

水道管路の震害予測

士 岐 憲 三

ESTIMATION OF SEISMIC DAMAGE OF WATER SYSTEM

By *Kenzo* TOKI

Synopsis

It has been said that the damage of subsurface pipe system is governed by the surface acceleration and the damage of such facilities were estimated through the estimation of acceleration amplitude during earthquakes. In this study, then, the correlations between the damage index and the intensity of ground motion are examined to find the result that the damage is governed by the ground velocity rather than acceleration amplitude.

The velocity response is determined from the average response spectra which were calculated from 277 components of the past strong motion accelerograms. The distributions of response amplitude and the physical properties of the ground around the averages are taken into account in the response analyses.

The damage potential of water system in Osaka is estimated by applying the regression formula between the damage index and the velocity amplitude.

1. ま え が き

地下に埋設された管路は地震による被害を受けやすい施設であることは広く知られている。埋設管路には上下水道、ガス、石油などの流体を輸送する目的のものと、沈埋トンネルや地下鉄道などの交通施設とがあるが、後者は敷設されている場所が限られていることと築造年代が新しいことから、過去の大地震により壊滅的な被害を受けた例は無い。また、ガスや石油などの液体燃料を輸送する目的の管路もその歴史が浅いことから大きな被害を受けた例は少ないが、類似の施設である上水道の管路は過去の大地震のたびに被害を生じている。石油やガスのパイプラインは水道のそれとは構造的には異なる点もあるが、管路のネットワーク、管径で代表される規模、埋設深さ等においてはほぼ同様の特性を持つこと、ならびにそれらが燃料の輸送を目的とした施設であることから生じる2次災害の源となることを考え合わせれば、これらの施設の震災対策は現今の都市防災において極めて重要な問題であることが明らかである。

上水道施設、特に配・給水管路は過去の震害例にも明らかのように地震による被害を受けやすい施設であり、大地震に見舞われた場合にはその給水機能はほぼ完全に停止するものと考えねばならない。水は生命維持の根源でもあることから、震災時といえどもこれを欠くことができないが、今日の京浜・阪神などの大都市圏域においては飲料水供給源としての井戸が皆無に近いことや震災時における交通路の遮断のため給水車による給水の困難等を勘案すれば、施設の耐震化と同時に給水機能の早期回復のための処置を講じておくことも都市防災計画立案のための必須事項であることがわかる。

導水路や送水管路、あるいは新設の配水管路においては特別な処置を講ずることによりその耐震化を計ることでも可能であろうが、配・給水管の大半は大地震に際しては激甚な被害を免がれ得ないことは過去の例が示すとおりであり、これらに対しては速やかな復旧計画の策定が最も有効な震災対策であろう。このような計画の立案のためには大都市圏の場合にはある地域ごとの被害発生程度の相異を明確にしておき、その程度に応じた復旧資材や人員の配置計画などを立てる必要が生じることから、都市市内での被害予測とその分布を

知ることが計画立案の第1歩でもある。

以上のような観点から、本研究では大阪市域を対象として、我国における過去の地震による地動に関する資料に対して統計的処理を行って、水道管路における震害の発生の可能性を確率的見地から検討したものである。

2. 大阪市における地動強度の予測

2.1 基盤地震動の想定

各地の都市で行われる地震防災対策のための地盤地震動の予測はおおむね Fig. 1 のような手順で行われることが多い。すなわち、当該都市において想定すべき地震は、過去の地震に関する統計資料から決定され、一般にはマグニチュードと震央距離とが与えられる。一方、過去の多くの地震により各地での加速度の観測値が得られており、これは震央からの距離に逆比例することが知られている。すなわち、これらのデータに

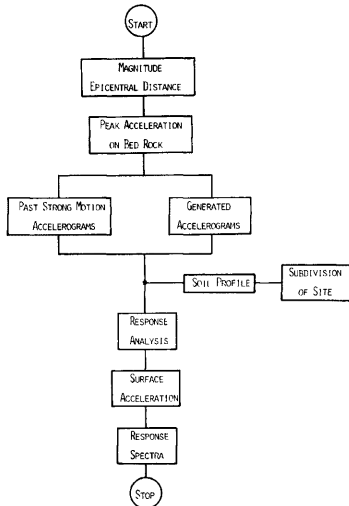


Fig. 1. Procedure for estimating the seismic ground motion

統計処理を施すことによりマグニチュード M と震央距離 d とから加速度振幅を定める関係式が得られているが、加速度振幅の観測値のばらつきは非常に大きく、回帰分析によって得られる関係式のまわりでの変動は極めて大きい。したがって、 M と d とから回帰曲線によって定まる加速度振幅より大きな加速度を伴う地震の発生する可能性は高い。すなわち、地震防災計画の策定に際しては地震による地動のこのような変動を考慮する必要がある。そこで本研究においては、後述のような地動強度のばらつきを考慮した解析を行った。

Fig. 1 で表わせるような従来の地震防災計画の策定においては、地震動の想定の際の段階として地震波形の選定を行っている。これは過去の強震に伴う記録波形を用いたり、当該地域の震動特性を考慮して人為的に合成した波形を用いる場合もあるが、これらの波形に対する地盤モデルの応答計算を行い、これから当該地点での地動強度を推定している。しかしながら、地盤の応答は同一地盤であっても入力波形によって大きく左右される場合があり、さらに、将来において地震が発生しても想定したような波形が再現される可能性は低い。これらの事を勘案すれば、予測問題としての地震防災計画等においては特定の波形を選定して行う応答解析結果に基づいて地動強度の推定を行うことの必然性は低いと考えられる。

以上のような検討により、本研究においては地動強度の推定に際しては応答スペクトルの概念を導入することにより波形の影響の及ぶことを避け、また対象とする応答スペクトルは過去の多数の強震記録波形から算定したスペクトルに対して数量化理論を施すことによって得られたものを用いることにより平均値のみならず平均値からの変動も考慮した。

建設省土木研究所による新耐震設計法¹⁾に所載の応答スペクトルは数量化理論に基づいて作成されたものであり、震央距離とマグニチュードとのいくつかの組合せに対して算定されている。そこで、本研究では遠距離地震、中距離地震ならびに近距離地震として次の組合せのものを採用した。

遠距離地震 ($K=1$): $7.5 \leq M \leq 7.9$, $120 \text{ km} \leq d < 200 \text{ km}$

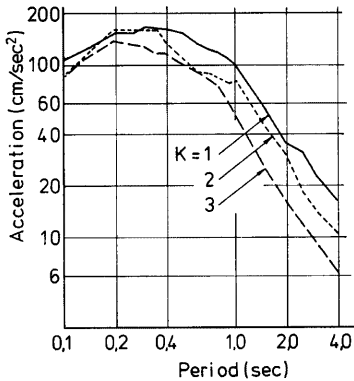


Fig. 2. Acceleration response spectra for long, medium and short distant earthquakes

中距離地震 ($K=2$): $6.8 \leq M \leq 7.5$, $60 \text{ km} \leq d < 120 \text{ km}$

近距離地震 ($K=3$): $6.1 \leq M \leq 6.8$, $20 \text{ km} \leq d < 60 \text{ km}$

また、地震入力基盤としては後述のように洪積層を考慮することから、これに相当する第2種地盤²⁾に対するスペクトル曲線を用いた。これらの加速度応答スペクトルを Fig. 2 に示す。また、Fig. 3 の速度応答の算出に際しては Fig. 2 のスペクトル曲線に $T/2\pi$ を乗じたものを用いた。

Fig. 2 と Fig. 3 のスペクトル曲線はいずれも数量化理論によって得られた推定値であり、推定値 S_A に対する原波形によるスペクトル値 S_A の比の度数分布³⁾を示したのが Fig. 4 である。この図から、推定値のまわりではほぼ対数正規分布に近い分布をしていることがわかる。このような度数分布の形状は他の周期についてもほぼ同様であることから、本研究においては対象とした応答スペクトル値を平均値として、そのまわりでのばらつきは固有周期には無関係に変動係数が0.5であるような対数正規分布であるとした。

2.2 地盤モデルの設定

Fig. 1 に示した地震防災計画の策定における従来の方法では対象とする都市を500m 正方のメッシュにより区分し、各区分ごとに地盤図や地質調査図に基づいて成層地盤モデルを作成し、これをせん断ばり型の振動系と考えてその底部に入力波形を働かせて応答解析を行うことが多い。しかしながら、ここにはいくつかの問題点がある。すなわち、地盤モデルにおいては一般には横波速度もしくはせん断弾性係数によりその力学特性を表現するが、1つのメッシュ内においてはその全域で横波速度が一定と考えることが多い。しかしながら、実際の地盤では500m も離れば地盤の構成や特性が大きく変動する場合もあると考えねばならない。

一方、地盤の力学特性が対象とする都市のすべてのメッシュに対して詳細に決定されることは稀であり、沖積層や洪積層などの大まかな地質区分に従ってその代表的な横波速度を付与することが多く行われる。しかるに、沖積層であると判断される地質であってもその力学特性は大きく変動することが知られている。したがって場所によっては平均的な横波速度の値からずれた値を持つ場合を無視することはできず、1つの

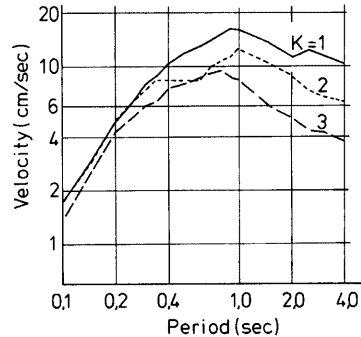


Fig. 3. Velocity response spectra for long, medium and short distant earthquakes

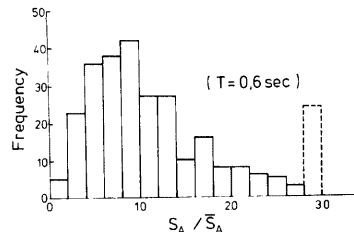


Fig. 4. Distribution of the ratio of the observed peak acceleration to the average value

メッシュでの横波速度を特定の確定値で表わすのは適当でない。

以上のような観点から、本研究においては地盤の横波速度を1つの確率変数であると考え、地盤の土質区分ごとに一定の平均値と標準偏差を持つ特定の分布に従うものとした。この場合、基盤としては下部大阪層部の上面をとり、その上の上部大阪層群を洪積地盤、さらにその上に沖積地盤が載っている2層地盤系を対象とし、沖積、洪積の両地盤とも卓越する土質によって粘性系と砂質系とに分けた。

各地盤の厚さは大阪地盤図⁵⁾から各メッシュでの平均的な層厚を判断し、これを同一メッシュ内では一定とした。また、密度の変動は横波速度のそれに比較して小さいものと考え、構成土質ごとに一定値とした。対象とした地盤モデルの概要図を示したのが Fig. 5 である。

2.3 横波速度の設定

横波速度を確率変数とするときには、その分布を決定しなければならないが、各メッシュの振動特性は沖積層と洪積層の横波速度が関与することから、両地盤での横波速度の相関関係が明らかにされていなければならない。そこで、沖積層と洪積層の両者を同時に含むような深い PS 検層図から両者の対応関係を調べたのが Fig. 6 である。

これは大阪市内の10箇所での PS 検層の結果による横波速度の深さ方向の分布図において、横波速度の出現する層厚を重みとする平均値を算出して、それぞれの地点ごとに沖積層と洪積層の対応関係を示したのが●印である。また同時に標準偏差をも算出し、その範囲を直線で結んだのが各●印を中心とする菱形図形である。この結果によれば、沖積層と洪積層の横波速度はいずれもばらつきを示すとともに、相互の間に明確な相関関係は見い出せないことがわかる。このことから、沖積層と洪積層の横波速度は同一地点であっても互に無関係であって、独立な確率量として差し支えないことがわかる。

次に、上述の検討に供したのと同一の資料により、横波速度とその速度の地盤の厚さの累積厚さを示したのが Fig. 7 である。したがって、この図は層厚を重みとする横波速度の頻度分布を表すものと考えてよいが、沖積層、洪積層のいずれもほぼ正規分布に近い分布をしていることがわかる。資料数も少ないことから、厳密な検定は行えないが、本研究では第1近似として正規分布に従うものとした。また、各地盤の土質区分ごとの横波速度の平均値と標準偏差とは Table 1 に示した大阪地盤に関する測定値⁵⁾を用いた。

2.4 解析方法

当該地域における地動強度の算定方法を、その順に従って述べる。

- 1) 各メッシュでの沖積層厚 H_1 、上部大阪層群の厚さ H_2 を大阪地盤図により定める。
- 2) 各地盤を粘性土と砂質土とに区分する。

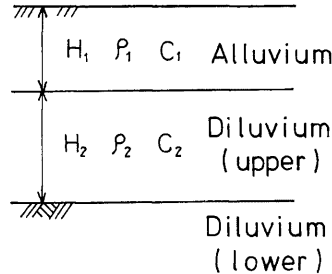


Fig. 5. Surface ground model.

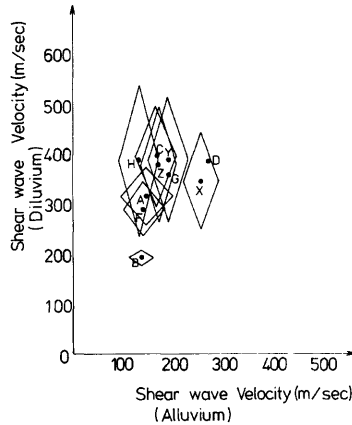


Fig. 6. Relationship of shear wave velocity of diluvium and alluvium

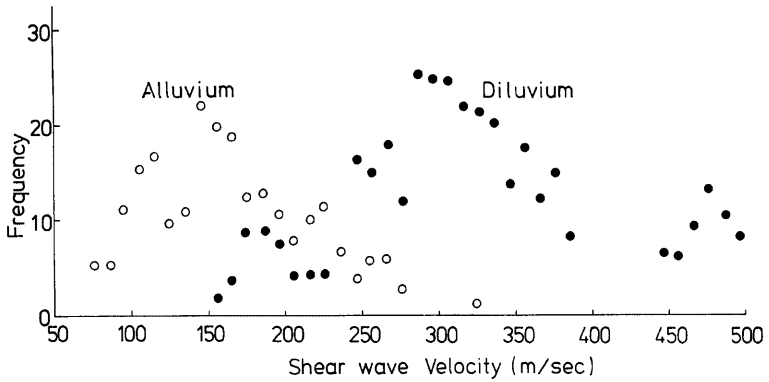


Fig. 7. Frequency distribution of shear wave velocity.

Table 1. Shear wave velocity (m/sec)

	Soil	Average	Standard deviation
Alluvium	Clay	150	55
	Sand	165	45
Diluvium	Clay	345	90
	Sand	450	55

- 3) 地盤種別ごとに土の密度 ρ_1, ρ_2 を定める。
- 4) 土質区分に従って横波速度の平均値と標準偏差とを **Table 1** の値に従って付与する。
以上の作業をすべてのメッシュに対して行う。続いて、各メッシュごとに以下のような解析を行う。
- 5) 沖積層、洪積層ごとに横波速度の上、下限を設定し、その中間をいくつかの区間Nに分けて横波速度の値を離散化する。
- 6) 横波速度の平均値と標準偏差に従って、離散化した横波速度ごとの出現確率を定める。これを沖積層と洪積層の両者に対して行い、両者の横波速度がある組み合わせになる確率を、それぞれの横波速度の出現確率の積として求める。
- 7) 沖積層での離散化した横波速度の第 i 番目の速度を $C_1(i)$ 、洪積層での第 j 番目の離散速度を $C_2(j)$ とし、その組合せに対応する出現確率を P_{ij} とする。このとき、地盤のせん断振動の1次及び2次の固有周期 $T_1(ij), T_2(ij)$ は次式の解として得られる。

$$\tan\left(\frac{2\pi H_1}{C_1 T}\right) \tan\left(\frac{2\pi H_2}{C_2 T}\right) = \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} \dots\dots\dots (1)$$

- 8) 応答スペクトル図から、対応する固有周期 $T_1(ij), T_2(ij)$ ごとに応答値 $S_1(ij), S_2(ij)$ を求める。これらから、平均応答値 $S_M(ij)$ を次式により定める。

$$S_M(ij) = \left[\sum_{l=1}^2 \{S_l(ij)\}^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

- 9) 最大応答値 X は中央値が $S_M(ij)$ であり、変動係数 θ が0.5である対数正規分布に従うものと考え、 X の確率密度関数 $P(X)$ を次式により算定する。

$$P(X) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{P_{ij}}{\sqrt{2\pi} \zeta x} \exp \left[-\frac{\{\ln x - \ln S_M(ij)\}^2}{2\zeta^2} \right] \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 $\zeta^2 = \ln(1 + \delta^2) = 0.22$ である。

10) $P(X)$ を離散積分することによって、最大応答値 X の確率分布関数 $P_{max}(X)$ が定まる。

11) 上述の 5)～10) の操作をすべてのメッシュに対して行う。

2.5 計算結果

前項の解析には多大の数値計算を必要とすることから、5)～10)の処理はすべて電子計算機によった。得られた結果のうちから、地動強度の平面分布を表わしたものの例が Fig. 8～Fig. 15 である。Fig. 8～Fig. 11

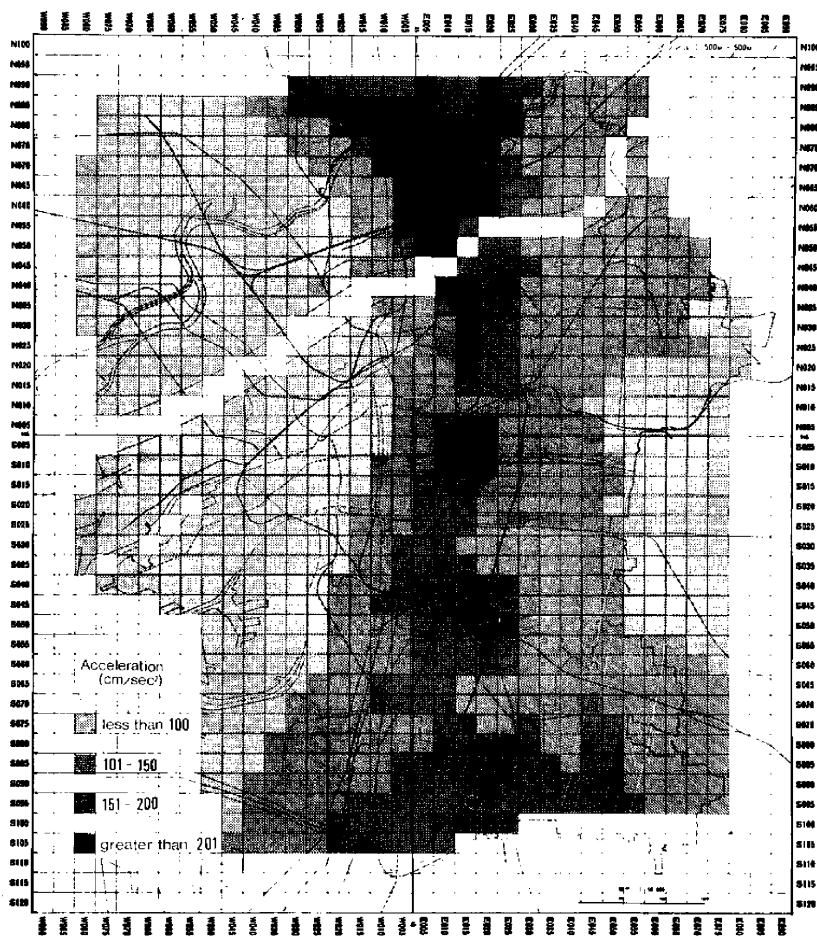


Fig. 8. Acceleration distribution on ground surface for long distant earthquake (Exceeding probability: 0.5).

は遠距離地震に対する場合であり、Fig. 12～Fig. 15 は近距離地震における結果である。また中央値は超過確率50%に相当する。

まず、Fig. 8 は遠地地震における加速度応答の中央値であるが、千里丘陵から上町合地にかけての地域において応答値が高く、およそ 200 gal 前後の値を示していることがわかる。Fig. 9 は同じ地震に対する超過確率が10%である応答加速度の結果であるが、全体的なパターンは中央値の場合とほぼ同様であり、その振幅だけが増えており、千里丘陵では約 350 gal に達していることがわかる。これに反し、臨海地域では応答値は低いが、沖積層はこの地域では合地に比較して厚いことから、応答加速度の振幅は沖積層厚に必ずしも比例しないことがわかる。

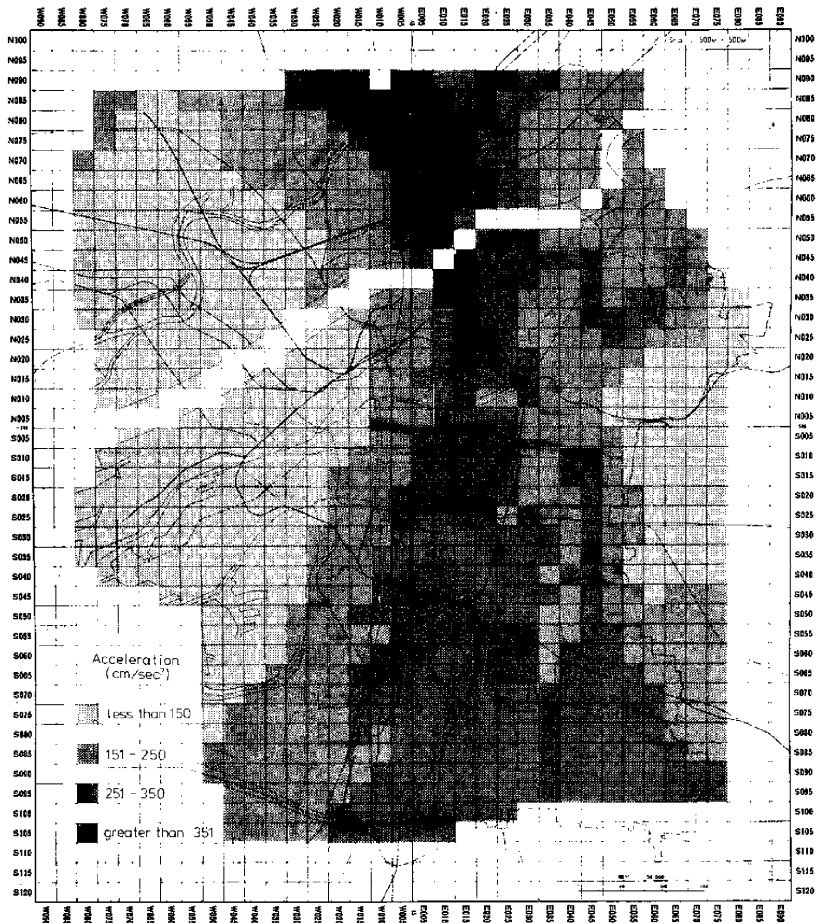


Fig. 9. Acceleration distribution on ground surface for long distant earthquake (Exceeding Probability: 0.1)

Fig. 12 は近地地震の場合の中央値の分布であり、千里丘陵の南端から上町合地にかけての地域で最も加速度振幅が高いことは遠地地震の場合と同様である。しかしながら、この場合には全体的にレベルが低くなっており、遠地地震との差は加速度振幅の低い所ほど強調される傾向が見られるが、これは解析に用いた応答スペクトル図の遠地地震に対するものと近地地震に対するものの差が現われたものである。すなわち、近地地震の場合には相対的に長周期成分が減少することに起因している。

Fig. 10 は遠地地震における応答速度の中央値、Fig. 11 は同じく超過確率が10%の場合の分布図を示したものである。Fig. 10 においては千里丘陵の南端部において最も応答値が低くなっており、加速度応答の場合と対照的である。この関係は Fig. 11 においても同様であるが、さらに顕著な相違は上町合地と臨海部と

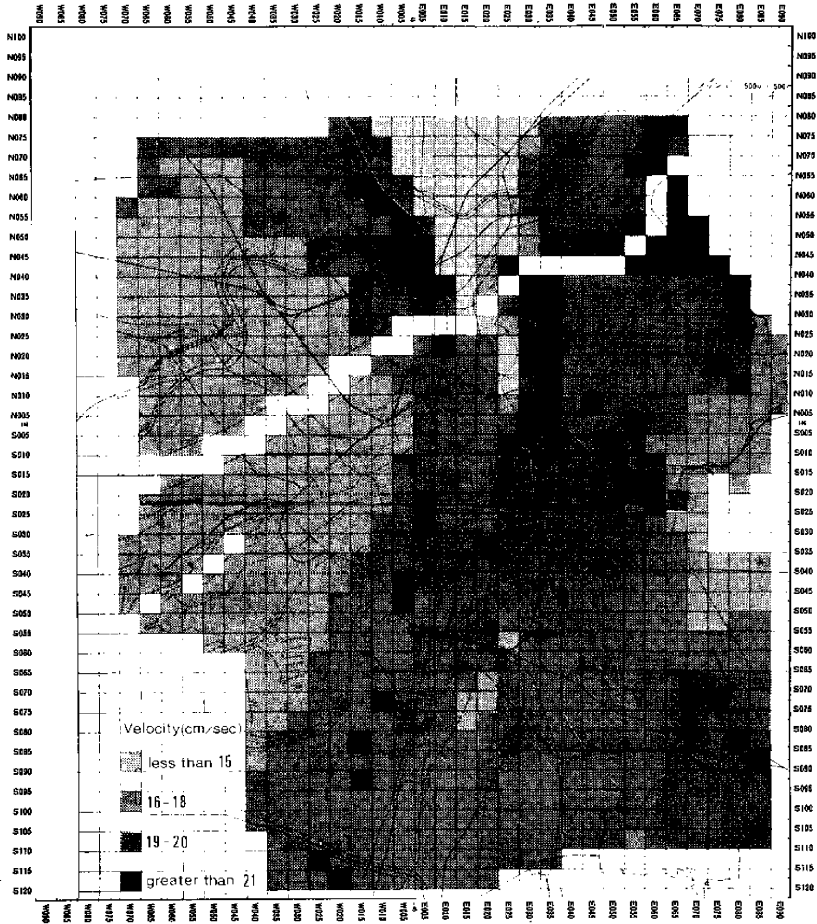


Fig. 10. Velocity distribution on ground surface for long distant earthquake
(Exceeding probability: 0.5)

の中間地帯において応答速度振幅が大きくなっていることである。この地域は Fig. 16 に明らかなごとく沖積層厚が約 5 m から 20 m 程度に急変するところであると同時に、上部洪積層厚も短い距離で 150 m から 250 m 位にまで変化する領域である。また、上町台地の東側も沖積層の厚さが 5 m から 20 m までのものが複雑に入りこんだ地域であり、上部洪積層も同様である。これらの結果から、速度応答振幅は地盤や地層の構成が急激に変化する地域において大きくなるのがわかる。

Fig. 14, 15 は近地地震に対するものであるが、中央値に対する Fig. 14 では地域による相対的な差が小さく、大きく 2 つの部分に分けられている。すなわち、速度振幅が 7 ~ 10 cm/sec の領域が狭く、11 ~ 12 cm/sec の部分と 7 cm/sec の部分が広い面積を占めている。一方、超過確率 10% に対応している Fig. 15 でも

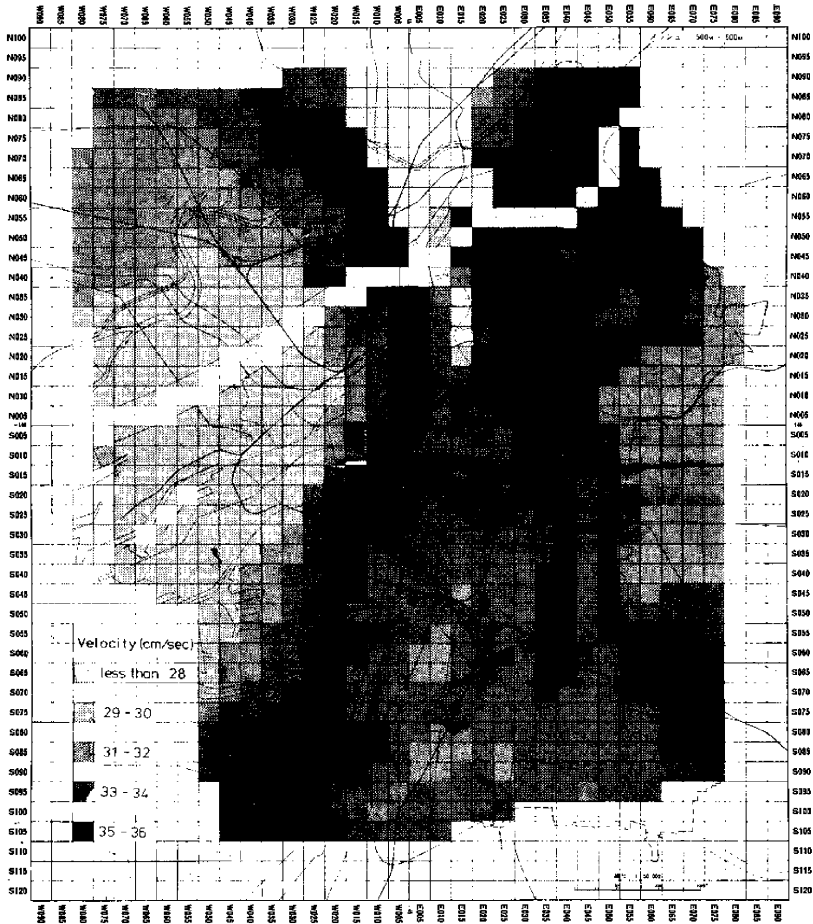


Fig. 11. Velocity distribution on ground surface for long distant earthquake (Exceeding probability: 0.1)

ほぼ同様な結果であるが、最小値が 7 cm/sec に対して最高値は 22 cm/sec と応答値の大きい部分と小さい部分との差が拡大されている。また、都島区付近での応答値が最大であるが、この付近は沖積層厚さが急変するところであり、これは遠地震の場合にも見られたとおりである。

Fig. 10, 11, 14, 15 に明らかなように、吹田市南部から、東淀川区の中央部を経て都島区に至る地域は加速度振幅が最も高い地域であるが、この付近は Fig. 16 に見るごとく沖積層厚は 10 m~30 m に達する地域である。一方、住之江、大正、港、此花、西淀川の各区でも沖積層厚は 20 m~30 m に達するが、加速度振幅は最も低い地域である。また、Fig. 13 の速度応答においては、吹田市南部から東淀川区西部に至る千里丘陵南端と上町台地はともにほぼ同程度の上部洪積層厚であるにもかかわらず、前者は最も速度振幅が低い地

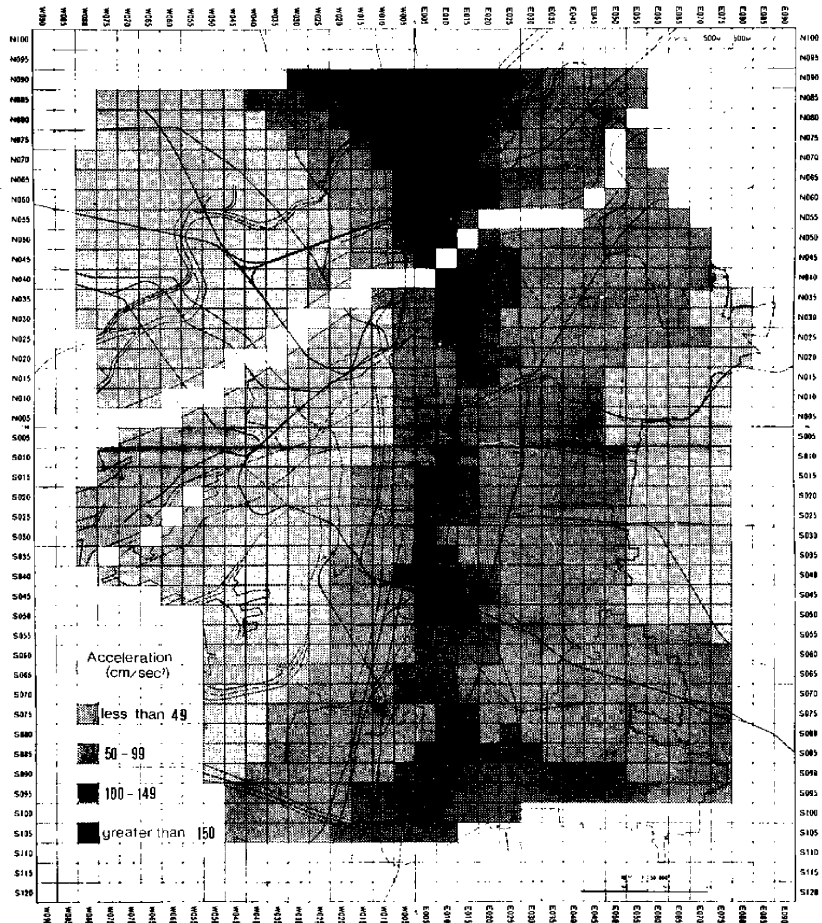


Fig. 12. Acceleration distribution on ground surface for short distant earthquake (Exceeding probability: 0.5).

域であり、後者はかなり速度振幅の高い地域である。このように、地表面での地動の強度は沖積層と洪積層の組み合わせによって複雑に変化することが明らかであり、地表面に近い表層地盤のみならず深い地盤をも考慮した解析の必要なことを示唆している。

3. 地動の強度と震害

水道管路の震害の程度を同一規準で统一的に論じることは困難である。新潟地震でも上水道施設は多大の被害を受けたが、被害が地下であるために顕在化していないものもあり、漏水調査のための試掘の結果、多大の被害を受けていることが判明したような場合もある。このように、被害程度の判定が一定でないことを

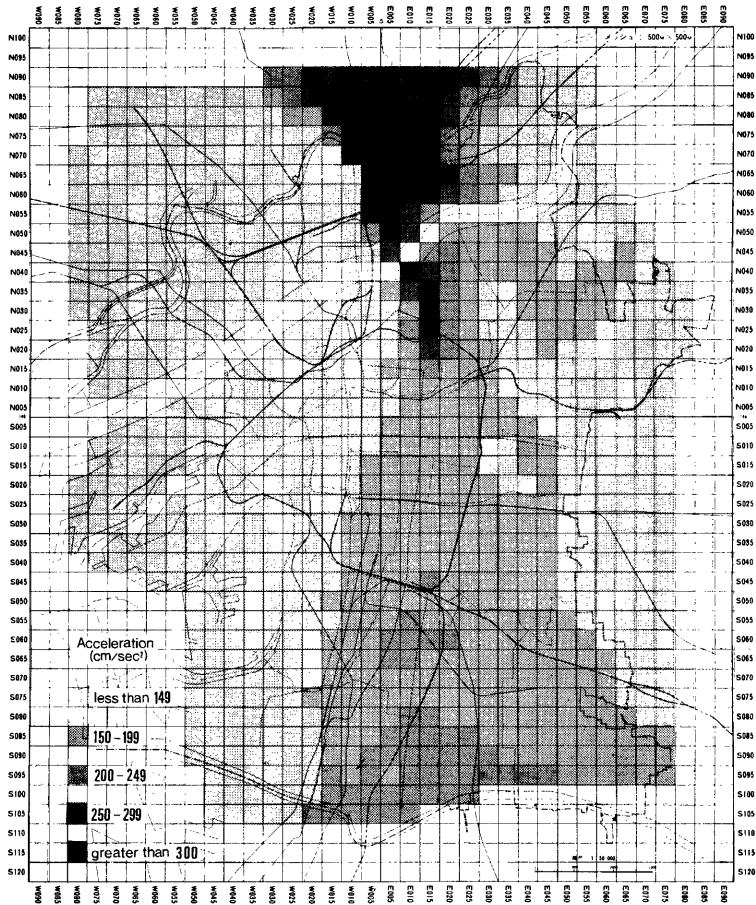


Fig. 13. Acceleration distribution on ground surface for short distant earthquake (Exceeding probability: 0.1).

前提として過去の地震による給・配水管の被害率を比較すると次のとおりである。

関東大地震	東京	71%
	横須賀	50~75%
南海地震	高知市	67%
福井地震	福井市	50%
新潟地震	新潟市	68%

ここにいう被害は破損のみならず、漏水等の生じたものも含まれているが、その大多数は鉸直または取り換えを要する状態である。このような被害を地震時の土地の運動、すなわち地動の強度と関係づけるには

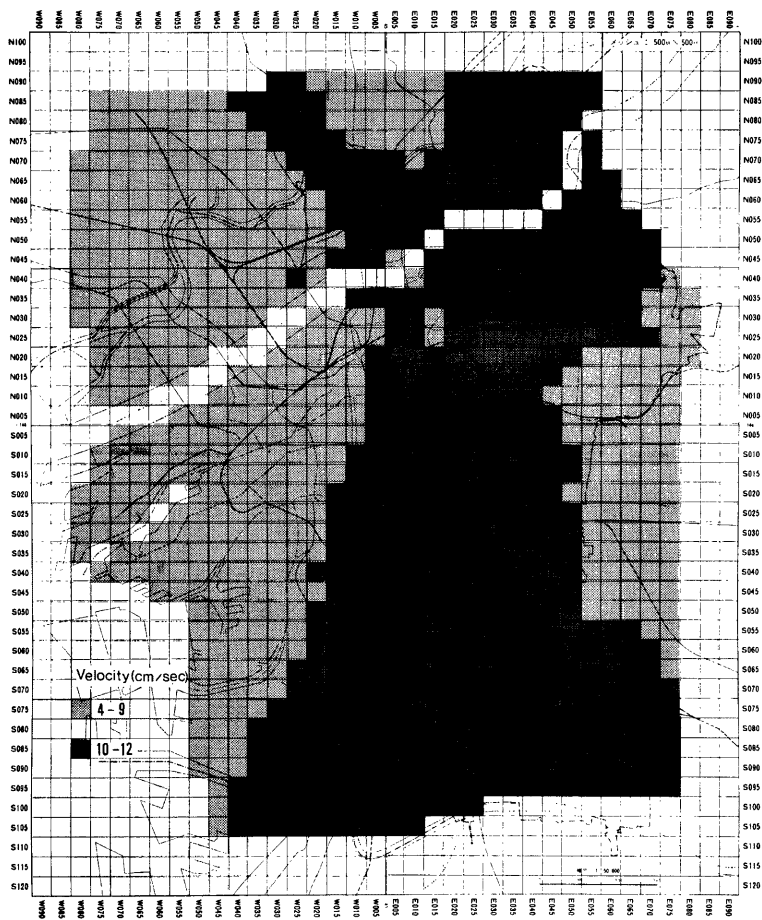


Fig. 14. Velocity distribution on ground surface for short distant earthquake (Exceeding probability: 0.5)

どのような尺度が適当であろうか。最も簡便なのは震度階との関係で表示する方法であり、Fig. 17 はその一例である⁶⁾。縦軸は単位敷設長さ当りの破損箇所数であり、横軸の震度階との関係はかなりのばらつきを示しているが、破損率はほぼ震度階に比例して増大すること、震度階Ⅴ以下ではほとんど被害を生じないことなどがわかる。

震度階はある土地での地動を人体感覚や身近にある自然物、人工物の作用との関係から専門家の判断に基づいて決定される量であることから同一震度階であっても、その物理的な尺度は必ずしも一定ではない。Fig. 18 は気象庁により震度階がⅣと公表された土地での実測加速度のばらつきを示したものである⁷⁾。横軸は実測の最大加速度、縦軸は頻度分布である。また、気象庁震度階と加速度の間には一定の関係があると

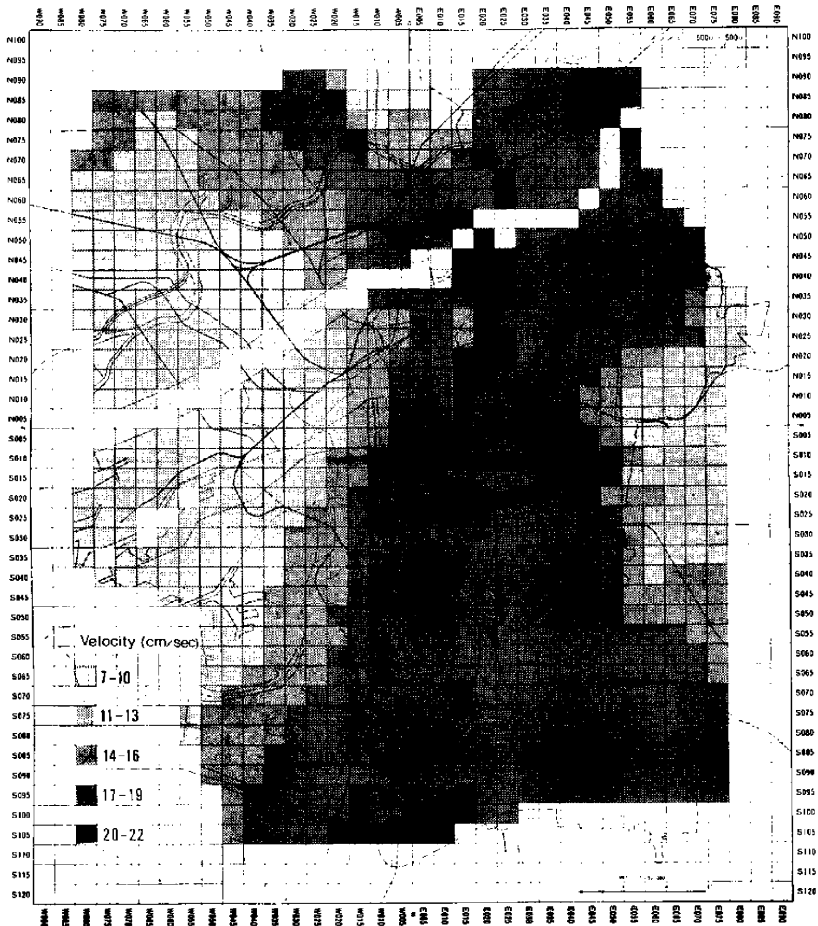


Fig. 15. Velocity distribution on ground surface for short distant earthquake
(Exceeding probability: 0.1)

されており、それを横軸の下に対応させて示してある。すなわち、震度階Ⅳの地動では25~80 gal程度の加速度を伴うと考えられているが、実際には8~250 galまでの加速度を伴う地動も含まれていることを表している。したがって、Fig. 17のように、ある都市での震度階が判明しても、都市内の地域によっては地動の強度は大きく変動していると考えねばならず、ある地点での被害の程度を他の場所での地動感覚から判定された震度階で表現することは困難と考えられる。このような状況を考慮すれば、ある都市全域での平均的な破損率とその都市での地震強度を一つの指標で代表する震度階との関係は極めて粗いものとならざるを得ないことがわかる。

久保ら⁸⁾は配水管の破損被害率と地震動の激しさとの関係として、Fig. 19のような結果を得ている。この結果は1971年サンフェルナンド地震に際してサンフェルナンド盆地での水道管路の被害資料に基づいて作製

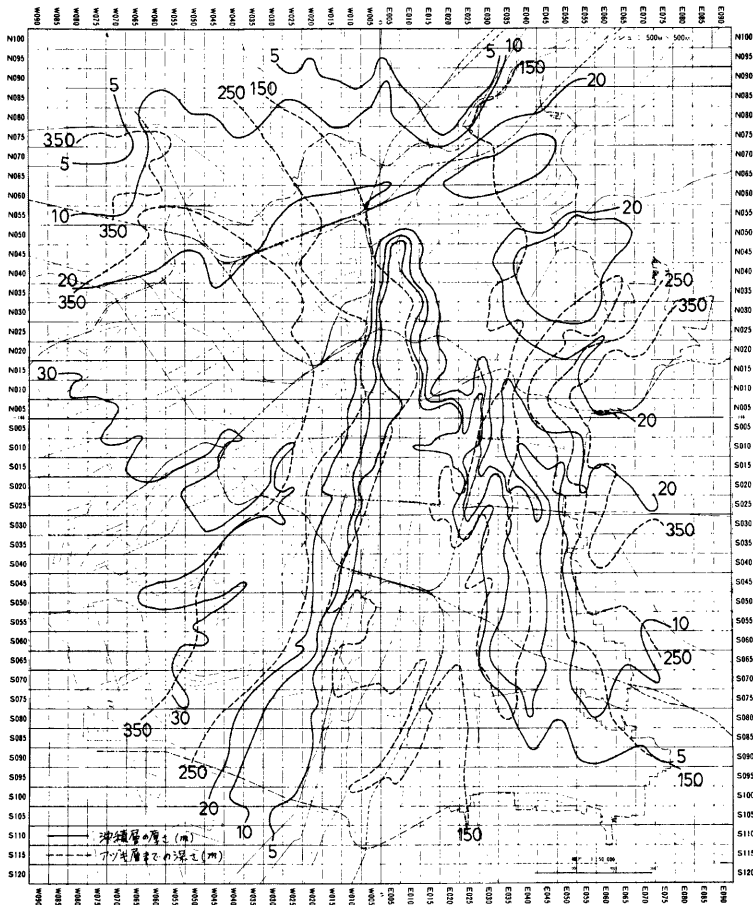


Fig. 16. Depth of Alluvium and diluvium (upper Osaka group) deposit in Osaka.

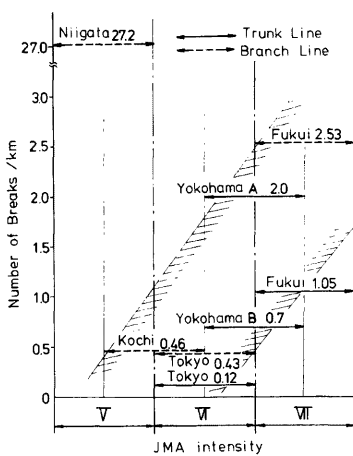


Fig. 17. Break rate vs. JMA intensity.

されたものである。これは被害率に関しては詳細な被害分布資料に基づいているが、地震動の強さとして用いた加速度振幅は推定値によるものである。すなわち、ある被害率の地域（1辺 480m の正方形）の震央距離を求め、震央距離 d と最大加速度振幅 a との間の経験式

$$\log a = 3.70 - \log d \quad \dots\dots\dots(4)$$

に基づいて加速度を算出したものであるから、**Fig. 19** は本質的には震央距離と被害率の関係を表わすものと考えられる。したがって、ある地点での被害率は必ずしも加速度振幅だけでなく、他の量、例えば速度振幅や変位振幅との間により密接な対応関係が見い出せる可能性もありうる。しかしながら、このような場合にも、速度もしくは変位振幅は加速度振幅と組成周波数特性によって定まるから、結局被害率と加速度の間には間接的な関係は存在することになる。

4. 関東地震による被害率の算定

前章に述べたように水道管の地震被害はこれまでは殆どの場合において、地震動による震度階もしくは加速度振幅との関連において検討されてきたが、これは被害率との関係を調べるのに適した資料が十分には得られていないことから、比較的容易に入手できるものとして加速度振幅が用いられたものと思われる。しかるに、加速度振幅と被害率との間の関係は必ずしも明確ではなく、その両者の間の相関がどの程度であるかも明らかにされてはいない。このような関係を検討するためには、ある地域での被害率と当該地域内の地動強度を表わす何等かの量との対応関係がすべての地域にわたって得られている必要がある。水道管の地震被害もしくは被害率に関しては小さな地域ごとの資料が過去の多くの地震においても得られているが、そ

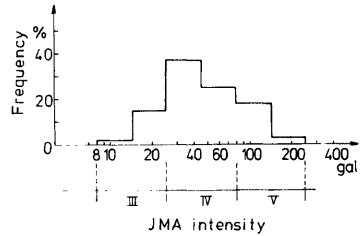


Fig. 18. Frequency distribution of peak acceleration associated with earthquakes of JMA intensity IV.

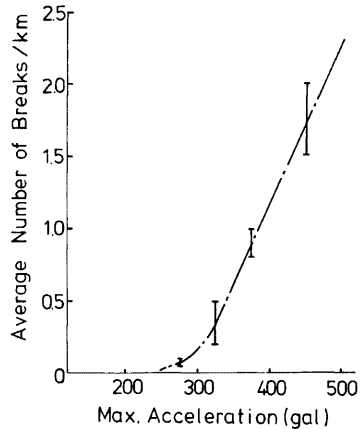


Fig. 19. Break rate vs. peak acceleration (after kubo et al.).

れとの対応をつけるための地動強度の都市内での小区域ごとの分布は殆ど得られていない。最近では地震時の地物の挙動や人間感覚についてのアンケート調査を行ってこれから詳細な震度階の分布が得られつつあるが、1968年十勝沖地震以前の地震においては水道施設に被害を受けた都市内を細分化した区域ごとの震度や震度階の分布に関する資料は極めてとぼしい。しかるに、1923年の関東地震においては Fig. 20 のように、東京市内での重力加速度に対する地動加速度の比、すなわち震度の分布が得られている⁹⁾。そこで、以下においてはこの資料ならびに関東地震による水道被害について実施された詳細な調査研究結果¹⁰⁾に基づいて、被害率と地動強度との相関関係について検討を行った。

Fig. 20 は関東大地震震害調査報告¹¹⁾ に所載の震度図上に、同報告に付図第50として添付されている水道鉄管漏水破損修繕調査図上に点で示されている修繕箇所を連ねて得られる線を重ねて示したものである。この結果によれば、隅田川以東ならびに皇居から隅田川に至る区域には被害は見られないことになるが、これらの地域の大半は地震に伴った大火災による焼失地域に重なっていること、この調査は大正13年3月末日現在のものであることから、未調査の領域であると推論される。隅田川以西でも浅草、上野方面は焼失地域ではあるが前述の修繕図によれば調査済と考えられる。この地域は Fig. 20 によれば震度は0.25内外であり、その被害率も相当に大きい、一方皇居南方の麻布方面では被害率は浅草方面と大差ないにもかかわらずその震度は0.1内外となっており、被害率と震度すなわち加速度とは必ずしも直接的な対応関係にはないことを示唆している。そこで、被害と地動強度との関係を見出すために以下のような手順により検討を行った。

Fig. 20 に示した震度図は旧東京市内での震度の分布を表わしてはいるが、その数値は全般に低く見積られており、最近の研究結果¹²⁾¹³⁾では関東大地震による加速度はもっと大きかったものと推定されている。そこで、まず Fig. 20 の図上を1km四方のメッシュで覆い、各メッシュ内での各震度の部分の占める面積比をよって震度を算出し、さらに旧東京市内の8区での平均震度を求めた。これを、東京都防災会議における藤¹⁴⁾による加速度の8区での平均値と対比すると Fig. 21 の如くなる。この図中において示す直線は両者の間の回帰分析によるものであり、かなり強い相関のあることがわかる(相関係数は0.86)。そこで、Fig. 20 による震度を x とするとき、各メッシュ内での震度 y を次の回帰式により換算した。

$$y = 0.22 + 0.58x \quad \dots\dots\dots(5)$$

一方、東京都内での地盤調査結果に基づいて都内全域を覆う500mのメッシュの交点での振動解析から各交点での固有周期が得られている¹⁵⁾。そこで、各メッシュの4隅での固有周期の平均値でそれぞれのメッシュの固有周期とし、これと Fig. 21 に示した震度とから各メッシュ内での速度振幅を算定した。

このようにして得られた地動強度と被害率との関係を図示したのが Fig. 22 及び Fig. 23 である。まず、Fig. 22 は各メッシュ毎の震度を横軸に、被害率を縦軸にとったものである。縦軸の被害率 (D) は各メッシュ内での漏水箇所数 n 、1km² 内での当時の人口密度を3.06万人を1とした場合の密度比 P 、各メッシュ内での河川、掘等を除いた有効面積 A とから、

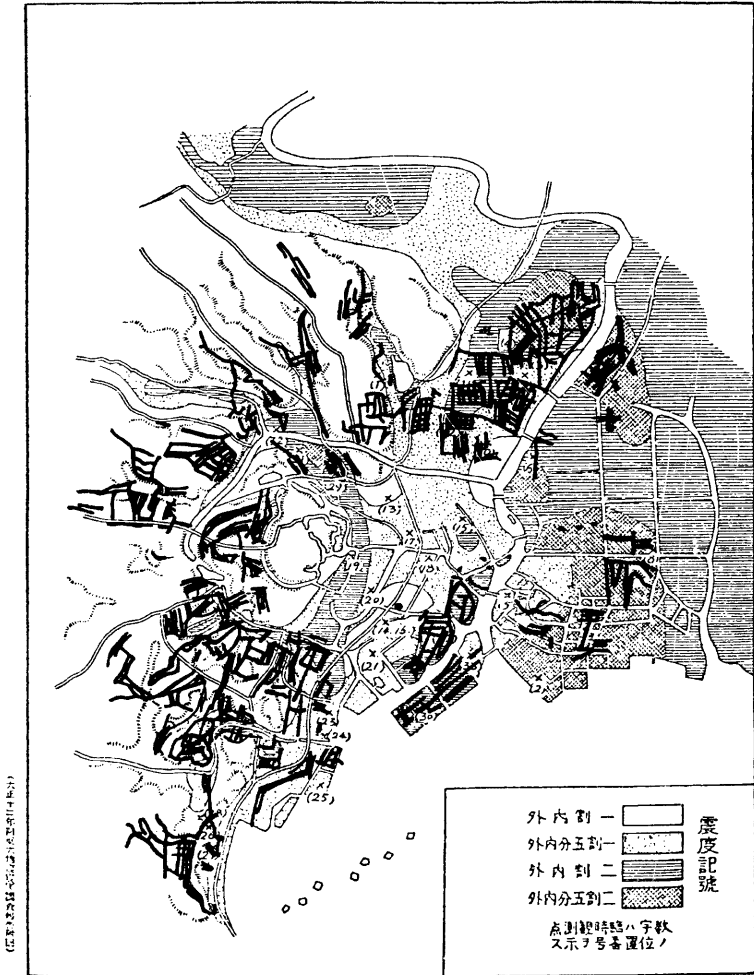
$$D = n/PA \quad \dots\dots\dots(6)$$

によって算定したものである。したがって、被害率 D は人口約3万人当りの漏水箇所数であるから、当時の1戸当りの家族数を平均5~6人と考えれば5~6千戸当りの漏水箇所数を表わしていることになる。このような定義の被害率と震度 (g) との間には明確な関係は見い出せないが、両者の間に直線相関を仮定して回帰分析を行った結果が図中の直線である。この直線は両者の関係を良く表わすとは考えられず、また相関係数も0.05程度であることから、結局漏水による被害は震度に比例的であると結論できないことがわかる。

次に、被害率と速度振幅との関係を示したのが Fig. 23 である。この場合には被害率と速度の対数に対して直線回帰を仮定して得られた結果が図中の実線であり、この場合の相関係数0.63である。この結果から被害率は速度振幅のほぼ2.6乗に比例することがわかる。すなわち、

(總序)

附圖第五
東京市街地震度分布圖



(從火災防消並會報告第百號(甲)による)

Fig. 20. Distribution of seismic intensity and damage of water system caused by Kwanto earthquake.

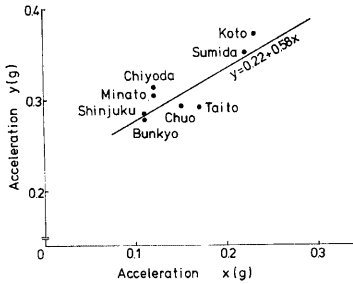


Fig. 21. Relationship between acceleration x by Fig. 20 and acceleration y by Ref. 12).

$$D = 0.84v^{2.62} \dots\dots\dots(7)$$

このように水道管の漏水に関しては地動の加速度振幅よりはむしろ速度振幅に比例することが明らかとなったが、その物理的な意味について考えてみよう。

地殻から地表に向かって入射する地震波は一般には地表に近い地盤ほど増幅を受けるが、地表面で反射されて再び地中に向う下降波の場合には、地盤は深くなるほど一般には堅固になることから波動の透過率は低下し、その結果、地表層中に波動エネルギーが蓄積されることになる。このようにして表層地盤中に貯えられた波動エネルギーは表層地盤内で消費されて熱エネルギーに変換されることになる。このような波動エネルギーの消費は主として地盤を構成する土の粘性によって行われると考えられるが、さらに震動振幅が増大すると土の非線形挙動による消費が卓越する。そして、このような非線形な運動は地盤の変状や局所的な破壊を生じることになり、したがって埋設管路等がそのような地盤中にある場合には継手の引き抜けによる漏水や折損などの被害を引き起すこととなる。一方、波動のエネルギーはその速度振幅に比例するから、地盤や埋設管路の変状が表層地盤内の波動エネルギーに関わるものとするれば、結局これは表層地盤の速度振幅に比例的であることとなり、Cを定数とすると、

$$D = Cv^2 \dots\dots\dots(8)$$

と表わせる。

以上のような議論により地震による水道管路の漏水被害は地震動による震度すなわち加速度振幅よりはむしろ速度振幅への依存度が高いことがわか。従って、水道管などの埋設施設の被害軽減対策や復旧対策のための被害予測に際しては当該都市内の加速度振幅のみならず、速度振幅の分布を把握する必要があり、これと式(6)または(7)とを結びつけることにより震害の都市内での平面分布の予測が可能となる。そこで

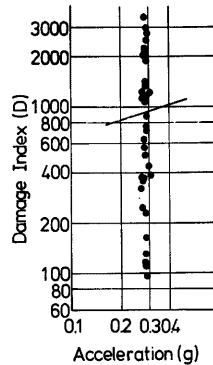


Fig. 22. Relationship between damage index and ground acceleration.

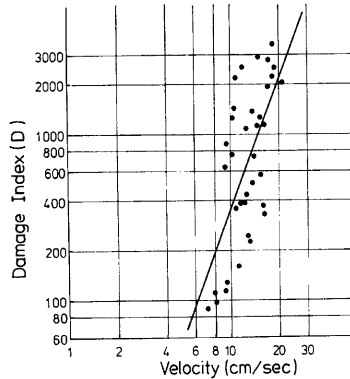


Fig. 23. Relationship between damage index and ground velocity.

次節では大阪市を対象とした震害予測結果について検討を行う。

5. 水道管路の震害予測

これまでの検討により水道管の震害、特に漏水被害に関しては埋設されている地盤の震動に伴う加速度よりはむしろ地動の速度に比例的であることが明らかにされた。さらに、襲来する地震の強さや地盤強度等における不確定性を考慮して地動強度の予測も行ったから、この両者から想定した地震動に対する水道管の被害を予測することが可能であり、以下のようにして漏水ならびに破損数の予測を行った。

まず、想定地震（遠地地震と近地地震）のそれぞれに対し、地動速度の中央値ならびに超過確率10%に対する値の各行政区域ごとの平均値を算出し、これから式（7）の関係により漏水被害率を定めた。しかしながら、この被害率は当時の東京市の平均人口密度 3.08 万人/km² を 1 とする人口密度比に基づいているから、この被害率を大阪市内へ適用するためには、各メッシュでの人口密度の 3.08 万人/km² に対する値を乗じなければならない。しかしながら **Table 2** に明らかのように各行政区での人口と敷設延長とは必ずしも比例関係にはない。そこで、この漏水被害率を人口密度が 3.08 万人/km² であり、単位面積当りの敷設延長が当該都市の平均値に等しい地域での被害率であると考えれば、 α 行政区での単位面積（1 km²）当りの漏

Table 2. Area, population and length of water system in Osaka

	Area (km ²)	Population (千人)	Pipe length (km)
Higashiyodogawa	6.62	162	210
Yodogawa	7.01	151	229
Nishiyodogawa	6.45	97	145
Asahi	3.65	124	137
Miyakozima	3.41	87	125
Oyodo	2.04	42	38
Kita	3.40	44	137
Fukushima	3.41	61	107
Konohana	6.80	82	105
Minato	3.92	106	139
Nishi	2.79	50	161
Higashi	2.96	29	121
Joto	5.96	154	153
Tsurumi	4.60	90	92
Minami	1.97	42	80
Tennoji	3.08	60	147
Higashinari	3.27	96	124
Naniwa	2.47	56	132
Ikuno	5.86	195	203
Taisho	5.03	88	136
Nishinari	4.99	170	157
Abeno	4.29	129	151
Suminoe	5.40	107	185
Sumiyoshi	5.82	129	139
Higashisumiyoshi	5.74	174	195
Hirano	5.96	203	159

水被害数 (N_L)_{*i*} は次のようにして定めることができる。

$$(NL)_i = DI_i \times \frac{1}{3.08} \times \frac{\sum_{j=1}^N P_j}{\sum_{j=1}^N A_j} \times \frac{\frac{L_i}{A_i}}{\frac{\sum_{j=1}^N L_j}{\sum_{j=1}^N A_j}} \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 DI_i , L_i , A_i はそれぞれ *i* 行政区での式 (7) による被害率、敷設延長、居住面積であり、 P_i は人口である。また N は大阪市の行政区の数すなわち 26 である。ただし、面積は各区での全面積から水面、公園、農地等を除いてある。

次に漏水箇所数と破損数との関係について検討を行おう。**Fig. 24** は関東大地震における配水管の漏水数と破損数とを 100mm~600mm の管について管径ごとの関係を示したものであり、各プロットに添付した数字が管径を表わしている。被害数の多い管径においては、明らかに漏水数と破損数とは良い対応を示しており、両者の関係は図中の直線で近似できよう。すなわち、

$$\text{漏水数} = 400 \times \text{破損数} \dots\dots\dots(10)$$

である。この関係を用いて 1 km² 当りの破損数 N_B を定めた。この数には地域による地動強度と配水管の密度の両者が考慮されており、想定地震による破損数の予測値である。**Fig. 25~26** に遠地地震と近地地震のそれぞれについて超過確率10%、50%の場合に対応する破損率を示した。これらの図中で上段の数字が10%、下段が50%に対応している。遠地地震の超過確率が10%の場合においては、西区、浪速区などで大きな値を示しており、此花区や大淀区、西淀川区においては破損率が低いことがわかる。すなわち、地域によって約5倍の差があるが、これは行政区内での平均値であるから、もっと狭い地域についてみればその差はさらに顕著であろう。浪速区や西区は地動強度と敷設密度の両者が共に高いことによるものである。東区と城東区とでは地動強度には大差ないが、東区では敷設密度が高いことから 1 km² 当りの破損数の予測値は大きくなっている。

一方、**Fig. 26** は近地地震に対するものであり超過確率が10%の場合には、此花区での0.49に対して天王寺区では5.40と約10倍になっており、地域による差は遠地地震の場合より開いている。旭区や都島区のように破損率の高い地域では遠地地震の場合の4~5分の1になっているのに反し、此花区や西淀川区などの破損

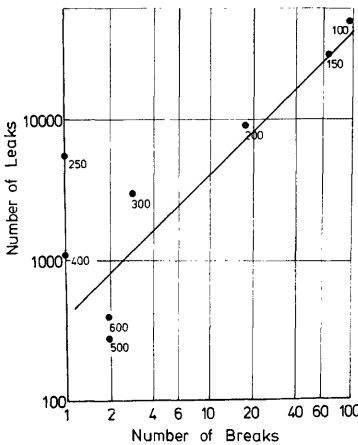


Fig. 24. Relationship between leak rate and break rate of water system.

率の低い地域では遠地震の約10分の1になっている。遠地震と近地震による加速度振幅の差は Fig. 9 と Fig. 15 とを比較しても認められるが、Fig. 25 と Fig. 26 の破損率における差のほうが顕著である。これは破損率は地動速度に関係しており、近地震においてはたとえ加速振幅が遠地震と大差なくとも速度振幅は一般に小さいことによるものである。このことから、加速度振幅が同じならば遠地震のほうが配水管路の被害が大きいと考えてよかろう。

次に、超過確率が10%と50%の場合を比較すると、遠地震の場合には地域には無関係に4対1程度であり、近地震においてははやばらつきは見られるがほぼ4対1の割合に近い。すなわち、遠地震か近地震かにかかわらず超過確率10%であるようま地震を想定すれば超過確率が50%であるような地震を想定した場合の約4倍の破損率、被害率を見込む必要があることを意味している。したがって想定する地震の超過確

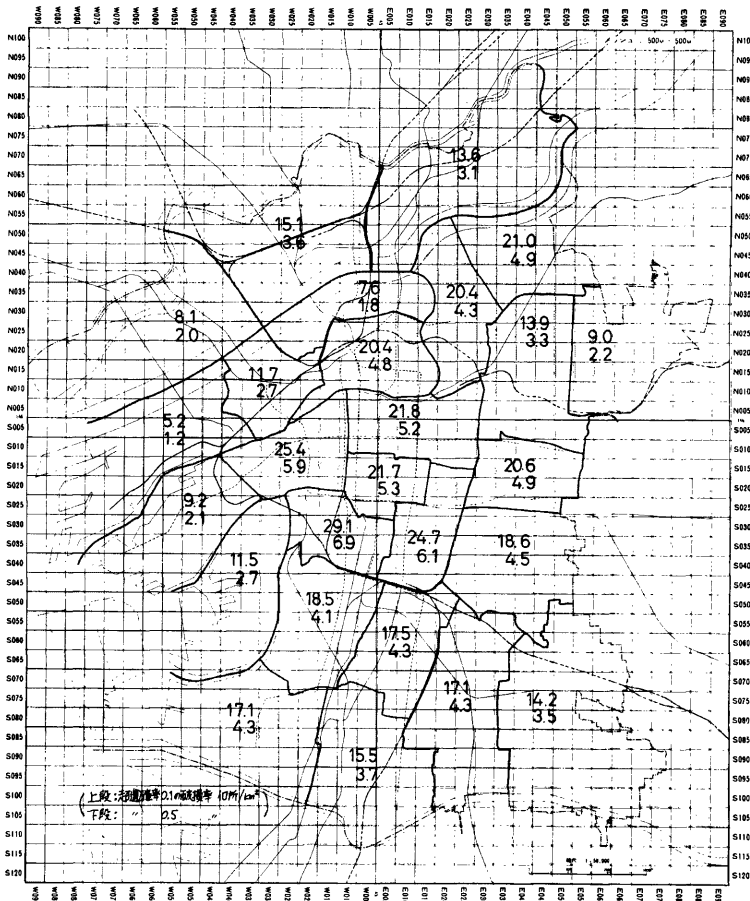


Fig. 25. Estimated break rate for long distant earthquake.

率の大きさによって予測すべき被害率が大きく変動することがわかる。このように被害率が想定する地震によって変化するのは地震による地動の強度が確率的な見地からしかとらえられないことに起因するものであり、これを避けるためには従来から行われてきたようにマグニチュードや震央距離をほぼ同じにする既応の地震による地動の平均値により論じるしか方法はない。しかるに、2.にも述べたように過去の地震による統計では平均値のまわりでの変動は非常に大きく、最大加速度についてみても平均値の数倍に達するものも少なくない。したがって、水道の各種施設や管路の地震による被害の予測や対策においてもすべての施設を同一の平均値にのみ準拠した見地から考えるのではなく、重要性、復旧性などの見地から想定する地震もしくはそれによる地動強度に差違があってしかるべきと考えられる。このような見地からは各地点での地動強度とそれに対する超過確率の関係が与えられていることが望ましく、これにより、対象とする施設や対策に

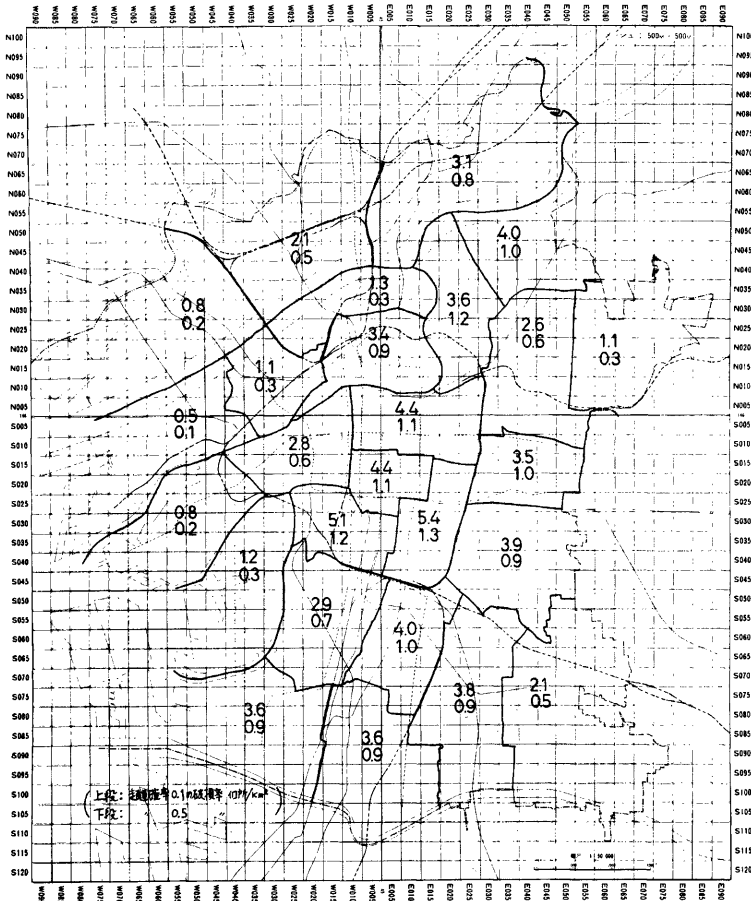


Fig. 26. Estimated break rate for short distant earthquake.

じて想定地震の超過確率を決定すれば、それに対する地動強度が定まり、地動と震害との関係から被害予測が可能となり、従来の平均値のみに準拠したものよりさらにきめの細い合理的な震害予測を行うことができよう。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所：新耐震設計法（案），土木研究所資料，第1185号，昭和52年3月。
- 2) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針・同解説，昭和47年4月。
- 3) 国土開発技術研究センター：耐震技術に関する研究開発総合報告書，昭和52年3月，p.142。
- 4) 大阪市総合計画局：大阪市防災計画調査報告書（地震と地盤），昭和46年3月。
- 5) 土質工学会編：大阪地盤，土質工学会，昭和52年7月。
- 6) 大阪市水道局部内資料。
- 7) 勝又 護，徳永規一：震度Ⅳの範囲と地震の規模および震度と加速度の対応，験震時報第36巻第3，4号別刷，昭和46年8月。
- 8) 久保慶三郎，片山恒雄：地震時の地下埋設管被害に関する調査，東京都防災会議，1974。
- 9) 土木学会編：大正12年関東大地震震害調査報告（第2巻），上水道・下水道・瓦斯工事之部，大正14年版。
- 10) 前出 8)。
- 11) 前出 9)。
- 12) 佐藤泰夫：地震動，地盤および建築物被害に関する調査，関東地震の震害よりみた地盤構造と震度の関係，東京都防災会議，1966。
- 13) 吉山良一：関東大地震のマグニチュードと東京における地震動について，関東大地震50周年論文集，東大地震研究所，1973。
- 14) 前出 12)。
- 15) 河角 広，佐藤泰夫，嶋 悦三：東京都（23区）地盤の振動に対するレスポンス，東京都防災会議，昭和45年3月。