

「資料」

阪神・淡路大震災における水道管路の被害と分析

日本水道協会工務部

1. はじめに

死者6,300名をこえる阪神・淡路大震災から1年余が経過した。この間の対応等については本誌第64巻第10号(平成7年10月)¹⁾に述べた通りであるが、この中で、被災水道事業者の管路被害に関する資料を収集し、地盤情報等との関連を含めて水道管路の地震被害の実態の解析に努めている旨を述べた。

この度、各被災事業者からの全面的な協力を得て水道管路の被害の状況の全貌が見えてきたところである。ここでは被害に関する基本的な数量と要因分析結果等を紹介し、全国の水道事業者の参考に供したい。

2. 調査対象と被害の概要

1) 調査対象

兵庫県南部地震による水道施設の被害は、配水管をはじめとし、取水、導水、浄水、送配水と多岐にわたった。被災を受けた事業者も兵庫県、大阪府下に及んだ。

本調査は、上記被害の内、神戸市、芦屋市、西宮市、宝塚市、尼崎市、大阪市および北淡町の7つの水道事業者について主に配水管の被害について、資料を収集、データベース化を行い、被害の分析を行ったものである。なお、水管橋、橋梁添架部等の地上配管については、本調査結果には含まれていない。

上記の各事業者から配水管(含む、属具)、給水管の被害箇所の修繕台帳および工事写真を収集した。この内、配水管については、全データをコンピュータ・データベース化した。

2) データベース化

収集、整理した資料の内、配水管については、地理情報システム(GIS)の上に各被害箇所がプロットされている。また、各被害箇所については、管理番号、地名、管種、口径、被害形態、布設年

度が属性としてデータベース化されている。また、工事写真はスキャナーにて読み取り、デジタル画像データとした。入力した画像データは約13,000件にのぼった。

特に、神戸市水道局(東部センター、中部センター、西部センター)、芦屋市水道部(奥山、奥池を除く全市)、西宮市水道局(南部地区)については、後述する各種の分析を行うために、各々の配水管管理図(縮尺1/6000~1/5000)をGISに入力した。これらの市については、配水管路図上に被害箇所がプロットされており、各箇所には、各々の属性を示すデータが関連付けられている。

また、上記の被害および管路の情報に加えて、神戸、芦屋、西宮の各市については、表層地質、液状化の程度、震度階等の関連情報がGISに入力された。管路被害の要因を分析するにあたり、神戸、芦屋、西宮をカバーする範囲で国土標準メッシュに準拠する約290m×230mのメッシュを導入した。管路被害と関連情報は、このメッシュごとに集約されている。

3) 管路被害

調査対象事業者の配水管被害の数量を表-1にまとめる。また、調査対象事業者の配水管被害箇所の分布を図-1に示す。

調査対象7事業者で配水管被害2,885件、属具被害745件、合計で3,630件にのぼった。これら以外の事業者も含めると今回の震災による配水管被害は約4,000件であった。給水管(公道下)においては、神戸市では約11,800件、芦屋市、西宮市ではそれぞれ約380件、約4,800件となっている。

表-2に各管種ごとの代表的な被害モードをまとめる。

以上のこと等から配水管被害の特徴は以下のよう

・ダクタイル管(DIP)の一般継手(A, K, T

表-1 調査対象地域の配水管および属具の被害集計結果

事業体	管種	管体被害				小計	継手部被害					不明	小計	不明	合計	(被害)		属具					小計	被害総合計			
		直管	異形管	分岐管	その他		直管	異形管	磨損	突込み	不明					延長距離 (km)	被害率 (件/km)	空気弁	仕切弁	消火栓	止水栓	詳細不明					
神戸市	DIP	9	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9											
	CV	155	44	36	18	253	118	13	6	3	0	0	1	141	0	394											
	VP	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	24											
	CP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13											
	小計	165	44	36	18	263	118	13	6	3	0	0	1	142	0	434											
芦屋市	DIP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CV	54	0	0	0	54	67	0	0	0	0	0	0	67	4	121	57.0	1.554									
	VP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	小計	54	0	0	0	54	67	0	0	0	0	0	0	67	4	121	57.0	1.554									
西宮市	DIP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CV	88	5	1	0	94	74	18	7	2	0	0	0	94	13	207	193	1.539			2	53	0	10	0	85	362
	VP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	小計	88	5	1	0	94	74	18	7	2	0	0	0	94	13	207	193	1.539			2	53	0	10	0	85	362
大阪市	DIP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CV	63	8	10	0	81	85	2	0	0	0	0	0	87	0	178	637.0	0.402									
	VP	52	24	12	0	88	51	15	6	0	0	0	0	72	0	160	183.5	1.177									
	CP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	小計	115	32	22	0	169	136	17	6	0	0	0	0	162	0	338	820.5	0.143									
尼崎市	DIP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CV	31	5	0	0	36	46	4	0	0	0	0	0	40	0	76	492.5	0.044			0	0	0	4	13	17	235
	VP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	小計	31	5	0	0	36	46	4	0	0	0	0	0	40	0	76	492.5	0.044			0	0	0	4	13	17	235
宝塚市	DIP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	VP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	小計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
北淡町	DIP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CV	22	5	5	0	32	7	7	7	0	0	0	0	11	0	47											
	VP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	小計	22	5	5	0	32	7	7	7	0	0	0	0	11	0	47											
上記の事業体の合計	DIP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
	CV	449	68	71	19	607	248	18	32	5	0	0	10	18	1209	13	1293										
	VP	147	31	19	0	197	81	16	128	2	0	0	0	14	0	352											
	CP	14	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14											
	小計	620	99	90	19	828	339	34	140	7	0	0	10	24	1223	13	1337										
合計	728	102	98	19	947	1580	91	171	8	14	0	44	1888	50	2885												

1. DIPの管体被害の大半は、管体直下のH形鋼等の硬化物による局部損傷やボックスカルバート上部に布設されていた管の地盤の不等沈下に伴うものであった。
2. 上記被害の他に、仮設配管、試掘、仕切弁切込みによる工事があった。

表-2 各管種の主な被害モード

管 種	継手形式	主な被害形態
ダクタイル管	一般継手 (A, K, T 形)	継手の抜け
	耐震継手 (S, S II 形)	被害なし
鋳鉄管	印ろう形	継手の緩み・抜け 管体破損
	A 形	継手の抜け 管体破損
鋼管	溶接継手	溶接部の破損
	ネジ継手 (SGP)	管体破損 継手の抜け・破損
硬質塩化ビニル管	TS 形	管体破損 継手の抜け・破損
石綿セメント管		管体破損 継手の抜け・破損

- 形) のほとんどは、過去の地震と同様、継手の抜けによる漏水であった。なお、西宮市等の地滑り地帯や液状化発生地帯の地盤変状が大きかった場所の数カ所において、継ぎ輪部で挿し口どうしのくい込み、継手部で挿し口の受口内への入り込み変形などがみられた。
- ・DIP の耐震継手である S, SII 形管路は埋立地や造成地で約270km 布設されていたが、被害は発生しなかった。この内、液状化の発生した埋立地では約100km の耐震継手管が布設されていた。
 - ・鋳鉄管 (CIP) と硬質塩化ビニル管 (VP) は、過去の地震と同様、継手の抜けや破損、および管体破損がみられた。
 - ・鋼管は、神戸市の埋立地区であるポートアイランドで液状化による地盤の大きな側方移動に伴い非裏波溶接部が破断したものがみられた。また、水管橋の橋台の破損にともなって管体も破損したものが数カ所みられた。
 - ・属具に関しては、仕切弁、空気弁、消火栓の被害はフランジ部の緩みや、破損、または本体の破損によるものがみられた。なお、事業者でのヒアリング調査によると属具で本体が破損したものは鋳鉄 (FC) 製がほとんどであったとのことである。

3. 被害の要因分析

配水管被害を関連要因と対比させながら分析することを試みた。分析の対象は、詳細な管路情報が GIS 化されている神戸市、芦屋市、西宮市とした。この地域は先にも述べたように約290m × 230m のメッシュを導入して、このメッシュを1つの単位として集計、分析を行った。

図-2にメッシュデータ化した関連要因例を示す。表層地質は、この地域の一般的な表層地質図に、国土地理院の土地条件図に基づく微地形分類 (自然堤防、埋立地) を一部参考にして作成した。液状化については、濱田教授らの航空写真による地盤変状調査結果²⁾に基づき、「顕著な液状化で、噴砂・地割れがほぼ全面的に見られるもの」を100%、「まったく噴砂が見られない地域」を0%、両者の中間を50%と区分し、表示したものである。50%とは、メッシュ内に噴砂・地割れは認められるものの、それほど顕著ではないものとした。この区分は、おおむね液状化の影響の程度を表すものと考えてよい。震度階は中央開発(株)が調査、作成したもの³⁾をメッシュ化している。この震度階は基本的には気象庁の各震度の定義によったものであるが、同社が独自に調査した結果に基づき震度5以上の地区を示したものである。ただし、気象庁の定義にはない震度超7が区分されている。この超7は同社独自のもので「木造家屋倒壊50%以上 (震度7は30%以上)、鉄筋コンクリート造の損害多い」と定義されている。

管路被害件数、延長をメッシュデータに集約した例を図-3に示す。同図には参考のためにメッシュごとの被害率 (箇所/km) も示している。これは、管種、管径、被害形態によらず全てのデータを表示したものであるが、パソコンでこれらの条件を細かく指定すれば、対応した表示が得られるようになっている。

上で述べたメッシュデータに基づき、管の被害箇所・形態、管種、口径、震度階、表層地質、液状化の程度を要因としたクロス集計を行った。集計は各市ごとに行ったが、ここでは紙面の制約上全てを紹介できず、3市の合計としての要因ごとの単純集計、および管種に着目したクロス集計結果を述べる。

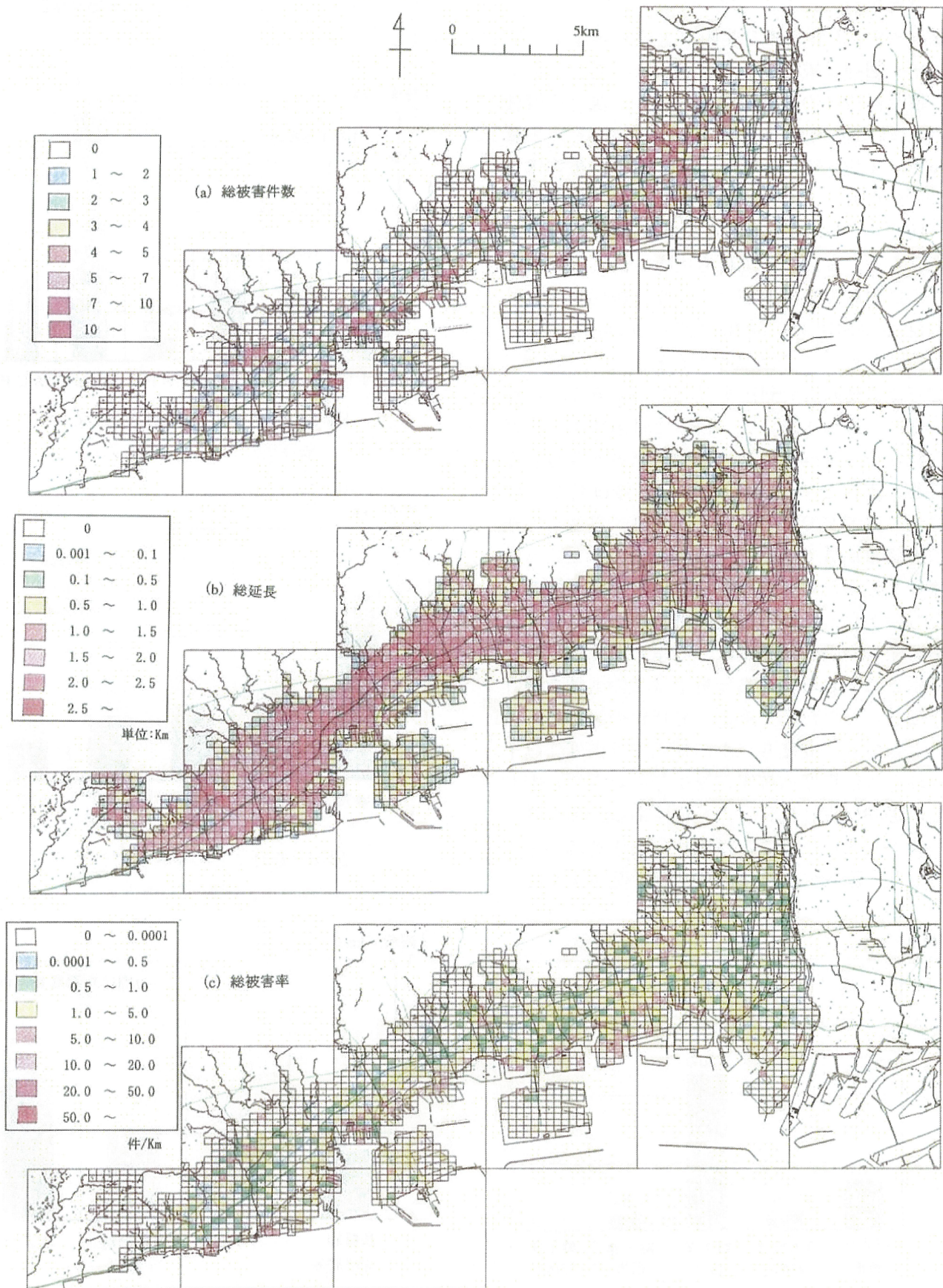


図-3 配水管被害のメッシュ表示例

1) 単純集計

図-4~9に3事業者の要因ごとの単純集計結果を示す。図-4は被害箇所・形態ごとの対比であるが、継手部抜けの被害が最も大きい。図-5の管種ごとでは、被害率としては、石綿セメント管(ACP)、CIP、VPの順に多い。CIPの被害率を1.0とすると、ACPは1.2倍(1.782÷1.508)、VPは0.9倍、DIPは0.3倍となる。図-6の管径ごとをみると、φ75以下で最も大きく、口径が大きくなるにつれて被害率が小さくなる傾向を示す。なお図-5のSGPは、適用口径が75mm以下で延長が短いためここでは参考とする。

図-7は震度階との対応を見たものである。これによると、震度4以下と5以上では被害率に差がみられるが、震度5以上では大きな差がみられない。特に震度5で1.121箇所/kmとほぼ超7と同じ程度の被害がでていたが、これは、震度7の地帯の南側の地域で液状化が発生しているところを震度5としたためであり、液状化の影響が反映されたものとなっている。震度階のベースとなった中央開発(株)の調査結果には、沿岸の埋立地については示されておらず、当分析ではこの地域を便宜上震度5としたためである。液状化の影響を考慮しないとしても、震度6以上の地域では震度4以下の地域の3倍程度の被害が発生していたことがわかる。図-8は表層地質との対応である。埋立地での被害が大きい、ここは液状化発生地域に相当しており、図-9によれば、液状化が発生すると、

非液化化発生地域(0%)の2~3倍の被害が発生することがわかる。

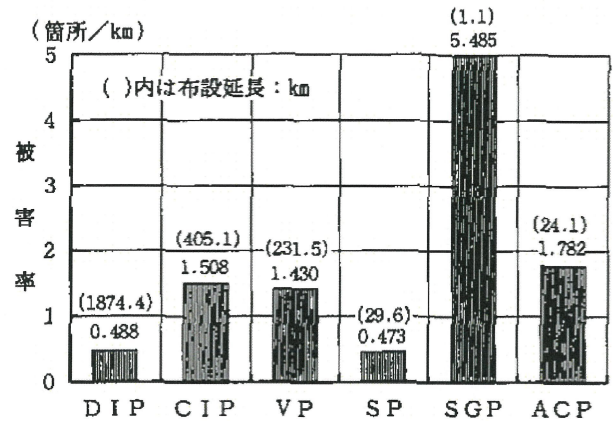


図-5 管種ごとの単純集計結果 (神戸市, 芦屋市, 西宮市)

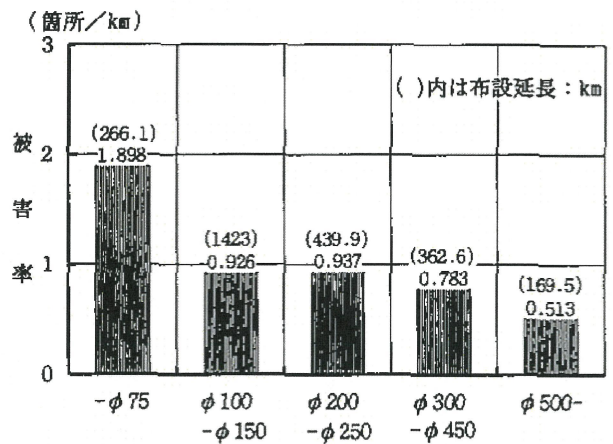


図-6 管径ごとの単純集計結果 (神戸市, 芦屋市, 西宮市)

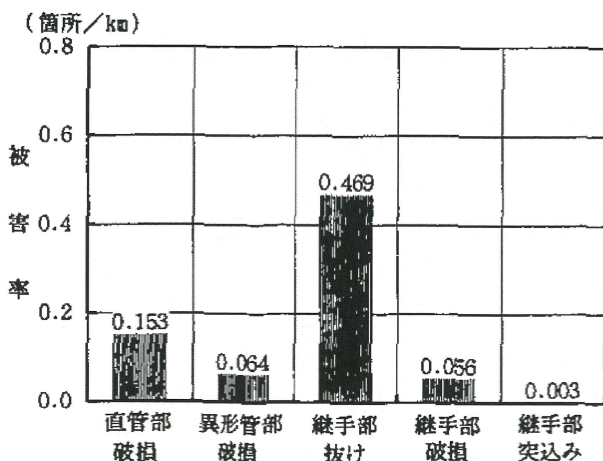


図-4 被害箇所および形態ごとの単純集計結果 (神戸市, 芦屋市, 西宮市)

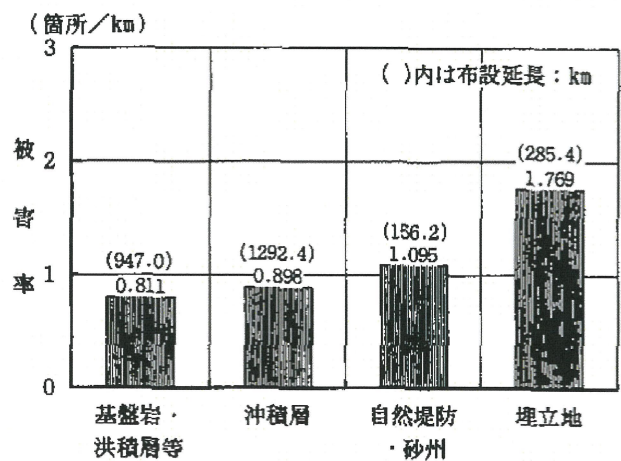


図-7 震度階ごとの単純集計結果 (神戸市, 芦屋市, 西宮市)

図-9で液状化発生の顕著な地域(100%)の被害率が中間地域(50%)のものより低いですが、ポートアイランド、六甲アイランド、芦屋浜等、液状化の顕著な地域にはS形、SII形の耐震管路が多く埋設されていたことにより被害率が小さくなったものと考えられる。たとえば、ポートアイランドでは約27%、六甲アイランドでは約97%のS形、SII形の布設割合であった。なお、図-7~9は全ての管種が含まれたものであり、各管種ごとの内容については後記のクロス集計結果で述べる。

図-8の表層地質の対比において、基盤岩・洪積層の被害がほぼ沖積層と同じ程度に発生している。これは、六甲山地のすそ野に帯状に広がる地域に相当し、人工的な造成地における盛土のすべり等の地盤変状による被害が大きく寄与しているものと考えられる。また、これら山すその丘陵地で被害が集中している地区(西宮市の丘陵地区等)を

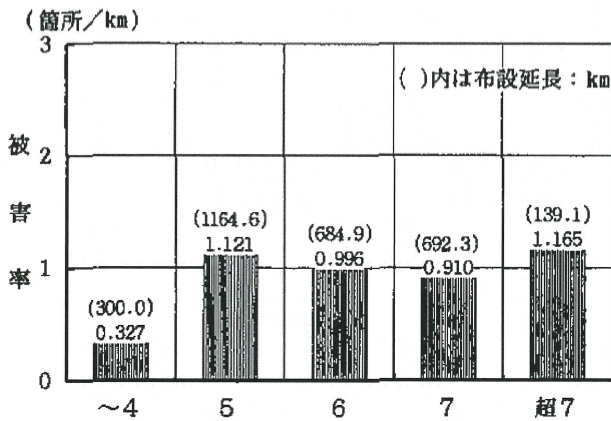


図-8 表層地質ごとの単純集計結果 (神戸市, 芦屋市, 西宮市)

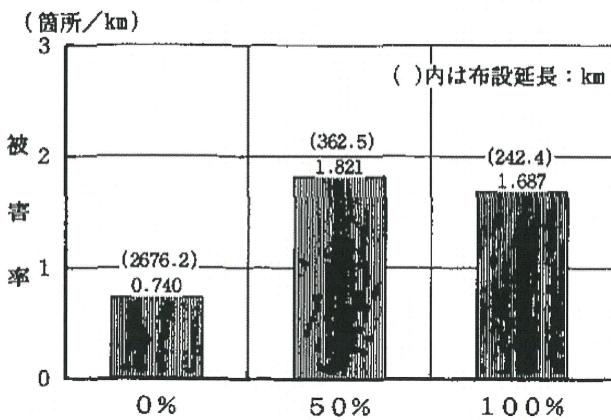


図-9 液状化の程度ごとの単純集計結果 (神戸市, 芦屋市, 西宮市)

詳細にみてみると、被害はため池の周辺、あるいは旧ため池地区が多いことがわかっている。これら地区の一部では噴砂も認められていた。

2) 管種に着目したクロス集計

ここでは管種を中心として、その被害の内訳を見ることとする。表-3に各要因の内訳を示す。これは、神戸、芦屋、西宮の合計である。これらの数値を詳細に見ていくと、管の被害の全体像が見えてくるが、ここでは布設延長の多いDIPとCIPをとりあげ、両者対比しながら被害の特徴を見ていく。

図-10に被害箇所・形態ごとの被害率を示す。DIPは915箇所の被害があったが、その内の96%にあたる880箇所が継手部の抜け被害で、その被害率は0.469箇所/kmである。一方、CIPは611箇所の被害の内、継手部抜けの199箇所(32%)に比べて、管体破損381箇所(62%)の方が多く、DIPと傾向を異にする。

図-11には、管径ごとの被害率を示す。DIPではφ75以下が1.029箇所/kmと最も大きいですが、φ100~450の範囲では約0.5箇所/km程度と、この口径では被害率はあまり変わらない。しかし、φ500以上になると被害率はかなり小さくなる。

一方、CIPでは口径が大きくなるにつれて被害率は、徐々に小さくなっていくことがわかる。

図-12~14に震度階、表層地質、液状化の程度とDIP、CIPの被害率を対比したものを示す。図-12の震度階で見ると、CIPは震度が大きくなるにつれて、被害率が大きくなる傾向があるのに対

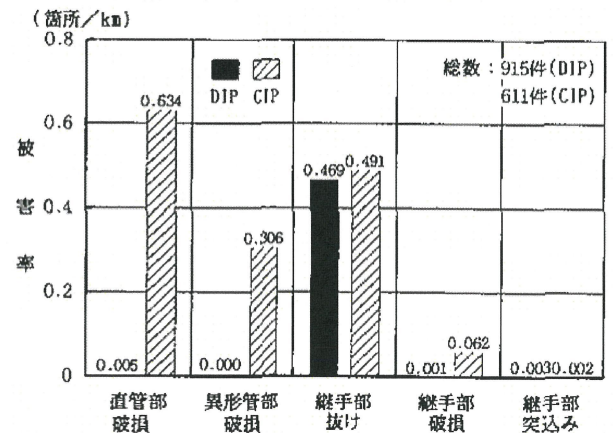


図-10 被害箇所および形態ごとのクロス集計結果 (神戸市, 芦屋市, 西宮市)

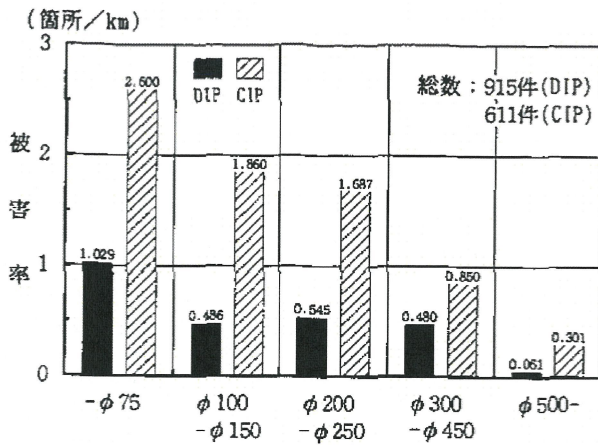


図-11 管径ごとのクロス集計結果
(神戸市, 芦屋市, 西宮市)

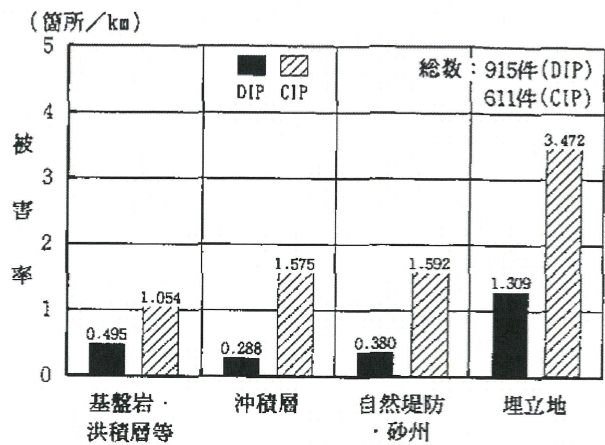


図-13 表層地質ごとのクロス集計結果
(神戸市, 芦屋市, 西宮市)

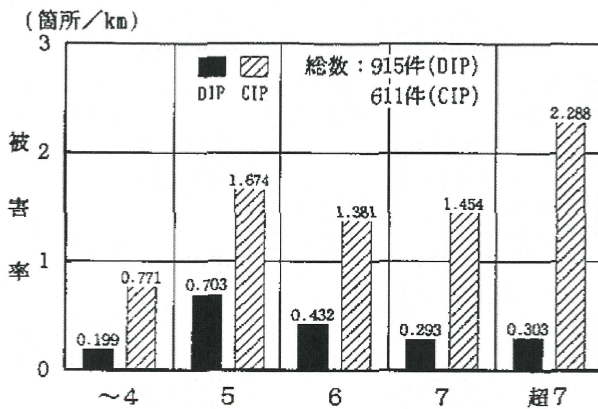


図-12 震度階ごとのクロス集計結果
(神戸市, 芦屋市, 西宮市)

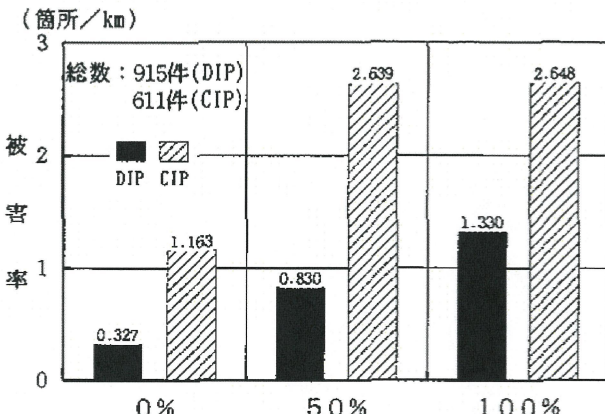


図-14 液状化の程度ごとのクロス集計結果
(神戸市, 芦屋市, 西宮市)

して、DIPでは震度5は図-7で説明した要因が考えられる。また、震度超7は図-9での説明のとおりであって他はそれほど震度の影響は見られない。これは、CIPとDIPの管体、継手構造特性の違いの影響がでていることを示しているものと推察される。

図-13の表層地質については、埋立地での値が大きい。これは図-14に示すように、液状化の影響によるものであり、液状化発生地域(100%)では非液状化発生地域に比べてCIPでは約2倍、DIPでは約4倍の被害が発生していたことになる。ただし、被害の大きさはDIPに比べてCIPの方が2~3倍大きい。なお、液状化による地盤変状と被害の関係については後述する。図-13の表層地質では、DIPが沖積層、自然堤防・砂州に比べて基盤岩・洪積層で被害が大きいのは、先にも述

べた通り丘陵地における旧ため池の影響や地盤の切盛土等の人工改変に伴うものが多かったためであると推定される。

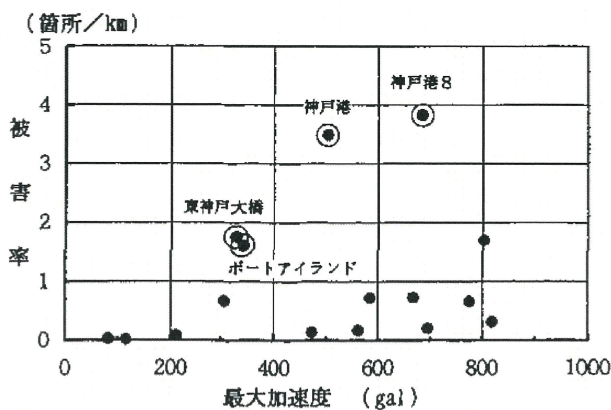
4. 地震動強さと被害率

3項で震度階と配水管被害の関係を見たが、震度階は建物の被害の程度に基づくものであり、管路被害との関係を見るには、多少あいまいさをもっているものと思われる。たとえば、震度階には建物の構造、建築年代といった事項は考慮されていない。また、液状化が顕著であった地区では、建物が少なかったせいも、前述したように震度階が示されていない。一方、阪神地区では、関係機関により強震観測が行われており、多くの記録が得られている。ここでは強震観測が得られている地点周辺の配水管被害率と観測された地震動強さを

関連付けてみることにした。

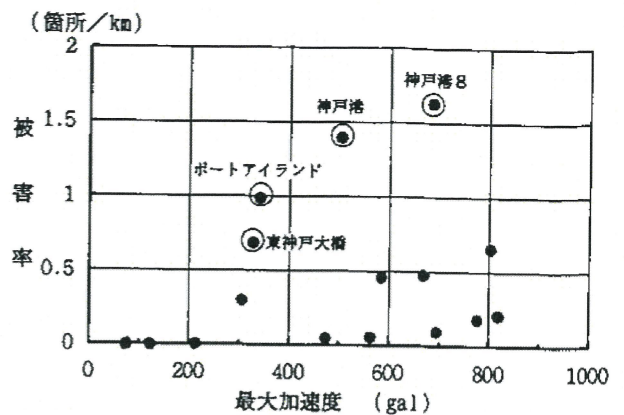
地震動強さとしては、水平方向の最大加速度（水平2成分の大きい方）とし、各機関から公表されている数値を用いた。この観測地点を中心として、約2 km四方の範囲の管路の被害率を算定した。ここでは、この程度のエリア内では地震動はほぼ同等であると想定したものである。

図-15に最大加速度（水平2成分の大きい方）と全管種合計の被害率の関係を示す。おおむね200gal程度から被害がはじめ、最大加速度の増大につれて被害率も大きくなっていく。図中の観測地点名を示した箇所は、顕著な液状化が発生していた地点である。これらの地点では、非液状化発生地点と比べて3～4倍の被害率となっている。図-16に DIP および CIP の被害率と最大加速度との関係を示す。これらの管は布設延長も多く、その被害率の値は他の管種に比べて信頼度が高いと思われる。DIP では300gal程度から被害がはじめ、非液状化発生地域に着目すると600～800galでは、おおむね0.1～0.7箇所/km程度である。一方、CIPでは被害のはじめる加速度は200gal程度からであり、600～800galでは0.3～2.0箇所/kmと DIP に比べて3倍程度大きい。CIPは明らかに最大加速度の増大につれて被害率も大きくなるが、DIPについては、ややその傾向が小さいように思われる。また、液状化地点をみると、DIP、CIPとも非液状化地点と比べてかなり大きな被害率となっている。DIPでは600～800galで非液状

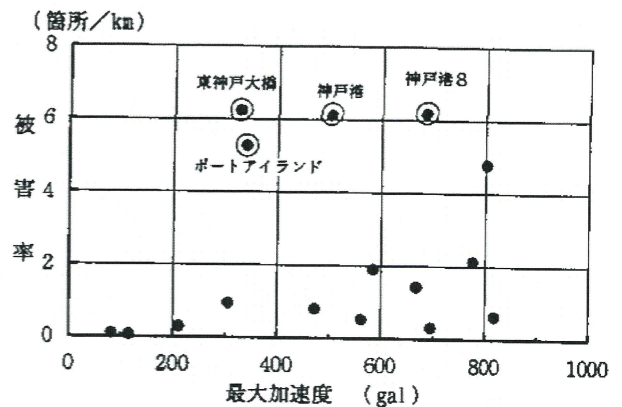


(○は液状化発生地域を示す)

図-15 観測された水平最大加速度と配水管被害率の関係



a) DIP



b) CIP

(○は液状化発生地域を示す)

図-16 観測された最大水平加速度と被害率の関係

化発生地点と比べて約6倍の被害率を示す。一方、CIPの被害率は、液状化発生地点ではほぼ一定（6箇所/km程度）であり、非液状化発生地点との比率ではDIPと同様6倍程度となっている。この値は前述した3項のクロス集計に基づく分析結果とオーダー的には同等である。

5. 液状化による永久変位の影響

地盤の液状化が埋設管にどのような形で影響を及ぼし、被害につながるか、現状ではあまり明確ではない。しかし、液状化に伴い地盤が水平方向に流動すると埋設管は大きな力を受け、被害は増大するものと考えられる。

兵庫県南部地震においては沿岸部の埋立地において液状化が発生し、配水管の被害に影響を与えたことは、先の3、4項で述べたが、これら液状

化発生地域の一部においては、数 m にも及ぶ地盤の側方流動が発生していた。濱田らは、これら地区について地震前後の航空写真を用いて、地盤の側方流動量を求めている²⁾。本調査では、ポートアイランド、六甲アイランド、芦屋浜を対象として、地盤の側方流動量と配水管の被害について分析した。これらの地区は、S 形、SII 形の耐震管路が多く採用されており、一般継手と対比して、これらの継手の挙動をみる事ができる。

濱田らによる側方流動量の測定結果の例（水平変位量）を図-17に示す。この例は六甲アイランドの北側の地区である。側方流動はベクトルの形で表わされ、流動の方向および流動量が示されている。

本調査では、上記の対象地区の管路に沿って図-17に例示するような測線を設け、周辺のベクトルから管軸方向および管軸直角方向の平均地盤ひずみを求め、これと管路の被害の関係をみた。

(合計133測線)

図-18に DIP について地盤の軸方向平均ひずみの分布、および各測線の範囲内で被害があったか否かの区分を示す。この図から管路周辺の地盤の軸方向の平均地盤ひずみはほぼ 1% 以下であった

ことがわかる。図-18a)の一般継手 (A, K, T 形)のものをみると、地盤ひずみが0.2~0.4%をこえると被害が発生しはじめ、0.6%をこえると全ての測線内で被害が発生していることがわかる。例えば A 形継手の許容伸び量 (最大伸び量の 1/2) に相当するひずみは0.4%程度であり、上記の結果は継手の性能とほぼ一致する傾向を示している。

図-18b)は耐震継手 (S, SII 形)の管路の集計結果である。調査対象地区の埋立地では、約100 kmの耐震管路が布設されていたが、耐震継手の被害はなかった。耐震継手の軸方向許容ひずみは±1%であり、この性能が検証されたと言える。

6. おわり

以上、阪神・淡路大震災における水道管路の被害と分析結果を述べてきた。紙面の制約上、ここでは述べられなかったが、被害の多かった芦屋市から西宮市にかけての丘陵地の分析も行っている。これらについては、ここで示した詳細内容も含め、今年度中に報告書としてまとめる予定である。

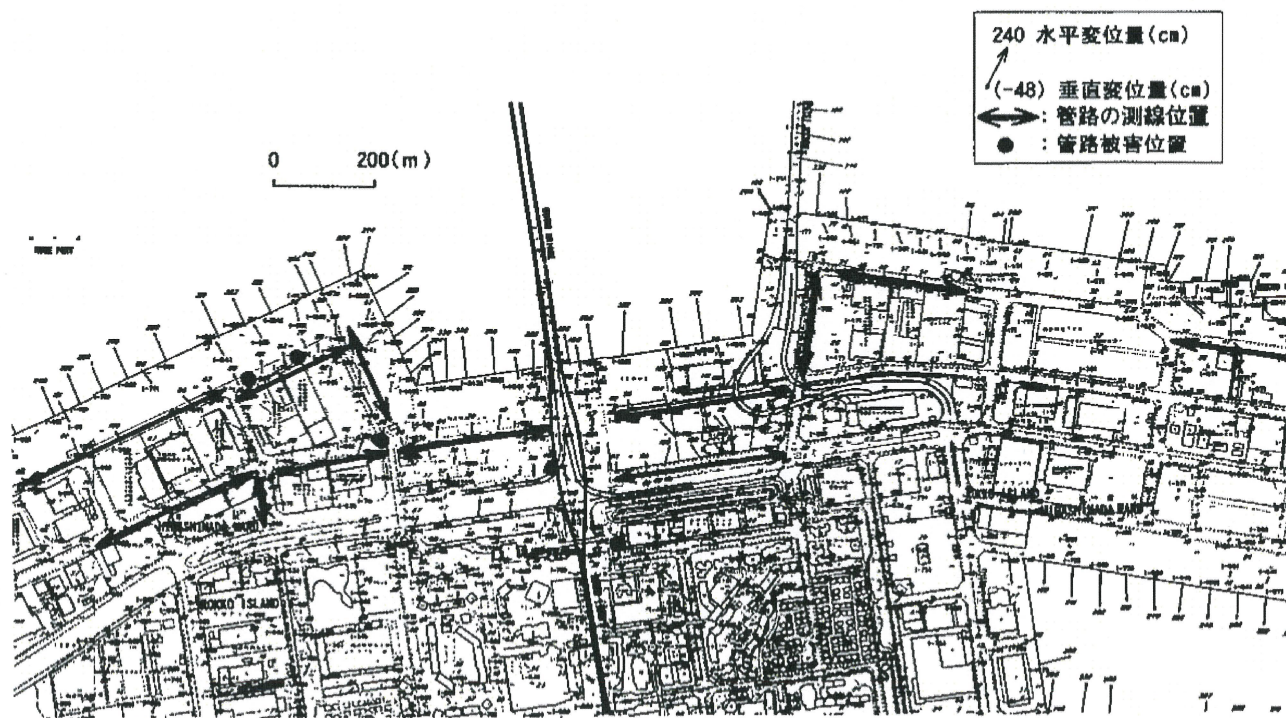


図-17 六甲アイランド北側の地盤の側方流動の測定結果²⁾と地盤ひずみを分析した測線

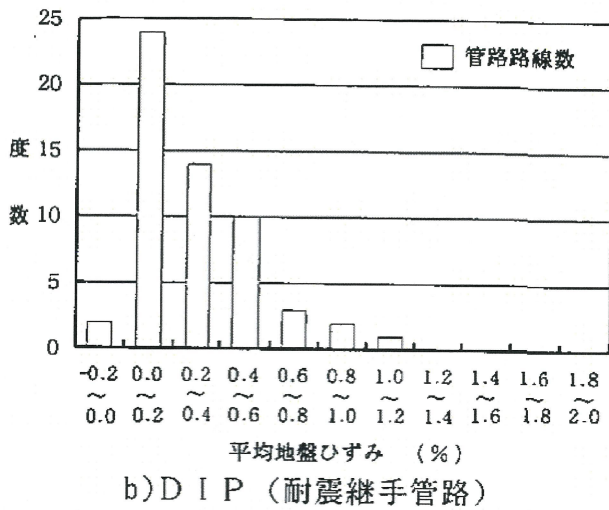
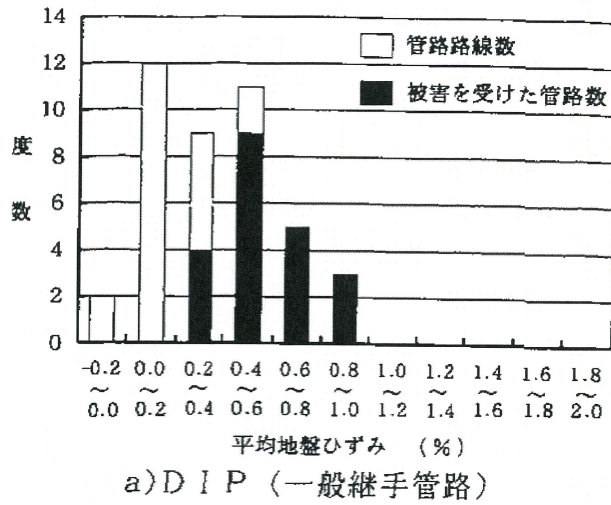


図-18 地盤の軸方向平均ひずみの分布と配水管被害

参 考 文 献

- 1) 日本水道協会工務部：「資料」阪神・淡路大震災における日本水道協会と水道事業者の対応，水道協会雑誌，第64巻第10号（第733号），平成7年10月。
- 2) M. Hamada, R. Isoyama, and K. Wakamatsu : The 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake, Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area, Association for Development of Earthquake Prediction, The School of Science and Engineering, Waseda University, Japan Engineering Consultants, August, 1995.
- 3) 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，平成7年3月。