

阪神・淡路大震災における水道の被害と復旧

— 送配水形態に着目した考察 —

広島工業大学工学部 能島 暢呂*
 鳥取大学工学部 野田 茂**
 鳥取大学工学部 細井 由彦***
 阿南工業高等専門学校 上月 康則****

本研究は、阪神・淡路大震災において発生した水道施設被害による配水機能障害の実態を、配水量や配水圧データなどから明らかにするとともに、送・配水幹線のネットワーク形態および管路の被害・復旧状況と断水被害との関連に着目し、分析を行ったものである。阪神水道企業団による導・送・配水の幹線ネットワークと各市の市内配水管網がなす階層的な水供給システム構造は、今回の地震による長期断水被害を特徴づける要因となった。このため分析対象は、関連する神戸・尼崎・西宮・芦屋の4市を中心とし、比較のために宝塚市・伊丹市などのデータを示した。

1. はじめに

阪神・淡路大震災では、様々な事業規模・システム特性・地形的条件をそなえた多数の事業者が被害を受け、兵庫県下だけでも約126万戸に及ぶ未曾有の規模の断水が発生し、都市機能に長期にわたる影響を及ぼした。断水解消のプロセスを示した図-1に見られるように、特に大きな被害を受けた神戸市・西宮市・芦屋市では復旧が難航し、平均2~3週間、最長2~3ヶ月もの間、水が使えない不自由な日々が続いた¹⁾。

阪神地域は水源に恵まれず、神戸（給水人口129.0万人）・尼崎（同49.3万人）・西宮（同42.4万人）・芦屋（同8.7万人）の4市の配水機能は、共同出資の阪神水道企業団による淀川からの導・送・配水に依存する。給水能力ベースの自己水源率は神戸24%、尼崎25%、西宮42%、芦屋21%と極めて低い（図-2）。各市では、上位システムである阪神水道企業団の幹線網から受水し、市内配水管網から各戸への水供給を行っている。

今回の地震による上水道システムの被害の特徴は、阪神水道企業団の幹線網と各市の配水管路網が構成する階層的な水供給システムに、広く被害が発生したことである。このような送配水形態に着目し、筆

者らは阪神水道企業団の導・送・配水量と各市における配水量と配水圧の変動や、幹線網と支線網の被害と復旧の状況に関する資料を収集した。本研究はこれらに基づいて、断水被害の実態を明らかにするとともに、データ間の相互の関連から断水長期化の要因と問題点を探るものである。以下の2.~4.では、システムの階層性の上位から順に記述を行う。

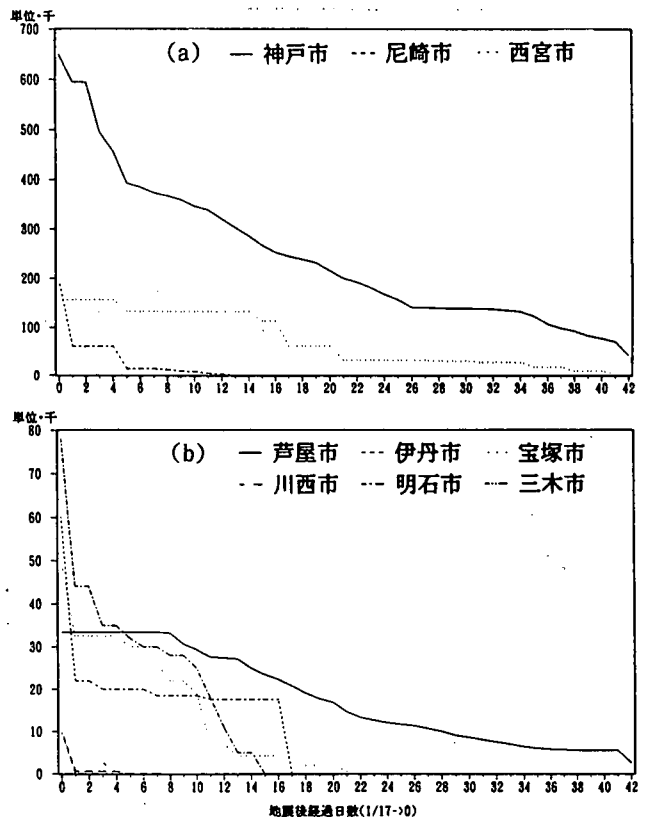


図-1 断水戸数の解消プロセス

キーワード：ライフライン、水道、ネットワーク

- * 広島工業大学工学部 0829-21-3121
- ** 鳥取大学工学部 0857-31-5307
- *** 鳥取大学工学部 0857-31-5317
- **** 阿南工業高等専門学校 0884-23-7194

2. 阪神水道企業団のシステムと被害概要

阪神水道企業団の施設概要を図-3に示す。管路網は昭和11年の事業開始以来、5期にわたって整備が進められ、延長は取水管3.9km、導水管64.8km、送水管46.4km、配水管57.9kmとなっている²⁾。淀川系統は、淀川ポンプ場から淀川導水路で導水され、尼崎事業所（浄水場・ポンプ場）、西宮ポンプ場、西宮送水路を経由する第1期系統と、甲東ポンプ場、甲山浄水場、甲山送水路を経由する第

2期系統に分かれるが、越木岩受水池で合流し越木岩送水路を経て最後に神戸市に至る。3期・4期・5期に整備された大道系統は、大道ポンプ場、大道導水路、猪名川浄水場、甲東ポンプ場、甲東送水路、芦部谷送水路を経由して神戸市に至る。一部で多重化されたネットワーク形状となっているほか、10区間472.6mの系統連絡管により冗長化が図られている。

兵庫県南部地震によって生じた管路網被害の概要を表-1にまとめる³⁾。導・送水路については、第1期淀川導水路が最も長期化したほか、第3期猪名川送水路、第3期甲東送水路、第4期西宮送水路、第3期芦部谷送水路に被害が生じた。また昭和12~46年の間に布設された配水管路網は、尼崎市へ配水する第2期東部配水管、西宮市へ配水する第1・2・4期中部配水管と第2期西部配水管、芦屋市に配水する第2・4期西部配水管のあわせて計6系統に、铸铁管77箇所、ダクタイル铸铁管9箇所などの被害が発生した。

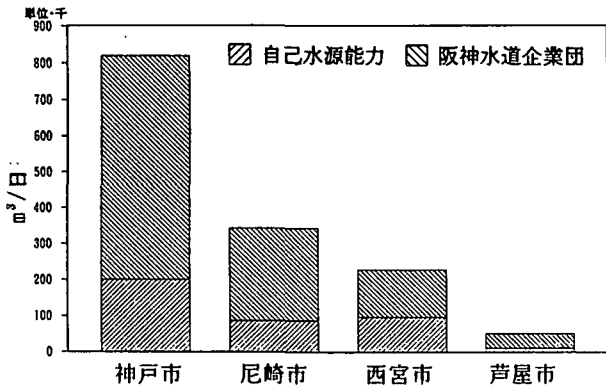


図-2 一日最大給水量の内訳

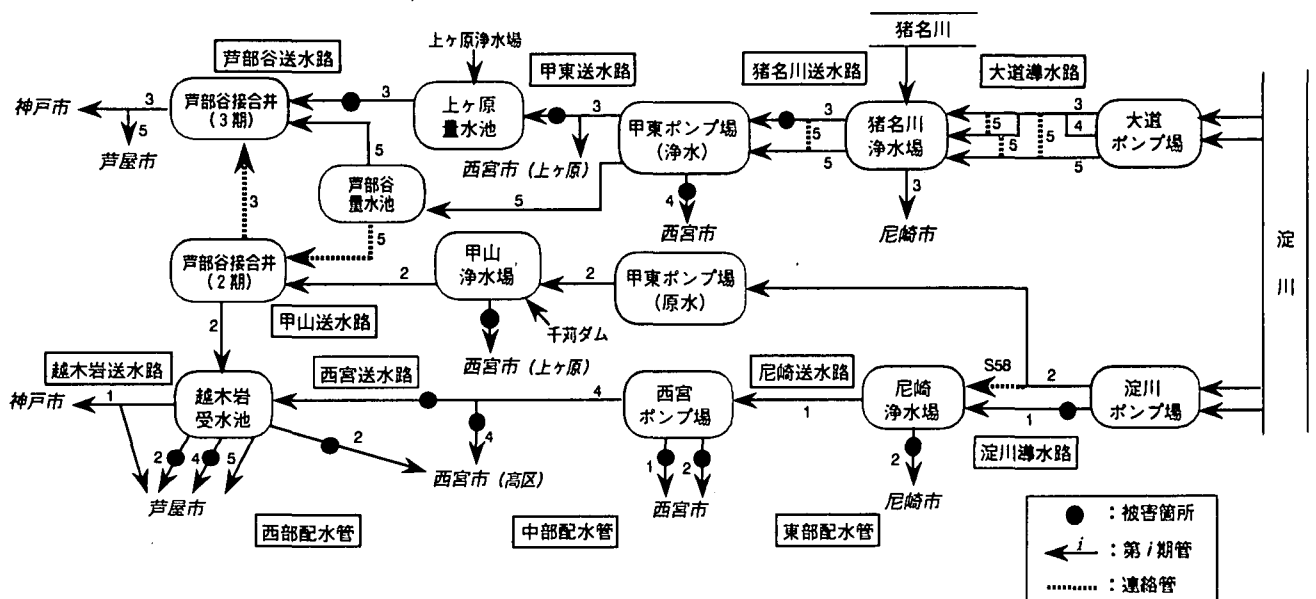


図-3 阪神水道企業団の主な施設と被害の位置

表-1 阪神水道企業団の導・送・配水管の被害

管路	管径	管種・被害状況	応急復旧
第1期淀川導水路	φ1.200	遠心力鉄筋コンクリート管, 継手漏水23箇所	2月19日
第3期猪名川送水路	φ1.700	P C管, 継手漏水5箇所	2月1日
第3期甲東送水路	φ1.500	ダクタイル铸铁管, メカニカル継手抜けだし5箇所	2月1日
第4期西宮送水路	φ1.200	ダクタイル铸铁管, メカニカル継手抜けだし1箇所	1月27日
第3期芦部谷送水路	φ2.100	鋼管, 水管橋伸縮管部破損	1月27日
第2期東部配水管	φ400~600	铸铁管, 印ろう継手抜けだし5箇所	2月10日
第1期中部配水管	φ200~400	仕切弁・石綿セメント管・铸铁管, 布設替え238m	2月13~18日
第2期中部配水管	φ300~500	铸铁管, 印ろう継手抜けだし22箇所	2月9日
第4期中部配水管	φ300~400	ダクタイル铸铁管, メカニカル継手抜けだし3箇所	1月20~28日
第2期西部配水管	φ300~350	铸铁管, 継手抜けだし破損47箇所・布設替え104m	2月24~28日
第4期西部配水管	φ350~600	ダクタイル铸铁管, メカニカル継手抜けだし6箇所	1月28日

基幹施設では2系統受電を行っていたが、その上位変電所が地震直後に送電停止したため、甲山浄水場、西宮・甲東・大道・淀川ポンプ場などで停電となった。ほとんどが1時間以内に復電したが、甲山浄水場のみ3時間を超えた。

3. 阪神水道企業団の取水・送水・配水量の日変動

以上に述べた阪神水道企業団の幹線被害に伴って、関連4市における水供給に大きな支障がでた。まず、淀川事業所と大道事業所における取水量の平成6年と平成7年の比較を図-4に示す。大道事業所には地震の影響がほとんど見られないのに対し、淀川事業所では第1期導水管の被災の影響が大きい。第2期淀川導水路は近接工事の防護中で安全確認を要し、5日後にようやく40%の能力を回復した。大道系統の猪名川事業所では沈澱池の改修工事中であり、施設能力に余裕がなく淀川系統のバックアップを果たすに至らなかった。

次に、第5期甲東送水路（新甲東送水路）、甲山送水路、西宮送水路における1時間当たり送水量の変動を図-5に示す。第5期甲東送水路には被害がなかったが、被災系統から切り離すための弁操作に時間を要したため、75%の供給量を確保するのに約1日かかった。一方、送水管に被害を受けた西宮送水路については西宮ポンプ場の場内配水管も被害を受け、送水を再開したのは1月27日であり、この間、尼崎浄水場からの送水も停止した。通水後も第1期淀川導水路の復旧までは、通常の配水量の約30%にとどまっている。甲山送水路は上流施設の第2期淀川導水路の影響を受けたが、1月27日と2月19日の配水量変動は、第1期淀川系統の西宮送水路に系統連絡管を通じて分水したことを示している。

阪神水道企業団から各市への送配水量は図-6に示すように、平常時との比で神戸32%、尼崎57%、西宮32%、芦屋16%まで低下したが、尼崎市と神戸市の回復は比較的早い。尼崎市では、第3期系統の猪名川事業所から配水が可能であったこと（後出図-12）、第2期淀川導水路が連絡管（昭和58年布設、28.6m）により尼崎事業所と連結していたこと、水源に比較的近く基幹施設被害の影響を受けにくかったこと等による。また神戸市内へは、ほぼ健全であった第5期系統が第1期越木岩送水路に分水可能で

あったこと、両者が神戸市中心部で相互連絡していたこと⁴⁾、などによる冗長性が初期の機能回復に有効で、ネットワーク的には阪神水道企業団の末端に位置するにもかかわらず回復が早かった。その後、芦部谷送水路と西宮配水路・甲東送水路の復旧に伴って配水量が増加しているが、全般的に図-4の淀川事業所の動向に支配されていることがわかる。

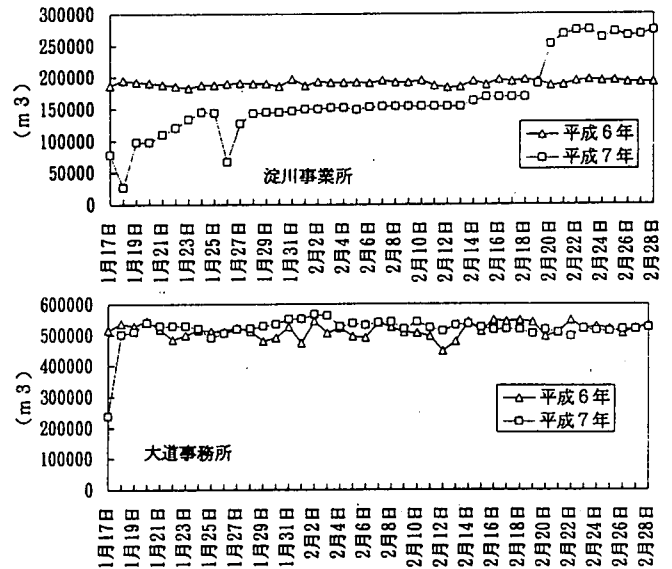


図-4 阪神水道企業団の淀川・大道事業所における取水量の比較

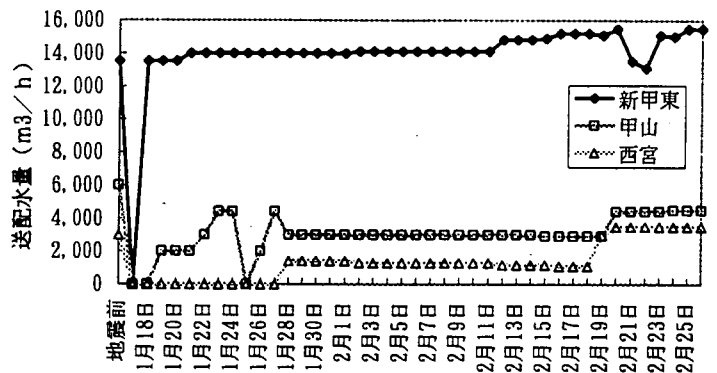


図-5 阪神水道企業団の甲東・甲山・西宮送水路における時間送水量

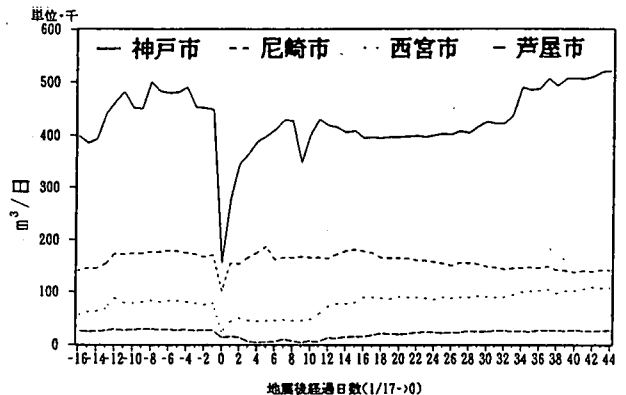


図-6 阪神水道企業団から各市への送配水量

これに対して西宮市と芦屋市では、西宮ポンプ場の10日間におよぶ機能マヒなどの影響を直接受けたこと、両市へ配水する西部配水管と中部配水管の損傷が大きかったことから配水量の低下が長期化した。西宮市では、西宮送水路の通水時(10日後)には配水量が回復しているが、断水解消に結びつくまでにはさらに数日を要している。芦屋市では甲山送水路から分岐する第2・4期西部配水管の被災し、1月28日(11日後)に第4期西部配水管が復旧するまでは配水量の増加はほとんど見られなかった。下流側の施設は上流側の施設被害の影響を直接受けることとなった西宮・芦屋両市では、漏水発見のための試験通水さえ行えない事態に陥った。

4. 各市の配水管被害と配水機能障害

図-7は、各市における配水管網の被害箇所数と1kmあたりの被害率を管径別にまとめたものである。被害箇所数の総数は、神戸、西宮、芦屋、宝塚、尼崎の順に多く、いずれの市においても布設延長が長い小口径の配水管に継手離脱等の被害が多発した。被害率は、芦屋市が特に大きな値を示し3箇所/kmに近い値となっている。一般に小口径管の被害率が高くなるが、神戸市では布設延長の短い大口径管に、空気弁などの付属設備や橋梁添架部に被害が発生したため、被害率が高くなっている。

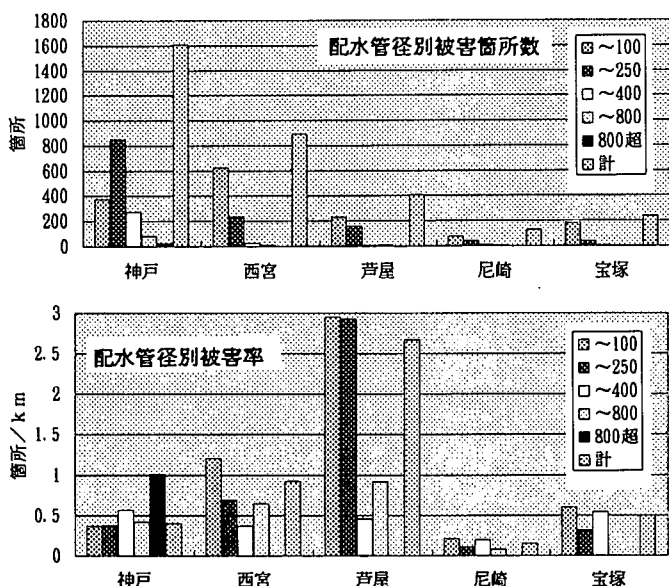


図-7 各市における管径別の配水管被害箇所数および被害率

図-8は、各市における一日総配水量(神戸市・芦屋市は阪神水道企業団からの送配水量のみ)の変動を、地震前1週間の平均値に対する比で表したものである。配水量は様々な変動パターンを示している。配水量減少の要因としては、(a)緊急遮断や幹線被害による配水停止、(b)阪神水道企業団からの送配水量の減少、(c)漏水による配水池枯渇などが挙げられる。配水量増加の要因としては、(d)十分な配水池容量により漏水を覚悟した配水継続、(e)通水完了後にも残存する管路被害による漏水などが挙げられる。

以下、各市における配水機能障害の状況について述べ、比較のために宝塚・伊丹についても触れる。

(1) 神戸市

表-2は、神戸市の各事業所ごとの配水管被害をまとめたものである。神戸市では配水管の材質および継手の改善によって耐震化が進められ、全体の90%近くが耐震管路と称されるタイプとなっていた。被害が集中したのは長田区・兵庫区・中央区・灘区・東灘区であり、震度7の激震地域と概ね一致していると同時に、耐震化率の低い行政区でもあった。

神戸市では起伏の激しい地形的条件から、特に高いところ(標高91m以上:配水池数79箇所)、高層

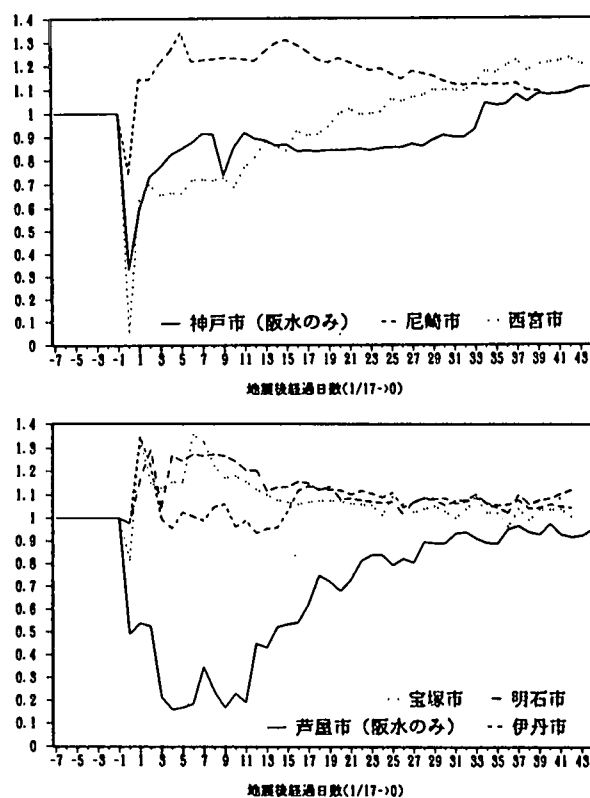


図-8 市内送配水量の地震前後比(1/10~1/16の平均値を1とする)

(同61~91m : 17箇所), 中層(同31~60m : 13箇所), 低層(同0~30m : 10箇所)に配水区域を分割し, さらに2~4kmの配水ブロックに分けた層別ブロック別供給システムをとっている⁵⁾。図-9は, 会下山中層・低層(兵庫区), 灘中層・低層(灘区), 東灘第1・第2低層(東灘区)の各配水ブロックにおける平常時(1月11日)と地震後(2月27日, 3月11日, 3月19日)の一時間配水量の変動を図示したものである。平常時の配水量は午前/午後のピークが顕著に現れる。中層の配水ブロックは比較的復旧が早く, 会下山中層, 灘中層ともかなりの漏水量が見られるが, 水需要パターンは大きく崩れてはいない。一方, 低層の配水ブロックは被害集中区域を含んでいるため, 中層配水ブロックより明らかに配水量増加の傾向が強いケース(灘低層, 東灘第2低層)と, 減少した配水量のほとんどが漏水に消えたと考えられるケース(会下山低層)が認められる。いずれも時間配水量がフラットな形状を示し, 通常の水需要パターンとは著しく異なっている。

図-10には, 1月29日以降の各配水区域における一日配水量の日変化を示す。会下山中層においては, 漏水により配水量が急増したが, その後収束してほぼ横ばいの形状を示している。逆に, 配水量が激減してその後増加したり(会下山低層), さらに地震前の水準を大幅に上回るケース(東灘第1低層・第2低層)は, 配水管路網に大きな被害が生じており, 漏水が激しかったことによる。

図-11は, 神戸市内の5事業所ごとの復旧率を示す。北区に比して垂水区・西区がやや遅れ, 他の6区はさらに復旧が遅れたことがわかる。10日後(1月27日)以降には, 芦部谷送水路と西宮送水路の通水を受けて通水率が上昇したが, 25日後(2月11日)以降あたりからは送配水量不足の影響が再び現れ, 第一期淀川導水路の復旧まで停滞した。さらに2月下旬頃からは道路を覆った倒壊家屋のガレキ処理待ちのため, 断水解消が難航した。

(2)西宮市

西宮市は関連4市の中では阪神水道企業団への依存率が最も低い。配水系統は北部・南部地区に分かれている。配水機能に大きな支障があった南部地区は, 複数の配水系統が連結する多点注入系の形態となっている。前述のように阪神水道企業団の中部・

西部配水管の被害により受水量が低下した。自己水源系は, 自然流下の越水・丸山浄水場と3箇所の配水槽, ポンプ圧送の鯨池・鳴尾・武庫川浄水場などの施設よりなる。地震前には各施設の貯水量はほぼ満水であったが, 自然流下系においては漏水により数時間で貯水がなくなり, 供給再開までに30~76時間を要した。ポンプ圧送系では, 鯨池浄水場が配水管の被災状況からしばらく供給を見合わせたが, 鳴尾・武庫川浄水場では, 停電が解消した2時間半後には供給を再開している。

復旧は主に市北東部より開始されたが, 断水解消プロセス(図-1)を見ると, 2月1日時点での通水率はわずか20%であり, 復旧の初動体制が最も遅れたといえる。市南西部は阪神水道企業団からの給水区域であり長期断水となった⁶⁾。図-1で32日後(2月19日)以降に断水が解消しているのはこの地域であり, 2月末にようやく通水が完了した。

図-1の復旧過程は全体的にステップ状の形状を描いており, 断水解消がスムーズに進まなかったことかわかる。配水ブロックを細分化し, 管路被害の波及範囲を狭めることと, 被害修復と通水作業をスムーズにすることが課題といえよう。

(3)芦屋市

阪神水道企業団からの受水地点および奥山浄水場から, 高区・中区・低区の配水池を経て, 自然流下方式で市内に配水される。阪神水道企業団からの受水は, 第2・4期西部配水管およびその上位施設の被害により激減した(図-6)。芦屋市では, 渇水のため地震前から阪神水道企業団からの受水率が95%前後まで上がっていた。自己水源の芦屋川取水口の堤防崩壊のため, 浄水場への取水ができなくなった。配水支線には多数の被害が発生したが, 自然流下方式のため配水幹線(φ200~700)は山手側に埋設されており, 被害は22箇所と比較的軽微であった。市内9箇所の配水池は地震前には貯水率100%近かったが, 2時間あまりで空になり, その後も配水管からの漏水が続いて全面的な断水となった。

復旧作業は1月23日には奥池地区が完了したが, 本格的な断水解消は市街地の高区の通水が開始された1月25日以降である。1月末には高区のほとんどと中区北部の断水が解消したが, 通水率は25%に過ぎない(図-1)。復旧が遅れたのは, 中区西部,

表-2 神戸市の事業所別の配水管被害概要

事業所(行政区)	延長 (km)	耐震化 率(%)	被害 箇所	被害率 (箇所/km)
東部(東灘・灘)	675.5	80.2	871	1.29
中部(中央・兵庫)	531.7	81.2	657	1.24
西部(長田・須磨)	647.6	86.9	435	0.67
垂水(垂水・西)	1315.7	94.2	204	0.16
北(北)	792.6	94.0	106	0.13
合計	520.8	88.8	2273	0.57

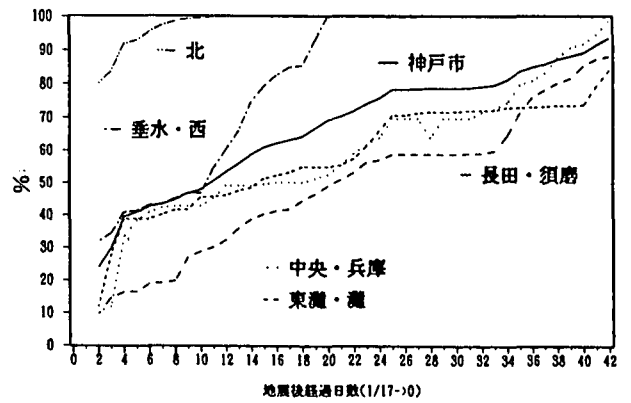


図-11 神戸市の事業所別の復旧率

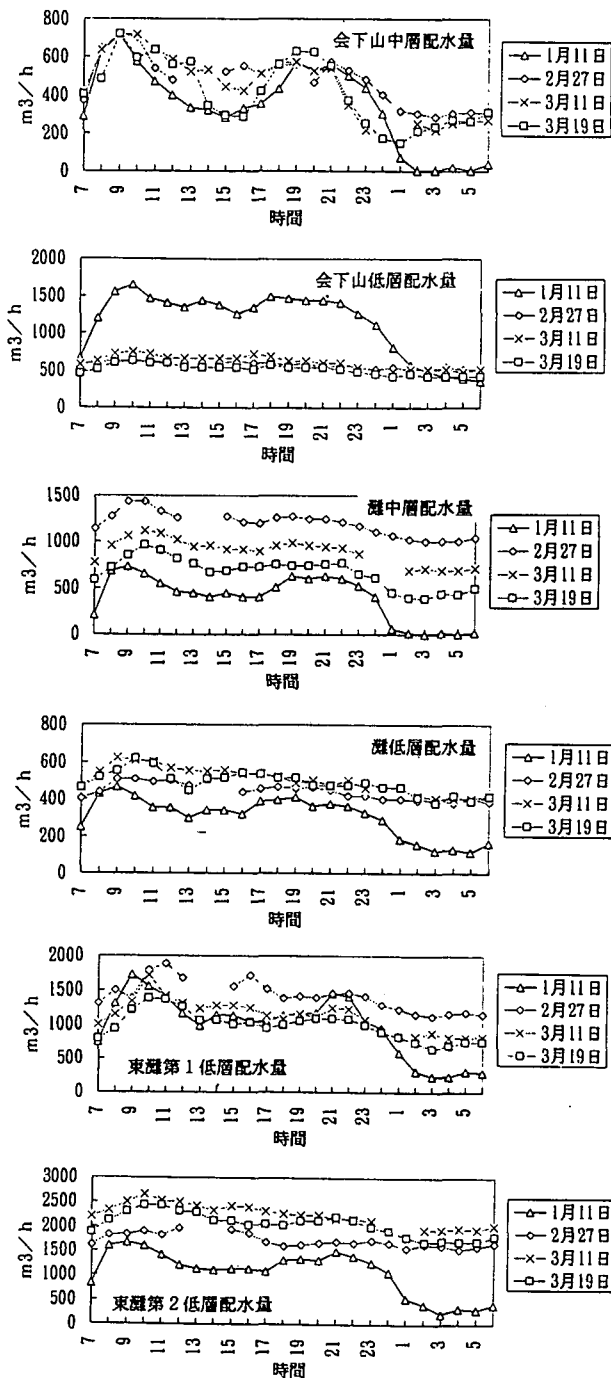


図-9 神戸市内の配水ブロックの時間配水量の変動

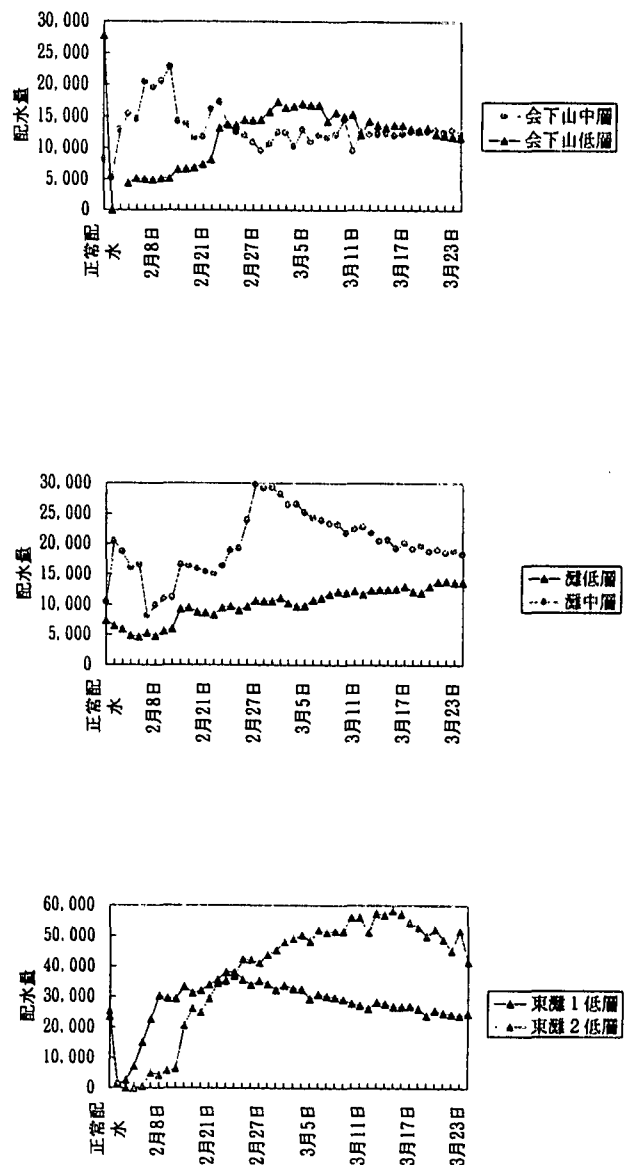


図-10 神戸市内の配水ブロックの日配水量の変動

第1低区西部，第2低区南部であり，家屋倒壊が集中した国道2号線付近の津知町や川西町では，被害調査すらできない状況が続いた。

(4) 尼崎市

尼崎市では，阪神水道企業団の第2期東部配水管には被害があったものの，末端部であったため影響は小さく，図-12に示すように猪名川事業所および尼崎事業所からの受水が豊富であった。また自己水源の神崎浄水場が給水能力の限界（地震前の約4倍）まで配水量を増加させ，総配水量は著しく増加した（図-8）。しかし給・配水管の被害多発による漏水のため配水圧が安定せず，断水地域や漏水箇所の特定に支障をきたし，復旧プロセスに種々の影響を及ぼした。1月31日の通水完了後もまだ配水圧は低く，平常レベルに回復したのは2月中旬であった（図-13）。尼崎市においては，漏水の解消に伴って，神崎浄水場の配水量を落とさずに猪名川事業所からの受水量を減少させ，下流に位置する西宮市の阪神水道企業団からの受水に配慮した（図-6）。

(5) 宝塚市

宝塚市の給水区域は相次ぐ宅地開発により標高約400mまで広がり，配水区域は細分化されている。武庫川および沿岸付近の深井戸を水源とし，浄水場6箇所から28箇所のポンプ加圧所を経由して，配水池41池から配水を行っている。断水は全戸の70%に及んだが，低地配水区より試験通水を行い，徐々に水圧を上げて復旧を進めた。断水が長期化したのは，きよしが丘，泉が丘，米谷上・下，白瀬上・下などの高地配水区に集中している。配水量は一時，地震前の1.3~1.4倍程度となったが（図-8），細かな配水区ごとに水圧を上げてゆくため，市内配水量が平常レベルに戻るのには早かった。

(6) 伊丹市

伊丹市では，淀川系の導水管（ $\phi 1,000$ P C管）が試験通水中に破損し，配水管の漏水箇所の特定ができなくなった。復旧資材のストックがなく，新たな製作を要したため，約2万戸の断水が16日間以上も続いた様子がうかがえる（図-1）。導水管修理の後，2月2日に通水を完了したが，配水圧が平常レベルに回復したのは尼崎市と同様に2月中旬であった（図-14）。

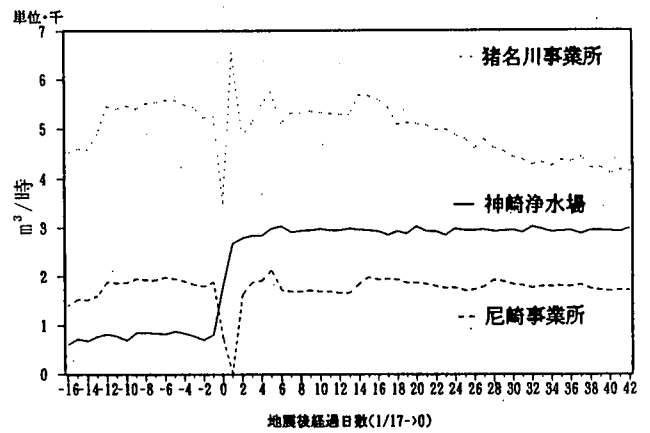


図-12 尼崎市内の日配水量の変動

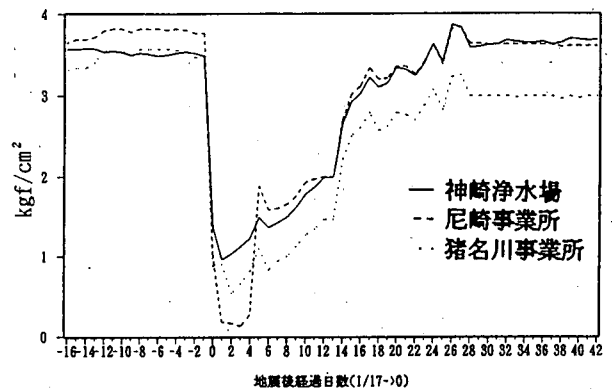


図-13 尼崎市内の配水圧の日変動

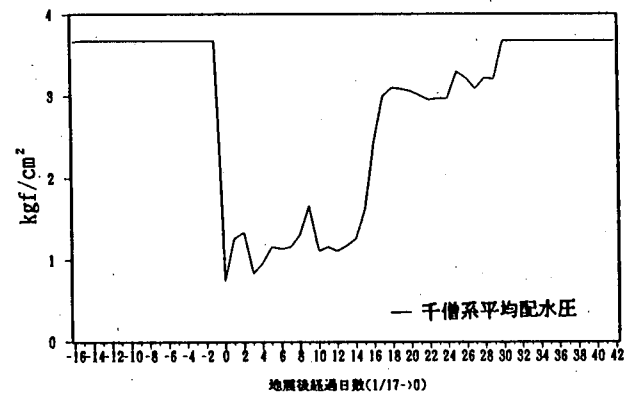


図-14 伊丹市内の配水圧の日変動

5. まとめ

本研究では，阪神地区の水道事業者について，阪神水道企業団に依存した共通の送配水形態と，地形的条件や水利条件などに起因する送配水形態の相違点などに着目し，阪神淡路大震災における断水被害の分析を行った。要点を以下に掲げてまとめとする。

- (1) 阪神水道企業団の導水路および送水幹線の被害は，関連4市の配水機能に多大な影響を及ぼした。各市における漏水修理作業や断水解消過程は，階層的に上位施設の復旧に支配された状況

が濃厚に認められた。伊丹市でも導水管破損が復旧プロセスのボトルネックとなった。

- (2) 西宮市と芦屋市では、阪神水道企業団の西宮送水管と、送水幹線から分岐する中部・西部配水管の被害により受水量が激減した影響が大きい。
- (3) 阪神水道企業団の導・送・配水幹線がなす多重化された構造や系統間連絡管は、ネットワークの冗長性を高める効果を発揮し、一部地域への供給継続に貢献したことがわかった。阪神地域の送配水形態の特殊性を考えると有効な対策であり、今後とも推進するべきであると考えられる。
- (4) 市内配水量の増減傾向は、上位施設からの受水量と漏水のかねあいから、複雑な変動を示している。漏水量には、配水管被害のみならず、自然流下方式かポンプ圧送方式かといった配水形態の違いが関与している。
- (5) 市内配水圧は通水完了後にも低水圧を示すケースが多く、断水戸数の特定すら困難な状況をまねいたことがわかった。配水機能の回復過程を通水率のみで表すのは必ずしも適切ではないと考えられる。

今回の地震では、階層構造をなす水道施設に広く被害が発生し、事業者の枠を超えた対応が必要となった。各被災都市においては、今回の水道施設被害の教訓や被災市民の苦情を踏まえて、多岐にわたる耐震化対策が打ち出されている⁷⁾。構造的な強化や施設の危険分散、貯水能力の向上などの対策とともに、以下のような新たな方針も盛り込まれている。

- a) 大容量送水管による近隣都市との系統連絡強化と

広域ネットワークによるバックアップ実現化。

- b) ユーザーのニーズや困窮度にあわせた復旧目標の立案。
- c) 断水日数・運搬水量・運搬距離を勘案した応急給水対策の立案と、その実現に向けての配水ネットワーク構成、および階層的重要度を考慮した強化戦略の立案。

この地震を契機に、地震防災対策に求められる「品質の高さ」に応えるような目標が掲げられているといえる。

【謝辞】

お忙しい中、ヒアリングに応じて下さり、貴重な資料をご提供いただいた各事業者の方々に、記して感謝の意を表します。なお参考文献の掲載は、スペースの都合上、ごく一部にとどめさせていただきました。また有益なご意見を賜った京都大学防災研究所亀田弘行教授に感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 能島・野田・細井・上月：兵庫県南部地震における上水道システム被害の復旧プロセスの分析，第23回地震工学研究発表会講演概要集，pp. 635-638, 1995. 7.
- 2) 阪神水道企業団：施設概要，1994.
- 3) 阪神水道企業団水道施設耐震化計画検討委員会：阪神水道企業団施設耐震化提言書，1995. 6.
- 4) 森川正三：神戸市水道における地震対策の現状と課題，土木学会関西支部講習会テキスト「より安全な都市を目指して」，pp. 75-81, 1991. 11.
- 5) 高田至郎：ライフライン施設，兵庫県南部地震緊急被害調査報告書（第2報），神戸大学工学部建設学科土木系教室，1995. 3.
- 6) 西宮市水道局：阪神・淡路大震災（水道復旧の記録），1995. 4.
- 7) 例えば，神戸市水道復興計画検討委員会：神戸市水道耐震化指針，1995. 6.

Damage and Restoration of Water Supply Systems in the Great Hanshin Earthquake Disaster — With Emphasis on System Aspects of Water Transmission and Distribution —

Nobuoto Nojima, Shigeru Noda, Yoshihiko Hosoi, Yasunori Kozuki

Hanshin district suffered severe damage to water supply functions in the Great Hanshin Earthquake Disaster. In this paper, condition of water supply malfunction is outlined on the basis of data on physical damage and restoration of water supply facilities, daily number of households without water, the amount of water supply and water pressure measured at various sites, etc. Emphasis is placed on the effect of hierarchical configuration of water transmission and distribution lines including the facilities of Hanshin Water Supply Authority on which Kobe, Amagasaki, Nishinomiya, and Ashiya City are highly dependent.