案し、東海地震（ $M=8$ ）を想定した場合の名古屋市域の水道管の被害予測を行った¹⁾。名古屋市では、この予測結果に基づいて水道管の耐震強化区域と耐震強化路線が設定され、管体の被害が大きいと予想される水道管の布設替えや新規に耐震性のある管路の布設等の改良工事が行われ、この十数年間に耐震性を目指した整備が実施されてきた。

上述した震害予測モデルは、液状化の可能性を持つ河川周辺や埋立地が地形の要因の中に含まれているが、液状化履歴に関する要因は直接的に考慮されていない。そのため、本研究は関東地震時の東京の液状化履歴を水道管の震害分析のための要因の1つとして付加し、同地震による東京の水道管被害を数量化理論Ⅰ類を用いて分析し、液状化を考慮した水道管の震害予測モデルの構築を行った。つぎに、再度東海地震を想定してこのモデルを名古屋市に適用し、現況下における市域の水道管の被害予測を試み、水道管の地区別被害危険度を示した。今回の被害予測は、前回予測対象外であった硬質塩化ビニル管の被害も含めた。なお、被害分析と被害予測のために、東京と名古屋をそれぞれ1 km四方のメッシュに分割した。

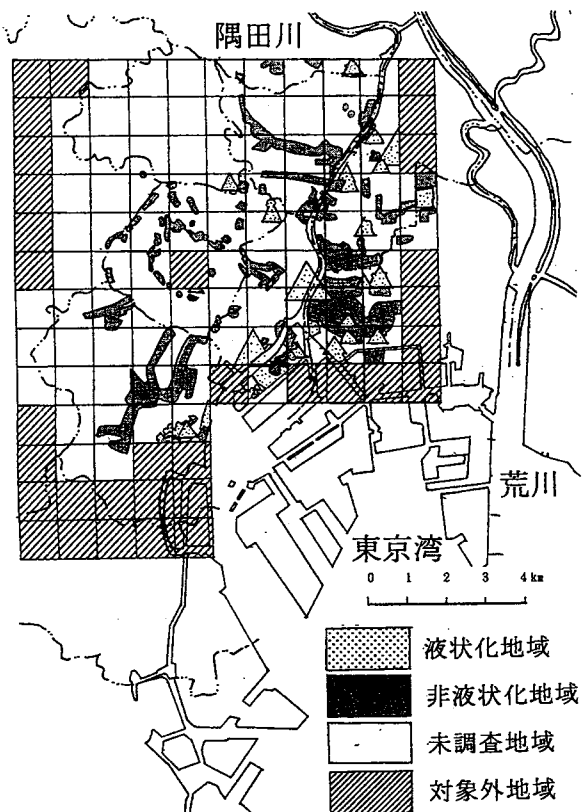
2. 液状化履歴を考慮した水道管の震害予測モデルの構築

2.1 関東地震による東京の液状化履歴

水道管の震害分析は分析対象地域を1 km四方のメッシュに分割し、各メッシュの水道管の被害率（水道管布設延長1 km当たりの管体の破損、折損、継ぎ手の抜きの個数）を目的変数とした。そのため、液状化履歴もメッシュ単位で評価する必要がある。

関東地震による東京の液状化履歴は、東京都土木技術研究所²⁾と若松³⁾によってそれぞれ公表されている。前者の液状化履歴図は液状化程度の区分とそれらの発生地域あるいは地点の確定性の区分の組み合わせで色分され、液状化発生・非発生地域ならびに未調査地域の3つに大別できる。一方、後者の液状化履歴図では液状化発生地域（地点）と液状化の概略範囲が示されているが、非液状化地域については明示されていない。

ここでは、これら2つの液状化履歴図を重ね合わせ、図・1に示すように液状化発生地域、非発生地域および未調査地域に分けた。図中、対象外地域とは水道管の布設状況が不明



図・1 関東地震による東京の液状化履歴

なため分析対象から除外した区域である。図・1は1km四方のメッシュに分割されているが、各メッシュには液状化発生地域、非発生地域および未調査地域が混在し、分析対象地域において未調査の占める割合が圧倒的に大きく、メッシュ全体が液状化または非液状化となるものはない。本研究では、各メッシュにおいて液状化地域の面積が30%以上占める場合を液状化、非液状化地域の面積が30%以上占める場合を非液状化、これ以外を未調査地域として扱った。

2.2 数量化理論による要因分析

水道管の震害分析に用いた要因は①実効震度、②地盤種別、③地盤の平均N値、④沖積層厚、⑤土質、⑥地形、⑦1メッシュ当たりの水道管の布設延長、⑧液状化程度の区分の8要因である。これらの要因間の関連の強さをクラマーのV係数より判断したところ、①と②、①と④、①と⑤、②と⑤、④と⑤の組み合わせにおいて、V係数が0.54~0.65となり、他の要因間の組み合わせよりも相対的に大きな値となった。

そのため、①実効震度、②地盤種別、④沖積層厚、⑤土質のうち、いずれか1つを除く7要因に対する分析も行った。その結果、上記の8要因すべてを用いた場合の方が、7要因を用いたいずれの場合よりも各要因のカテゴリースコアの順序性が水道管の震害を工学的に説明しやすく、かつ重相関係数が最も大(=0.815)となった。

この結果を表・1に示す。表中のカテゴリースコアは、+の場合は被害を大きくする方向に、-の場合は被害を抑制する方向に働くことを示している。一方、各要因のレンジはその要因における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水道管の被害に与える影響が強いことを意味している。

すなわち、水道管の震害には実効震度が大きく影響し、ついで地形、布設延長、地盤種別、液状化程度の区分の順で効いており、地盤のN値はあまり大きな影響を与えていないことがわかる。

被害に与える影響の大きい要因についてさらに吟味すると、実効震度は0.225を越えると被害が急激に増加することを示している。つぎに、地形的には河川周辺や埋立地で被害が増加し、地盤種別では沖積層の方が洪積層よりも被害が大きくなる。さらに、液状化地域において被害が増大するという結果が得られた。

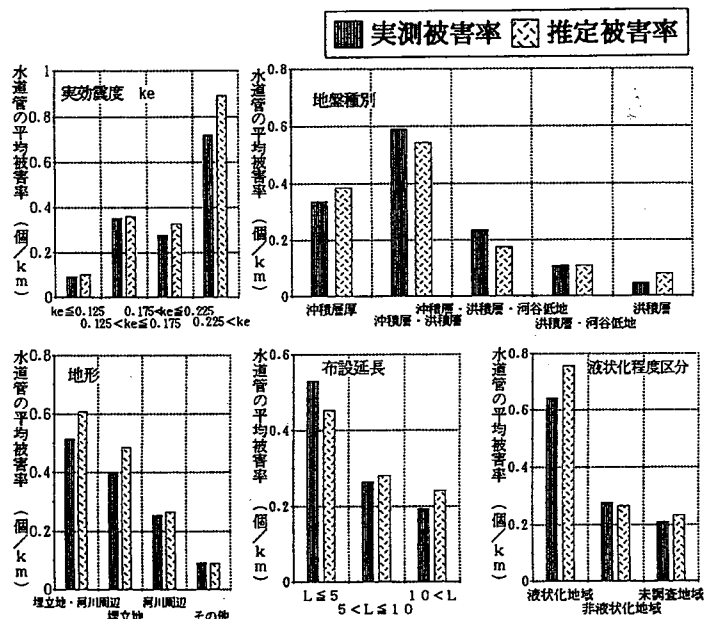
表・1のモデルを用いて、東京の各メッシュの水道管の推定被害率を求め、これを実効震度、地盤種別、

表・1 数量化理論I類による分析結果

アイテム	カテゴリー	カテゴリースコア	スコアダイアグラム	レンジ
実効震度 Ke	Ke ≤ 0.125	-0.0782	[スコアダイアグラム]	0.657 (1)
	0.125 < Ke ≤ 0.175	-0.0014		
	0.175 < Ke ≤ 0.225	-0.0193		
	0.225 < Ke	0.5788		
地盤種別	沖積層	0.1421	[スコアダイアグラム]	0.3076 (4)
	沖積層・洪積層	0.0281		
	沖積層・洪積層・河谷低地	-0.0941		
	洪積層・河谷低地	-0.1303		
深さ5mまでの地盤の平均N値	N ≤ 5	0.0556	[スコアダイアグラム]	0.1354 (8)
	5 < N ≤ 10	-0.0798		
	10 < N	-0.0615		
沖積層厚 H (m)	H ≤ 10	0.0291	[スコアダイアグラム]	0.2122 (7)
	10 < H ≤ 20	0.0649		
	20 < H	-0.1473		
深さ5mまでの土質	粘性土・シルト	0.0941	[スコアダイアグラム]	0.2547 (6)
	砂質土	-0.0806		
	粘性土・砂質土	-0.1606		
地形	埋立地・河川周辺	0.2386	[スコアダイアグラム]	0.4181 (2)
	河川周辺	0.1628		
	埋立地	0.0867		
	その他	-0.1795		
1メッシュ当たりの水道管の布設延長(Km)	L ≤ 5	0.1647	[スコアダイアグラム]	0.3625 (3)
	5 < L ≤ 10	0.0332		
	10 < L	-0.1978		
液状化程度区分	液状化地域	0.1905	[スコアダイアグラム]	0.2726 (5)
	非液状化地域	-0.0821		
	未調査地域	-0.0095		

重相関係数 = 0.8153

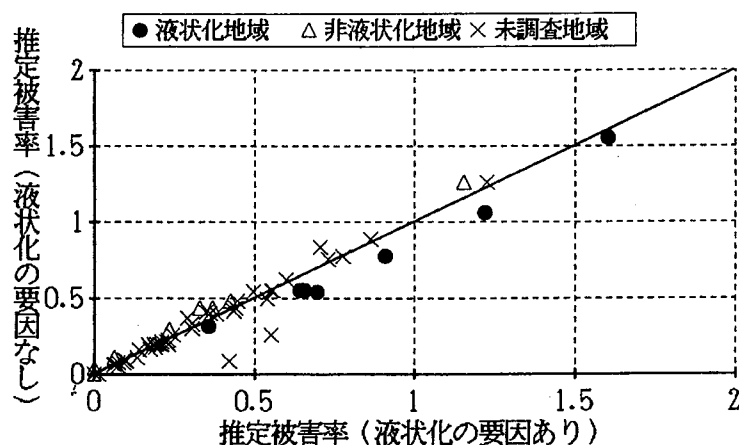
平均スコア = 0.2838



図・2 各要因の実測平均被害率と推定平均被害率の比較

地形などの要因ごとに整理し、実測被害率と対比させたものが図・2である。これらの図より、推定被害率と実測被害率とは近似しており分析結果が良好であることが分かる。

また、図・3は液状化を考慮しない場合のモデル¹⁾と液状化を考慮した今回のモデルにおける東京の各メッシュの水道管の推定被害率の比較を示したものである。この図より液状化の要因を考慮することによって、被害率が液状化地域では増加し、非液状化地域では低下しており、表・1のモデルは工学的に妥当なものであると考える。したがって、表・1の分析モデルを予測モデルとして、後述するように地震時における名古屋市の水道管の被害予測を試みた。



図・3 水道管の推定被害率の比較

3. 既往地震による管種別の水道管被害の軽重

前述した旧東京市に対する水道管の震害分析は、管径 75mm～400mm未満の普通铸铁管に対するものであり、この管種は現在わが国の各都市では使用されていない。そのため、水道管の被害の算定に当たり、表・1のモデルで得られた結果に対して補正をする必要がある。

筆者らは既往地震（宮城県沖地震、日本海中部地震、釧路沖地震）による水道管の管種別の管体被害を整理し、管種別の平均被害率ならびに高級铸铁管の平均被害率を基準とした場合の他の管種の平均被害率の比（＝重み係数）を求めた。これを表・2に示す。普通铸铁管に対する高級铸铁管の重み係数に

表・2 既往地震による管種・管径別の平均被害率と重み係数

（管径75mm以上～400mm未満）

管種	高級铸铁管	ダクタイル铸铁管	石綿セメント管	綿管	鋼管	硬質塩化ビニル管
平均被害率（個/km）	0.082	0.037	0.426	0.018	0.173	0.173
重み係数	1.0	0.45	5.20	0.22	2.11	

ついては適切なデータがないため、両者の引張り強さ、曲げ強さ、継手の違い等から判断して、重み係数は前者を1.0とした場合、後者は0.8と仮定した。ダクタイル铸铁管に対しては継手のタイプ（A型、K型、S型）によって被害の重みを変えた。すなわち、継手の抜け出し限界値の大きさより、A型の重み係数を1.0とした場合、K型のそれは0.65とした。一方、S型はストッパー付きの耐震継手を持ち、いわゆる耐震管と呼ばれている。この管種は、震度階VI以上となった三陸はるか沖地震（1994）や兵庫県南部地震（1995）において、ほとんど被害を受けていない。東海地震時に名古屋市域の震度階はV～VIと予想されることより、耐震管は被害を受けないものとした。

以上のことより、普通铸铁管に対する他の管種の被害の重み係数は、表・2に示した重み係数に0.8を乗じて（ダクタイルのK型はさらに0.65を乗じた）、つぎのように決めた。

- ①高級铸铁管 : 0.8
- ②ダクタイル铸铁管(A) : 0.36
- ③ダクタイル铸铁管(K) : 0.36×0.65
- ④石綿セメント管 : 4.16
- ⑤鋼管 : 0.18
- ⑥硬質塩化ビニル管 : 1.69
- ⑦ダクタイル铸铁管(S:耐震管) : 無被害

つぎに管径の大小による被害の重み係数は、関東地震時の旧東京の被害例に基づき管径75mm以上400mm未満を1.0とした場合、400mm以上は0.7とした¹⁾。一方、管径75mm未満に対しては重み係数を決めるための適切な被害資料が得られなかった。上述のように管径75mm～400mm未満を1.0とした場合、400mm以上は30%減の0.7としたので、75mm未満は30%増の1.3と仮定した。

以上に述べた重み係数を用いて、表・3に示す水道管の被害個数の補正式より、メッシュ単位で管種・管

径別の水道管の推定被害個数を算定した。表中のMは表・1のモデルから求められた推定被害個数、すなわち普通铸铁管として求めた被害個数である。Lは各メッシュの水道管の布設延長、 L_i は各メッシュの管種・管径別の布設延長であり、 $L = \sum L_i$ である。 a_i は管種・管径を考慮した推定被害個数である。

4. 想定東海地震による名古屋市域の液状化予測

2.で述べた液状化を考慮した水道管の震害予測モデルを名古屋市域に適用するためには、想定東海地震時に名古屋市域で液状化発生の可能性のある地域を明らかにする必要がある。これまでに、東南海地震(1944、 $M=8.0$)による名古屋市の液状化発生・非発生地点に対して数量化理論Ⅱ類による要因分析を行い、広域を対象とした液状化発生モデルを提案した⁴⁾。このモデルを表・4に示す。液状化発生・非発生に対するモデルの判別率の中率は82%である。また、このモデルの判別スコアZ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・4に示す。

このモデルを用いて液状化判定を行う場合、判定対象地点において表・4の6要因を調べ、各要因において該当するカテゴリーのカテゴリースコアを順次加えて判別スコアZを求める。そして、このZが上記の 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・4から明らかのように、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。そのため、液状化予測は判別スコアZの値によって、以下のように4つの判定ランクを設定して行った。これらの区分は図・4にも示した。

- ① $0.59 < Z$: 液状化の可能性が極めて高い
- ② $-0.3 < Z \leq 0.59$: 液状化の可能性が高い
- ③ $-0.74 < Z \leq -0.3$: 液状化の可能性が低い
- ④ $Z \leq -0.74$: 液状化の可能性が極めて低い

この4つの判定基準によって、対象とした名古屋市の約3300箇所に対して液状化発生の判定を試みた結果が図・5である。図中の記号は、●が液状化の可能性が極めて高い地点(約500箇所、全体の15%)、▲が液状化の可能性が高い地点(約550箇所、全体の17%)、△が液状化の可能性が低い地点(約360箇所、全体の11%)、

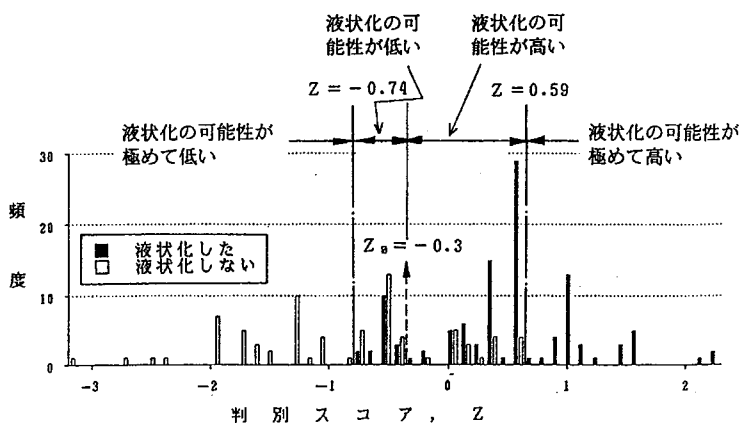
表・3 管種・管径による水道管の被害個数の補正式

管種	管径(mm)	補正後の被害個数 " a_i "
高級铸铁管	50 以下	$a_1 = M \times (L_1 / L) \times 0.8 \times 1.3$
	400 未満	$a_2 = M \times (L_2 / L) \times 0.8 \times 1.0$
	400 以上	$a_3 = M \times (L_3 / L) \times 0.8 \times 0.7$
ダクタイル铸铁管(DA)	50 以下	$a_4 = M \times (L_4 / L) \times 0.36 \times 1.3$
	400 未満	$a_5 = M \times (L_5 / L) \times 0.36 \times 1.0$
	400 以上	$a_6 = M \times (L_6 / L) \times 0.36 \times 0.7$
ダクタイル铸铁管(DK)	50 以下	$a_7 = M \times (L_7 / L) \times 0.36 \times 1.3 \times 0.65$
	400 未満	$a_8 = M \times (L_8 / L) \times 0.36 \times 1.0 \times 0.65$
	400 以上	$a_9 = M \times (L_9 / L) \times 0.36 \times 0.7 \times 0.65$
石綿セメント管	50 以下	$a_{10} = M \times (L_{10} / L) \times 4.16 \times 1.3$
	400 未満	$a_{11} = M \times (L_{11} / L) \times 4.16 \times 1.0$
	400 以上	$a_{12} = M \times (L_{12} / L) \times 4.16 \times 0.7$
鋼管	50 以下	$a_{13} = M \times (L_{13} / L) \times 0.18 \times 1.3$
	400 未満	$a_{14} = M \times (L_{14} / L) \times 0.18 \times 1.0$
	400 以上	$a_{15} = M \times (L_{15} / L) \times 0.18 \times 0.7$
硬質塩化ビニル管	50 以下	$a_{16} = M \times (L_{16} / L) \times 1.69 \times 1.3$
	400 未満	$a_{17} = M \times (L_{17} / L) \times 1.69 \times 1.0$
	400 以上	$a_{18} = M \times (L_{18} / L) \times 1.69 \times 0.7$

表・4 数量化理論Ⅱ類による分析結果

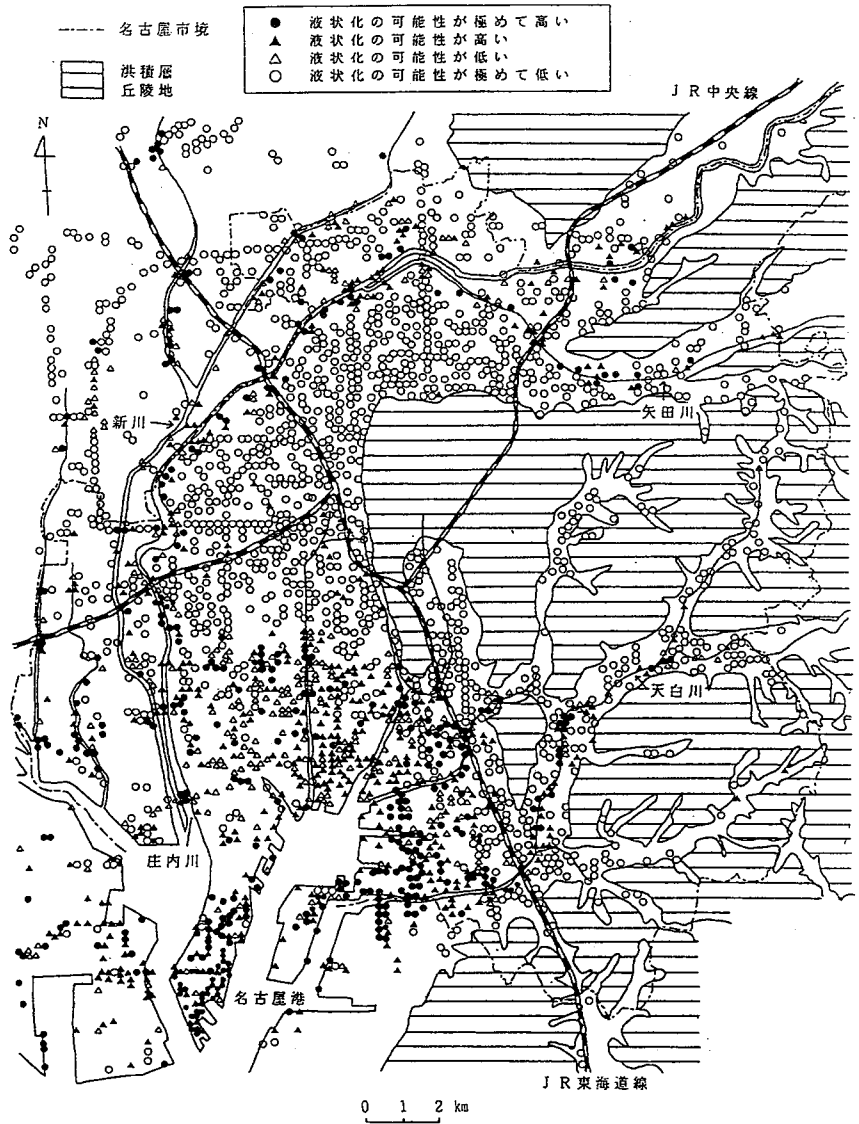
要因	カテゴリー	データ数	カテゴリースコア	レンジ
実効震度 k_e	$0.0 < k_e \leq 0.125$	9	-0.7469	1.1637 (5)
	$0.125 < k_e \leq 0.175$	112	-0.1968	
	$0.175 < k_e$	69	0.4168	
地下水位の深さ Z (m)	$Z = 0.0$	42	0.4909	1.2659 (3)
	$0.0 < Z \leq 3.0$	128	-0.0400	
	$3.0 < Z$	20	-0.7750	
平均N値	$0.0 < N \leq 5.0$	99	0.4347	0.9077 (6)
	$5.0 < N$	91	-0.4730	
飽和砂層厚 D (m)	$D = 0.0$	22	-1.0950	2.2606 (1)
	$0.0 < D \leq 10.0$	160	0.0923	
	$10.0 < D$	8	1.1656	
シルト・粘土層厚 B (m)	$B = 0.0$	8	0.8576	1.2176 (4)
	$0.0 < B \leq 5.0$	123	0.1167	
	$5.0 < B$	59	-0.3600	
地形	河川周辺	27	0.6027	1.9966 (2)
	埋立地	146	0.0509	
	その他	17	-1.3939	

[相 関 比 $\eta^2 = 0.46$]



図・4 判別スコアのヒストグラムと判別区分点

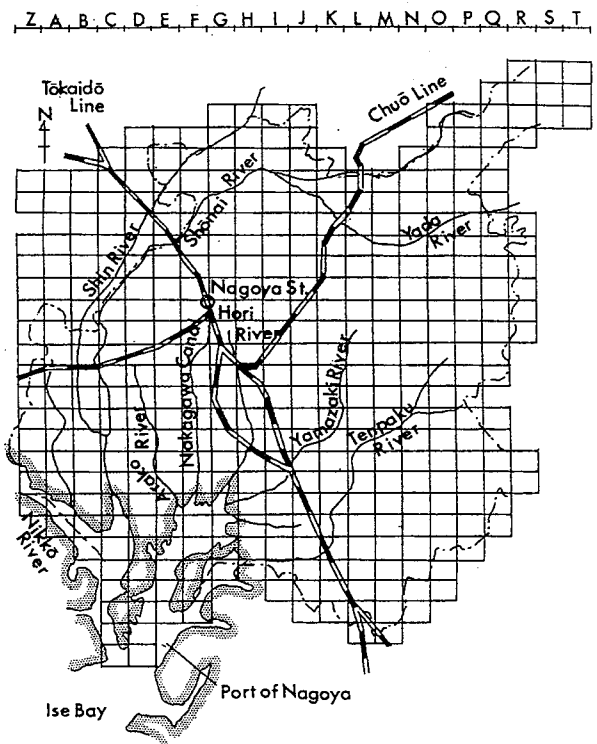
○が液状化の可能性が極めて低い地点を示している（約1900箇所、全体の57%）。図・5より、液状化の可能性が極めて高い地点は名古屋港臨海部の埋立地や河口付近に広範囲に分布している、さらに、市の北部から西部を流れる庄内川、矢田川、新川沿いや東部から南部に流れる天白川沿いにおいても液状化の可能性が極めて高い地点が多く点在していることがわかる。また、液状化の可能性が高いと判定された地点のほとんどは、これらの臨海部や河口付近ならびに河川周辺地域に含まれている。これに対して、河川周辺を除く市の北部や西部の沖積地盤では、液状化の可能性が極めて低いと判定された地点が多い。図・5に基づいて、名古屋市各メッシュ単位の液状化判定を行った。



図・5 想定東海地震による名古屋市域の液状化判定

5 想定東海地震による名古屋市域の水道管の被害予測

メッシュ単位で水道管の被害予測を行うために、名古屋市域を図・6のように1km四方に分割した。分割したメッシュの総数は約400である。水道管の震害予測は、表・1に示したモデルの各要因を予測対象となるメッシュに対して調べ、それぞれの要因に反応するカテゴリーのカテゴリースコアを順次加えたのち平均スコアを加えれば、そのメッシュの水道管の推定平均被害率が得られる。この被害率に各メッシュの水道管の布設延長を乗じることによって、管体の推定被害個数Mが求まる。この推定被害個数は、前述したように表・3を用いて管種・管径による被害の軽重を考慮して補正する必要がある。このようにして名古屋市各メッシュの管種・管径別の被害個数 a_i を求めた。



図・6 水道管の被害予測の対象地域

表・5に名古屋市全域の管種・管径別の水道管の布設延長、推定被害個数、推定平均被害率を示す。東海地震を想定した場合、市域全体の水道管の推定被害個数は1050個と予想され、総布設延長に対する平均被害率は0.141個/kmとなる。予想される被害

個数は、管径50mm以下の硬質塩化ビニル管が820個と最も多く、全被害個数の約80%を占める。ついで管径 75mm～400mm未満のダクタイル鑄鉄管 (A) の106個、管径 75mm～400mm未満の高級鑄鉄管の86個の順となっている。これら3種類の水道管で全被害個数の95%を占める。

つぎに、地震時における市内の水道管の相対的な被害危険度を示したものが図・7である。被害危険度は各メッシュの推定平均被害率を名古屋市全体の推定平均被害率(0.141個/km)で除し、得られた被害率の比 R_d の大きさに被害危険度が最も低いランク I から危険度が最も高いVまで、下記のように5段階に分けた。

- ①危険度 I : $R_d < 0.5$
- ②危険度 II : $0.5 \leq R_d < 1.5$
- ③危険度 III : $1.5 \leq R_d < 2.5$
- ④危険度 IV : $2.5 \leq R_d < 3.5$
- ⑤危険度 V : $3.5 \leq R_d$

図・6と図・7の対比より、水道管の被害危険度がIV、Vとなる地域は、①日光川、庄内川の河口付近一帯、②名古屋港の臨海部、③市の北部から西部を流れる新川、庄内川の河川周辺地区、④天白川沿いの一部地区など埋立地や臨海部ならびに河川周辺に多いことがわかる。図・7に太線で囲ったメッシュは水道の基幹施設である浄水・配水場がある地区を示している。これらの地区のほとんどは水道管の被害危険度が低いと判定された。

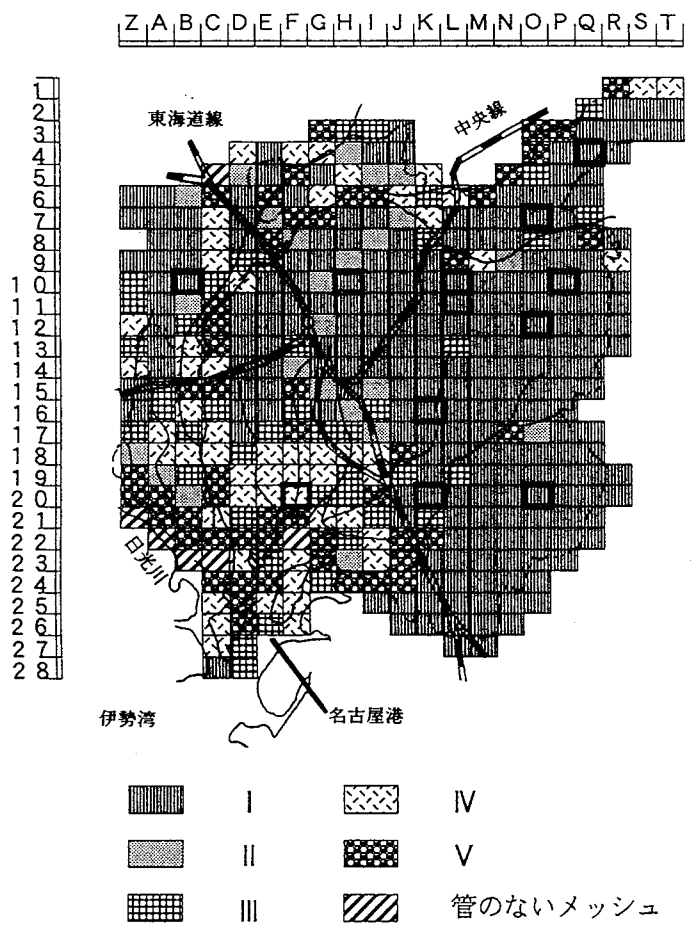
6. まとめ

数量化理論 I 類を用いて、液状化発生を考慮した水道管の震害予測モデルを構築した。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の水道管の被害予測を試み、水道管の管体被害の危険度分布図を示した。この危険度分布図は地震時に水道管を破壊から守るために耐震化の重点をどの地区におくべきかを決定する上で役立つものとする。

表・5 水道管の被害予測結果

管種	管径(mm)	布設延長(Km)	推定被害個数	推定平均被害率(個/Km)
高級 鑄鉄管	50 以下	0.32	0.06	0.186
	75～400未満	844.11	85.88	0.102
	400～2200	100.44	8.72	0.087
ダクタイル 鑄鉄管 (DA)	50 以下	—	—	—
	75～400未満	2225.48	105.85	0.048
	400～2200	207.88	8.98	0.043
ダクタイル 鑄鉄管 (DK)	50 以下	—	—	—
	75～400未満	724.43	11.39	0.016
	400～2200	343.30	5.88	0.017
石綿 セメント管	50 以下	—	—	—
	75～400未満	3.99	2.72	0.680
	400～2200	0.28	0.03	0.108
鋼 管	50 以下	0.16	0.0	0.0
	75～400未満	8.79	0.26	0.030
	400～2200	22.94	0.65	0.028
硬質塩化 ビニル管	50 以下	2557.97	820.03	0.321
	75～400未満	—	—	—
	400～2200	0.02	0.0	0.0
耐震 管	50 以下	0.0	0.0	0.0
	75～400未満	373.17	0.0	0.0
	400～2200	47.90	0.0	0.0
計		7461.18	1050.45	0.141

名古屋市全体の推定平均被害率 : 0.141 個/km



図・7 想定東海地震時の水道管の被害危険度

【参考文献】1)市原・山田：地震時における名古屋市の水道管の相対危険度、土木学会報告論文集、No. 316、pp. 51-63、1981。 2)東京低地の液状化予測、東京都土木技術研究所、1987。 3)若松：日本の地盤液状化履歴、東海大学出版会、1991。 4)山田：想定地震による名古屋市沖積地盤の液状化予測、土木学会論文集、No. 445、pp. 37-45、1992。