

1995年兵庫県南部地震における地盤特性を考慮した 上水道管路の被害要因分析

金沢大学 村田 晶*
 金沢大学 宮島 昌克**
 金沢大学 北浦 勝*

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震はマグニチュード7.2の大きな直下型地震であり、5,500名を超える死者、約10兆円ともいわれる被害をもたらした地震であった。また、上水道システムが機能を喪失したため、市民生活を営む上で重大な影響が出た。そこで本研究では、特に地盤特性を考慮に入れ、多変量解析法を用い上水道管路の被害特性を定量的に分析する。その結果、液状化地盤では継手部の被害、非液状化地盤では管体部の被害が卓越すること、六甲アイランド等で埋設された耐震管路の耐震性が確認されたこと、非液状化地盤では地盤種別による地震動増幅特性が被害に大きく影響すること、各地域特有の地盤特性が被害形態に大きく関わるということが明らかになった。

1. はじめに

兵庫県南部地震は、5,500人あまりのおびただしい死者、10兆円とも言われる被害総額と、未曾有の被害をもたらした。上水道システムの被害は約561億円と全体の約20分の1の被害金額ではあったが、同システムの機能喪失は、市民生活に重大な影響を与えた。また被害の特徴としては、新潟地震以来着目されている地盤の液状化と、三陸はるか沖地震で見られた段丘地形における被害がある。前者は人工島などの埋立地で顕著に報告されており、後者は神戸市街地を中心に報告されている。そこで本研究では、特に管路埋設地盤特性を考慮した上水道管路の被害特性を定量的に分析することで、今回の兵庫県南部地震における上水道管路被害特性を明らかにすることを目的としている。分析対象とする上水道システムは、被害数も多く、かつ精度の高い被害データがそろっている、神戸市水道局管内の神戸市中央区・灘区・東灘区における上水道配水管路とする。

2. 上水道配水管路被害の特徴

神戸市各区における上水道配水管被害率〔単位は敷設延長距離当たりの被害数(箇所/km)で表示〕を図2.1に示す。神戸市全体では被害率は0.41(箇所/km)となっているが、神戸市中央区・灘区・東灘区における被害率はそれぞれ1.00(箇所/km)、0.86(箇所/km)、0.87(箇所/km)と高くなっている。被害率の高いことが神戸市中央区・灘区・東灘区における上水道配水管路を分析対象地域として選んだ理由の1つである。

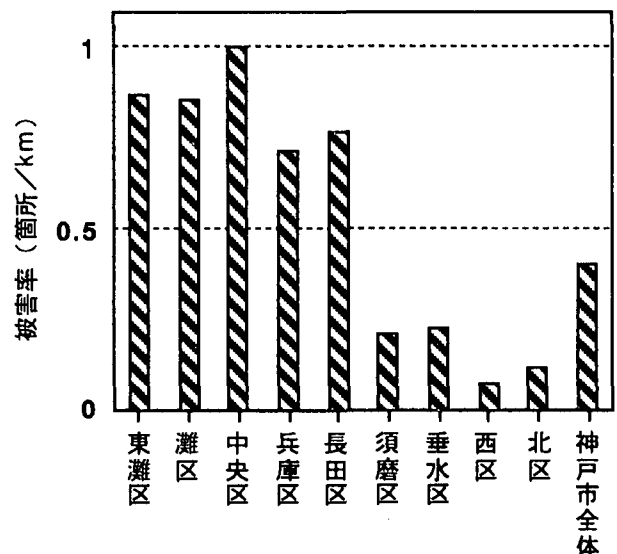


図2.1 神戸市各区における配水管被害率

キーワード：上水道，地震被害，多変量解析

*金沢大学工学部，0762-34-4654

**金沢大学大学院自然科学研究科，0762-34-4656

(1) 管路に起因する被害要因

今回分析対象地域とした神戸市中央区・灘区・東灘区における管種は、敷設延長距離のほとんどがダクトイル鑄鉄管で構成されていること、また被害管種を特定できない箇所があること、特に管路被害を地盤特性から着目する、などの理由から、被害データとしてはダクトイル鑄鉄管のみを扱うことにする。ダクトイル鑄鉄管における管径別の被害率を表2.1に示す。主な配水管の口径は100, 150, 200, 300 mmであり、これらで敷設延長距離の約85%を占める。これらの口径における被害率には大きな差はなく、管体の折損で0.22~0.32(箇所/km)、継手部の離脱で0.32~0.57(箇所/km)と、継手部の離脱の方が被害率は大きくなっている。また、他の口径についても同様な傾向があり、継手部の離脱の被害が卓越している。この理由としては既往の地震による上水道管路被害と同様に、ダクトイル管の管体強度に比べて継手強度の方が弱いためであると考えられる。ところで、一般的に口径が大きくなるほど管体強度・継手許容量が増加するのに対して、口径が大きくなるほど被害率がそれほど低減する傾向が見られないことから、管路に起因する要因以外にも被害要因があることが読み取れる。

表2.1 管径別被害率

口径(mm)	敷設距離	管体の折損		継手部の離脱		合計被害率
		被害率	被害率	被害率	被害率	
900	13.338	2	0.15	8	0.60	0.75
800	3.320	0	0.00	5	1.51	1.51
700	18.988	1	0.06	3	0.18	0.24
600	8.958	0	0.00	1	0.14	0.14
大口径管	40.584	3	0.07	17	0.42	0.49
500	20.207	2	0.10	1	0.05	0.15
400	18.470	8	0.49	16	0.97	1.46
350	0.140	0	0.00	1	7.14	7.14
300	128.958	30	0.24	75	0.59	0.83
中口径管	183.775	40	0.24	93	0.57	0.81
250	15.651	8	0.38	10	0.64	1.02
200	190.947	52	0.27	82	0.43	0.70
150	379.015	83	0.22	168	0.44	0.66
125	3.198	1	0.31	0	0.00	0.31
100	120.571	39	0.32	39	0.32	0.65
75	37.497	5	0.13	8	0.18	0.29
50	5.781	1	0.17	0	0.00	0.17
小口径管	752.660	187	0.25	303	0.40	0.65
合計	957.019	230	0.24	413	0.43	0.67

(2) 地質・地盤形態と管路被害との関係

神戸市の地質形態は、縄文海岸線(現在の国道2号線沿線付近)を基本として南北に区分して考えるとわかりやすい。縄文海岸線以北は、六甲山系の急傾斜地であり、基盤は花崗岩でできている。堆積地質は六甲山系からの流出土が扇状的に堆積した玉石地帯と、傾斜地に自然堆積した大阪層群、砂層・粘土多質地帯から形成されている。縄文海岸線以南は砂・粘土層と埋立地から形成されている¹⁾。

灘区・東灘区における配水管路被害と地質分布を図2.2に、中央区における配水管路被害と地質分布を図2.3に示す。図2.2、図2.3ともに海岸部、丘陵部それぞれにおいて被害が見られるが、ある特定の地域に被害が集中していることはなく、概略的には複数箇所の被害を受けた管路系統が比較的多いことが挙げられる。また、地質形態と被害種別の関係を敷設距離当たりの被害率で見たものを図2.4に示す。(1)で継手部の離脱による被害の卓越していることを指摘したが、特に埋立地、砂・粘土層における継手部の離脱による被害率が、それぞれ1.77(箇所/km)、0.91(箇所/km)と高いことが言える。この理由としては、これらの地域では地盤の液状化による地盤沈下、側方流動による永久変形などの影響の強いことが考えられる。また、管体の折損による被害についても同様に埋立地、砂・粘土層における被害率がそれぞれ0.72(箇所/km)、0.56(箇所/km)と高いが、この理由についても液状化現象などによる地盤変状の影響が大きく現れていると考えられる。さらに埋立地での管体・継手の被害率をあわせると2.49(箇所/km)となるが、この値は、既往の地震で顕著な液状化被害の報告された新潟地震の被害率3.31(箇所/km)、日本海中部地震の被害率3.26(箇所/km)と比べても、今回の地震の方がやや小さい値を取るものの調和的な傾向が見られる²⁾。ところが同じ埋立地盤である六甲アイランドにおける被害は件数としては4件、被害率は0.09(箇所/km)と先の値の約30分の1である。この理由としては、六甲アイランドでは上水道配水管として耐震継手が採用されているため、大規模の地盤変状にも追従できたからではないかと考えられる。このことから、埋立地のような軟弱な地盤においては、適切な耐震対策を施さない限り、管体・継手部の剛性が増加しても被害の割合はそれほど減少しないと言える。ところで花崗岩地

盤における管体の折損による被害率が 0.52(箇所/km)と比較的大きな値となっているが、これはこの地盤の近くを活断層が走っているために、局所的な地盤変形や震源に近いことによる上下動を含めた衝撃的な加速度の影響があったからではないかと考えられる。

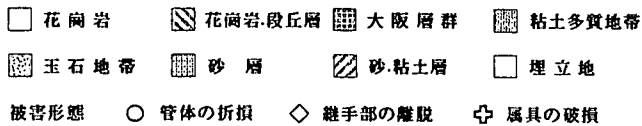
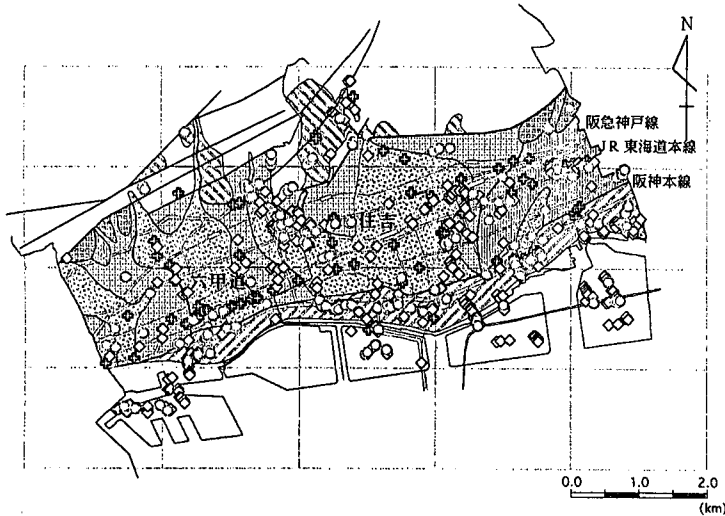


図2.2 灘区・東灘区における配水管被害と地質分布

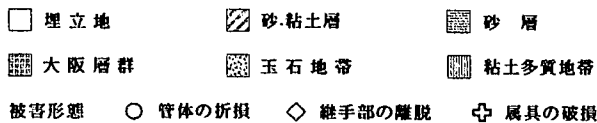
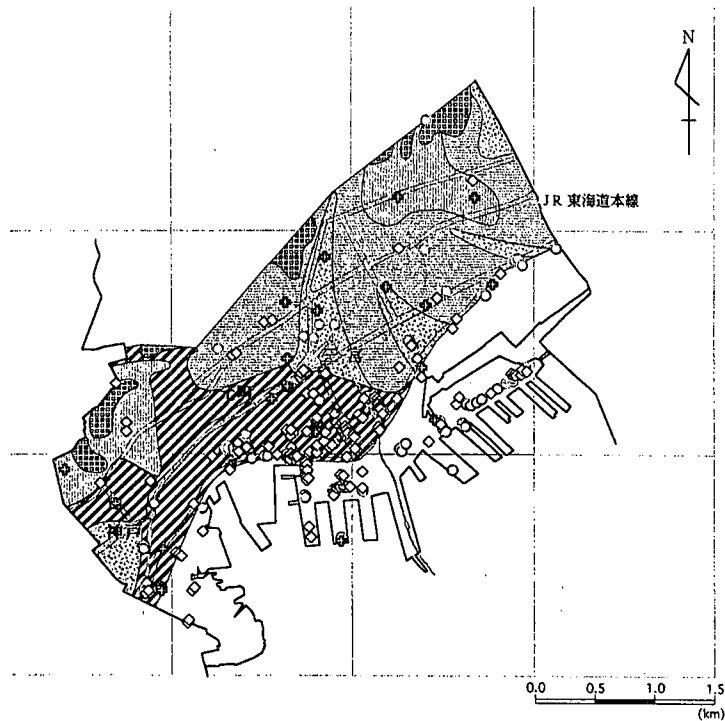


図2.3 中央区における配水管被害と地質分布

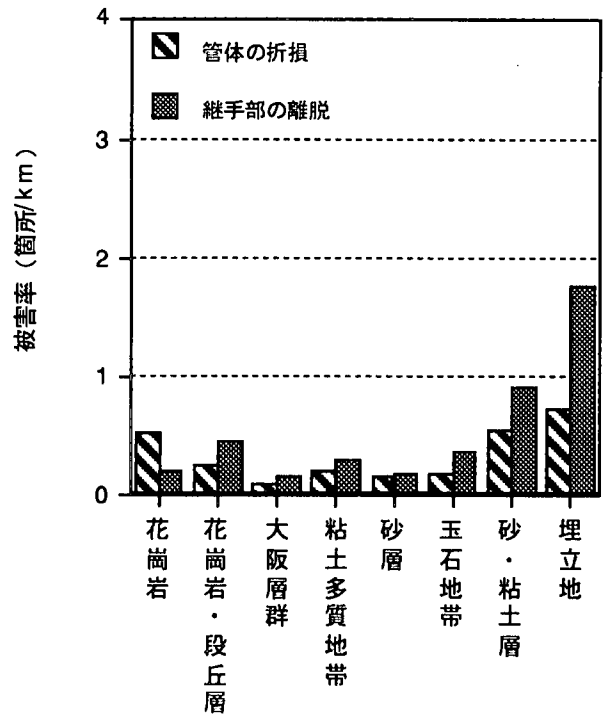


図2.4 地形形態別被害率

つぎに永久変位（水平変位）、地盤沈下と管路被害の関係レベルごとの地域に埋設されている、配水管路の敷設距離当たりの被害率として図 2.5, 図 2.6 に示す。永久変位、地盤沈下データは（財）地震予知総合研究振興会による調査資料³⁾を基に作成した。今回の分析では、地盤変状が報告されなかった被害箇所は分析から除外している。図 2.5 に示すように、永久変位量 50 cm 未満を除くと管体・継手部の合計被害率は 2.76~3.73(箇所/km)と軒並み高い値となっている。また、それらの値について変形量の増加に伴う被害率の増加は見られない。このことから変形量が 50 cm を越える地盤においては、地盤のひずみが管体強度・継手変形量に対する許容量を上回るため、何らかの耐震補強策が必要になると言える。また、図 2.6 に示すように、地盤沈下に対する被害率の相関はあまり高くない。しかし、被害率自体はどれも高い値を取っていることから、地盤沈下が起きるような液状化地盤などの軟弱地盤では、程度にかかわらず耐震対策が必要であることを意味している。

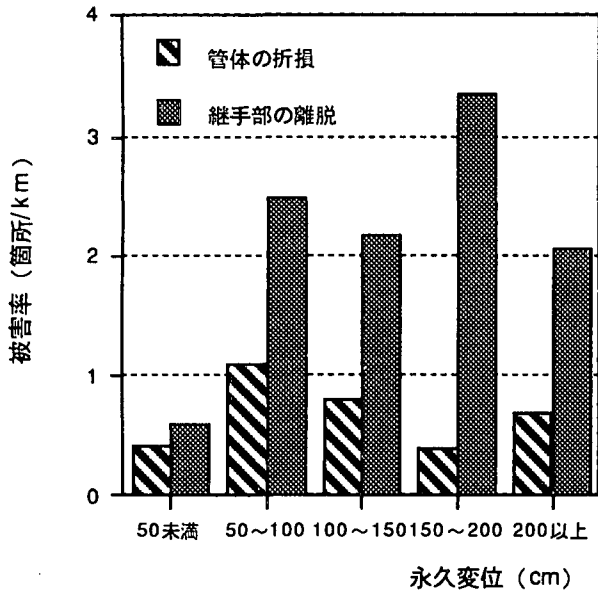


図2.5 永久変位別被害率

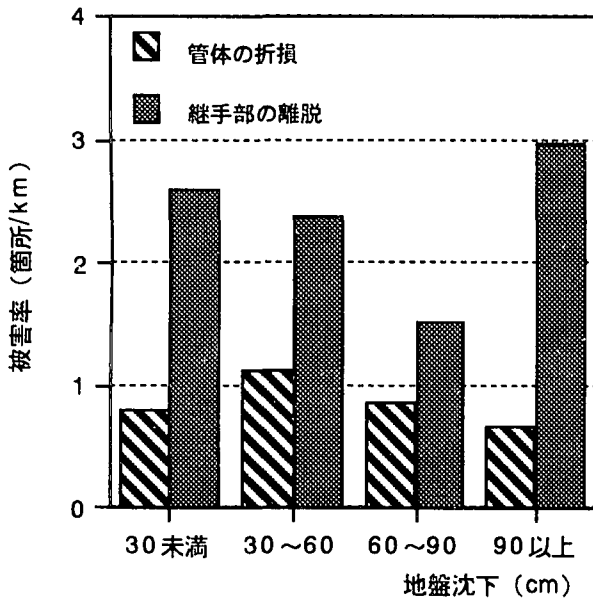


図2.6 地盤沈下別被害率

(3) 建物被害と管路被害との関係

地震動の影響を見る指標としては強震記録や、地震応答解析が考えられるが、データ数や標準貫入試験結果の入手状況から、今回の分析では建物被害の程度を地震動の影響を見る指標として用いた。そこで現地調査に基づいて、建物被害の程度をレベル1～レベル4に分類したものと、管路被害の関係について分析する。ここでレベル4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3とは木造住宅の倒壊率が30%以上、50%未満を、レベル2とは木造住宅の倒壊率が30%未満の地域を、レベル1

とは木造住宅の壁に割れ目が入る程度の地域をそれぞれ示している⁴⁾。建物被害と管路被害の関係を各レベルごとの敷設距離当たりの被害率として図2.7に示す。管体の折損についてはレベルによる違いはあまり見られないのに対して、継手部の離脱についてはレベル1を除くと、レベルが上がるごとに被害率が高くなっている。レベル1の継手部の離脱の値が大きくなった理由としては、レベル1と判定された地域には、臨海部の埋立地が範囲に含まれているためである。このことから継手部の離脱には、臨海部では地盤変状の要因が、それ以外の地域では地盤震動が大きく影響することが考えられる。

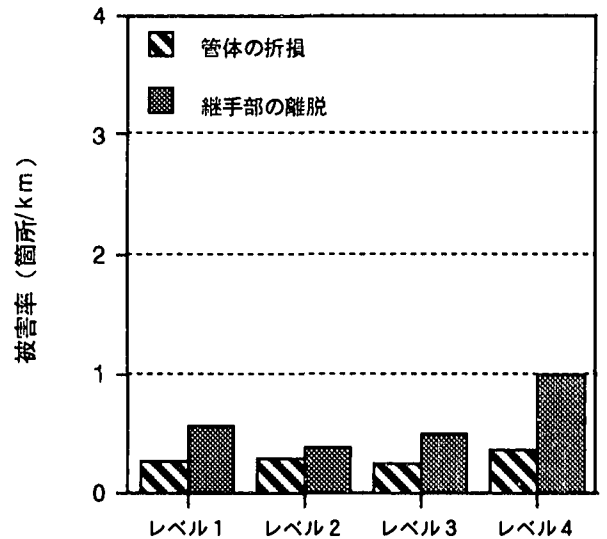


図2.7 建物被害別被害率

3. 数量化理論Ⅱ類を用いた上水道配水管被害の多変量解析

数量化理論とは、数だけではなく質的データも数量化して分析する手法であり、現在Ⅰ～Ⅳの手法がある。このうち数量化理論Ⅱ類は、質的な要因を用いて質的な外的基準を予測・判別するための手法である。本研究では、説明変数(アイテム)に地質・地形の質的要因を含んでいること、外的基準として被害の種類(管体被害、継手の離脱)を判別することを目的とするため、数量化Ⅱ類を用いた上水道配水管被害の多変量解析を行う。

数量化Ⅱ類を用いた分析対象地域としては2.と同様に神戸市中央区・灘区・東灘区における上水道配水管路とする。アイテムとしては、管体の口径、地質・地形形態、建物被害、永久変位、地盤沈下の5つを用いる。なお、地質・地形形態においては、分類の都合

上花崗岩を基盤に、花崗岩・段丘層と大阪層群を高位段丘に、粘土多質地帯、砂層、玉石地帯を低位段丘に、砂・粘土層を沖積地に、埋立地は埋立地にそれぞれ分類している。

表3.1に分析に用いたアイテムとカテゴリーを示す。数量化Ⅱ類による分析の限界として、各カテゴリー内のサンプル数はほぼ均等になるようにしなければならず、分析に用いるアイテム間の関連性が強いと、それらのアイテムに対する外的要因への影響の大きさを相殺してしまう可能性がある。そのため、各カテゴリー内のサンプル数については、質的データ以外はなるべくサンプル数が均等になるようにカテゴリーを設定している。また、アイテム間の関連性については、口径、地質・地形、建物被害を共通アイテムとし、永久変位をアイテムとした場合（case-1）、地盤沈下をアイテムとした場合（case-2）に分けてそれぞれ分析を行う。

図3.1、図3.2はそれぞれ case-1, case-2 について数量化Ⅱ類を用いた分析結果である。ここで、外的基準より正の値が継手部の離脱の被害に、負の値が管体の折損の被害にそれぞれ寄与するものとする。永久変位をアイテムとした場合は図3.1に示すように、管体の折損、継手部の離脱のカテゴリーウェイトはそれぞれ-0.94, 0.61となり、相関比は0.57であった。各アイテムの寄与率（偏相関係数）は永久変位がもっとも高く、寄与率0.49であり、高い順に建物被害、地形形態、管径の順となった。カテゴリーウェイトから、継手の離脱に寄与する要因としては、永久変位量が大きいこと、建物被害はレベルが小さいこと、地形は埋立

地、そして大口徑管が考えられ、管体の折損についてはそれらの結果の逆が考えられる。つぎに地盤沈下をアイテムとした場合は図3.2に示すように、管体の折損、継手部の離脱のカテゴリーウェイトはそれぞれ-1.01, 0.73となり、相関比は0.74と良い結果であった。各アイテムの寄与率（偏相関係数）は管径がもっとも高く、寄与率0.49であり、高い順に地盤沈下、建物被害、地形形態の順となった。カテゴリーウェイトから、継手の離脱に寄与する要因としては、case-1の場合とほぼ同様な結果が得られるが、地盤沈下があること、建物被害はレベルが小さいか大きいこと、地形は埋立地か沖積地が、そして小口径管以外の口径が挙げられる。

以上の結果より、今回の地震における被害形態を分類する要因としては、管径と地盤変状の影響が大きいこと、地形形態や地盤震動は被害形態を分類する要因としてはあまり適当でないことが明らかとなった。

表3.1 分析に用いたアイテムとカテゴリー

1. 管径		4-1. 永久変位 (case-1)	
種類	カテゴリー	種類	カテゴリー
~φ300mm	1	~50cm	1
φ300~φ600mm	2	50~100cm	2
φ600mm~	3	100~150cm	3
		150~200cm	4
		200cm~	5
		永久変位なし	6
2. 地形・地質形態		4-2. 地盤沈下 (case-2)	
種類	カテゴリー	種類	カテゴリー
基盤	1	~30cm	1
高位段丘	2	30~60cm	2
低位段丘	3	60~90cm	3
沖積地	4	90cm~	4
埋立地	5	地盤沈下なし	5
3. 建物被害		外的基準	
種類	カテゴリー	種類	カテゴリー
レベル1	1	管体の折損	1
レベル2	2	継手部の離脱	2
レベル3	3		
レベル4	4		

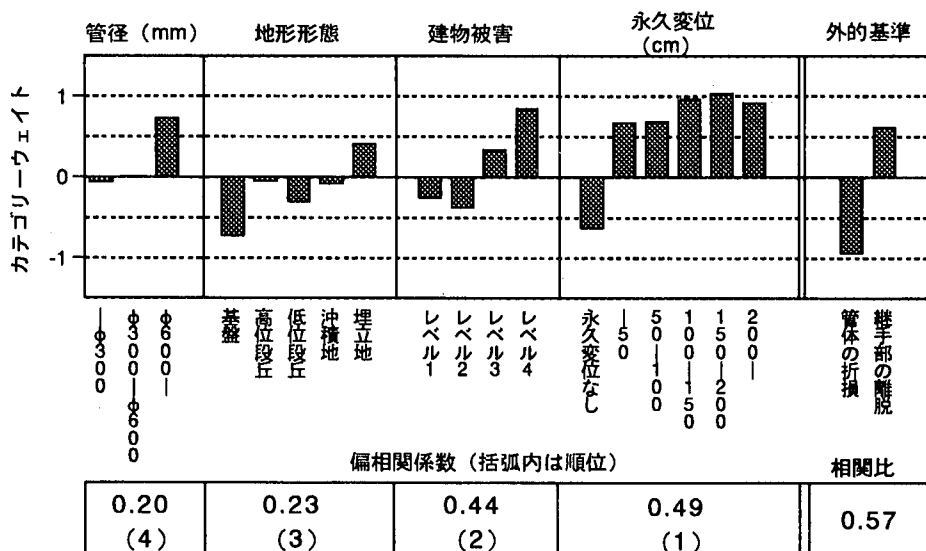


図3.1 数量化Ⅱ類結果 (case-1)

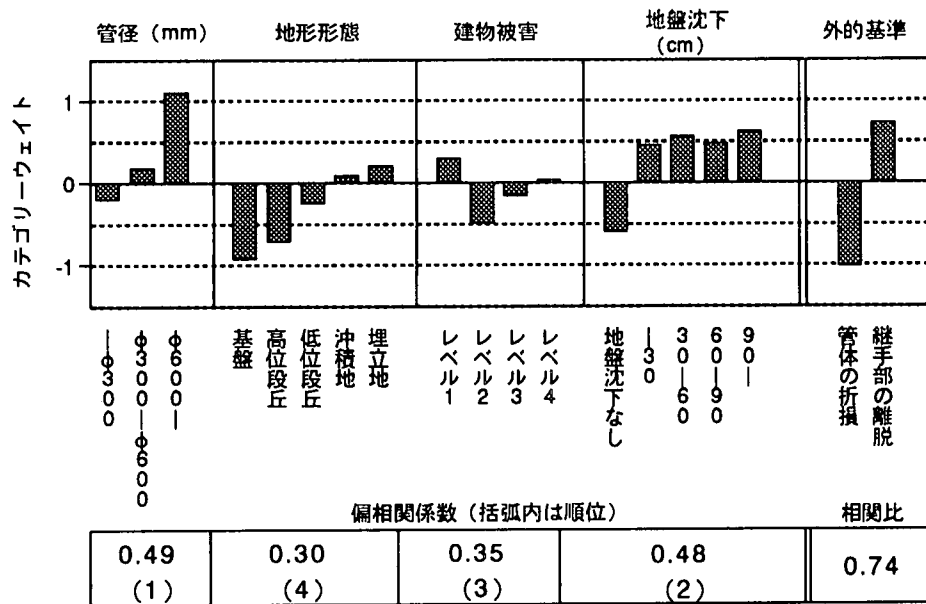


図3.2 数量化Ⅱ類結果 (case-2)

4. まとめ

以上の結果をまとめると以下のようなものである。

- ①数量化Ⅱ類を用いた分析結果と被害率で分析した結果には良い対応があり、地盤変状と管径が継手部の被害に大きく影響する。
- ②永久変形や地盤沈下を起こす地盤では、変状の程度にかかわらず耐震対策を講じる必要がある。現に、耐震対策を講じてあった六甲アイランドについては、ほとんど被害の報告がなかった。

今後は、配水管路被害の有無を判別する要因と配水管属部の被害要因について多変量分析を行う必要がある。最後に本研究を行うに当たり、卒業論文として本研究の資料整理等にご尽力頂きました田中良英氏（現 神戸大学大学院生）に感謝します。また、本研究が文部省科学研究費（基盤研究（C））、課題番号 07650539、代表 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) 藤田和夫・笠間太郎：神戸地域の地質 地域地質研究報告（5万分の1）、地質調査所、1983.3.
- 2) Miyajima, M. and Kitaura, M. : Earthquake Performance of Water Supply Pipelines During the Recent Earthquakes in Japan, Proc. of the Pacific Conf. on Earthquake Engrg., Vol.2, pp.87-96, 1995.
- 3) 浜田政則・磯山龍二・若松加寿江：1995年兵庫県南部地震 液状化、地盤変位及び地盤条件、（財）地震予知総合研究振興会、1995.9.
- 4) 中央開発（株）：1995年兵庫県南部地震 阪神大震災災害調査報告書、1995.3.

DAMAGE ANALYSIS OF WATER SUPPLY PIPELINES CONSIDERING GEOLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE 1995 HYOGOKEN-NAMBU EARTHQUAKE

Akira MURATA, Masakatsu MIYAJIMA and Masaru KITaura

Earthquake damage to water supply pipelines from the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake was investigated. The purpose of this study is to analyze of water supply pipelines quantitatively using multivariate analysis method. As a result, it was clarified that liquefied ground strongly affected the damage to pipe joint rather than non-liquefied ground and geological site effect related to the damage characteristics of pipe.