

## 1995年兵庫県南部地震における上水道管路被害の定量的解析

金沢大学 宮島昌克\*

金沢大学 翟 恩地\*\*

金沢大学 北浦 勝\*\*\*

1995年兵庫県南部地震における上水道管路の被害のメカニズムを明らかにするために、要因分析を行った。まず、被害が顕著だった阪神水道企業団、神戸市、芦屋市、西宮市の上水道管被害を整理し、管種、管径と被害との関係を検討した。その結果、口径の小さな管路、比較的強度の小さな管種、古い管路に被害が多かったこと、被害形態として継手部の引き抜けが非常に多かったことなどを定量的に明らかにした。つぎに、神戸市の被害に注目し、地質と被害との関係、建物被害と管路被害との関係などについて検討した。その結果、埋立地盤や沖積地で被害が多いことを定量的に示した。さらに、今回の管路被害の程度とこれまでの被害地震におけるそれとを、被害率と地表面加速度との関係で示したところ、これまでの被害の傾向と調和的であることが示された。

### 1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、阪神、淡路地方に甚大な被害を与えた。この地震は高度成長期を経て発達した大都市を襲った最初の地震であり、高度に発達した都市ライフラインの構造的、機能的障害が、地震後の救援、復旧活動に大きな影響を与えた。

これまでの被害地震の事例から、ライフラインの供給停止から復旧に要する時間の目安として、電力は1日、水道は1週間、ガスは1カ月といわれていたが、今回の震災では、電力が約1週間、水道が約2カ月、ガスが約3カ月を要した。このことから、今回の地震によるライフラインの構造被害が如何に顕著であったのか、容易に推測することができる。

本論文では、上水道管路の被害を報告するとともに、その特徴について検討を加えた。まず、阪神地区における上水道管路の被害を、管種、管径との関係で考察した。つぎに、被害の特徴を明らかにするために、神戸市の被害を取り上げ、地質と管路被害との関係、建物被害と管路被害との関係について考察した。さらに、今回の管路被害の程度とこれまでの被害地震におけるそれとを、被害率と地表面加速度との関係で比較、検討した。以上より、今回の地震における上水道管路被害の特徴を明らかにするとともに、被害のメカニズムについて考察した。

### 2. 被害の概要

#### (1) 阪神水道企業団

琵琶湖・淀川水系を水源とし、尼崎市、西宮市、芦屋市、神戸市などに供給しており、給水人口は2,470,888人、平均給水量は726,274m<sup>3</sup>/dayである。水道統計資料によれば、送配水管の延長距離は約163kmであり、管種別の敷設延長距離の割合は図-1に示すとおりである。

導水管、送水管、配水管合わせて120箇所被害が生じた。ただし、道路崩壊のように管路が連続して被害を受けている箇所については1箇所の被害としている。これらの被害を管種別にまとめたものが図-2である。図-2は、水道統計資料に示されている平成6年3月現在のそれぞれの管路延長で被害数を除し、敷設延長1kmあたりの被害箇所数を被害率と定義し、整理したものである。同図によれば、铸铁管(CIP)が大きい被害率を示しているが、これは主に印籠継手、メカニカル継手の引き抜けによるものである。図-3は同様に管径別に示したものである。管径が小さいほど被害率の高いことがわかる。

#### (2) 神戸市

布引、烏原、千刈の3箇所にダムを築いて水源を確保しているが、供給能力833,000m<sup>3</sup>/dayの約1/4にあたる200,000m<sup>3</sup>/dayしか自己水源で賄うことができないので、約3/4にあたる619,000m<sup>3</sup>/dayを阪神水道企業団から、また約14,000m<sup>3</sup>/dayを兵庫県から受水している。給水人口は約150万人、1日平均給水量は約60万m<sup>3</sup>/dayである。配水管の延長距離は約4,000kmであり、管種別の敷設延長距離の割合は図-4に示すとおりである。管路の90%近くがダクタイル铸铁管(DCI

キーワード：兵庫県南部地震、上水道、地震被害

\* 金沢大学大学院自然科学研究科、0762-34-4656

\*\* 同上

\*\*\* 金沢大学工学部、0762-34-4654

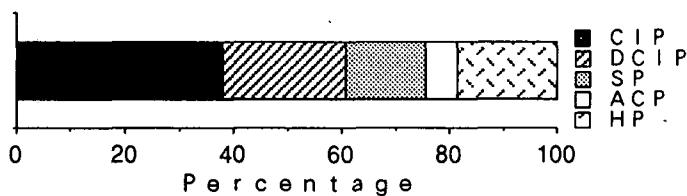


図-1 阪神水道企業団における管種別敷設延長の割合

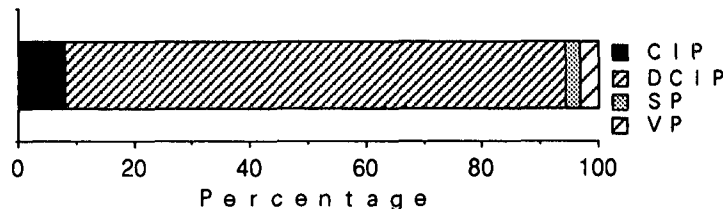


図-4 神戸市における管種別敷設延長の割合

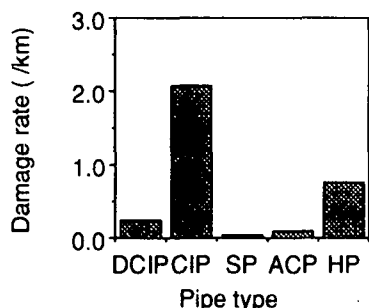


図-2 阪神水道企業団における管種別被害率

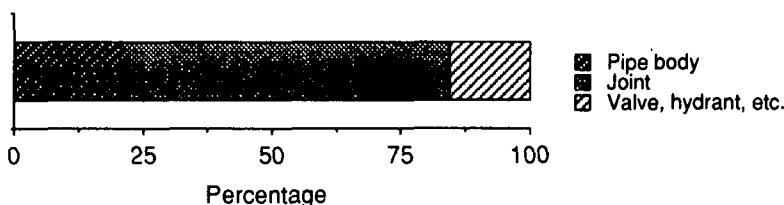


図-5 神戸市における被害形態の割合

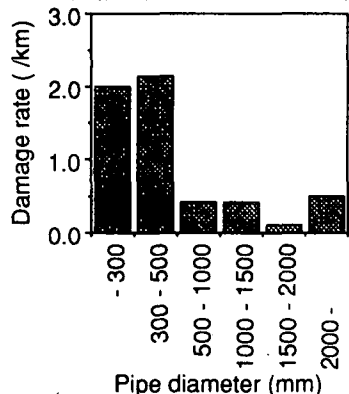


図-3 阪神水道企業団における管径別被害率

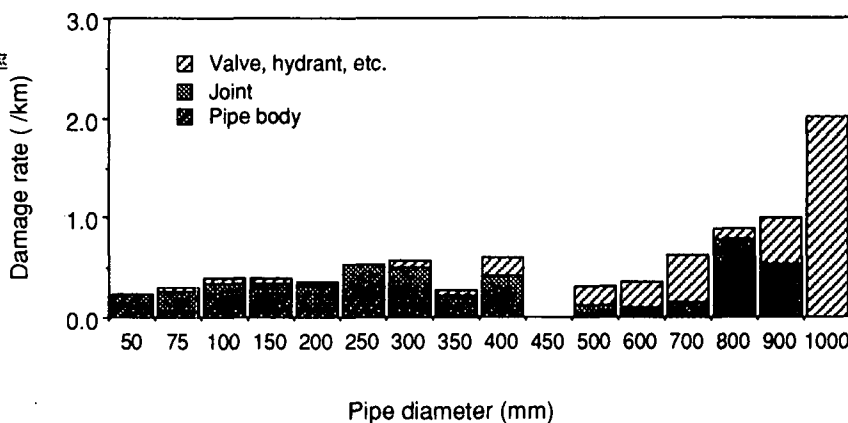


図-6 神戸市における管径別被害率

P)であるのが特徴的である。さらに、埋立地や高盛土地区、地滑り地区、 $\phi 400\text{mm}$ 以上の幹線など、敷設延長の約6%は耐震継手を有するダクタイル鋳鉄管が用いられている。

平成7年4月末日までにまとめられた神戸市全体の被害資料から、被害形態の割合をまとめると図-5のようになる。すなわち、全体の約64%が継手部の被害で、約20%が管体部の被害となっており、継手部の被害が多いことがわかる。

図-6は、これらの被害を管径別に被害率として示したものである。同図によれば、大口径管の属部の被害率が高くなっている。前述したように、 $\phi 400\text{mm}$ 以上の幹線などには耐震継手を有するダクタイル鋳鉄管が用いられているが、空気弁などの属部の耐震性について今後検討を要するものと考えられる。

現時点では管種と被害との関係は統計的に明らかではないが、全体的にCIPの印籠継手における被害が目立っているようである。また、耐震継手の被害は報告されていない。

### (3) 芦屋市

芦屋市上水道の供給能力は $50,610\text{m}^3/\text{day}$ であり、その内の $10,670\text{m}^3/\text{day}$ を自己水源で賅っているが、残り

の $39,940\text{m}^3/\text{day}$ を阪神水道企業団から受水している。給水人口は86,640人、1日平均給水量は $33,107\text{m}^3/\text{day}$ である。配水管の延長距離は約183kmであり、管種別の敷設延長距離の割合は図-7に示すとおりである。

平成7年2月末日現在で、340箇所の被害が確認されている。その内の112箇所が属部の被害である。管体、継手部の被害を管種別に示したものが図-8である。塩化ビニル管(VP)の被害率が最も大きい。DCIPの被害も小さいとはいえない。芦屋浜の埋立地では、直管部では耐震継手が、異形管部ではメカニカル継手が用いられていたが、ほとんどメカニカル継手のみが被害を受けた。図-9は、管径別に被害率を示したものである。200mm以下の小口径管の被害率の高いことがわかる。

### (4) 西宮市

西宮市上水道の供給能力は $294,038\text{m}^3/\text{day}$ であり、その内の $120,550\text{m}^3/\text{day}$ を自己水源で賅っているが、残りは、 $153,488\text{m}^3/\text{day}$ を阪神水道企業団から、また $20,000\text{m}^3/\text{day}$ を兵庫県から受水している。給水人口は422,335人、1日平均給水量は $169,953\text{m}^3/\text{day}$ である。配水管の延長距離は約1,000kmであり、管種別の敷設延長距離の割合は図-10に示すとおりである。DCIPが約60%を占めているが、石綿セメント管(AC

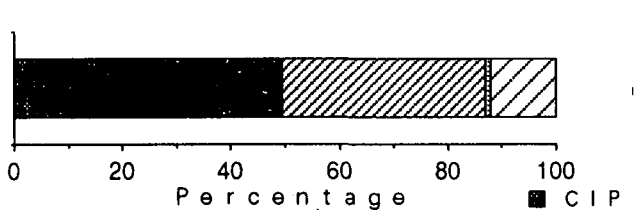


図-7 芦屋市における管種別敷設延長の割合

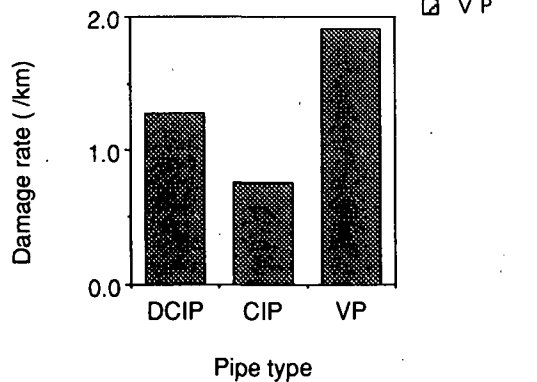


図-8 芦屋市における管種別被害率

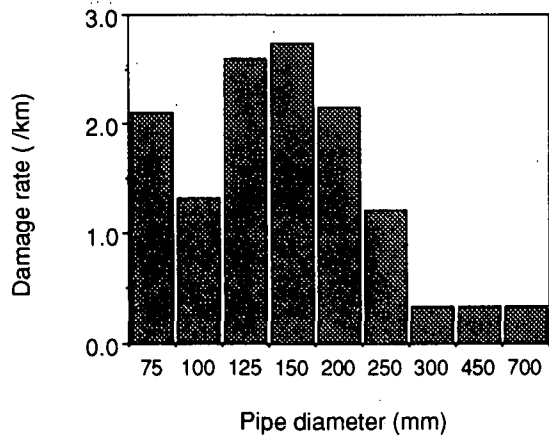


図-9 芦屋市における管径別被害率

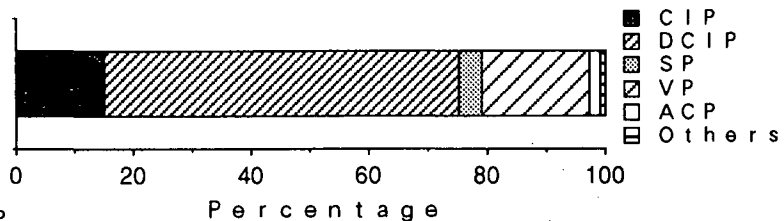


図-10 西宮市における管種別敷設延長の割合

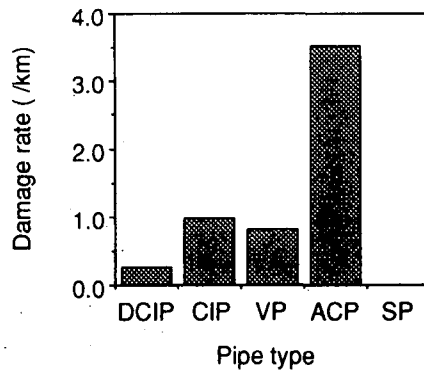


図-11 西宮市における管種別被害率

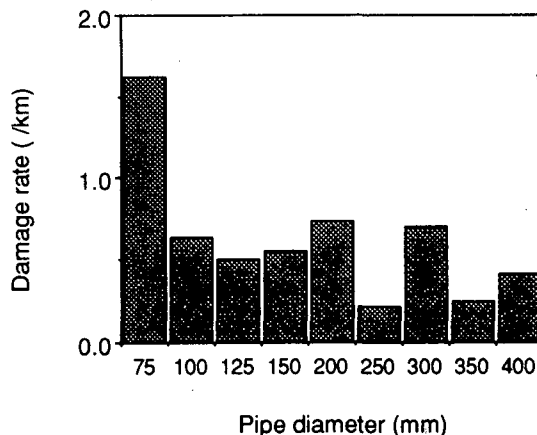


図-12 西宮市における管径別被害率

P) がまだ約2%残っている。

平成7年2月末日現在において資料の比較的整っている市北西地域、中央南部地域、中央南東部地域の配水管の被害総数は530箇所である。これを管種別に被害率で表すと、図-11のようである。同図によれば、ACPの被害率が極めて高い値となっているが、これはACPが老朽化しており、強度も低いためと考えられる。図-12は、管径別に被害率を示している。管径が小さくなるほど被害数が多くなることがわかる。

### 3. 被害の特徴

#### (1) 地質と管路被害との関係

神戸市の被害に注目し、地質と被害の関係について検討する。図-13は被害の分布図と神戸市街地質図<sup>1)</sup>を比較し、地質ごとの被害数を示したものである。それぞれの地質区域に敷設されている管路延長が明らかではないので定量的な考察はできないが、埋立地、沖積層での被害数が多い。また、六甲山麓の基

盤岩においても少なくはない被害が生じている。これについては、活断層との関係についてさらに検討する必要がある。

それぞれの地質における被害形態の割合を示したものが図-14である。いずれも継手の被害が最も多いが、埋立地、大阪層群においては特にその割合が大きくなっている。一方、基盤岩においては属部の被害の割合が大きい。基盤岩には大口径管が埋設されている割合が高いため、前述した大口径管において属部の被害が卓越していることと対応している。このような属部の被害が構造的な問題なのか、地盤あるいは活断層に関連しているものであるのか、検討を要する。

神戸市全体では、地質別の管路延長を求めるのが困難であるので、つぎに中央区の被害のみに注目した。図-15は、中央区における管路の被害箇所と地質区分を示している。同図からも埋立地と沖積層で被害の多いことがわかる。さらに、配管図から各地質区域の管路延長を読み取り、地質区域ごとの被害率

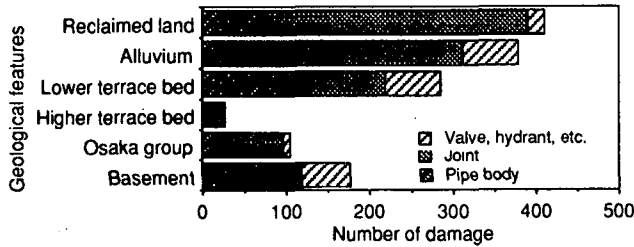


図-13 神戸市における地質区分ごとの被害数

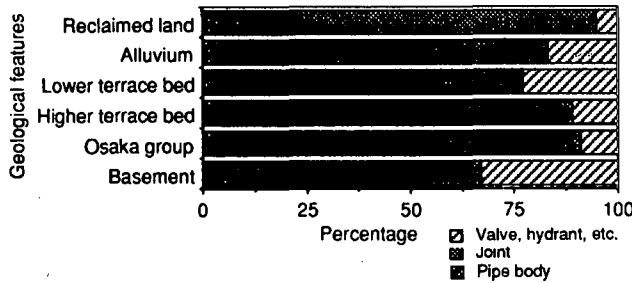


図-14 神戸市における地質区分ごとの被害形態の割合

を求め、図-16にまとめた。同図によれば、埋立地の被害率が3.0箇所/kmを越えており、極めて大きいことが注目される。なお、同図にはポータランドは含まれていない。

## (2) 建物被害と管路被害との関係

現地調査に基づいて、建物の被害程度の分布図が図-17のように示されている<sup>2)</sup>。ここで、レベル5とは木造住宅の倒壊率が50%以上で、コンクリート建物の倒壊の多い地域を、レベル4とは木造住宅の倒壊率が30%以上、50%未満の地域を、レベル3とは木造住宅の倒壊率が30%以下の地域を、レベル2とは木造家屋の壁に割れ目が入る程度の地域を、レベル1とはそれよりも被害程度の小さい地域をそれぞれ示している<sup>2)</sup>。同図と管路被害の分布図を比較し、建物の被害程度別の管路被害数を示したものが、図-18である。なお、レベル1については、山側と海側に分けて整理した。ここでも、それぞれの区域に敷設されている管路延長が明らかではないので定量的な考察はできないが、レベル1の海側の被害数が最も多くなっている。これを、それぞれの区域における被害形態の割合で示したものが図-19である。レベル1の海側で継手部の被害の割合が最も高くなっている。地盤の液状化に起因する継手の引き抜けと密接に関連しているものと考えられる。

つぎに、中央区を取り上げて建物の被害レベルごとの管路の敷設延長を配管図から読みとり、被害率として整理し、図-20にまとめた。また、建物の被害レベルの分布図に管路の被害箇所を重ねて、図-21に

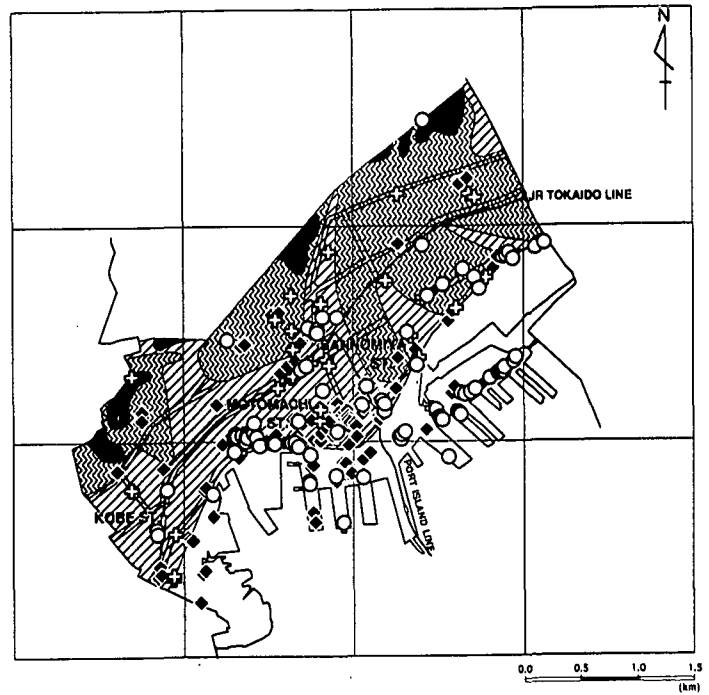


図-15 神戸市中央区における地質区分と管路被害箇所

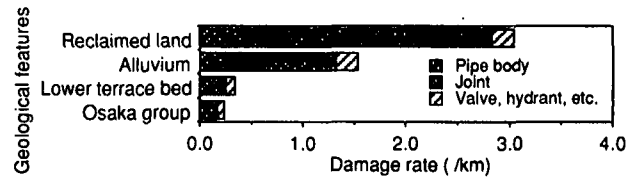


図-16 神戸市中央区における地質区分ごとの被害率

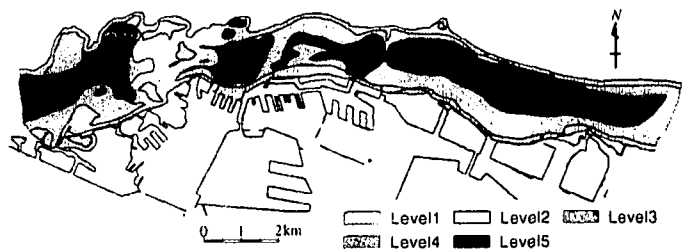


図-17 神戸市における建物被害の分布

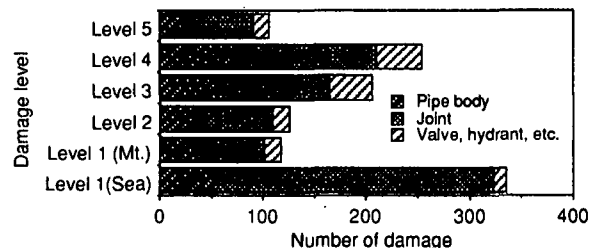


図-18 神戸市における建物被害レベルごとの被害数

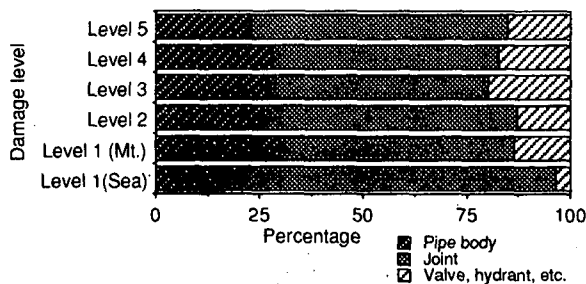


図-19 神戸市における建物被害レベルごとの被害形態の割合

示した。図-20によれば、建物の被害程度が大きいほど被害率も大きくなっていることが分かる。図-17によれば、レベル5の地域は一般には東西方向に帯状に広がっているが、中央区に関しては図-21に示されるように帯状ではなく、沖積地に広く分布していることがわかる。したがって、図-16と図-20を考え合わせると、管路の被害は建物の被害の程度よりも地質との相関の方が強いと言えよう。

### (3) 人工島における管路被害

神戸港内の人工島であるポートアイランドと六甲アイランドの被害状況を比較し、検討する。両島ともに大規模な液状化が発生し、平坦部では地盤沈下、沿岸部では港湾施設の被害、橋脚の損傷など大きな被害を受けた。人工島全体の被害数は、ポートアイランドでは管体3箇所、継手37箇所、属部3箇所の合計43箇所であるのに対して、六甲アイランドでは継手4箇所、属部1箇所の合計5箇所である。配管図からそれぞれの敷設延長を読みとるとポートアイランドでは約35km、六甲アイランドでは約22kmであるので、被害率はポートアイランドでは1.23箇所/kmであるのに対して六甲アイランドでは0.23箇所/kmとなる。このような明確な違いの原因としては、六甲アイランドの方が建設年代が新しく、管路の敷設年代も新しいこと、したがって耐震継手も多く用いられていること、ポートアイランドの方が液状化の規模が大きかったこと、などが考えられる。

### (4) 従来の被害地震との比較

神戸市においては、敷設延長距離3,963kmに対して1,610箇所の被害が生じているので、被害率は0.41箇所/kmとなる。同様に、芦屋市では1.83箇所/km、西宮市では0.68箇所/kmとなる。これらと、これまでの被害地震における被害率を地表面加速度との関係で示したものが図-22である。同図には1989年ロマブリエタ地震における各都市の上水道配水管の被害率<sup>3)</sup>、1994年三陸はるか沖地震における八戸市の被害率、液状化が広範囲に発生し上水道被害が拡大した1964

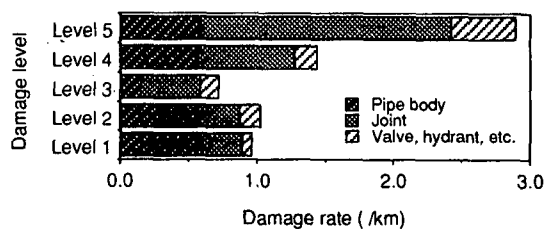


図-20 神戸市中央区における建物被害レベルごとの被害率

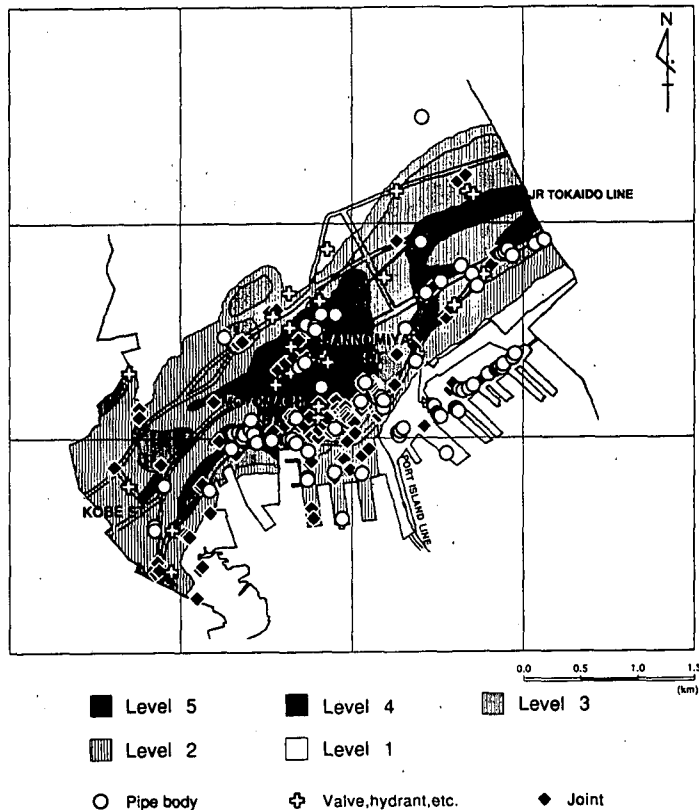


図-21 神戸市中央区における建物被害レベルと管路被害箇所

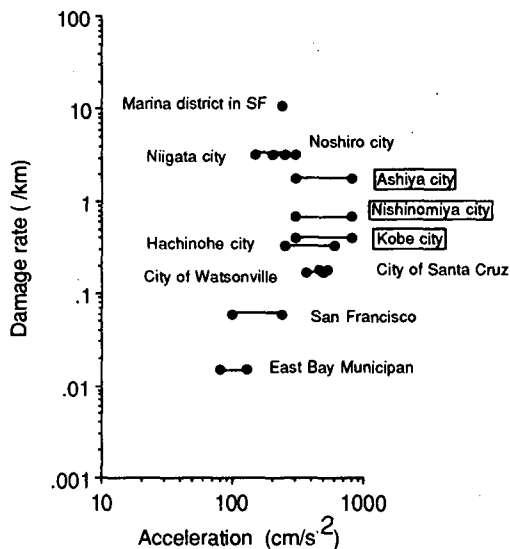


図-22 地表面加速度と上水道管の被害率との関係

年新潟地震における新潟市，1983年日本海中部地震における能代市の被害率もプロットされている<sup>4)</sup>。なお，阪神地区における地表面加速度を300galから800galとして示した。同図によれば，地表面加速度が大きくなるほど被害率は増大しており，阪神地区の被害率は，液状化が特に顕著ではなかった各都市の被害率の増加の傾向と調和的であるといえる。これらの地区においても液状化は発生しているが，市全域が液状化しているわけではなく，全市的にみれば地盤の良いところと悪いところが混在しており，その平均値として被害率が算出されているので，このような結果になったものと考えられる。また，中央区の埋立地だけを見れば，被害率は3.0箇所/kmとなっており，図-22における新潟市や能代市の被害率と同程度となる。したがって，埋立地においては液状化の影響を強く受けているものと考えられる。

#### 4. まとめ

本論文では，1995年兵庫県南部地震における上水道被害を報告するとともに，その特徴について考察した。まず，阪神地区の主な上水道管路の被害を報告し，その特徴として，口径の小さな管路，塩化ビニル管や石綿セメント管などの強度の比較的小さい管路，古い管路に被害が多かったこと，ダクトイル鋳鉄管の属部の被害が目立ったこと，などを明らかにした。さらに，神戸市の管路被害に注目し，地質と管路被害との関係，建物被害と管路被害との関係について検討を加えた。その結果，埋立地や沖積地での被害が多く，液状化やそれに伴う地盤変状による被害が異多いことが示唆された。しかし，液状化

地盤においても耐震継手を有するダクトイル鋳鉄管には被害がなかったことが示された。さらに，今回の管路被害の程度とこれまでの被害地震におけるそれとを，被害率と地表面加速度との関係で示したところ，これまでの被害の傾向と調和的であることが示された。

最後に，本研究の一部が地盤工学会阪神大震災調査委員会ライフライン部会ワーキンググループ（主査 神戸大学高田至郎教授）の活動として行われたことを記して，関係各位に深謝いたします。資料の整理にご尽力頂きました金沢大学工学部 近藤宏樹氏，田中良英氏，深谷正俊氏に感謝します。また，本研究が文部省科学研究費（一般研究（C）），課題番号07650539，研究代表者 北浦 勝）の補助を受けていることを記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 神戸市企画局総合調査課編：神戸市街地地質図，神戸の地盤。
- 2) 中央開発株式会社阪神大震災災害調査団：阪神大震災災害調査報告書（速報），平成7年1月31日，1995。
- 3) Miyajima, M.: Performance of Water Supply Pipelines due to the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989, Journal of Japan Society for Natural Disaster Science, Vol. 10, No. 1, pp. 145-157, 1991.
- 4) Miyajima, M. and Kitaura, M.: Earthquake Performance of Water Supply Pipelines During the Recent Earthquakes in Japan, Proc. of Pacific Conference on Earthquake Engineering, 1995 (in press).

## DAMAGE ANALYSIS OF WATER SUPPLY PIPELINES IN THE 1995 HYOGOKEN-NAMBU EARTHQUAKE

Masakatsu MIYAJIMA, Endi ZHAI and Masaru KITaura

Earthquake damage to water supply pipelines from the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake was investigated. An overview of the damage to water supply pipelines in the Hanshin area is presented and the relationship between the damage to water supply pipelines in Kobe city, geological features and damage to buildings is discussed. The damage rate is compared with that with occurred from past earthquakes. As a result, it was clarified that liquefaction strongly affected the damage to pipelines. The ductile cast iron pipelines with earthquake-proof joint did not suffer damage even in the liquefied area. The effect of earthquake proof joint was confirmed.