

地震時における名古屋市の水道管の相対的危険度

RELATIVE DEGREE OF RISK OF WATER-SUPPLY PIPES IN
NAGOYA CITY DURING EARTHQUAKE

市原松平*・山田公夫**

By Matsuhei ICHIHARA and Kimio YAMADA

1. ま え が き

都市の地下には水道管、ガス管など生活線としてのパイプラインが網目のように埋設されている。これらの地下埋設管は他の土木構造物のようにすべてが耐震的に設計されているわけではない。この理由は地震時における地下埋設管の挙動が十分に解明されていないことや、埋設管をすべて耐震的にすることは膨大な費用がかかるためである。生活線としてのパイプラインはすべての市民に平等にサービスを供給するという義務を負っているため、地盤が悪いからといって布設を取りやめたり、あるいは地盤の悪い場所を避けて通ることはできない。そのため、好むと好まざるにかかわらずパイプラインはたびたび地盤の悪い場所に埋設される。さらにパイプラインは布設時期によって使用された管の強度や継手の形状は異なり、新しいものほど強度は大きく、継手も改善されている。このように、強度の異なる地盤に埋設された種々のタイプのパイプラインは地震によって被害を受けることは過去の事例^{1)~6)}からも明白である。たとえば1978年の宮城県沖地震では仙台市の上水道は完全復旧に約10日間、都市ガスは地震後3日間は全面的に供給が停止し、完全復旧までに27日間を要したと報告されており⁷⁾、地震によるパイプラインの被害はわれわれの日常生活に大きな影響を及ぼす。それゆえ地震時における地下埋設管の被害予測に関する研究は地震が発生した場合、パイプラインの被害に対する応急処置の準備や救援、復旧作業の対策などを立てるうえで重要である。また、パイプの布設前に耐震設計の重点をどの地区におくか、すなわち危険度に応じてどのような対策をとるかを決定するためにも重要である。

地震時におけるパイプラインの被害予測に関する研究

は多くない。久保ら^{8)~6)}は関東地震による旧東京市の水道管の被害結果をもとにして、被害の軽重を地盤の動的特性としての卓越振動数と表層地盤種別によって定量的に関係づけ、東京都の区部や、川崎市の地震時における水道管の被害予測を試みている。Whitman⁹⁾らは水道システムの破壊を“共同体に奉仕する機能の低下”という言葉で定義し、一般の構造物の破壊と区別している。地震時にシステムの構成要素であるダム、水路、主配水管、操作施設などが破壊してシステム内の各機能（取水、送水、配水など）を喪失させることになる。このうち主配水管網を考えると、これが軟弱層を通るときの送水機能喪失による被害がきわめて多いことを指摘し、この被害状態を5種類に分けて各状態が発生する確率をBostonの水道システムを例にあげて求めている。松尾¹⁰⁾らは過去の地震による埋設管の被害を地盤のN値、管の材質や径などの因子に関して要因分析を行い、地震時のパイプラインの被害はN値と管の種類に大きく影響されると述べている。また彼らは埋設管の破壊確率を求め、地盤の状態に対応する管の最適な種類の決定法を示している。これらの研究から水道管の被害には地盤の良否が影響することは確かであるが、ある1つの地震によって起こった都市の水道管の被害を、もっと広範囲の要因を取り入れて総合的に考えることが必要とされる。このために被害を入念に分析することがまず先決であると考えた。

著者らの研究は過去の地震による水道管の被害を数量化理論工類を用いて分析し、地震時における水道管の定量的な被害予測のための予測モデルの確立を試み、さらにこのモデルを用いて、将来発生が予想される東海地震に対する名古屋市の水道管被害の危険度分布をマイクロゾーンネーションの問題として取り扱ったものである。そのために分析対象ならびに予測対象地域を1km×1kmのメッシュに分割した。上述した久保らの研究ではパイプラインの被害に影響を与える要素のうち地盤に関する

* 正会員 工博 和歌山工業高等専門学校 校長

** 正会員 工修 中部工業大学講師 工学部土木工学科

ものとしては地盤の卓越振動数と浅層地盤の構成を、Whitman らの研究では破壊の要因としてその場所に軟弱土があるかないかを、松尾らの研究では地盤の N 値を考えた。著者らは数量化理論 I 類を用いて水道管の被害を分析するにあたって、その要因として以下に示す 7 つを選んだ。これ以外の要因も考えられるが、要因の選択にあたっては分析ならびに予測対象の両地区、すなわち東京と名古屋で測定あるいは調べることが可能な要因であること、要因間の関連が極度に強くないことなどを考慮して、被害と関係が深いと考えられるものを選んだ。このように多くの要因を一括して考えて、水道管の被害に影響する要素を探究した研究はない。① 表層の地盤種別、② 深さ 5 m までの土の種類、③ 深さ 5 m までの土の強さ (N 値)、④ 沖積層の厚さ、以上の 4 要因は地盤構成と土の強さを考えているが、さらに地形に重点をおいて、⑤ 被害の発生場所が河川流域、埋立地であるかそうでないかという要因を付加している。これら河川流域、埋立地は他に比して土の強度低下以外に液状化発生の原因が含まれていると考えるためである。さらに重要な要因と考えられる⑥ 震度と⑦ 水道管の布設延長を取り入れた。⑦ を取り入れる理由は、著者らは被害の程度を表わす尺度として各メッシュ内の管の布設延長 1 km 当たりの被害個数を考えたためである。これらの要因と被害との関係を調べるために関東地震 (1923) による旧東京市の被害¹⁾を調べた。関東地震による東京市の被害を分析の対象にした理由は 2. で述べる。

この研究では水道管の被害は管体被害 (管の破裂、折損、継手の抜け) を対象としており漏水被害についてはふれていない。この理由は関東地震による東京市の漏水被害については下町の火災を受けた地区の被害状況が十分に調査されていないためである。

2. 地震による水道管の被害の特性

過去の地震による水道施設の被害の特性についてはすでに報告した¹¹⁾。ここでは前述した被害の分析に使用した関東地震による東京市の被害^{11), 12)}を主として述べる。

関東地震は 1923 年に発生した。震源地は相模湾の北西部で地震の規模はマグニチュード 7.9 であった。東京は地震の直後火災が発生し下町は火の海となった。東京市の水道管の被害 (管体の破裂、折損、継手の抜け) は埋立・干拓地である下町低地や河川周辺地域で多発した。当時、上水道の普及率が低かったとはいえ、下町低地で水道管の被害が多発したことはこの地区の火災を大きくした原因の 1 つである。関東地震によって東京市の水道は約 230 か所の管体被害 (管径 75~1100 mm の管の破裂、折損、継手の抜け) と約 96000 か所の漏水被

害を受けた。管体被害のおよそ 80% は沖積低地で生じ、残りの 20% が洪積台地あるいは、洪積台地が中小河川によって刻まれた河谷低地で生じた。東京市全体の水道管の管体の平均被害率 (水道管布設延長 1 km 当たりの管体の被害個数) は 0.29 個/km であった。被害が大であった沖積低地で占められている地区の平均被害率はおおよそ 0.45 個/km であったのに対し、洪積台地で占められている地区の平均被害率はおおよそ 0.15 個/km であった。管径別の管体被害個数は管径 75 mm 以上 400 mm 未満の管が全体の約 95% を占め、管径 400 mm 未満と 400 mm 以上の管の平均被害率の比は前者に対して後者は 0.7 で管径が大きいと被害率は小さくなる。当時の管は普通鑄鉄管を使用しており、古い管は布設後 20 年以上経過していた。

著者らが調べた過去の地震 (関東地震、新潟地震、十勝沖地震、宮城県沖地震) による水道管の平均被害率をみると、いずれも被害都市を襲った地震の震度は震度階 V であるが、調べた平均被害率は都市によってかなりの差がある。たとえば、十勝沖地震による青森市の平均被害率はおおよそ 2.9 個/km であり、新潟地震による新潟市の平均被害率は普通鑄鉄管の場合、地震後の試掘調査によると、試掘延長 60~230 m に対して、100~173 個/km であった。青森市の被害が大きいのには継手が完全に抜けず鉛抜けしたもの (関東地震ではこの程度の被害は漏水被害に含まれていると考えられる) も被害個数に算定されているためである。また、新潟市の被害が極度に大きいのは液状化による地盤変動が大であったためである。

被害を管体の破損と継手部における管の抜けに限定して被害の特性をまとめると、被害の多い管は石綿セメント管、ねじ継手をもった小口径の鋼管、鉛ソケット継手をもった普通鑄鉄管である。被害の多い場所は土の液状化が発生する地盤、軟弱地盤、埋立地、造成地盤で盛土と切土の境界付近ならびに崩壊の可能性のある斜面などである。水道施設のうち、主要な構造物は耐震的な配慮がなされているため、管路に比べて被害は小さい。

上述した被害を分析するためには次の資料が必要である。① 地震による地表加速度あるいは震度の分布、② 管路の被害地点と水道管の布設延長ならびに埋設位置を示す資料、③ ボーリング柱状図、地形分類図、地盤種別図など地盤に関する資料である。これらの条件を満足させる資料が入手できるのは関東地震による東京市の被害の場合のみであった。すなわち、関東地震による東京市の震度分布は調査されわかっていること¹³⁾、水道管の被害地点ならびに管の布設延長、埋設状況についても利用できる資料があること^{14), 15)}、さらに東京の地盤状態についてはすでに明確に調査されている^{16), 17)}からで

ある。これに対して、関東地震以外の地震では水道管の被害と地盤特性ならびに地震動の大きさとの関係について十分に調べることができる資料が不足している。このような理由のために、著者らは関東地震による東京市の被害を分析の対象にした。

3. 地震時における水道管の被害分析

地震時における水道管の被害の程度は地震の強さ、管が埋設された場所の地盤の種類や強度ならびに地形状況、管の材質や口径ならびに管の布設密度などによって異なる。現実にはこれらの要因が相互に関連しあって被害が発生するため、被害分析はこれらの要因を個々に解析するのではなく同時に解析すべきである。そのための解析手法として多変量解析法がある。多変量解析法の1つとして重回帰分析があるが、これは分析対象も要因もともに数量で与えられた場合に適用されるもので、地盤の種類とか地形状況など分類で与えられる要因がある場合には使用できない。そのために著者らは質的なデータに数量を与えて分析する方法、すなわち数量化理論を用いて地震時における水道管の被害分析を試みた。

(1) 数量化理論Ⅰ類

数量化理論Ⅰ類は分析対象が数量で与えられている場合の方法である¹³⁾。この研究における分析対象は1km×1kmの網目に分割した各メッシュの管体の平均被害率(水道管布設延長1km当りの管の破裂、折損、継手の抜けの個数)である。分析に用いた要因は1.で述べた7つであり、これらの要因は表-1に示すようにそれぞれ2つ~5つのカテゴリーに分けた。

あるメッシュ k の推定平均被害率を \bar{Y}_k とし、要因 i のカテゴリー j に与える数量を x_{ij} とする。ここで δ_{ij} という関数を導入する。 δ_{ij} はあるメッシュ k において要因 i がカテゴリー j に反応すれば $\delta_{k(ij)}=1$ 、反応しなければ $\delta_{k(ij)}=0$ である。このように決めるとあるメッシュ k の推定平均被害率 \bar{Y}_k は次式で表わされる。

$$\bar{Y}_k = \sum_i \sum_j \delta_{k(ij)} \cdot x_{ij} \dots \dots \dots (1)$$

あるメッシュ k の実測平均被害率を Y_k とする。そして \bar{Y}_k が Y_k を最もよく表わすように x_{ij} を決める。そのため、 $E = \sum_k (Y_k - \bar{Y}_k)^2$ とおいて次式から E を最小にするような各要因のそれぞれのカテゴリースコア x_{ij} を求める。

$$\frac{\partial E}{\partial x_{ij}} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

これは Y_k と \bar{Y}_k の相関が最大となるように重み x_{ij} を決めることにほかならない。このようにしてすべての

表-1 数量化理論Ⅰ類による分析に用いた要因とそのカテゴリー

要因 1		要因 4		
カテゴリー	震度 (k)	沖積層厚 $H(m)$		
	$k \leq 0.125$	1	$H \leq 10$	1
	$0.125 < k \leq 0.175$	2	$10 < H \leq 20$	2
	$0.175 < k \leq 0.225$	3	$20 < H$	3
	$0.225 < k$	4		
要因 2		要因 5		
カテゴリー	浅層の地盤種別		地表から深さ 5m までの土の種類	
	沖積層	1	粘性土	1
	沖積層・洪積層	2	砂質土	2
	沖積層・洪積層・河谷低地	3	粘性土・砂質土	3
	洪積層・河谷低地	4		
	洪積層	5		
要因 3		要因 6		
カテゴリー	地表から深さ 5m までの平均 N 値		地形	
	$N \leq 5$	1	河川流域・埋立地	1
	$5 < N \leq 10$	2	河川流域	2
	$10 < N$	3	埋立地	3
			その他	4
		要因 7		
カテゴリー			1メッシュ当たりの水道管の布設延長	
			$L \leq 5 \text{ km}$	1
			$5 \text{ km} < L \leq 10 \text{ km}$	2
		$10 \text{ km} < L$	3	

要因のカテゴリースコア x_{ij} が決定されれば、この値を用いて地震時の水道管の被害を定量的に予測することができる。

(2) 管体の平均被害率の算定

管体の平均被害率を算定するには関東地震による東京市の水道管の管体被害位置と当時の水道管の配管図が必要である。前者は文献 1) に示されている。しかしながら、関東地震当時の東京市の水道管の布設状況を示す資料は入手できなかったため、著者らは明治 44 年 3 月現在の東京市の水道管布設図¹⁴⁾を用いて布設延長を測定した。明治 44 年 4 月から大正 12 年までに造成された埋立地に埋設された水道管や、この間に拡張工事で埋設された水道管の正確な配管状況は不明である。したがって管体の被害個数は入手した水道管の布設図に基づいて修正した。前述したように平均被害率は管径が大きくなると減少する傾向を示している。そのため管径が 400 mm 未満と 400 mm 以上の 2 つの場合に大別し、各メッシュごとに平均被害率を求めた。管径 400 mm 以上の管が埋設されたメッシュ数が少ないことと、管体の被害個数の約 95% は管径 400 mm 未満の管であるなどの理由から、管径 400 mm 未満の管の被害を分析対象にした。分析対象としたメッシュの総和は 86 区画である。

(3) 分析に用いた要因

数量で与えられる要因に対するカテゴリ区分の仕方はいくつかある。そのため著者らはそれらの要因について区分の仕方を変えて被害率に対する一元配置の分散分析を行った¹⁹⁾。その結果より *F* 値¹⁹⁾が大きく、かつ扱いやすい区分になるようにカテゴリを区分した。

a) 震度

今村は使用材料や構造の違いによる家屋の良否を考慮に入れて関東地震による東京市の家屋の被害状況を詳細に調査した。さらに今村は余震を利用して市内の 32 地点で簡単な地動計を用いて地盤の震動性能を調査し、これと家屋の被害状況から関東地震による東京市の震度分布図を作成した¹³⁾。震度分布図は震度 0.1 内外から 0.25 内外まで 0.05 ごとに 4 段階で示されている。著者らはこの震度分布図を前述と同様の方法で 1km×1km の網目に分割し、各メッシュの震度を決めた。1つのメッシュで震度が入り組む場合にはそれぞれの震度の占める面積を重みにした平均的な震度を求め、これをそのメッシュの震度とした。震度は表-1 に示すように 4つのカテゴリに分けた。

b) 地盤種別

地表面の地盤構成については文献 17) に基づいて、沖積低地を A、洪積台地を B、河谷低地を C として次の 5つのカテゴリに分けた。

- i) A：メッシュ内がすべて沖積低地で構成されている。
- ii) AB：メッシュ内が沖積低地と洪積台地で構成されている。
- iii) ABC：メッシュ内が沖積低地、洪積台地、河谷低地で構成されている。
- iv) BC：メッシュ内が洪積台地と河谷低地で構成されている。
- v) B：メッシュ内がすべて洪積台地で構成されている。

c) 標準貫入試験による *N* 値

水道管の埋設深さは地表面よりせいぜい 5m 程度までである。地盤の強さを表わす指標として深さ 5m までの *N* 値の平均値を要因として用いた。*N* 値はそれぞれのメッシュのすべての土質柱状図¹⁷⁾を用いて次式から決めた。

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \dots\dots\dots (3)$$

ここで、*N_i* はあるメッシュの *i* 地点の土質柱状図より求めた深さ 5m までの平均 *N* 値、*n* はあるメッシュのボーリング箇所総数である。*N* 値は表-1 に示すように 3つのカテゴリに分けた。

d) 沖積層厚

関東地震による水道管の管体被害の約 80% が沖積低地で生じたことはすでに述べた。沖積層の厚さが被害にどの程度影響しているかを知るためにこれを要因として取り上げた。沖積層厚は文献 17) の地盤断面図と土質柱状図の両者を用いて、各メッシュでの平均的な厚さを求め、表-1 に示したように 3つのカテゴリに分けた。

e) 土の種類

水道管が埋設された場所の土質の違いによって管体の被害は異なると考えられる。したがって、地表から 5m までの深さの土の種類を次の 3つに大別した。この要因を取り上げた理由は同じ砂であっても洪積層と沖積層の砂があるためである。また、洪積層の粘性土と沖積層の粘性土では強さが明らかに異なるためである。

- i) 粘性土（シルトを含む）で構成されている層。
- ii) 砂質土（礫を含む）で構成されている層。
- iii) 粘性土と砂質土で構成されている層。

f) 地形

地形を分類すると多岐にわたるが本研究では河川流域、埋立地とそれ以外の地区とに分けた。この理由は河川流域や埋立地は地盤が軟弱であるということ以外に、他の地区と比べて液状化の可能性をもっていると考えたからである。この要因のカテゴリは表-1 に示すように 4つに分けた。

g) 水道管の布設延長

布設延長と、被害率の関係を調べるために、著者らは各メッシュの水道管の布設延長を要因に入れた。図-1 に関東地震による東京市の管体被害をもとにした 1メッシュ当たりの布設延長と平均被害率のヒストグラムを示す。この図は管径 400mm 未満の管の被害結果である。図から明らかのように布設延長の長いメッシュほど平均被害率は減少する傾向を示している。布設延長が 10km を超えると平均被害率に大きな差はないと考え、カテゴリは表-1 のように 3つに分けた。

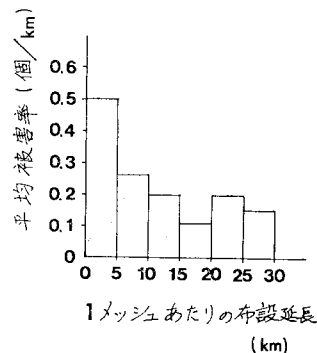


図-1 東京市の 1メッシュ当たりの水道管の布設延長と平均被害率のヒストグラム（関東地震時）

(4) 数量化理論Ⅰ類による分析結果

数量化理論Ⅰ類の適用にあたって分析に用いた要因間の関連の強さを検討する必要があるため、クラマーのコンティンジェンシー係数²⁰⁾を求めた。ここに、クラマーのコンティンジェンシー係数とは要因間の関連の強さを示す係数で、0から1の間の値をとり、0に近づくほど関連が小である。その結果、地盤種別と震度、沖積層厚と震度のコンティンジェンシー係数はそれぞれ0.574、0.548となり他の要因間のコンティンジェンシー係数よりも相対的に大きな値となった。そのため地盤種別を除いた場合と沖積層厚を除いた場合のそれぞれ6要因と地盤種別と沖積層厚を除いた5要因で数量化理論Ⅰ類による分析を行い、これらの結果を7つの要因を用いて分析した結果と比較した。重相関係数は7つの要因を用いた場合0.808、地盤種別を除いた場合0.802、沖積層厚を除いた場合0.794、両者を除いた場合0.789であった。また、これら4つの分析結果において各要因のカテゴリースコアに大きな差異は認められなかったが、7つの要因を用いた場合の方が各要因のスコア図において説明しやすい結果が得られた。それゆえ、前述した7つの要因をすべて用いた。その結果を表-2に示す。

表-2のカテゴリースコアは各要因のカテゴリースコア x_{ij} からその要因のカテゴリースコアの平均値 \bar{x}_j を差し引いたもので、プラスの場合には平均値に加算さ

表-2 数量化理論Ⅰ類による分析結果

要因	カテゴリ	カテゴリスコア	スコア図				レンジ
			-0.2	0	0.2	0.4	
震度 (k)	$k \leq 0.125$	-0.0961		0.7049 (1)			
	$0.125 < k \leq 0.175$	0.0006					
	$0.175 < k \leq 0.225$	-0.0024					
	$0.225 < k$	0.6448					
地盤種別	沖積層	0.1379		0.2867 (5)			
	沖積層・洪積層	-0.0154					
	沖積層・洪積層・河階低地	-0.1069					
	洪積層・河階低地	-0.1210					
深さ5mまでの平均N値 (N)	$N \leq 5$	0.0570		0.1383 (7)			
	$5 < N \leq 10$	-0.0813					
	$10 < N$	-0.0657					
	沖積層厚 (H) (m)	$H \leq 10$			0.0546		
深さ5mまでの土の種類	$10 < H \leq 20$	0.0569		0.2969 (4)			
	$20 < H$	-0.2400					
	粘性土	0.0603					
	砂質土	-0.0150					
地形	砂質土・粘性土	-0.1557		0.2161 (6)			
	河川流域・埋立地	0.2233					
	河川流域	0.1590					
	埋立地	0.1430					
布設延長 (L) (km)	その他	-0.1823		0.4056 (2)			
	$L \leq 5$	0.1698					
	$5 < L \leq 10$	0.0353					
	$10 < L$	-0.2049					

重相関係数 = 0.8076
平均スコア = 0.2838

れ被害を大きくする方向に、マイナスの場合には被害を下げる方向に働くことを示している。ここに各要因のカテゴリースコアの平均値 \bar{x}_j は各カテゴリーに属するサンプル数(メッシュ数)の重みつき平均である。各要因のカテゴリースコアの平均値の和すなわち平均スコア¹⁹⁾はこの分析では0.2838個/kmであった。この平均スコアは東京市の各メッシュの平均被害率の和をメッシュ数で除した値に等しい。これで数量化の計算に誤りがないことがわかった¹⁸⁾。次に、表-2の各要因のレンジはカテゴリースコアの最大値と最小値の差であって、このレンジの値が大きい要因ほど平均被害率に及ぼす影響が強いことを示す。表-2のレンジの欄の括弧内の数値はその大きさの順序を示しており、地震時の水道管の平均被害率には特に震度が大きく影響しており、次に地形、布設延長の順に効いている。また、沖積層厚や地盤種別の影響も見逃すことはできない。深さ5mまでの土の種類や平均N値は被害率に対して直接的にそれほど影響していないという結果が得られた。もちろん、震度は地盤の強さ、すなわちN値によって影響されるが分析に際して種々の要因を考えると、地震時にはN値よりも震度が大きく効くという上述の結果が得られている。また、久保らの研究のように、被害の分析にあたって表層地盤の種類と地盤の動的特性を考えているが、地震時に外部から与えられる震度が直接的に大きく影響するということがわかった。被害率に与える影響度の大きい要因についてさらに吟味すると、震度については震度が0.225を超えると急激に被害が増加することを示している。次に地形については河川流域でかつ埋立地という場所のカテゴリースコアが最も大きく、ついで河川流域、埋立地の順になり両者とも被害を増加させる傾向を示している。また、1メッシュ当たりの水道管の布設延長は延長距離が長い場合ほど被害率は下がることを示している。

分析結果の精度は重相関係数で表わされる。すなわち重相関係数が1.0に接近するに従い平均被害率の実測値と推定値の間の誤差が小さくなり予測をする場合に信頼性が高いことになる。表-2に示した分析の重相関係数は上述したように0.808であり、この分析モデルの説明率は約65%である。この結果を用いて後述するように名古屋市の地震時における水道管の被害予測を試みた。

4. 東海地震を想定した場合の名古屋市
の震度分布の推定

3. で述べたように、地震時において水道管の被害に最も大きく影響を与える要因は震度であることが示された。したがって、東海地震を想定した場合、名古屋市の

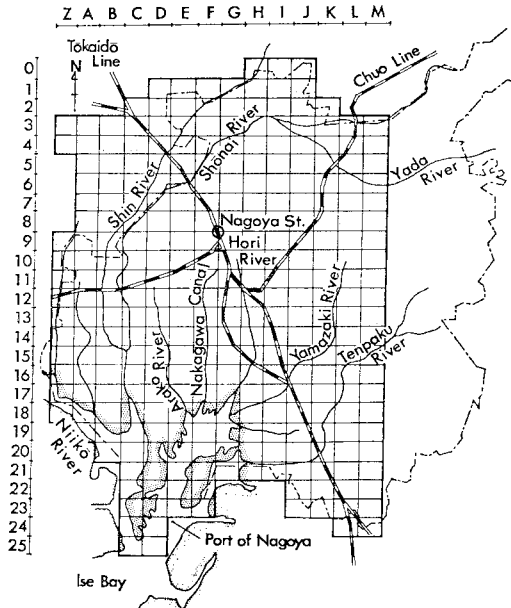


図-2 応答計算ならびに被害予測の対象にした地域（太線区域内）

水道管の被害予測のために名古屋市の各地で予想される震度が必要になる。著者らは名古屋市を東京市と同様に $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ の網目に分割し、各メッシュでの地表最大加速度を求めするために SHAKE というプログラム²¹⁾を用い地盤応答計算を行った。応答計算の対象にした地区は図-2の太線区域内である。この区域は名古屋市の東部丘陵地帯を除き、名古屋市の総面積の75%になる。名古屋市の地盤の概略や応答計算のための名古屋市の各メッシュの地盤のモデル化ならびに応答計算の詳細についてはすでに報告した^{12), 22)}。名古屋市の各メッシュの基盤に入力する地震波は想定される東海地震 ($M=8.0$) 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用いた。この地震波は地表で観測されたものであるから応答計算にはこれを基盤に戻した地震波を使用した。地震波を入射させる基盤は標準貫入試験の N 値が50以上の洪積層とした。また、東海地震の予想震源域は石橋モデル²³⁾を用いた。

(1) 地表最大加速度と地盤の固有振動数

図-3に応答計算から得られた地表最大加速度の分布を、図-4に地盤の固有振動数の分布を示す。東海地震を想定した場合、名古屋市中で予想される地表最大加速度は300 gal以下であり、地表最大加速度が250~300 galを示す地区は洪積層のところである。河川沿いや名古屋港の一部で200~250 galを示すところもあるが、予想される地表最大加速度は150~200 galを示す場所が最も多い。また、固有振動数は基盤に正弦波を与えて同じ

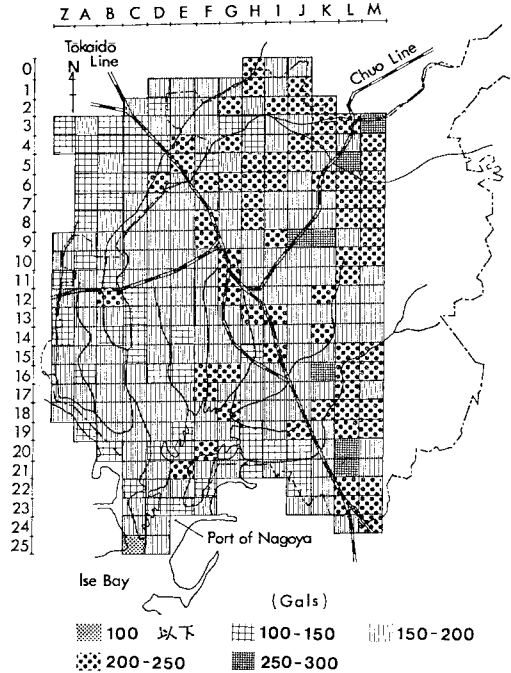


図-3 東海地震を想定した場合の応答計算による名古屋市の地表最大加速度の分布

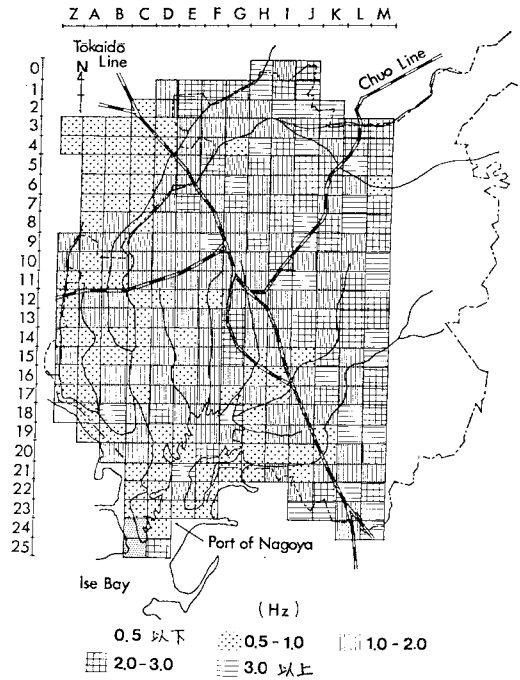


図-4 東海地震を想定した場合の名古屋市の地盤の固有振動数の分布

く SHAKE のプログラムで求めたが、地盤の良好なところで 2.0 Hz 以上を示しており、河川沿いや沖積層の厚い名古屋市の北西部や名古屋港付近では 1.0 Hz 以下

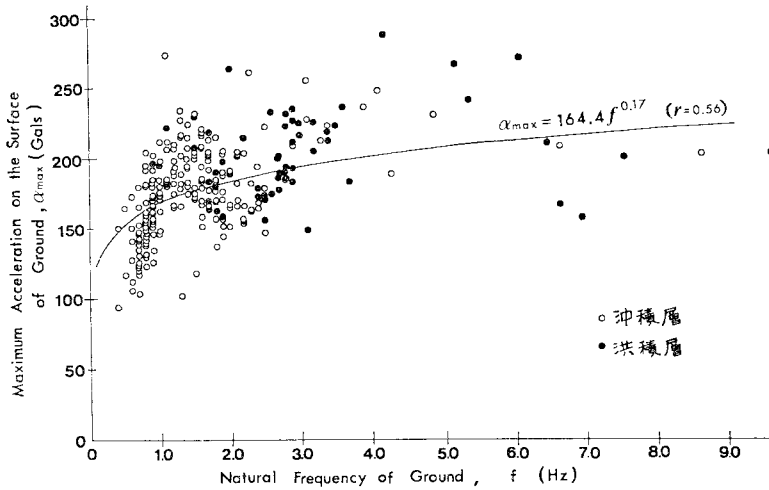


図-5 名古屋市の地盤の固有振動数 f と地表最大加速度 α_{max} の関係

である。図-5 は横軸に名古屋市の各メッシュの地盤の固有振動数 f をとり、縦軸に地表最大加速度 α_{max} をとり、沖積層を○印で洪積層を●印で示している。図中の実線は固有振動数と最大加速度との回帰曲線である。この図によると地盤が良好になるにつれて、すなわち f が大きくなるにつれて α_{max} が増加している。

(2) 名古屋市の震度分布の推定

数量化理論 I 類による分析で用いた東京市の震度は関東地震による東京市の震度分布 $k = a/g$ に基づくもので、これは前述したように東京市の建物の被害、墓石の転倒ならびに余震の観測から決定したと報告されている¹³⁾。ここに k が震度、 a が水平加速度、 g が重力の加速度である。上述した今村の決定した震度と地表最大加速度の関係を調べるために、東京市の 99 メッシュのそれぞれに対して、名古屋と同じ方法で SHAKE のプ

ログラムを使用して、関東地震における東京市の地表最大加速度 α_{max} と地盤の固有振動数 f を求めた。

関東地震の震源域については、金森ら²⁴⁾によって図-6 に斜線を付した四辺形 $abcd$ の区域として示されている。著者らは理科年表に書かれている震央の位置(北緯 $35^{\circ}12'$ 、東経 $139^{\circ}18'$ 、図に×印で示されている)を通して、四辺形の長辺 \overline{ab} に平行な線 \overline{ef} に沿って、地震が発生したと仮定して応答計算を行った。なお比較のため長辺 \overline{ab} 、 \overline{dc} に沿って地震が発生した場合の応答計算も行ったが、 \overline{ab} に沿う場合には \overline{ef} に沿う場合と大差なく、また \overline{dc} に沿う場合には極度に大きな地表最大加速度が得られ、後述する図-8 の $(\alpha_{max}/f)-k$ 曲線がもっと勾配の緩いものになる。したがって、その曲線を名古屋市に適用した場合に過小な k が名古屋市で得られる。このことは危険側の見積りをしたことになるので、結局 \overline{ef} を応答計算のための震源の位置と仮定した。

表-3 に東京市の表層地盤構成と震度 k の関係を示している。応答計算から求めた東京の沖積層と洪積層の固有振動数 f の平均値はそれぞれ 1.13 Hz, 2.34 Hz である。これによると地盤がよいほど k の値は小さく、逆に f の値は大きくなっている。この関係は図-5 にすでに示した地表最大加速度の f に対する関係と異なっている。

図-7~9 はそれぞれ横軸に東京市の各メッシュの応答計算から求めた α_{max} 、 α_{max}/f 、 α_{max}/f^2 を、縦軸に今村が決定した震度 k をとって、これらの値をいずれも沖積層と洪積層に分けて示している。これらの図はそれぞれ横軸に加速度、速度、変位をとって k を表現したことになる。 k と α_{max} の関係では、 α_{max} が小になるに従って k が小にならなくてはならない。しかるに図-7 では α_{max} が 0 に接近しても、 k が 0 に接近しないから、この図からは α_{max} と k の関係が得られな

表-3 東京市の表層地盤構成と関東地震時の震度の平均値

地盤構成	メッシュ数	震度の平均値
沖積層	39	0.182
沖積層・洪積層	5	0.137
沖積層・洪積層・河谷低地	4	0.138
洪積層・河谷低地	28	0.106
洪積層	10	0.104

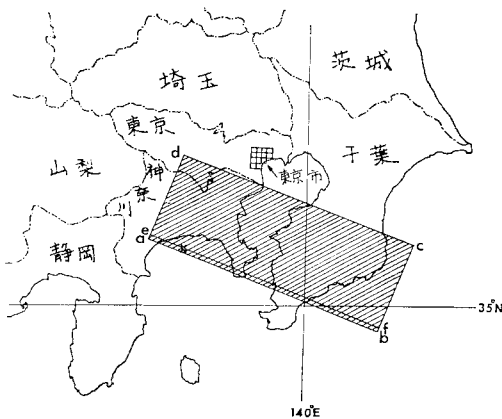


図-6 金森らによる関東地震の震源域

い。

図-8, 9 には、いずれも k の上限値のいくつかを満足させる曲線が実線と破線で示されている。実線は沖積層に、破線は洪積層における k の変化を示している。これによると両図ともに α_{max} が 0 に接近すると、 k の値も 0 に接近することがわかる。図-8 の実線と破線の曲線はそれぞれ次式で与えられる。

$$k = 0.0144 \left(\frac{\alpha_{max}}{f} \right)^{0.497} \dots\dots\dots (4)$$

$$k = 0.0290 \left(\frac{\alpha_{max}}{f} \right)^{0.277} \dots\dots\dots (5)$$

式 (4) が沖積層に、式 (5) が洪積層に適用される。また 図-9 に示された 2 つの曲線は次式で表現される。式 (6) が沖積層に、式 (7) が洪積層に適用される。

$$k = 0.0672 \left(\frac{\alpha_{max}}{f^2} \right)^{0.199} \dots\dots\dots (6)$$

$$k = 0.0698 \left(\frac{\alpha_{max}}{f^2} \right)^{0.118} \dots\dots\dots (7)$$

名古屋、東京のいずれにおいても、固有振動数 f の値はだいたいにおいて、 $0.4 \text{ Hz} \leq f \leq 4.0 \text{ Hz}$ であるが両都市ともに、 $0.5 \text{ Hz} \leq f \leq 2.0 \text{ Hz}$ の場所が大半を占め、特に名古屋の沖積層では $f=1.0 \text{ Hz}$ 付近の値をとる場所が多い。名古屋市の α_{max}/f と α_{max}/f^2 の値の範囲はそれぞれ 図-8, 9 に沖積層と洪積層に分けて示してあるが、名古屋市に上述の式 (4)~(6) ならびに (7) を適用することの妥当性がこれで示される。

k を式 (4), (5) に示すように速度で表現した方がよいか、式 (6), (7) のように変位で表現した方がよいかを調べるために、 f の代表的な値に対して、 $\alpha_{max}-k$ の関係を上式に基づいて 図-10 のように描いてみた。これによると加速度の変化に対する k の変化は速度から求めたものは変位から求めたものに比してはるかに顕著に変化していることがわかる。地震による被害を表わす k の値は地震の強さ α_{max} によって大きく支配されることを考えると、 k が α_{max} によって明確に変化する式 (4), (5) を採用するのがよいように考えられる。結果的にみて変位よりも変位の時間的割合が被害に大きく影響を与えると考えられる。

一方、名古屋市の水道管の被害の見積りに際して、式 (4), (5) を用いると、 α_{max} が比較的に小さな名古屋市の沖積層の場合に、図-10 に示すように式 (6) を用い

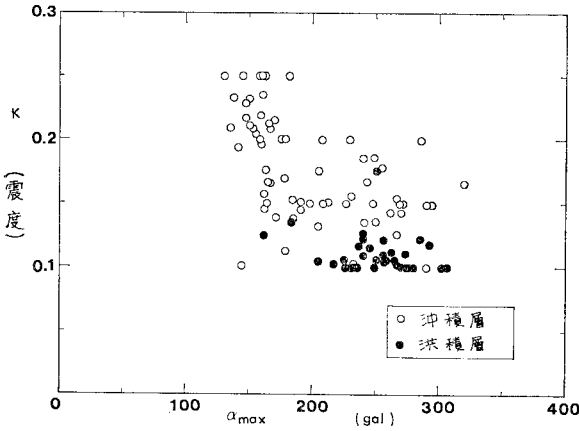


図-7 α_{max} と震度 k との関係

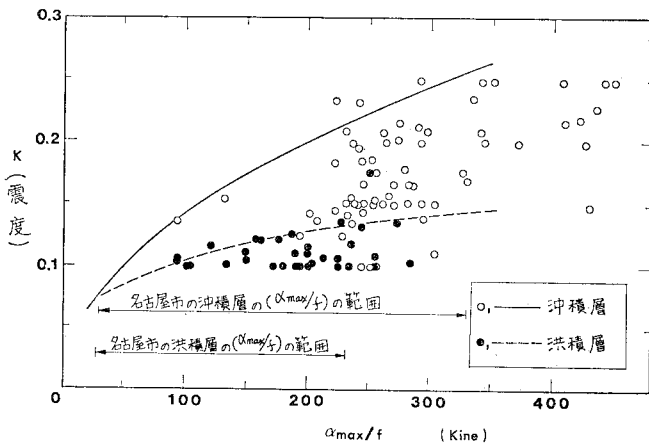


図-8 α_{max}/f と震度 k との関係

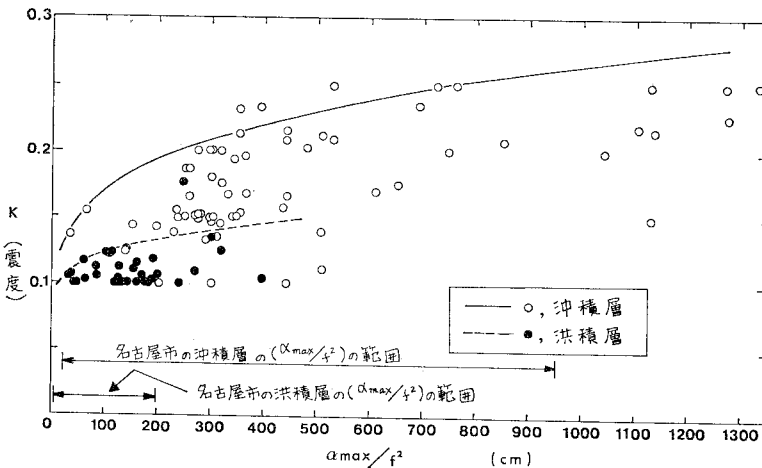


図-9 α_{max}/f^2 と震度 k との関係

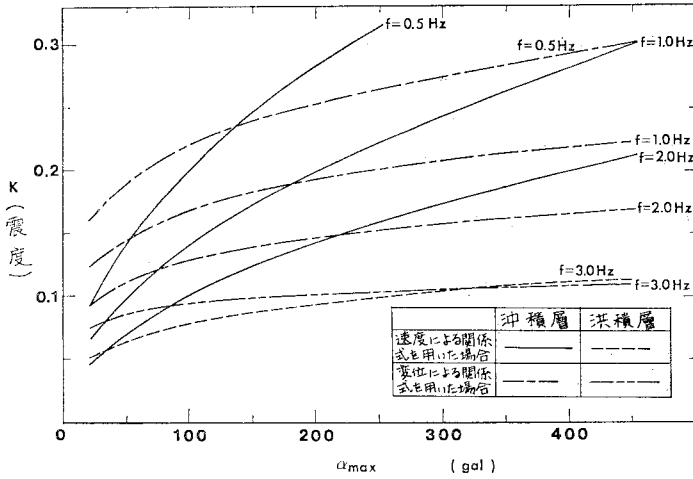


図-10 地表最大加速度 α_{max} と震度 k との関係

るよりも震度を小に見積り、危険側の推定を行ったことに関する。このことは前述したように関東地震の震源の位置の決定において、また k の決定に際して、図-8, 9 の上限値をとったという、一連の考え方と相反することになる。しかしながら水道管の被害は前述したように、表-2 の震度 k のカテゴリによって影響され、式 (6)、または式 (7) を使用することによって震度が大きく、あるいは小さくなくても、上述の k のカテゴリが変わらない限り、平均被害率には大きな影響を与えないことになる。著者らはこれに対する検討を行ったところ、式 (6)、(7) を用いることにより式 (4)、(5) を用いた場合よりも震度のカテゴリが変わるのは、名古屋市の総メッシュ 297 個に対してわずか 19 個のメッシュであった。これを被害個数で算定すると、後述する管種、管径を考慮した場合において名古屋市全体でわずか 4.4 個増すに過ぎない。したがって実用上の問題では、ここで大きな不安全側の考察をしたことにはならない。以上の理由により、ここでは速度から求めた震度 k を使用して名古屋市の各メッシュの震度を決めた。図-11 に式 (4)、(5) で求めた名古屋市の推定震度分布を示す。

5. 地震時における名古屋市水道管の被害予測

被害予測の対象としたところは図-2 に示した太線区域内であり、メッシュの総数は約 300 であった。数量化理論による結果を名古屋市に適用するためには東京市の被害分析に用いた要因と同じ要因について調査し、各メッシュのそれぞれの要因のもつカテゴリスコアの和に前述した平均スコア 0.2838 を加えれば各メッシュの水道管の管体の推定平均被害率が求まる。また、この推定平均被害率に各メッシュの水道管の布設延長を乗じる

ことによって各メッシュの管体の推定被害個数を求めることができる。そのため筆者らは 4. で述べた震度以外の地盤に関する要因についても、名古屋市の地盤、地形に関する資料^{25), 26)} を詳細に調べた。さらに予測対象地区内に布設されている水道管の管種、管径別の布設延長を縮尺 1/1 000 の配水管図 2 500 枚を用いて入念に測定した²⁷⁾。

(1) 名古屋市水道管布設現況²⁷⁾

測定した水道管の管種は高級铸铁管、ダクタイル铸铁管、石綿セメント管ならびに鋼管の 4 種類で管径は 75 mm 以上のものである。対象地区内の水道管の布設総延長は約 3 400 km であった。これを管種別にみると高級铸铁管が約 2 000 km (58.8%)、ダクタイル铸铁管が約 1 200 km (35.3%)、石綿セメント管が約 180 km (5.3%)、鋼管が約 20 km (0.6%) であった。管径別では ϕ 400 mm 未満の管が全体の 84% を占め、残りが ϕ 400 mm 以上の管であった。管種別の布設時期は普通铸铁管が昭和 7 年以前であり、その後昭和 33 年までは高級铸铁管が用いられた。ダクタイル铸铁管は昭和 34 年以降現在も使用されている。石綿セメント管は昭和

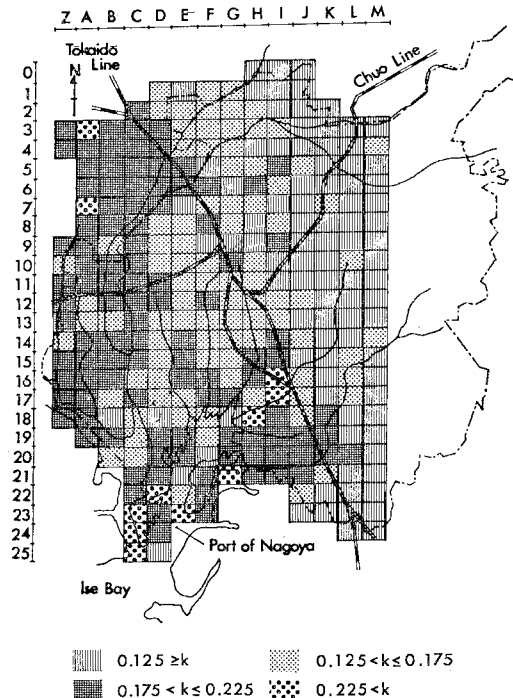


図-11 東海地震を想定した場合の名古屋市の推定震度分布

37年以前に布設された。鋼管は現在も使用されているが布設開始時期は不明であった。

(2) 管体の被害個数の算定

各メッシュで予想される管体の被害個数を図-12に示す。図中で*印を付したメッシュは水道管(φ75mm以上のもの)が埋設されていないメッシュである。被害個数の合計は588.2個で名古屋市全体の平均被害率は0.17個/kmである。東京市の被害分析によって得た分析モデルを予測モデルとして用いる場合、その妥当性を調べる1つの方法として両モデルで求められた平均スコアを比較する方法がある。すなわち予測モデルの平均スコアが分析モデルの平均スコアに近づくほど予測モデルの適合性が大であるといわれている。東京市の平均スコアは前述したように0.284であり、これに対して名古屋市の平均スコアは0.275であった。ここに平均スコアと前述した名古屋市の平均被害率0.17を混同してはならない。前者は各メッシュの平均被害率の総和をメッシュ数で除したもので、後者は総被害個数を総布設延長で除した値である。このように名古屋市と東京市の平均スコアは大差のない値を示した。この程度の差ならば予測モデルとして用いても実用上問題は無いと考えられる。

図-12に示した被害個数は東京市の分析結果を適用したため、管種、管径の違いによる被害の重みは考慮されていない。すなわち、管種はすべて普通鑄鉄管として取り扱い、管径は75mm以上400mm未満とした場合のものである。過去の地震による水道管被害から管種の違いによる被害の差を関連づけられるものは1978年の宮城県沖地震の際の仙台市の被害のみであった。したがって筆者らは管種の違いによる被害の重みをつけるために仙台市の水道管の管体被害(管径75mm以上400mm未満の管)を整理した²⁸⁾。表-4に仙台市の水道管の管種別の布設延長、管体の被害個数、平均被害率ならびに被害の重み係数を示す。表-4に示した重み係数は高級鑄鉄管の平均被害率に対する他の管種の平均被害率の比である。普通鑄鉄管に対する高級鑄鉄管の重み係数については適切なデータがない。それゆえ、両者の引張強さ、曲げ強さ、ならびに継手の違いから判断して、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。そして、普通鑄鉄管に対する他の管種の重み係数は表-4に示した重み係数に上述の0.8を乗じて以下のように決めた。

- 高級鑄鉄管: 0.8
- ダクタイル鑄鉄管: 0.34
- 石綿セメント管: 4.0

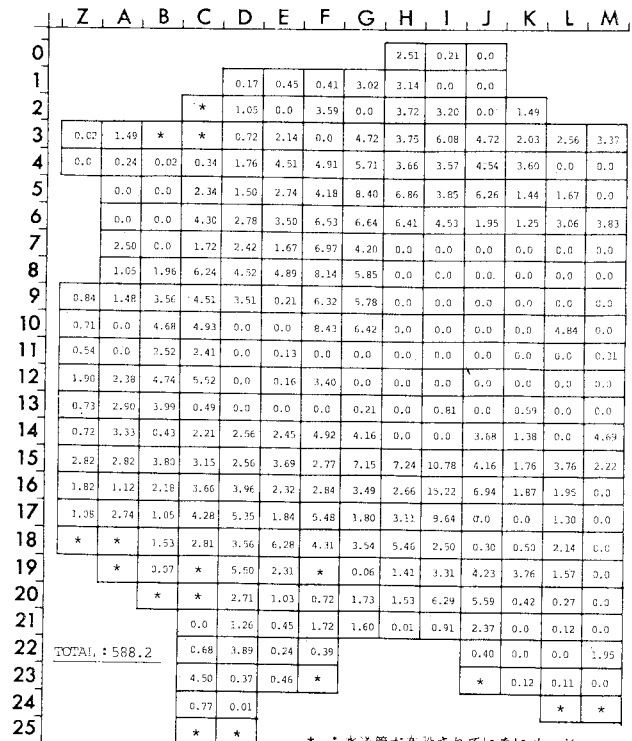
鋼管: 0.18

管種についてはこの係数を用いて推定被害個数を補正した。なお、表-4に示した石綿セメント管に関する被害については仙台市北部の新興団地造成地区における資料は除いた。この理由は、①この地区は民間業者が水道を作ったため安価な石綿セメント管の占める割合が多く、この管の被害が集中していること、②管の被害には盛土の崩壊が原因となった二次的な被害が含まれていること、③名古屋市ではこれと類似した地区がないことなどによる。管径の大小による被害の重みは関東地震による東京市の被害結果を用いた。東京市において、管径400mm以上の管の被害率と400mm未満の管の被害率との比をとると後者を1.0とした場合、前者は0.7であった。それゆえ、管径に対する重み係数はすべての管種において400mm未満1.0に対して、400mm以

表-4 宮城県沖地震(1978)による仙台市の水道管の管体被害

管種	高級鑄鉄管	ダクタイル鑄鉄管	石綿セメント管	鋼管
布設延長(km)	235.8	275.6	46.1	56.8
被害個数	18	9	18	1
平均被害率(個/km)	0.076	0.033	0.39	0.018
重み係数	1.0	0.43	5.1	0.23

(管径75mm以上400mm未満)



* : 水道管が布設されていないメッシュ

図-12 すべてを普通鑄鉄管として考えた場合の名古屋市の各メッシュにおける水道管の被害個数(東海地震想定時)

表-5 管種、管径の違いによる水道管の被害個数の補正

管種	管径 (mm)	補正後の被害個数 "a _i "
高級 鋳鉄管	400 未満	$a_1 = M \times (L_i/L) \times 0.8 \times 1.0$
	400 以上	$a_2 = M \times (L_i/L) \times 0.8 \times 0.7$
ダクタイル鋳鉄管	400 未満	$a_3 = M \times (L_i/L) \times 0.34 \times 1.0$
	400 以上	$a_4 = M \times (L_i/L) \times 0.34 \times 0.7$
石棉セメント管	400 未満	$a_5 = M \times (L_i/L) \times 4.0 \times 1.0$
	400 以上	$a_6 = M \times (L_i/L) \times 4.0 \times 0.7$
鋼管	400 未満	$a_7 = M \times (L_i/L) \times 0.18 \times 1.0$
	400 以上	$a_8 = M \times (L_i/L) \times 0.18 \times 0.7$

M: 普通鋳鉄管として求めた各メッシュの被害個数

上を 0.7 とした。

管種、管径を考慮した被害個数は表-5 に示したようにして算定した。表-5 に示す M は普通鋳鉄管として求めた各メッシュの推定被害個数、L は各メッシュの水道管の布設延長、L_i は各メッシュにおける管種、管径別の布設延長であり $L = \sum L_i$ である。また a_i は管種、管径別に分けた推定被害個数であり、 $\sum a_i$ が管種、管径を考慮して求めた各メッシュの推定被害個数である。このようにして算定した名古屋市の各メッシュの推定被害個数を図-13 に示す。被害個数の合計は 495.2 個で名古屋市全体の平均被害率は 0.146 個/km である。表-6 は地震時における名古屋市水道管の管種、管径別の管

表-6 管種、管径別の名古屋市の水道管の推定被害個数および推定平均被害率 (東海地震想定時)

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)
高級鋳鉄管	400 未満	1801.5	228.3	0.127
	400 以上	188.5	18.1	0.096
ダクタイル鋳鉄管	400 未満	874.1	54.3	0.062
	400 以上	335.5	14.4	0.043
石棉セメント管	400 未満	184.1	179.3	0.974
	400 以上	0.0	0.0	0.0
鋼管	400 未満	3.8	0.2	0.053
	400 以上	12.4	0.6	0.048
計		3999.9	495.2	

名古屋市全体の推定平均被害率: 0.146 個/km

体の推定被害個数ならびに推定平均被害率を示す。

(3) 被害の危険度分布

図-13 に示した各メッシュの推定被害個数をそれぞれのメッシュの水道管の布設延長で除し、各メッシュごとの推定平均被害率を求めた。さらに、このメッシュごとの推定平均被害率を名古屋市全体の推定平均被害率 (0.146 個/km) で除し、得られた平均被害率の比 R_d の大きさで被害の危険度を次に示す 5 段階に分けた。

危険度 I: 被害は小さい (R_d < 0.5 のメッシュ)

危険度 II: 被害は平均的である (0.5 ≤ R_d < 1.5 のメッシュ)

危険度 III: 被害はやや大きい (1.5 ≤ R_d < 2.5 のメッシュ)

危険度 IV: 被害は大きい (2.5 ≤ R_d < 3.5 のメッシュ)

危険度 V: 被害は非常に大きい (R_d ≥ 3.5 のメッシュ)

上記の分類に従って、地震時における名古屋市水道管の管体被害の危険度分布を示したものが図-14 である。この図からわかるように危険度 IV、V の地区は新川、庄内川などの河川流域地区や名古屋港の臨海部である。この地区は軟弱な沖積層でおおわれており、南へ行くに従って沖積層が厚く堆積している。また名古屋市の液状化の予想調査²⁹⁾によれば、名古屋市の南部の河川沿いの地区や名古屋港付近の地区で液状化の危険性が大であると報告されている。これに対して、危険度 I と判定された名古屋市の東部は洪積層あるいは第 3 紀層でおおわれた地盤の良好な地区である。

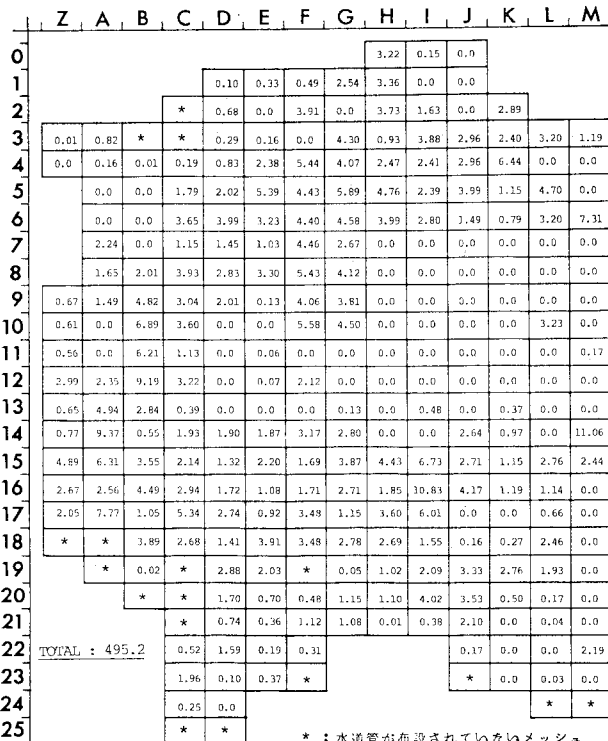
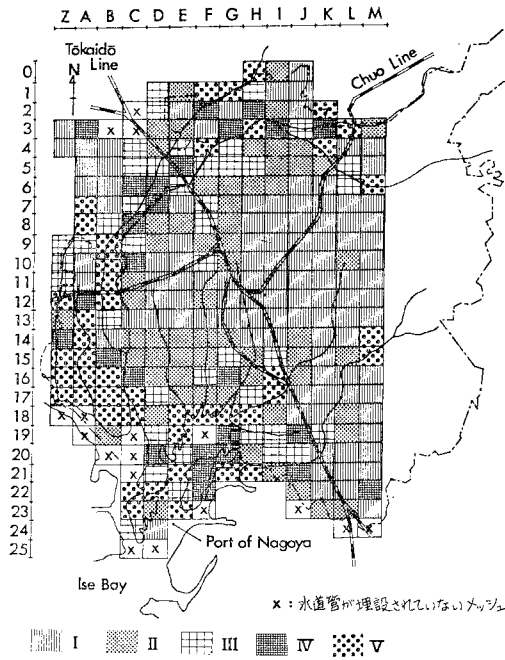


図-13 管種、管径を考慮した場合の名古屋市の各メッシュにおける水道管の被害個数 (東海地震想定時)

6. 結 語

地震時における水道管の被害分析の結果、定量



図一四 東海地震を想定した場合の名古屋市の水道管の危険度分布

的な被害予測のための1つのモデルを確立することができた。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、地震時における水道管の管体被害の危険度分布を示した。このような被害の予測に対する研究は、地震時にパイプラインを破壊から守る耐震設計の重点をどの地区におくかに役立つ。また、ネットワークを形成している一連の送水機能を維持するために当初に膨大な費用をかけずに、地震時に送水機能に異状があったときにどのような合理的の処置をとるかを考えるうえでも役立つものと考えられる。この研究で得られた結果を以下に要約して示す。

(1) 過去の地震による水道施設の被害調査の結果、多くの都市において浄水、配水施設等の主要構造物の被害は軽微であったが管路は大きな被害を受けた。それゆえ、将来の地震に対して地震時の水道管の管体被害の予測を試みるために、関東地震による東京市の水道管の管体被害を7つの要因を用いて数量化理論Ⅰ類によって分析した。その結果、分析モデルの精度を表わす重相関係数は0.808であった。著者らはこのモデルを用いて、地震時における名古屋市の水道管被害の危険度分布を示した。

(2) 水道管の被害分析に用いた要因を被害に与える影響度の大きいものから列挙すると、① 震度、② 地形、③ 水道管の布設延長、④ 沖積層厚、⑤ 地盤種別、⑥ 深さ5mまでの土の種類、⑦ 深さ5mまでの平均N値の順になる。各要因のレンジの大きさから判断す

ると、地震時の水道管の被害には震度が特に大きく影響し、このレンジは0.7409であった。次に影響度の大きな要因は地形であり、このレンジは0.4056であった。この要因には液状化の発生の可能性が考慮されている。第3番目に影響度の大きな要因は布設延長であり、このレンジは0.3747であった。

(3) 被害に与える影響度の大きい要因について吟味すると、震度については震度が0.225を超えると急激に被害が増加することを示している。地形については河川流域でかつ埋立地という場所で最も被害が大きく、ついで河川流域、埋立地の順になり、両者とも被害を増加させる方向に働いている。また、1メッシュ当りの水道管の布設延長は延長距離が長いほど被害を減少させる傾向を示している。

(4) 十勝沖地震(1968)の際、八戸港で記録した地震波形を用いて東海地震を想定し名古屋市の地盤応答解析を行った。その結果、名古屋市で予想される地表最大加速度 α_{max} は300gal以下であり、地盤が良好なほど α_{max} は増大する傾向を示した。

(5) 東京市で決定された関東地震による震度と同じ意味の震度を名古屋市が東海地震で受けるためには、どのように震度を見積るかを式(4)、(5)で示した。これには応答計算から求めた地表最大加速度と地盤の固有振動数が必要である。

(6) 東京市の被害分析によって得た分析モデルを予測モデルとして用いる場合の適合性を知るために両モデルで得られた平均スコアを比較した。その結果、分析モデルの平均スコアは0.284で、予測モデルの平均スコアは0.275となり、両者の平均スコアは大差のない値を示した。

(7) 東京市の被害分析から得られた予測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管体被害を、被害が小さい危険度Ⅰから被害が非常に大きい危険度Ⅴまで5段階に分けた。そして、水道管被害の相対的な危険度分布を示した。その結果、河川流域地区や臨海部では危険度Ⅳ、Ⅴと判定されるところが多く、洪積層や第3紀層でおおわれた地盤が良好な地区ではほとんどが危険度Ⅰであった。

以上のように、地震による水道管の被害分析を精度よく行い、その結果を利用して、名古屋市が東海地震に襲われたときに、どの地区の水道管が大きな被害を受けるかを明確にさせ、予想される東海地震に対応できるようにさせた。ここで求めた被害の予測モデルは関東地震による東京市の被害に基づくといっても、他の都市の地震による被害が明確にされない限り、このモデルを使用せざるを得ない。また、この一連の研究ではSHAKEというプログラムを使用して東海地震による名古屋市の地

表最大加速度と固有振動数，ならびに関東地震による東京市の地表最大加速度と固有振動数をそれぞれ算定し，後者の結果を用いて東京市のいわゆる震度と地表最大加速度の関連をつけることができた．このような成果も耐震工学上，益するところが大きい．

以上の計算は中部工業大学計算機センター FACOM-M160 AD と名古屋大学大型計算機センター FACOM-M200 によった．

最後に応答計算のためにお世話になった運輸省第5港湾建設局ならびに貴重な資料を提供していただいた名古屋市水道局の関係各位に厚く感謝の意を表す．

参 考 文 献

- 1) 土木学会：大正 12 年関東大地震震害調査報告書，第 2 巻，pp. 1~284, 1927.
- 2) 土木学会新潟震災調査委員会編：昭和 39 年新潟地震震害調査報告，pp. 659~739, 1966.
- 3) 1968 年十勝沖地震調査委員会：1968 年十勝沖地震調査報告，pp. 553~578, 1969.
- 4) 佐藤敦久：上水道施設の被害，1978 年宮城県沖地震による被害の総合的調査研究，昭和 53 年度文部省科学研究費自然災害特別研究 (1)，pp. 175~183, 1979.
- 5) 岸野佑次・浅野照雄：ガス製造・供給施設の被害，1978 年宮城県沖地震による被害の総合的調査研究，昭和 53 年度文部省科学研究費自然災害特別研究 (1)，pp. 193~199, 1979.
- 6) 久保慶三郎・片山恒雄：地下埋設水道管の震害予測，川崎市の震災予防に関する調査研究報告書，川崎市防災会議地震専門部会，pp. 103~144, 1975.
- 7) Kubo, K., T. Katayama and A. Ohashi: Present state of lifeline earthquake engineering in Japan, The current state of knowledge of lifeline earthquake engineering, ASCE, pp. 118~133, 1977.
- 8) 久保慶三郎・片山恒雄：地下埋設管の被害，東京区部における地震想定に関する報告書，東京都防災会議，pp. 229~247, 1978.
- 9) Whitman, R.V. and K.H. Hein: Damage probability for a water distribution system, The current state of knowledge of lifeline earthquake engineering, ASCE, pp. 410~423, 1977.
- 10) Matsuo, M. and T. Horiuchi: Earthquake damage and methodology of design of small diameter pipelines, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 1, pp. 23~38, 1979.
- 11) 市原松平：水道施設と震害，昭和 54 年度第 2 回水道技術講習会テキスト，日本水道協会中部地方支部，pp. 1~22, 1980.
- 12) Ichihara, M. and K. Yamada: Earthquake damage prediction for water-supply pipes, The journal of natural disaster science, Vol. 1, No. 2, pp. 57~80, 1979.
- 13) 震災予防調査会編：震災予防調査会報告，第 100 号，甲，関東大地震調査報文，地震編，pp. 21~66, 1926.
- 14) 東京市役所：東京市史稿，上水道編附図，1923.
- 15) 東京都水道局：東京都水道史，pp. 161~166, 1952.
- 16) 東京地盤研究会：東京地盤図，技報堂，1959.
- 17) 東京都土木技術研究所編：東京都の地盤 (I)，技報堂，1977.
- 18) 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，pp. 177~225, 1977.
- 19) 松本嘉司：土木解析法 (1)，技報堂，pp. 308~314, 1973.
- 20) 安田三郎・海野道郎：社会統計学，丸善，pp. 16~56, 1977.
- 21) Schnabel, P.B., J. Lysmer and H.B. Seed: SHAKE-A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Earthquake engineering research center, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972.
- 22) 市原松平・山田公夫：想定地震による名古屋市沖積地盤の応答解析，第 14 回土質工学研究発表会講演集，pp. 1257~1260, 1979.
- 23) 石橋克彦：東海地方に予想される大地震の再検討，地震学会秋季大会講演予稿集，1976.
- 24) 金森博雄・安藤雅孝：関東地震の断層モデル，関東大地震 50 周年論文集，pp. 89~101, 1973.
- 25) 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編著：名古屋地盤図，コロナ社，1969.
- 26) 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.
- 27) 市原松平・山田公夫：地震時における名古屋市の水道管の被害調査 (その 2)，名古屋市防災会議，1980.
- 28) 仙台市水道局：1978 年宮城県沖地震による被害とその対策の記録，1978.
- 29) 市原松平・松沢 宏：地震時における擁壁の崩壊と地盤の液状化の予測に関する調査報告書，名古屋市防災会議地震対策専門委員会，pp. 1~43, 1975.

(1980.5.19・受付)