

3. ライフラインシステム挙動の分析と防災システムの提言

3.1 はじめに

本章は、阪神・淡路大震災におけるライフラインシステムの被害を研究的立場・視点から分析した結果を収録しており、主として大学の研究者が執筆した。さらに、こうした研究から、新たな防災システムの方法論が提案されている。震災の教訓を引き出すためには、詳細な資料の集積とともに、多角的な視点から入念な分析を行わねばならない。本章に収録された合計11件の記事は、ライフライン分科会委員によるこうした努力の成果である。

まず、3.1～3.4は複数のライフラインにまたがる課題を整理することに重点を置いた分析結果を示したものである。阪神・淡路大震災の複合都市災害の中で、ライフラインの被害が他のライフラインの被害の原因となったり、復旧活動に影響を及ぼす事例が多く見られた。また、ライフラインの被害が医療機関の活動や避難所の運営など、防災拠点の機能に多くの影響を及ぼした。こうした状況をできるだけ克明に記述しようとしたのがこの部分である。

次に、3.5～3.6は、下水道システムの被害と復旧、および今後への提言をまとめたものである。下水道システムは、管内が被圧状態ではないことによる被害箇所発見の困難さと、逆に地震後における修復が必ずしも徹底されない、などの傾向があったが、今回の震災はこうした状況の根本的な再検討を促すほどの被害をもたらした。さらに、基幹施設である処理施設が海岸の軟弱地盤に立地することにより大被害を経験したことも特筆されるべきである。これらの記事は、こうした下水道特有の問題を克明に記録して、そこから得られる提言をまとめたものである。

続いて、3.7～3.9は、道路交通システムの被害の状況を分析するとともに、今後の道路網計画への提言とその方法論を示したものである。阪神・淡路大震災は、戦後発展した現代都市圏において、交通網が大被害を受けた初めての震災となった。道路施設の構造的耐震化を中心に行われてきたこれまでの耐震対策に対し、今回の震災は震災下での交通管理、代替交通手段の確保、ネットワークとしての信頼性確保など、多くの課題を現実の問題として提起した。ここに収録された記事は、こうした課題に取り組んだ研究活動の成果である。

最後に、3.10～3.11は、阪神・淡路大震災の経験を普遍的な防災システムに生かす方策を提案したもので、水道システムを対象として、管路の耐震診断法と、適正な防災投資に関する意思決定の方法論を提示している。これらの成果は今後も継続されるべき震災経験の普遍化の努力の重要な方向を示すものと位置づけられよう。

本章に収録した記事は、必ずしもすべてのライフラインの課題を網羅的に扱っているわけではないが、阪神・淡路大震災におけるライフラインの被害から、できる限り将来への具体的教訓を引き出す努力の成果として現段階の特色ある到達点を示すと考えられる。

3.2 ライフラインの相互連関

3.2.1 はじめに

兵庫県南部地震では、ライフライン系の被害により広範囲にわたる機能障害が発生した。ピーク時の機能障害は、水道126万戸、電力260万戸、ガス85.7万戸という未曾有の被災規模であった。今回の被害の大きな特徴は、個々のシステムの被害が甚大であったのに加えて、被害拡大・復旧遅れの要因として事態を一層悪化させたことである。能島・亀田はこれまでの研究^{1)・2)}をもとに、阪神・淡路大震災における複合的な災害波及の中核をなすライフラインの相互連関に着目して、災害連鎖の階層的な構造を概念的に整理した³⁾。その後、ライフラインの被害と影響の実態が徐々に明らかにされ、詳細な状況が判明したので、本節では、ライフラインの相互連関の具体事例を取りあげて報告することとする。相互連関の分類は、文献²⁾で用いた(1)システム間の物理的な被害波及、(2)システム間の機能的な被害波及、(3)復旧段階におけるシステム間での相互影響、(4)システム間代替性によるバックアップ機能、(5)ライフライン関連の複合災害、という5分類に(6)エンド・ユーザーにおける相互影響を加えた6分類とした。図-3.2.1は、その相互連関構造を整理したものであるが、以下では上述の(1)～(6)の順に、事例を挙げながらライフラインの相互連関について考察する。

3.2.2 システム間の物理的な被害波及

都市施設の集積が進むにつれて都市空間は高密度に利用される。公共施設や住居建物が甚大な被害を受けた今回の地震では、被災施設から健全な施設に被害が波及するケースが至る所で見られた。その代表的な例は、道路・鉄道交通施設の高架部や立体交差部の崩壊が他の交通を遮断したことである。山陽新幹線と阪急今津線の交差部、国道117号線と阪急今津線の交差部、阪神高速道路神戸線の国道43号線高架部、国道2号線の国道43号線高架部などで、路面閉塞・軌道閉塞が発生した。ガレキが撤去された後も、復旧工事が行われている間は、付近で著しい交通障害が生じた。

また家屋の倒壊は多くの犠牲者を出したが、一軒一軒の被害にとどまることなく広く影響を及ぼした。家屋倒壊のガレキは至る所で道路を塞いだ。後に述べるように、こうした状況は、緊急対応と復旧段階で大きな妨げとなった。阪急今津線など、沿線の倒壊家屋により軌道が閉塞したケースもある。逆に鉄道の高架区間では、被災した高架部分の高架下空間の一部が居住空間や商業施設に利用されている場合が多く、鉄道施設被害が人間の活動空間に直接被害を与えた。

関西電力では架空配電設備が多大な被害を受け、支持物11,289基のうち3,495基が折損・倒壊、1,239基が火災により焼失し、供給支障の直接的原因となった⁴⁾。電柱の折損・倒壊の分布は震度7の分布とほぼ一致した傾向を示しており、折損・倒壊のほとんどは家屋等の倒壊に巻き込まれたものである。震度7地域を中心に調査された1,298基のうち、982基は倒壊家屋が電柱や電線に接触したり引き込み線を引っ張ったことが原因であった。同様に、NTTの神戸地域における約144万回線の加入ケーブルのうち、19.3万回線は家屋の損壊に伴う引き込み線や架空ケーブルの切断とケーブル焼失により被災したものであった⁵⁾。

橋梁の添架管・添架線の被害も多い。神戸市ポートアイランドでは、神戸大橋に添架されたφ600mm鋼管が座屈・溶接部せん断破壊、φ900mmダクタイル鋳鉄管の継手破壊が発生した⁶⁾。また六甲アイランドの六甲大橋では、2本の配水管(φ700mm鋼管)のうち、通水していた東側の管が長さ310mに亘って脱落した。これは、吊り金具が管の揺動によりはずれたためであり、橋桁本体に管を貫通させる「箱抜き方式」をとったガス管が落下を免れたのと対照的な被害となった^{7a)}。六甲アイランド内の水需要増加に備えて設置されていた西側配水管は、未通水のため軽量で被害を免れており、上流側からの配水が回復すると、この管を通じて六甲アイランドへの配水が再開された。施設余裕を持つことのメリットが活かされたとみることができる。中圧ガス導管は荊藻橋の護岸移動や神戸高速鉄道大開駅陥没に伴う被害を受けたが、ガス漏洩は免れた。

阪神高速道路公団や鉄道事業者の構造物破壊は、日本高速通信や日本テレコムの商用回線や自社通信網の被害へと波及した。兵庫県庁と国土庁を結ぶ長距離連絡網は、NTTと新電電系の複数回線あったが、通話料金の安い後者を自動選択するアダプターが双方の構内交換機に設置されており、地震直後においても、阪神高速道路の被害により断線した日本高速通信を選択するようにシステムが動作した。このため、約4

時間後にアダプターの電源が切られるまで、神戸の発着信ができない状態が続いた⁷⁾。システム冗長性がマイナス材料となったケースとして注意すべきであろう。ライフライン施設の末端施設の多くは道路下に隣接して埋設されているため、これ以外にも物理的な被害波及があった可能性が高い。

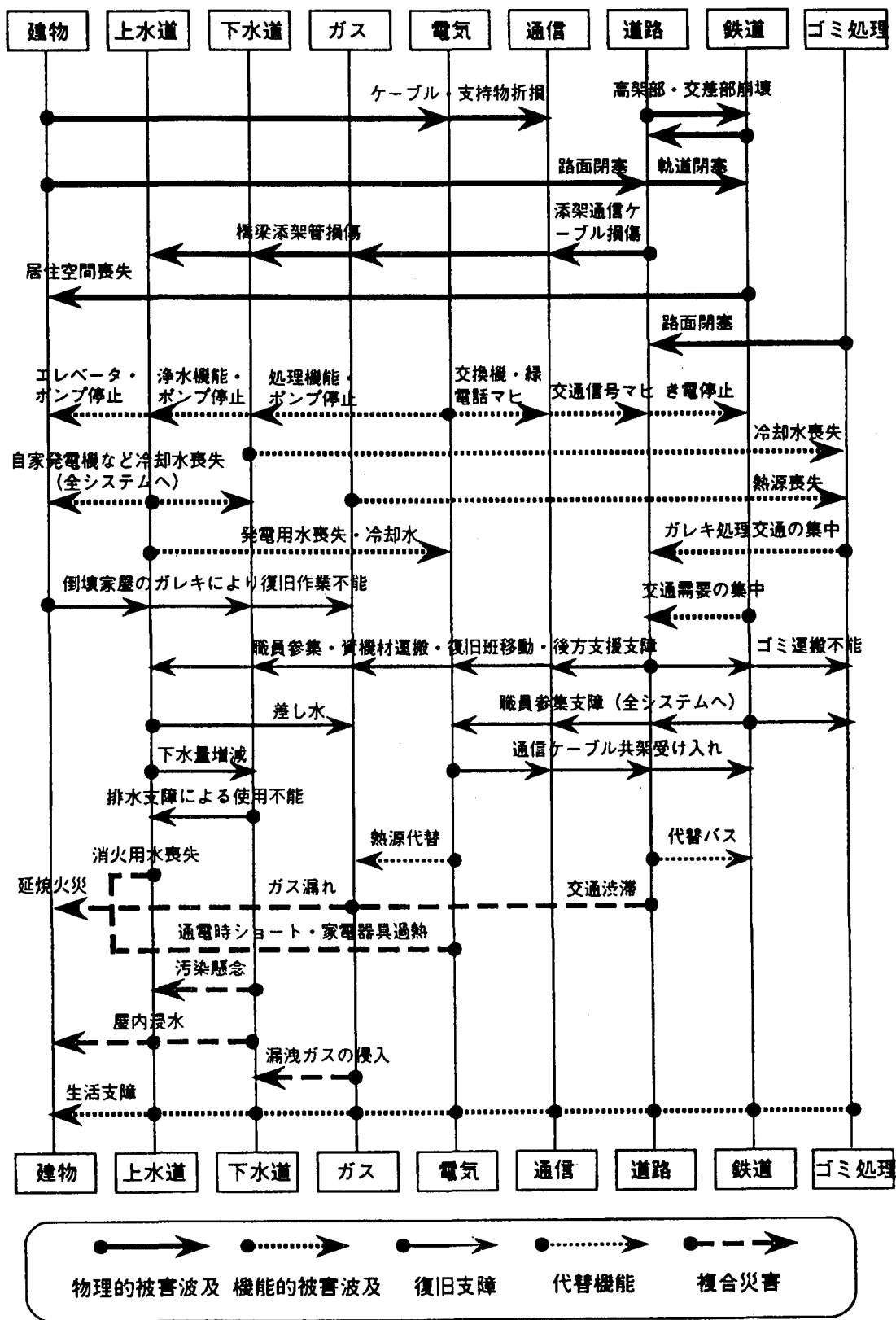


図-3.2.1 阪神・淡路大震災におけるライフラインの相互関連構造

3.2.3 システム間の機能的な被害波及

ライフライン系は他のライフライン系の機能に依存している場合が多い。このような相互依存体系の破壊によって機能障害がシステム間で波及する。中でも停電による動力喪失や中枢機能マヒは、これまでの地震でも広範な影響を与えてきた²⁾。地震直後は260万戸に上った停電戸数は、系統復旧により2時間後には100万戸まで減少した。その後、変電所へは翌18日8時、送電線へは21日2時に送電完了、23日15時には送電可能な需要家への通電が完了し、153時間ぶりに電力機能が回復した⁴⁾。架空設備が多く被害発見が容易で、仮配電線による応急配電が可能なため比較的早く機能回復したものの、停電は各種の災害対応に重大な影響を及ぼした。

交通信号機のマヒは、被災地一帯の交通渋滞を激化した大きな要因の一つとなった。神戸・阪神地区では地震直後に3千箇所あまりのほとんどの信号機がマヒしたが、物理的被害によるものはわずか282箇所、残りは停電が原因であった⁷⁾。兵庫県警が備えていた携帯発電機は137基で絶対数が不足したうえ、対応に当たる警官の確保も困難な状況であった。これを教訓として兵庫県警では、主要交差点の信号機を自家発電機装置を備えた機種に改め、百箇所への導入を決定した。

行政機関相互の緊急連絡も停電により大きく阻害された。兵庫県が1991年に82億円を投じて導入した「兵庫衛星通信ネットワーク」は、通信衛星「スーパーバード」を利用して県内91市町村の他、消防庁や国土庁などを結び、災害時には電話が途絶しても、即座に情報を伝達できるとされていた⁷⁾。地震による停電の後、非常用発電装置が作動したが容量の限界でダウンし、自家発電機も故障したために動力を完全に喪失した。これにより、復旧までの6時間、衛星通信は不通となり、各市町村や消防本部との連絡が取れない事態となった。兵庫県庁1号館と2号館に設置されていた自家発電機は、発電機と冷却水槽が別々の構造となっており、40mもの冷却水用配管で接続されていたが、この配管の破損が故障の原因であった。これに対して3号館では一体型の自家発電機が採用されており無被害であったことから、この改良システムの増設と、建物間の非常用電源の融通により、多重の停電対策とすることが検討されている⁷⁾。

停電対策としての蓄電池や自家発電機が、装置本体の破損や冷却水不足・燃料不足によりバックアップ機能を果たさなかったケースは他にも多い。神戸市内の8局のNTT交換所では、施設被害は軽微であったものの商用電源の途絶とバッテリーの倒壊や過放電が重なり、計28.5万の加入回線が被災した。表-3.2.1にその状況を示すが、移動電源車による応急的な電源供給が確立されるまで、最長約30時間の通信機能マヒの原因となった。また発信規制の対象とならない緑公衆電話は、テレホンカードのリーダー部分が商用電源に依存するので、停電のためカードでの利用ができなくなった。コインでの利用は可能であったが、すぐにコイン詰まりを生じ、コイン回収のための職員確保に時間を要したため、使用不能が長引いた。

表-3.2.1 NTT加入者交換機への停電の影響と対応(文献5)より作成)

被災施設	1995年1月日付 時刻	17日		18日		19日		20日		21日	
		0	6 12 18	0	6 12 18	0	6 12 18	0	6 12 18	0	6 12
A局加入者交換機	52,000回線		▲5:46		●1:01				◎10:20		
B局加入者交換機	33,000回線		▲9:50		●23:51						12:20◎
C局加入者交換機	19,000回線		▲9:50		●4:39				◎2:27		
D局加入者交換機	11,000回線		▲9:50		●4:39				◎2:27		
E局加入者交換機	59,000回線				▲17:59 ●8:10						◎18:20
F局加入者交換機	66,000回線				▲14:39 ●10:12◎21:50						
G局加入者交換機	45,000回線				▲14:49 ●4:41				◎2:27		
H局加入者交換機	3,800回線				▲◎5:46(瞬断によるメモリ破壊, 11:23手動再起動)						

▲: 商用電源断 ●: 移動電源車による電源供給 ◎: 商用電源回復

地震災害では救急医療のニーズが急激に増大するが、病院機能は低下する。被災地域の病院では、自家発電機を設置していたにもかかわらず、断水のため潤滑油の冷却水が得られず、作動しなかった例が数多く報告されている⁸⁾(神戸市立中央市民病院、六甲病院、神鋼病院など)。高層マンションでは、停電により受水層から高架水槽へのポンプアップが不能となった結果断水し、なおかつエレベータが使えないために重いポリタンクの水を持って階段の昇り降りをする必要が生じた。このように停電に関連する被害は、あらゆる場面で複合的な影響を及ぼしている。

ゴミ・廃棄物処理機能は、熱源・動力源・処理水・冷却水・収集・運搬などの面で複数のライフライン機能に依存し、機能障害の波及的影響を強く受けた⁹⁾。六甲アイランドの東部スラッジセンターでは、大被害を受けた東灘処理場の下水処理水を冷却水として利用していたため、海水利用により応急的に冷却水が確保されるまで機能が停止した。また芦屋市の廃棄物処理を行う環境処理センターでも、下水再処理水を排ガス冷却に利用していたため、処理に支障が生じた。1月20日に空気冷却に改造して仮復旧して処理を再開したが、増加した廃棄物に対しては能力不足であった。ゴミ処理場においてはガス断による熱源喪失が問題となったが、大阪ガスでは中圧供給を行っている病院・焼却場・斎場を公共性・緊急性の高い施設として優先的に復旧した¹⁰⁾。

神戸市・尼崎市・西宮市・芦屋市の配水機能は、4市で構成される阪神水道企業団(図-3.2.2)からの受水に依存しており、その被害は各市の配水機能に多大な影響を及ぼした。導・送水路については、淀川導水路、猪名川・甲東・西宮・芦部谷送水路に被害が生じた。配水管路については、東部・中部・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¹¹⁾。阪神水道企業団から各市への送配水量は平常時の神戸32%、尼崎57%、西宮32%、芦屋16%まで低下した。各市における総配水量の経日変動(図-3.2.3)を見ると、宝塚市や伊丹市など自己水源を中心とする都市と、水源の淀川に最も近く阪神水道企業団被害の影響が軽かった尼崎市では、漏水により配水量が増加している。一方、神戸・西宮・芦屋市では配水量が激減し、一時的に漏水発見のための試験通水さえ行えない事態に陥った。自治体の枠を超えた被害波及のために組織連携が必要となったこのケースは、相互連関の一種と捉えることができよう。

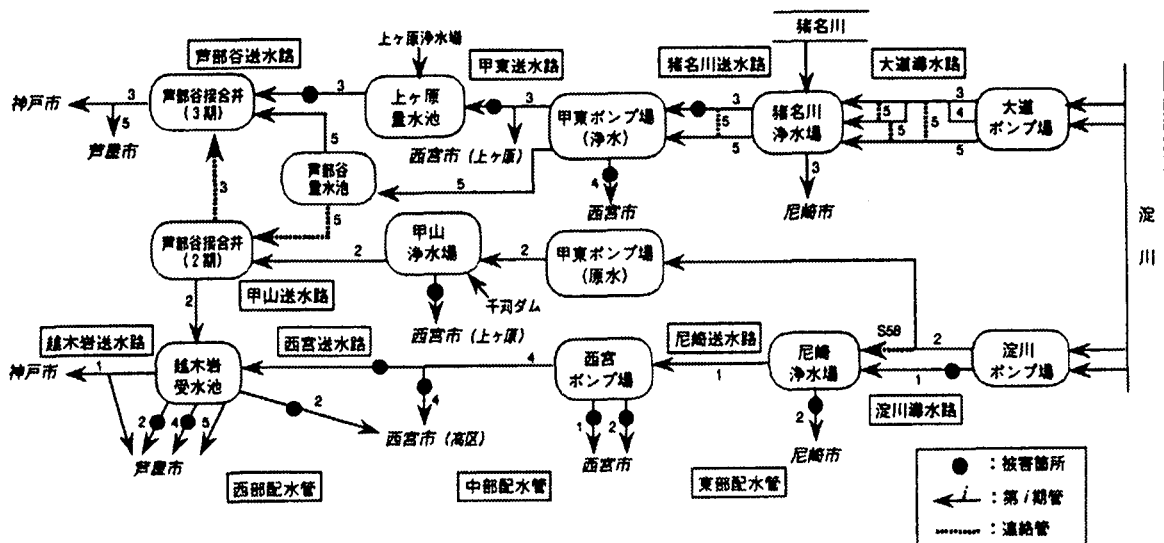


図-3.2.2 阪神水道企業団の主な施設と被害の概要

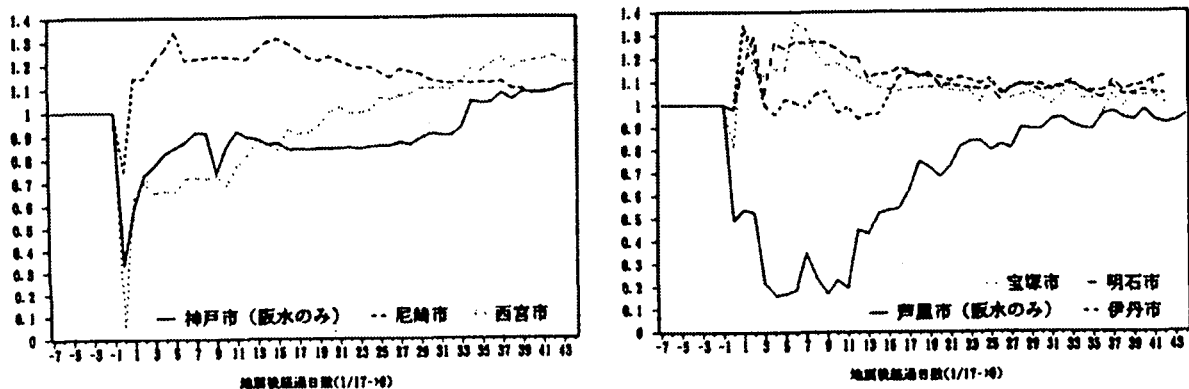


図-3.2.3 地震前後の各市における総配水量の比(1月10日~16日の平均を1とする)

阪神水道企業団の基幹施設では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。甲山浄水場では停電時間が194分で長く自家発電機が作動したが、その他は1時間以内に復電しており、いずれにしても導・送・配水機能に大きな影響を及ぼすには至らなかった。神戸市では6kVおよび20kV受電の浄水場とポンプ場37箇所が停電したが、そのうち4時間以内に24箇所、12時間以内に33箇所復電した。北野ポンプ場で約24時間、高取ポンプ場で約62時間であり、上ヶ原浄水場で最も長く約111時間の停電であったが予備回線は停電後5分で復電していた¹²⁾。

断水の影響としては、関西電力鳴尾情報センターにおける計算機用冷却水が断水により不足したこと(冷却水170トンを1月24日～2月4日まで購入して対応)、尼崎東発電所では、工業用水・上水ともに断水したため運転に制約を受けたこと(工業用水2,400トン1月25日～2月14日まで輸送船で確保して対応)などが挙げられる^{4)、12)}。

3.2.4 復旧段階におけるシステム間での相互影響

地震による交通支障は、復旧活動の初動体制確立に影響を及ぼした。例として、関西電力神戸支店における職員の参集状況を挙げる⁴⁾。神戸支店(営業所・電力所・発電所を含む)では、1月17日の出社予定人員2,389名のうち、9時までの出社率はわずか37%、当日中の出社率は69%であった。ちなみに地震当日の大阪近郊の鉄道の運行状況を表-3.2.2に示す。阪神地域の通勤交通としての機能が著しく損なわれていたことがわかる。出社可能であったネットワーク技術関係要員466名の出社手段は、図-3.2.4に示すように、通常のルートを利用できた割合はわずか10%であり、多くはマイカー・バイク・自転車・徒歩を利用している。復旧作業の後方支援に関しても、陸上ルートでは生活物資の輸送がはかどらず、本格化したのは海上輸送ルートが確立された後であった。

表-3.2.2 大阪近郊の鉄道の地震当日の運行状況(文献4)より作成)

被災施設 1995年1月日付 時刻	17日											18日以降 始発
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24		
J R 東海道新幹線	●6:23東京～名古屋間上り, 7:28下り											●18日 京都まで一部
J R 山陽新幹線	●13:16岡山以西											
J R 東海道本線	●20:44京都～高槻間											●18日 大阪～高槻間
J R 山陽本線	●20:15姫路以西											
J R 関西本線	●15:30難波～加茂間											
J R 福知山線	運転できず											●6:54大阪～塚口間
J R 片町線	●17:30片町～四條畷, 20:00全線											
J R 阪和線	●11:32一部運転再開, 12:32全線											
J R 大阪環状線	●13:30外回り, 17:55内回り											
近畿日本鉄道	●6:30運転再開 ●16:30東大阪線											
京阪鉄道	●7:10運転再開, 余震のため再停止, 8:05再開											
南海鉄道	●11:00運転再開											
阪急電鉄京都線	●14:00河原町～淡路間											
阪急電鉄宝塚線	●19:20大阪～池田間											
阪急電鉄神戸線	運転できず											●18日始発梅田～西宮北口
阪神電鉄(本線)	運転できず											●18日始発梅田～甲子園
大阪市営地下鉄	●11:15堺筋線, 中央線											
	●13:20四つ橋線, 14:00谷町線, 14:40御堂筋線											

釧路沖地震における低圧ガス導管の復旧作業は凍土に阻まれて作業性が悪かったが¹¹⁾、今回はシステム間の相互連関の問題が顕著であった。供給停止区域は需要家3,000～4,000戸を単位としてセクター化され、1セクター復旧に4～5日かかるとして1日約2万戸のペースで作業を進め、約1ヶ月半で全戸復旧という目標がたてられたが、以下のような復旧支障により復旧作業は難航した¹⁰⁾。

a) 漏水や地下水のガス修理箇所への浸水やガス管への差し水が生じた。管内カメラ班による差し水調査の後、抽水専門班や管内土砂排除専門班の作業を必要とするなど、作業性が極端に低下した。

b) 激しい交通渋滞に阻まれ、復旧班の移動に支障をきたした。移動時間を短縮するため、本社対策本部と兵庫地区対策本部（今津）以外に16箇所の「前進基地」や「車両基地」を設けたり（図-3.2.5）、早朝移動により渋滞を避けるなどの工夫をした。また復旧作業員や資機材の輸送のため、西島製造所と天保山を拠点とした海路・空路の輸送ルートを確認した。

c) 道路上の家屋倒壊の瓦礫や放置車両などの障害物により、バルブ操作や道路開削・修繕の作業が不能となった。本来の復旧順序を変更し、引き込み線の切断のみを先行して行うなどの工夫がされた。

最終的には復旧用ブロックとしてのセクター数は222に及び、70.4万戸の完全復旧に85日を要して、復旧効率は平均約8,300戸/日にとどまった。1セクターの修理完了に平均7~8日を要した計算となるが、各セクターの被災規模や差し水の程度により、数倍近い効率差が表れた。このような状況の中で大阪ガスは、復旧作業の競合や錯綜を回避するため、水道事業者との作業工程に関する打ち合わせをほぼ毎日行った。

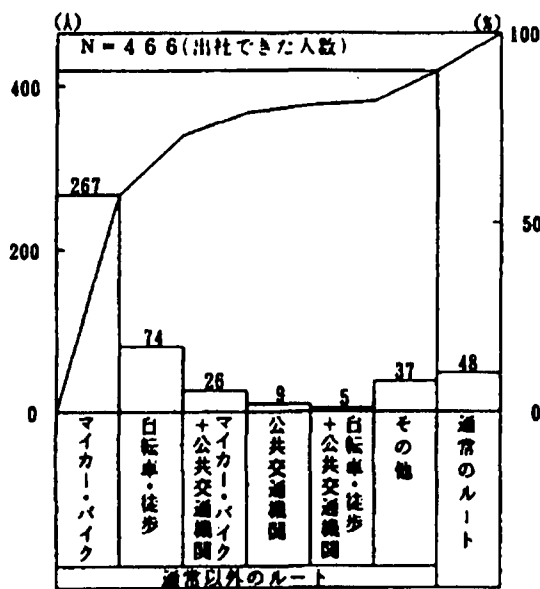


図-3.2.4 職員参集の交通手段
(文献4)より転載

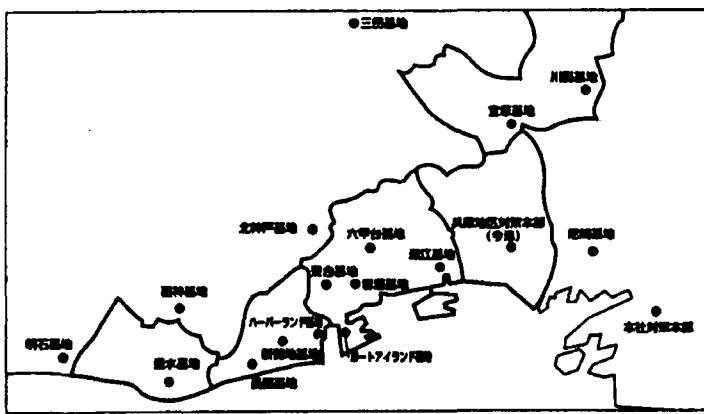


図-3.2.5 大阪ガスの復旧基地
(文献10)より転載

通信途絶の影響も大きく、各ライフラインの初動体制の確立と復旧活動における情報伝達が著しく阻害された。しかし、独自の通信施設を持つ関西電力では、神戸市とその周辺で通信ケーブル被害があったものの、無線鉄塔や屋内通信設備に被害は少なく、保安通信の中核を担う多重無線回線は健全であった。これにより、広域給電運用や電力間の資材融通の情報連絡に支障をきたすことはなかった⁴⁾。

マイナス面の復旧支障ばかりでなく、プラス面の組織連携もあった。単独柱が多数倒壊したNTTや、高速道路被害と鉄道被害により影響を受けた日本高速通信・日本テレコム、通信ルートが途絶したJRや阪急電鉄においては、迂回ルートを確認するため、関西電力に計2,000本の共架申請を行った。配電線支持物の建柱が早期に行われた関西電力では、この共架申請を受け入れ、他ライフラインの応急復旧に大きく貢献した⁴⁾。

都市の水循環を担う上水道システムと下水道システムの関わりについて、宝塚市の幹線部分を例にとってみたものが図-3.2.6である¹⁴⁾。配水量は大幅に増加しているが、汚水量は平常量をはるかに下回っている。これは、配水された水の多くが漏水して需要家まで配水されなかったことを裏付けるものである。また配水量が収束した頃に汚水量が増加しているのは、漏水減少に伴って家庭への配水が増え、かつガス復旧により給湯器や風呂が使用できるようになり、家庭排水が増加したためと考えられる。下水道については、地震後に要求される機能水準や復旧目標が不明確になりがちであるが、下水の滞留を避けスムーズな水循環を持続するためには、上水道の復旧と連動させるのが望ましいといえる。

また神戸市下水道では、地震翌日の18日から22日までに、処理面積ほぼ全域を対象としたマンホールおよび管内目視による一時調査を終了し、1月24日から汚水管のテレビカメラ検査が行われた。このような対応は、通水率がまだ低い段階（約40%）で行われていることから、比較的順調であったと考えられる。ただし上下水道においてもガスと同様、建物被害のガレキが路上に山積したため、弁の操作やマンホール蓋の開閉ができなくなり、復旧作業に支障を来したことがわかっている。

下水道の末端部分では、屋内排水設備の破損により水道が使用不能となった事例も多い。図-3.2.7は、神戸市上水道の道路および宅地内被害の修繕数と、排水管やトイレ詰まりなど排水設備の修繕率を、通水率と同時プロットしたものである¹⁴⁾。上水道・下水道工事を担う公認業者は同一であるが、上水道が優先され、下水道は後追いとなる傾向が読みとれるが、上述のように可能な限り同時復旧が望ましいと考えられる。

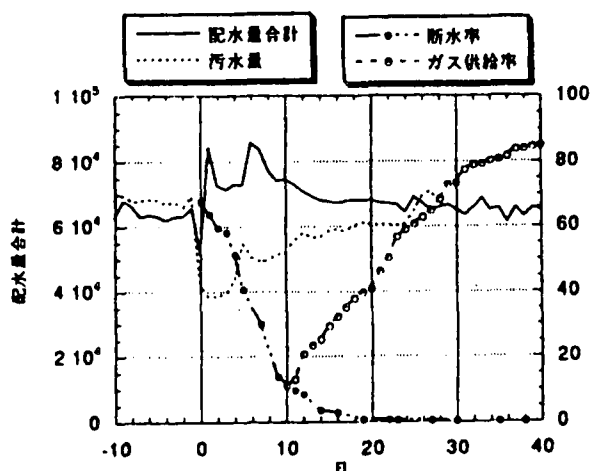


図-3.2.6 宝塚市の配水量・汚水量の変化
(文献14)より転載)

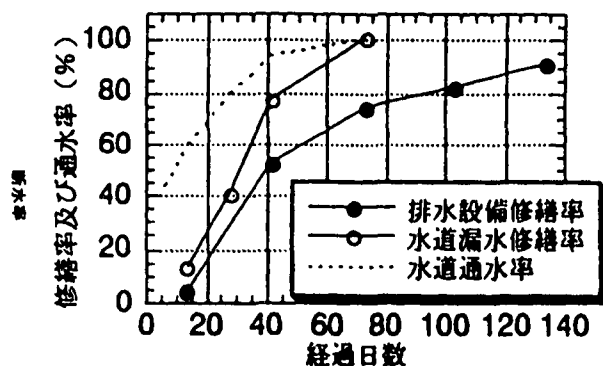


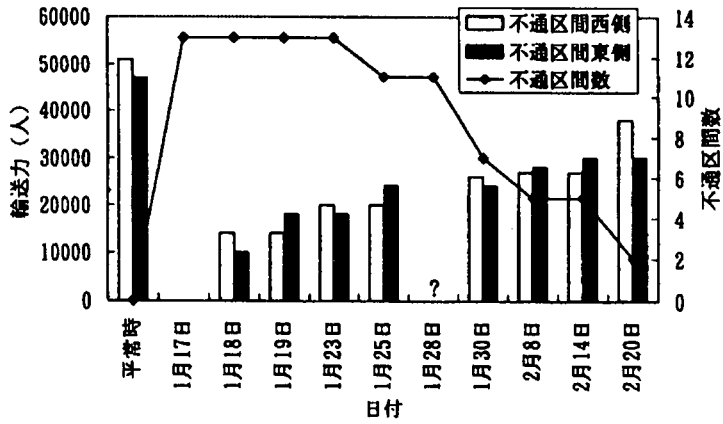
図-3.2.7 上下水道の修繕率の変化
(文献14)より転載)

3.2.5 システム間代替性によるバックアップ機能

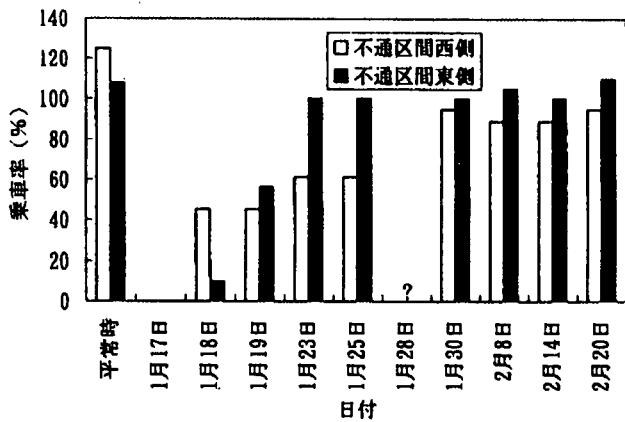
ロマ・プリエタ地震やノースリッジ地震においては、鉄道交通が道路交通の機能を代替する役割を果たし、交通需要を吸収した¹⁵⁾。一方、阪神地域は東西に偏平な地理的・地形的条件により交通網が冗長性を備えにくいというえ、あらゆる交通施設が同時に被災した。このため空路・海路など一部を除いて、決め手となる代替交通が存在せず、大阪～神戸間の都市内・都市間交通は完全なマヒ状態に陥った。その中で1月23日に運行を開始した鉄道代替バスは、交通需要を吸収するものではなかったにせよ、鉄道の被災した部分を補完する重要な役割を果たした。図-3.2.8はJR東海道・山陽本線における不通区間(1月18日：西明石～尼崎、1月23日：須磨～甲子園口、2月20日：灘～住吉)の西側・東側輸送力と乗車率および代替バスの輸送実績を示している。西側不通区間で地震翌日の乗車率が高いのは、地震の影響が比較的軽かった西明石以西を含むためである。23日には代替バスが三宮～甲子園口間で運行開始し、大阪と連結した不通区間東側の乗車率が回復した。30日には神戸～三宮間のシャトルバスが運行を開始し、不通区間西側も利用が急増した。このように、大阪～神戸間の東西交通の有機的連結が乗車率の向上に深く関与した。1月28日には国道43号線にバスレーンが設けられ、大量の代替輸送への協力体制が敷かれた。

釧路沖地震ではガス供給遮断地域に送電する橋北変電所において、電力需要増加が明確に認められた¹³⁾。今回のガス停止中においても、生活困窮を緩和するため、代替熱源として早期に復旧した電気により電熱器・電子レンジ・電気ポットなどの電気器具が盛んに利用されたことから¹⁶⁾、電力需要はかなり伸びたものと思われる。熱源供給としての電力とガスは相互に代替機能となりうるが、風呂の熱源のように転換が

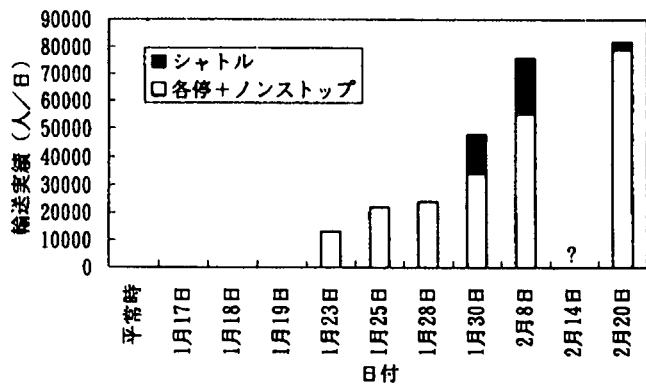
容易でない場合もある。大阪ガスでは、供給が途絶している間の代替熱源供給として、LPガス器具を病院などの公共施設や仮設住宅に貸与したり、カセットコンロ17.8万台を自治体に貸与したほか、簡易シャワー16箇所、仮設風呂7箇所、車載型シャワー7箇所の入浴設備の設置を行った¹⁰⁾。



(a) 不通区間数と両側の輸送力



(b) 不通区間両側の乗車率



(c) 代替バスの輸送実績

図-3.2.8 JR東海道・山陽本線不通区間の状況

3.2.6 ライフライン関連の複合災害

ライフラインのフローが外部に流出することによって、ライフラインに関連した複合災害が生じた。今回の地震における火災は、複合災害として種々のライフラインが関与した。ガスの供給遮断は地震から約6～15時間後にかけて行われたが、管内の残留ガスの漏出が遮断後にも続いていたことが明らかになった。また電気が通電した際のスパークが着火源となって火災原因となった。地震後3日以内に発生した179件の火災うち44件がガスまたは電気が関与していることが報告されている¹⁷⁾。このうち22件がガス関係、30件が電力関係(8件は電気とガスの複合)であると見られており、両システムの緊急対応や復旧の進め方などに課題を残した。

断水と交通支障は被災直後からの消火活動に大きな障害となり、同時多発火災は拡大してトータルで約70haを焼きつくす市街地大火となった。神戸市では二層式貯水池の一方に緊急遮断弁を取付け、緊急時に飲料水と消火用水の双方を確保する対策をとっていた。飲料水の確保には成功した一方で、消火栓が使用可能であったのはわずかであり、地震後20分の時点で水が得られなかった消火栓もある¹⁸⁾。このため、多くのポンプ車を連結して防火水槽や河川水、海水を利用せざるを得なくなり、消火活動は大きく阻害された。

3.2.7 エンド・ユーザーにおける相互影響

建物自体がライフライン機能に依存するために、ライフライン機能障害により建物機能が失われる事例が多発している。建物機能の高層化・インテリジェント化に伴って電力依存が進み、停電による建物機能喪失が発生した。また、屋内給排水管・ガス灯内管や、受水槽・高架水槽・浄化槽・ボイラーなどの屋内設備が被害を受け、漏水・浸水・漏電・ガス漏れなどの危険要因となるとともに、屋内レベルでもライフライン機能が失われる結果となった。1994年北海道東方沖地震では、ガス湯沸かし器や冷凍庫、製氷機、種々の医療機器などが水圧低下や断水のため使用不能となったうえ、水道管直結タイプであったために、代替手段で水が得られたとしても、それらの器具では利用できない状態となった¹⁹⁾。今回も同様の支障があったものと考えられる。

生活機能は、居住空間・用配水・熱源・照明・動力電源・情報機能・交通機能などに支えられ、ライフライン機能に複合的に依存しているため、日常生活の復旧は最も復旧の遅れたライフライン機能に支配される。エンド・ユーザーの対応行動は、生活支障の継続時間に応じて、1)我慢する、2)備蓄物を利用する、3)代替物を獲得する、4)宅外機能を利用する、5)疎開する、のような段階を踏むものと考えられる。今回の地震で交通機能がマヒしたことは、こうした対応行動をも阻害する結果となった。

3.2.8 おわりに

震度5程度で被害が出はじめるライフラインでは、大震災での被害回避は実質的に不可能であるが、本来の機能をできる限り損なわないこと(信頼性向上)、被害が発生しても機能を保持すること(冗長化/多重化/危険分散化/ブロック化)、早期復旧が可能な施設群を構成すること(保全性向上)、孤立してもある程度は機能存続できること(バックアップ強化/自律分散化)など、多面的な防災対策を、供給サイド・需要サイドの両面から強化することが肝要である。

しかし阪神・淡路大震災においては、各システムの被災規模がこれまでになく甚大であったことから、ライフライン相互連関は大規模な災害連鎖の根源的な位置を占めてしまった。阪神・淡路大震災は、都市機能の相互依存、生活機能のライフライン複合依存と他律化、都市空間の立体的な高密度利用という都市の特徴が、大災害の局面でいかにマイナス要因となるかをまざまざと見せつけた。ライフラインを含めて、震災波及構造の時系列を整理し、克明な災害記録をとどめることが望まれる。

3.3 水道を中心とした被害波及

3.3.1 まえがき

阪神間の水道システムの特徴は、4市(神戸市、尼崎市、西宮市、芦屋市)が淀川を水源とする阪神水道企業団からの受水に大きく依存していることである。各水道事業者の施設被害のみならず、阪神水道企業団の浄水施設や送水施設はかなりの被害を受けた。その結果、各市の断水解消過程は阪神水道企業団の送水低下の影響を強く受けた。水道の被害は事業者間に留まらず、広く影響波及した。各事業者の自助努力だけでは必ずしも解決できないため、相互連関による悪循環の防御の必要性が認識された。

水道は大きな被害を受けたが、その機能低下によって他の都市基盤施設にも少なからぬ影響を与えた。水は被災者の生命と生活を守るために欠かせない。従って、飲料水、医療用水や消火用水などの確保が必要になる。

本節では、水道の被害が及ぼした影響について、種々の観点から検討を試みる。まず、3.3.2では西宮市の水道を対象にして物理的ならびに機能的な被害を時系列的に示す。次に3.3.3では下水道やガスに及ぼした影響、3.3.4では医療機能への影響、3.3.5では廃棄物焼却施設に及ぼした影響を取り上げて被害波及の相互連関の問題を説明する¹²⁾。

3.3.2 西宮市の水道被害と復旧過程

被害が多発すると、取水量や配水量の減少により、水量確保の問題が生じる。そのため、西宮市では、水道システムに対して取水調整を行い、有限な水量を有効に活用して復旧作業を実施した。

図-3.3.1には、西宮市南部地域における各浄水場の配水量を示す。鯨池浄水場と越水浄水場は西宮市の水道システムの主要な浄水場である。これらの浄水場における配水量は大きく変化している。これは、阪神水道企業団の機能被害とその復旧に合わせて水圧確保のために配水調整を行った結果であり、復旧作業に活用されたと考えられる。

配水管の復旧作業における修繕箇所数を日別に整理し、被害率と通水率の関係を示すと、図-3.3.2(a)のようになる。ここに、被害率とは配水管の未修繕の被害箇所数に対する被害箇所総数の割合、通水率とは全需要戸数に対する供給戸数の割合を示す。図-3.3.2(a)よりわかるように、一日当たりの修繕箇所数は地震発生直後から徐々に増加している。1月末から2月下旬にかけ、修繕作業は集中的に行われた。2月中旬には一時的に修繕箇所数が減少したものの、2月21日から2月28日(仮復旧完了)までの一週間における作業は大幅に進んだので、被害箇所数が急減している。

図-3.3.2(a)に示した被害率と通水率の日別変化を図-3.3.2(b)のようにまとめた。被害率の低

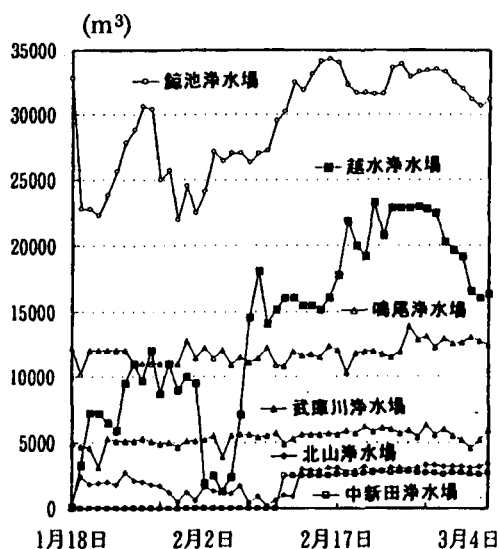
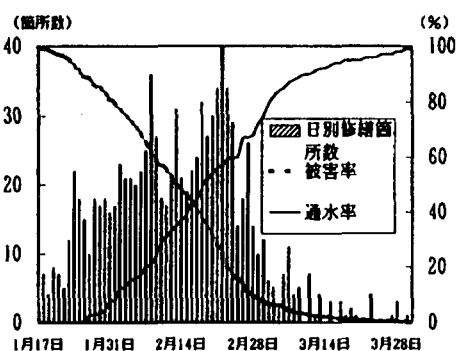
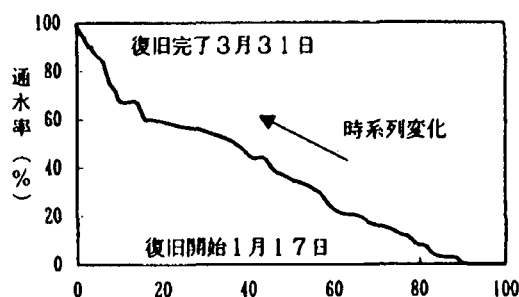


図-3.3.1 西宮市各浄水場における配水量の変化



(a) 日別修繕箇所数



(b) 被害率と通水率の関係

図-3.3.2 被害を受けた西宮市配水管の復旧状況

下に応じ、通水率はほぼ単調に増加している。しかし、その上昇率は鈍い。これは配水管の被害復旧から給水管への復旧推移がスムーズにいかなかったことを示唆している。なお、西宮市では、上流側の幹線部をまず優先的に復旧し、次いで下流側の復旧作業に取りかかる方針をとった。

図-3.3.3には、2月1日から3月5日にかけての断水率(断水中の世帯割合)、試験通水調査中世帯率、応急復旧世帯率を示す。漏水箇所での復旧方法としては、水量を確保しつつ水圧を上げることにより試験通水を行い、漏水箇所を発見、修繕するという手順を取ることが考えられる。復旧の進展に応じ、試験通水調査率は断水率とほぼ等しくなっている。仮復旧完了日の2月28日までに応急復旧率は99.8%まで回復しており、全戸通水完了日の3月28日には100%復旧が完了している。断水率と応急復旧率の時系列変化の関係をみると、配水管の被害率における減少速度つまり配水管の被害が復旧される早さに対して応急復旧率の増加速度は1対1の関係にない。これらの間にはかなりの開きのあることがわかる。つまり配水管が復旧し、家庭の蛇口をひねって水が出る状態になるまでにはかなりの時間のずれが生じていると言える。また、断水率が20%を下回ると、応急復旧率が急激に上昇している。これは、配水管の被害を修復し、水圧、水量とも確保した上で給水管の修復を実施したことが原因している。

次に、GIS(地理情報システム)を用いて配水管の被害状況と復旧状況を分析した。図-3.3.4は西宮市南部地域における配水管の被害箇所を管種別に示したものである。図中には各水系ブロックの境界線も記入している。被害は市の北部よりも南部に集中した(北部10件、南部644件)。2本の活断層にはさまれ、かつ震度7の区域に属する阪水西部水系においては被害が多発した。被害割合を見ると、DIP(ダクタイル鋳鉄管)が40.1%と最も多く、次いでVP(ビニール管)の30.4%、CIP(鋳鉄管)の22%となる。ACP(石綿セメント管)やSP(鋼管)の管種別被害割合は少ない。単位長さ当たりの被害率(箇所数/km)は、ACPが最も大きく(2.78)、VPが1.12、CIPが0.68、DIPが0.4と小さかった。

前述した方針に従い、復旧作業は実施された。図-3.3.5は復旧作業の推移の一部を示したものである。図-3.3.5(a)は地震発生後20日目に当たる2月5日の被害未復旧地点(図-3.3.2に

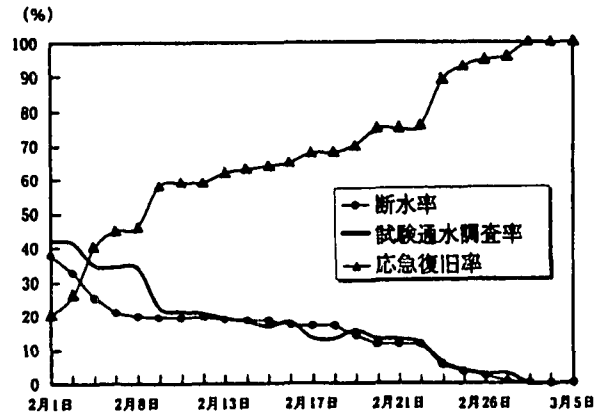


図-3.3.3 断水率、試験通水調査率、応急復旧率の関係

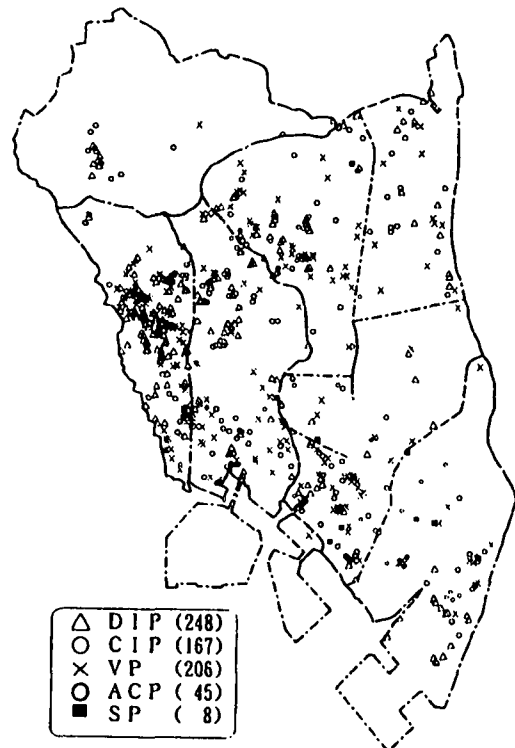
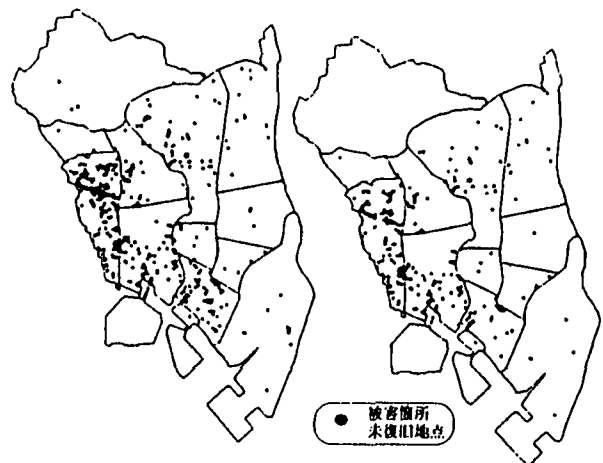


図-3.3.4 西宮市の管種別被害箇所



(a)2月5日現在

(b)2月15日現在

図-3.3.5 西宮市水道の復旧過程

おける被害率71%)を、図-3.3.5(b)は2月15日におけるそれ(被害率46%)を示したものである。図-3.3.4と図-3.3.5を比べてわかるように、復旧作業は市東部から着手され、次に被害の多発した水系ブロックに移行した。被害箇所数の多いブロックでは各所で漏水や断水が発生し、水量や水圧を確保することが困難であった。発見した被害箇所を随時修繕する復旧戦略では効率性が問題となる。この解決のためには復旧支援システムの開発が急務である。ここでは示さなかったが、復旧に当たっては多くの人員や資材を必要とした。しかし、各団体および他府県からの支援協力を受け、復旧を早期に完了することができた。

3.3.3 下水道ならびにガスにおける被害波及

本項では、断水が下水道の機能に及ぼした影響に関し、神戸市下水道局のデータ²⁰⁾を基にした定量的な考察を試みる。なお、以下の図において、横軸には地震発生当日の1月17日を時間の原点として地震後からの経過日数を示す。

図-3.3.6は神戸市のポートアイランド(PI)処理場と西部処理場における下水水量の変化である。PI処理場の放流量は流入量にほぼ等しいと仮定した。第1ポンプ場は1月26日に、第2ポンプ場は1月19日に、第3ポンプ場は2月7日に機能が回復した²¹⁾。

ポートアイランドでは橋梁添架の送水管が破損したため、地震直後から完全に断水した。病院などの一部では2月初旬に通水されたが、ほとんどの地域は2月中旬まで断水の状態にあった。図-3.3.6からわかるように、PIの下水量は地震後5日目にはほぼ最低になり、その状態は2月中旬まで続いた。ポートアイランドでは多くの高層建築物において受水槽の水が数日間使用できたことと、プールなどの貯水を用いて水洗トイレを維持できたことにより、地震後5日間程度における下水量の低下傾向はゆるやかである。ポートアイランド内の三つのポンプ場は、管渠からの泥水流によって水没し、機能を停止したが、いずれも、水道が復旧する前に機能を回復したため、水道からの流入による機能停止の影響は発生しなかった。

西部処理場では、第2系列のみが運転状態になり、全体の処理機能が20%に低下した。1月24日には第1系列の一部が運転可能になったため、50%の処理機能が確保された。処理機能は2月7日に60%、3月3日に70%、3月7日に100%に回復した²¹⁾。この処理機能(図中の細線)と2系列の処理水量の合計値(破線)を比較すると、処理場の機能回復量は汚水の回復量をほぼ上回っているため、機能低下の影響が下水処理に及ぶことはほとんどなかったと言える。

排水管の破損やトイレのつまりに伴う排水設備の修繕件数(文献21)に示されている修理受付件数の月末データから算定したものを5月31日時点の修繕受付件数(14,464件)で割って修繕率を求めると、図-3.3.7の曲線(●印)となる。このデータと比較するため、水道の通水率と漏水修繕率を1月、2月、3月の月末ごとにプロットした。なお、この修繕率は、道路上と宅地内における水道の修繕数を、通水率がほぼ100%になった3月31日における値(64,613件)で割って求めたものである。

下水道の修繕率は水道のそれを下回っている。その理由としては、水道が復旧して初めて下水道の被害に気がついたことが考えられる。また、下水道工事の公認業者は水道の工事も取り扱っており、水道の復旧を優先したことも一因である。これらの理由により、水道が復旧しても、トイレが使えないなどの問題

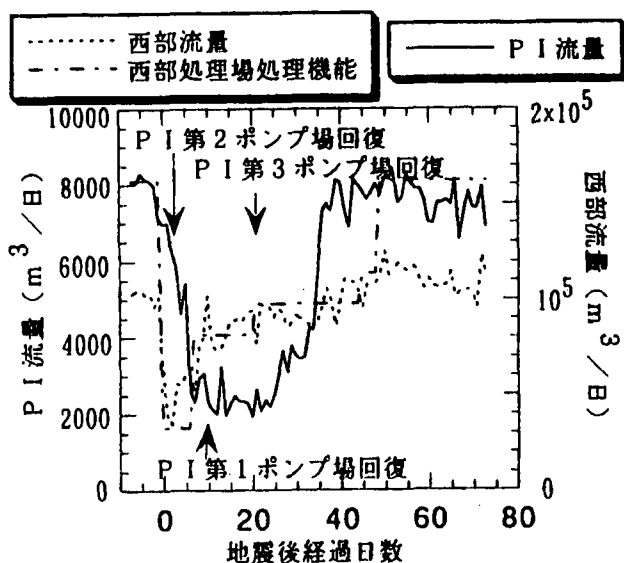


図-3.3.6 処理場(ポートアイランド、西部)における下水水量の変化

が生じたのである。上下水道の修繕率が同一地域で同程度に進むことが理想的であり、正常な水循環を回復していく上では望ましい。

図-3.3.8には、宝塚市における汚水量、配水量、断水率、ガスの供給率を示す。宝塚市では公共下水道の流量を15地点で定期的に測定している²⁰⁾。ここでは、このデータを基にして汚水量(2月中旬まで)を算定した。

地震直後は生活用水などの使用が減ったので、汚水量は減少している。一方、配水量²⁰⁾は地震前よりも増加している。この原因としては配水管の破損による漏水が考えられる。宝塚市の雨水管の大部分は従前からの水路などを利用した開水路である。護岸の崩壊などもあったが、ほぼ流下能力を維持できた。このため、漏水は污水管に流入せず、雨水管を通して排除されたものと考えられる。

断水率の低下に伴い、汚水量は漸増しており、逆に配水量は減少する傾向にある。断水の解消後、ガスの供給率の増加は汚水量の増加に関係しているように見受けられる。これは給湯器やガス風呂などの再使用によるものと考えられる。このように、汚水の発生は水道の復旧だけでなく、ガスの供給状況にも依存した。ちなみに、ガスの復旧完了日は3月25日である。

図-3.3.9は、宝塚市の代表的な污水幹線(宝塚幹線と中山安倉幹線)における時間汚水量の変化²⁰⁾を示したものである。地震前(1月10日)、汚水量は、午前9時と午後10時頃にピークをもつ典型的な水道使用パターンに対応した変化となっている。

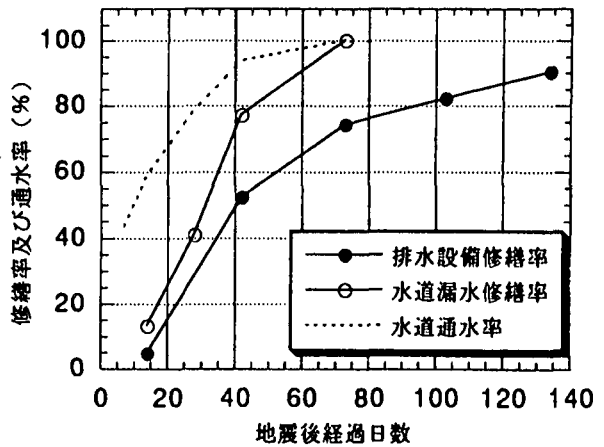


図-3.3.7 神戸市における上下水道の修繕率

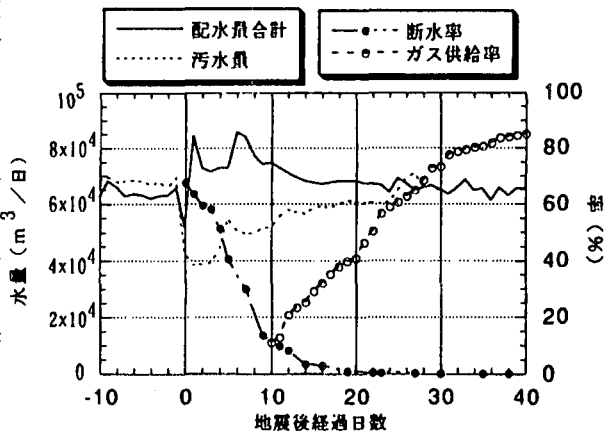
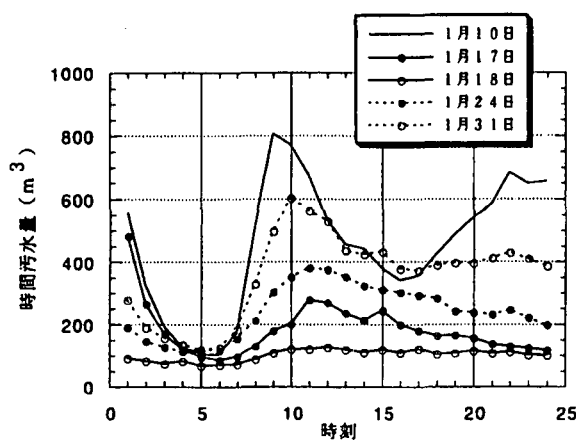
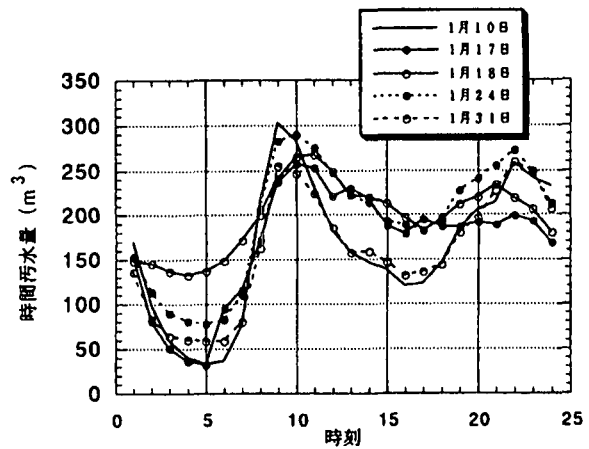


図-3.3.8 宝塚市における上下水量の関係



(a) 宝塚幹線



(b) 中山安倉幹線

図-3.3.9 宝塚市における時間汚水量の変化

地震直後から、宝塚污水幹線区域のほとんどでは、断水し、ガス供給も停止した。1月17日のデータによると、污水の増加が昼間にやや見られるが、18日には通常の水使用パターンを示していない。図-3.3.9(a)より、17日には受水槽などで蓄えられた水が使用可能であったが、その1日後にはそれも不可能であったことが伺える。時間の経過とともにこの区域の断水は徐々に解消され、26日には完全に通水した。その結果、24日さらには31日において、午前中における汚水量のピークが顕著に見られるようになった。

23日までは病院やホテルの公共施設を除いて、都市ガスの供給は停止した状況にあった(図-3.3.8参照)。24日にはまだ10%の復旧にも満たず、31日になって25.2%に回復した。ガスの供給再開によって風呂が使用され始めたため、図-3.3.9(a)のように、24日には夜間汚水量がそれほど増えていないが、31日の夜間汚水量は増加し、そのピークの存在がやや見え始めるようになった。

一方、中山安倉幹線地区では地震当日もほとんど通水状態にあり、ガスの供給停止は地区内の一部に限定された。従って、図-3.3.9(b)に見られるように、地震後も汚水量の大幅な減少は見られない。通常時(1月10日)と比べ、地震当日の午後や翌日の早朝と午後の汚水量は増えたが、午前9時と午後10時頃に見られたピーク値は低く抑えられる一方、最小値は増大している。このようなパターンを示すのは非日常的生活を余儀なくされたためと推察される。

次に、3市(神戸、尼崎、芦屋)の下水処理場における機能低下が放流水に与えた影響について水道の断水との関係で検討する。なお、神戸市の中部および西部処理場では一部処理機能が低下したが、流入してきた下水量を全て二次処理²¹⁾できたようなので、神戸市においては東灘処理場を主に対象とした。

3月始めまで降雨がほとんどなかったため、処理場に流入した下水量を水道の断水率より求め、放流汚濁負荷量の変化を試算することにした。実際の下水量には水道からの供給以外に、地下水や漏水による不明水も加わることが考えられるが、それらの量を予測することは不可能なので、ここではこの不明水を無視することにした。放流汚濁負荷量の試算式は、

$$\text{下水処理人口} \times (1 - \text{断水率}) \times \text{放流水質} / (\text{下水処理人口} \times \text{通常時の放流水質})$$

の式によった。

上式における分子は地震後の上下水道施設の機能低下時における下水処理場からの放流汚濁負荷量を、分母は通常時のものを示している。ただし、前述のように下水量を正確に予測することは難しいので、試算式では下水量の代わりに下水処理人口を用いた。下水道法施行令による放流水の水質の技術上の基準²²⁾は、通常の高級処理ではBODを20mg/l以下に、簡易処理では60mg/l以下に、殺菌処理のみでは120mg/l以下に規定している。そこで、ここでは、通常の高級処理に比し、簡易処理と殺菌処理の放流水質をおのおの3倍と6倍に仮定した。その結果、断水率の時系列変化に対し、各市の放流汚濁負荷量の通常時に対する比は 図-3.3.10のように求められる。図中に示す合計放流負荷とは3市の放流汚濁負荷量の合計値を意味する。

東灘処理場の放流汚濁負荷量は、神戸市の断水率が低下するに従い、通常その4倍まで漸増している。運河を使った仮設沈澱池による処理が2月7日(地震後21日)に開始されると、それは2倍程度にまで低下する。神戸市の全処理場に対する合計放流負荷を見ると、ピーク時には通常約2.5倍に達したが、2月7日以降には約1~2倍に変化した。芦屋処理場では地震直後に処理が全く行えない状況にあったが、1月30日(地震後13日)までに仮復旧を終えたので、放流汚濁負荷量は通常値を超えることがなかった。これは水道復旧との兼ね合いがうまくいった例と言える。

今回の地震は冬場に起こった。夏季の災害を考えると、被災地に与える環境面の影響は深刻なものになるに違いない。断水は、水洗トイレの機能停止を起こすとともに、健康管理面にも影響した。今後はこのような相互連鎖の解決も重要なテーマになるであろう。

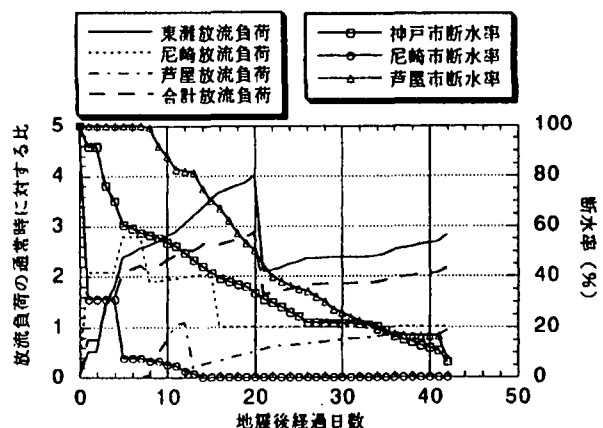


図-3.3.10 被災した処理場からの放流汚濁負荷量の試算結果(神戸市、尼崎市、芦屋市)

3.3.4 医療施設における機能破壊

兵庫県保健環境部では、阪神・淡路大震災に伴う医療機関(被災10市10町内の病院と診療所)の被害や防災に対する備えなどに関して、アンケート調査²³⁾をしている。回収数(率)は病院182(81.3%)、診療所1,845(61.5%)である。

調査によれば、自家用発電装置、水の備蓄タンク、医薬品、患者の食料、消防本部などとのホットライン、地下水、LPガスの備蓄タンクについて、それぞれ、74.6%、46.7%、33.7%、29.3%、24.7%、17.8%、9.9%の病院が地震発生前に設置・備蓄・確保していたようである。

施設や設備に損失がなかったか、軽微な補修が必要な病院は全体の38.9%であり、大半の病院では何らかの損傷を受けていた。被災による影響を受けた設備には、被災率の高い順に、MRI(被災率70%)、給水管(56.7%)、エレベータ(40.9%)、人工透析装置(37%)、高架水槽(36.5%)や受水槽(30.9%)がある。自家発電装置と通信設備(コンピュータを含む)の被災率は、おのおの、20.0%と19.6%である。ライフライン施設の中でも、水に係わる給水施設の損傷が目立っていることがわかる。

震災当日に対応できた診療機能の割合は、手術が43.1%、人工透析が47.1%、全診療部門が43.5%などである。水などのライフラインの途絶によって、対応できなかったことがわかる。事実、診療機能を低下させた原因の第1は、水道の供給不能すなわち断水(120病院、73.6%の回答)であった。続いて、電話回線の不通および混乱が98病院(60.1%)、ガスの供給不能が88病院(54%)、医療従事者の不足が72病院(44.2%)、施設・設備の損壊が68病院(41.7%)、電力供給不能が54病院(33.1%)である。

医療活動には大量の水が必要であり、人工呼吸器、人工透析装置や消毒装置には一定水圧の給水が欠かせない。高架水槽や受水槽は備えられてはいたが、前述の如く、それらの被災は著しく、備蓄していた貯水槽の水も有効に使えなかった。地下水などの自己水源も少なかった。水の断絶で医療活動は麻痺し、水がないために応急処置や手術ができなかった。断水のため透析治療ができず、亡くなった重症患者もいた。まさに断水は生死をわける一因となった。

水の確保と要請は、回答した140病院のうち、101病院(72.1%)が市町に対して実施している。以下、県へは32病院(22.9%)、民間協力企業へは32病院(22.9%)が協力要請を行った。自己水源(地下水・備蓄タンク)で対応した病院は29(20.7%)にすぎない。医療機関の運営に必要な最低限の水さえ確保できなかったのは2病院(1.4%)である。これより、用水の確保と多様な給水装置の配置がいかに重要かが認識されるが、今後の対応に当たって水の確保はほとんどの病院(121病院、87.1%)で計画されていない。震災後に水の備蓄タンクを配備したのは3病院(2.2%)、配備中なのは15病院(10.8%)にすぎない。

診療所の防災対策や被害状況は、病院に比べると、さらによくはない。水の備蓄タンクを有していたのは回答した1,806診療所のうち185診療所(10.2%)、地下水の確保は1,819診療所のうち108(5.9%)にすぎない。709診療所の被害設備は、単純X線装置(64.5%)、給水管(33.4%)、通信設備(24.9%)、受水槽(14.9%)、エレベータ(14.4%)や高架水槽(11.8%)である。ライフラインの中でも、水道の供給不能は診療機能を低下させた主原因(74.4%)である。ガス、電話や電気の影響は、おのおの、51.8%、47.9%、37.8%であった。病院に比し、診療所では、必要最低限の水の確保ができなかった診療所が多く(回答した1,206診療所のうち13.8%)、自己水源で対応したのは16の診療所(13.8%)にすぎなかった。

電気、電話、水道、ガスが被災した病院数は、それぞれ、167、167、158、143である。診療所における各ライフラインの被害数は、1,363、1,120、1,100、726である。これら被災医療機関における電気、電話、水、ガス、医薬品、非常食や給食の回復状況を震災後1週間について見ると、図-3.3.11のようになる。復電は比較的早いものの、水とガスの回復が遅れている。このため、医療機能の復帰にはかなりの時間を要することになった。なお、震災直後の被災率は水道よりもガスの方が低いが、復旧の進捗状況は水道の方がよい。これは、病院では中圧ガスが使用されていたり、プロパンガスが使われたことに起因しているものと考えられる。

ライフラインの確保はまさに病院の生命線である。阪神・淡路大震災では、建物に被害がなかった病院でも、高架水槽や受水槽などの給水施設が損傷した。これにより、給食機能が麻痺したり、院内が水浸しになり、検査・治療に支障をきたした。また、断水が病院の機能に大きく影響した。防災体制を強化する上で、給水施設の補強は今後の大きな柱にならなければならない。

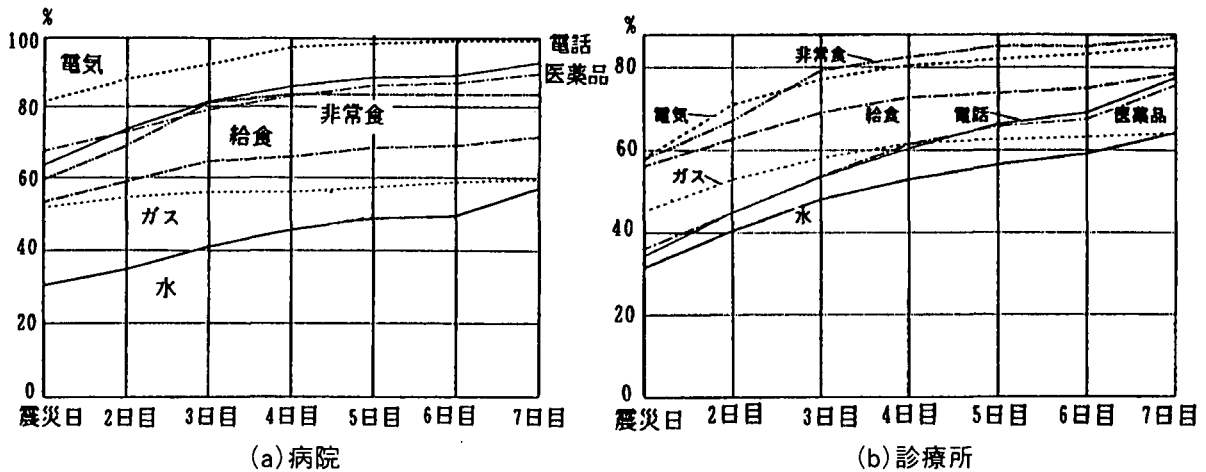


図-3.3.11 ライフラインなどの回復状況

3.3.5 廃棄物焼却施設に対する影響

今日、主な一般廃棄物の焼却処理施設においては、発生した余熱をボイラーによって取りだし、発電などに利用するシステムとなっている。また、排ガスの洗煙なども実施しており、そのために水道や工業用水道が利用されている²⁴⁾。

今回の地震により、水道や工業用水道の断水は、このような廃棄物焼却施設に対しても深刻な影響を与えた。断水の影響を受けた施設を表-3.3.1に示す。表中には、各廃棄物焼却施設ごとの焼却能力、水道の復旧完了日、施設の運転再開日を記している。いずれの施設も、電気、ガス、水道、電話のライフラインが復旧してから、運転が再開された。中でも、炉の運転再開に当たって最大のネックとなったのは断水であった。

神戸市で焼却処理をしているクリーンセンターの水道の用途は、蒸気を利用した燃焼空気の加熱、燃焼ガスの冷却、燃焼灰の消火、灰運搬時の飛散防止、燃焼ガスの洗浄などである。全てのクリーンセンターでは断水や機能低下のため、受水に支障をきたした。例えば、落合クリーンセンターでは、ガスの停止や水道の断水はなかったが、給水圧が低下したため、給水量が不安定となった。これは、水道局が漏水防止などのために減圧措置をとったことによる。東クリーンセンターのプラント設備において水道(φ200)と工業用水道(φ150)の埋設配管は地盤の陥没によって寸断されたが、HIP管で仮復旧された。放流水配管(φ400)も2箇所破断したが、補修された。東クリーンセンターと荻藻島クリーンセンターでは工業用水道を利用していた。工業用水道の復旧は、おのおの4月12日と3月1日であり、水道の復旧よりも遅れた。このため、水道を利用して運転が再開された。

表-3.3.1 廃棄物焼却施設の復旧

廃棄物焼却施設	焼却能力	水道復旧日	運転再開日
神戸市 東クリーンセンター	690ton/日 (230ton × 3)	2月19日 (工水4月12日)	2月20日
落合クリーンセンター	450ton/日 (150ton × 3)	1月22日	1月23日
港島クリーンセンター	450ton/日 (150ton × 3)	2月10日	2月11日
荻藻島クリーンセンター	600ton/日 (200ton × 3)	2月6日 (工水3月1日)	2月6日
西クリーンセンター	600ton/日 (200ton × 3)	1月23日	1月24日
尾崎市環境処理センター	625ton/日	1月19日	1月19日
第1機械炉	150ton/日		
第2機械炉	175ton/日		
第3工場	300ton/日 (150ton × 2)		
豊中市・伊丹市 クリーンセンター	675ton/日	豊中市水道通水 (伊丹市工水 1月26日)	
1号炉	225ton/日		2月27日
2号炉	225ton/日		2月27日
3号炉	225ton/日		1月21日
4号炉(試運転中)	195ton/日		1月23日

尼崎市では、第1機械炉、第2機械炉、第3工場の3基の焼却炉を使用していた。このうち、第2機械炉ではボイラーで余熱を取りだして蒸気タービンによる発電を、第3工場ではボイラーによって蒸気を隣接工場に供給していた。第1機械炉においては排ガスの冷却に対して水噴射をしていた。このため、水道や工業用水道を使用していたが、いずれもが断水した。そこで、市の環境処理センターでは水道局に対して最優先の仮復旧を依頼した。2日後には水道が復旧したことにより、運転を一部再開できた。

豊中市と伊丹市では両市の境付近に豊中市・伊丹市クリーンランドを建設していた。三つの炉を使用して焼却を行うとともに、第4号炉を建設して試運転中であった。1号炉と2号炉では排煙用の煙突が折損倒壊するとともに、その影響で水処理施設や苛性ソーダタンクが破壊した。第3号炉では大きな被害がなかったが、伊丹市の工業用水道が断水したため、運転が不能になった。同じ敷地内に豊中市の水道が引かれていたため、これを急拠代替水として使用し、4日後には運転が再開された。このように二つの市にまたがって複数の給水源を有していたことが施設の安全度を高めることにつながった。

芦屋市の焼却施設では、排ガスの冷却用に、隣接する下水処理場の処理水を利用するシステムとなっていた。下水処理場が被災して完全に停止したため、処理水が得られなくなった。そのため、応急的に施設を空気冷却式に改良し、3日後から運転を始めたが、焼却能力は低下した。

気温の高い夏季ならば、廃棄物の蓄積は都市の衛生問題に発展したものと考えられる。今後は、予備的な水源や貯水あるいは焼却炉方式の多様化、焼却の応援依頼など、断水時における対処方法を検討しておく必要がある。

3.3.6 あとがき

停電は給水停止に至る。電気やガスの供給停止は水質試験をできなくし、安全でない水の供給につながる。水道管の破断は濁水や水質汚染および廃棄物処理の不能や低下などを引き起こし、土砂や地下水はガス管などに流入して、復旧を困難にした。また、用水型産業は制約を受け、冷却水と空調を用いる機器やシステム環境に支障を生じた。さらに、消防に制約を生じ、火災が拡大した。飲料水制約は不衛生な水の使用につながり、人々に精神的なストレスがたまった。このように本節で取り扱ったライフラインにおいては、水道機能の破壊が他システムの機能に影響波及した。

水道施設の被害については、現行の耐震技術の適用を推進することで十分に軽減可能であったケースが多かったが、今回の水道被害は、消火活動や災害医療などの緊急対応を著しく阻害するとともに、様々な都市機能の麻痺につながった。また、単なる生活不便というレベルをはるかに超え、あまりに長期的な生活支障の原因となった。震災時に刻々と変化する水需要に対して最低限の水供給機能を損なうことのないよう、今後はシステム間の連携や応急対策あるいは恒久対策を含めた防災システムを構築していく必要がある。

3.4 都市施設被害の多重分析

3.4.1 概説

1995年1月に発生した兵庫県南部地震は、多くの都市施設を破壊し、生活環境に大きな影響を及ぼして、様々な社会的課題を惹起した。中でも、建物の被害による多くの死傷者と、ライフラインの機能喪失による長期にわたる都市機能の阻害は、避難所の運営などを含む地震後の緊急対応にも大きな影響を与えた。ここでは、西宮市域を対象に、震災に関する多様なデータを収集し、それらをデータベース化するとともに、地理情報システム(GIS)上に展開して、都市施設の被害とそれによる都市機能への影響、ならびに緊急対応活動への影響に関する多元的な分析を行っている^{25)、26)}。これらのデータは、いずれもGIS上で面的な広がりをもって分析され、災害事象の時空間的特性を把握するのに役立つ。本報告は、災害現象の多重分析を行うとともに、工学的視点と地理学的視点を合わせた横断的な考察から、ライフラインの耐震性強化・性能規範の策定などに有用な資料を提供するものである。

3.4.2 西宮市域の震災の位置づけ

本報告の対象としているデータの具体的内容としては、

- ①ハザードに関わるデータ：限定された地点の地盤の永久変位や、道路被害などにより表現される面的な性状としての地盤変状や地震動など
- ②環境条件に関わるデータ：地形・地質条件、地盤条件、都市化の進展度など
- ③物理的な被害項目に関わるデータ：家屋被害、ライフライン(上水道・下水道)の管路被害、死者の発生場所など
- ④都市機能と緊急対応に関するデータ：ガス、水道などのライフラインの復旧過程、避難所の人員の推移など

が挙げられる。

ここで、西宮市域の都市化が進んだ南部地域を震災の多重分析に用いた意義としては、以下の事項が挙げられる。

- ①被害の中心となった神戸市が六甲山地から狭い扇状地を経て直ちに海岸に至るのに対し、西宮市域は兵庫川氾濫原の沖積平野、六甲東麓の丘陵地帯、海岸の埋立地を含み、わが国の都市域に広く見られる地盤条件を備えている。今回の震災の教訓を受けて全国で進みつつある地域防災計画の見直しなどの作業には、こうした一般的な地質・地盤条件を持つ西宮市の被災状況の分析結果が広い応用性を持つと考えられる。
- ②西宮市から全面的な協力体制を得たこと、また大阪市の地域防災計画策定のための作業とも連係する形で調査・研究を進められたため、今後の防災体制確立へ向けて建設的な取り組みとすることができる。

3.4.3 西宮市の地形・地質区分と道路被害状況

本項では西宮市における地形・地質区分について述べ、兵庫県南部地震による地盤変状との相関が予想される道路の被害状況を示す。以下の解析においては、地形を、図-3.4.1に示す「山地」、「丘陵地」、「沖積平野」、「江戸時代以前の埋立地」、「江戸時代以後の埋立地」の5種に分類して取り扱った。「山地」は六甲花崗岩や甲山安山岩が卓越する地域を、「丘陵地」は大阪層群とこれを覆う中位段丘、高位段丘が卓越する地域を、「平野」は沖積層が広がる地域を、「埋立地」は地図で埋立地とされている部分をとっている。従っ

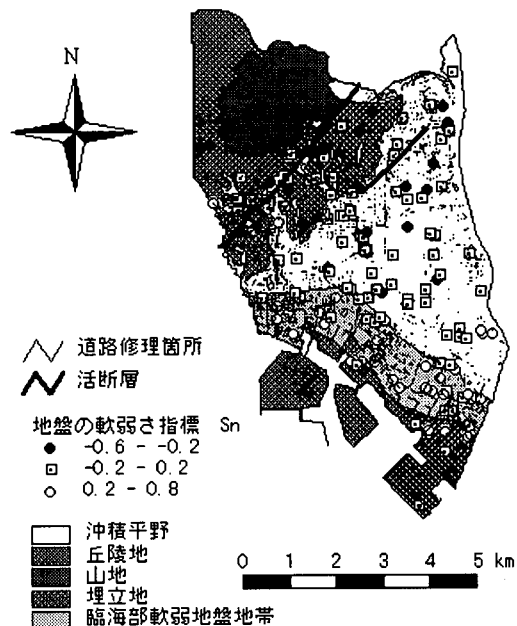


図-3.4.1 西宮市南部の地形分類とSn値および道路修理箇所

て以上の分類は、おおまかな地質区分に従ったものとなっている。なお、地形分類では「山地」と「丘陵地」の境界領域や、「丘陵地」と「沖積平野」の境界領域における住宅地は宅地造成が行われているものと考え、特に「造成地(宅造地)」という分類を設けて解析を行った場合もある。表層地質を詳細にデータベース化するために、西宮市教育委員会から提供された767本(146地点)のボーリングデータを用いた。それを基に、地表面から15~20m程度の深さまでの地盤の軟弱さを表す指標 $S_n^{27)}$ を上の地形分類と重ねて、図-3.4.1の地図上に示している。 S_n は、 $-0.6 \sim -0.2$ 程度でよく締まった地盤、 $-0.2 \sim 0.2$ 程度で普通の地盤、 $0.2 \sim 1.0$ 程度で軟弱地盤とされている。

西宮市より提供された道路被害状況図をもとに、道路の修理箇所を整理した。これも図-3.4.1に重ねて黒線で示した。この道路被害状況図は何らかの道路修理を行った場所を網羅的に記録したもので、被害の程度や形態などについては不明である。しかし、道路路面に変状が現れることは、液状化による地盤の変状、傾斜地における地盤の移動、その他、地盤震動による地盤破壊が生じたことの反映と見なせることから、道路被害箇所を地盤変状の有無を示す指標として用いることができると考えた。

3.4.4 脈動から推定される甲陽断層付近の基盤構造

被害の発生は上に述べたような、表層の影響だけではなく、深部基盤構造の影響を受け、断層によって基盤岩深度が急激に変化している地域の周辺では、被害の集中域が発生する可能性があるとして報告されている。西宮市では市域を甲陽断層が南西から北東にかけて横切っており、この断層に沿って、被害の著しい地域が帯状に広がっている(図-3.4.5参照)。そこで、脈動(周期が1~10秒程度のやや長周期微動)を用いた基盤構造の調査・推定を行った。

(1) 脈動の観測場所及び観測方法

図-3.4.2に示す甲陽断層を挟む西宮市北部地域において、1995年8月8日~10日にかけて75点の脈動の観測を実施した。観測は、西宮市営甲山墓地(OHK)と県立西宮高校(NHS)とを定点とし、それに5組の移動観測点を加えた計7観測点において、3成分(N-S、E-W、U-D成分)の同時観測を行った。時刻については、1/100秒以下の精度で記録の同時性を確保している。

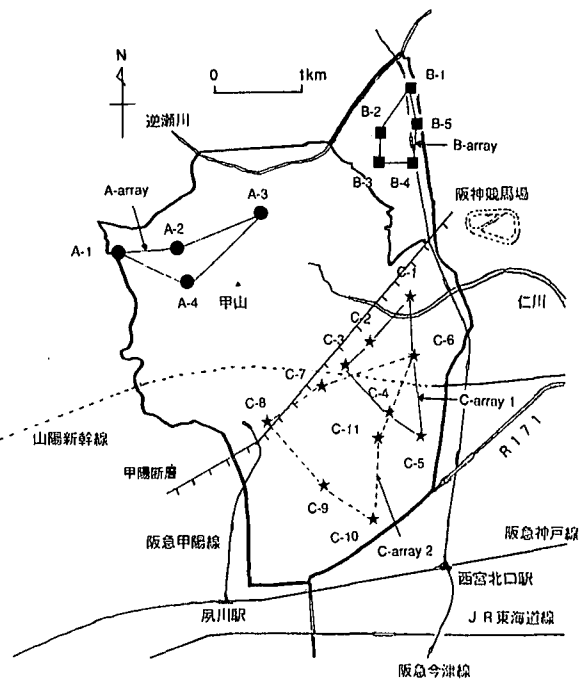


図-3.4.2 F-Kスペクトル解析に用いたアレーの配置

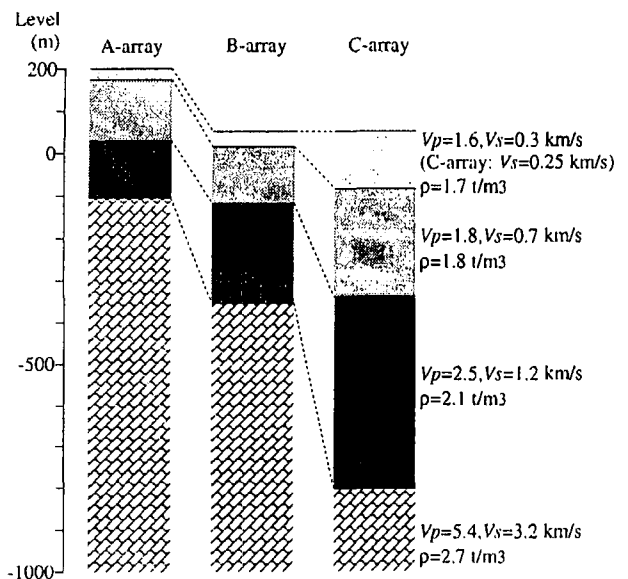


図-3.4.3 各アレーで得られた分散曲線の逆解析によって得られた地盤構造モデル

(2) 脈動のF-Kスペクトル解析と水平動/上下動
スペクトル比から推定される基盤構造

F-K スペクトル解析においては、帯城通過フィルタを通過させた波形について、Capon³¹⁾による最尤推定法(MLM)に基づき分散曲線を得た。さらに、得られた分散曲線から逆解析により、地盤の速度構造の推定を行なう。香川ら³²⁾が伊丹市において用いている地盤定数を初期モデルとして与え、その層厚のみを変化させて理論的に計算される分散曲線と観測された分散曲線が最も近い形状となる地盤構造を定めた。C-arrayは少し位置がずれるが大きさの異なる2つのアレーから得られた結果をまとめて整理している。地盤の速度構造の推定結果を図-3.4.3に示した。この図より、S波速度で3.2km/s程度の基盤岩の深度は、甲陽断層の北側で約300~400m、南側では、約850mであった。

次に、各観測点で得られた脈動の水平動/上下動スペクトル比(以下ではH/Vと呼ぶ)のピーク周期 T_p の分布を図-3.4.4に示す。一般に、 T_p の違いは基盤岩深度の相対的な変化を表すものといわれているが、甲陽断層を挟んで南側では T_p が急に大きくなっており、基盤岩深度が急激に変化していることを示唆している。北東部にピーク周期が大きい地域があることが注目されるが、これは、B-arrayのF-Kスペクトル解析結果から得られた基盤構造とも調和的である。

以上の結果より、西宮市では、甲陽断層を挟んで、南側の基盤岩が北側に比べて約500m深いところにあるものと考えられる。このことは、断層を跨ぐ測線上の余震観測で得られた余震の走時に基づいて推定された、基盤構造ともよい一致を示している(和賀ほか³³⁾)。

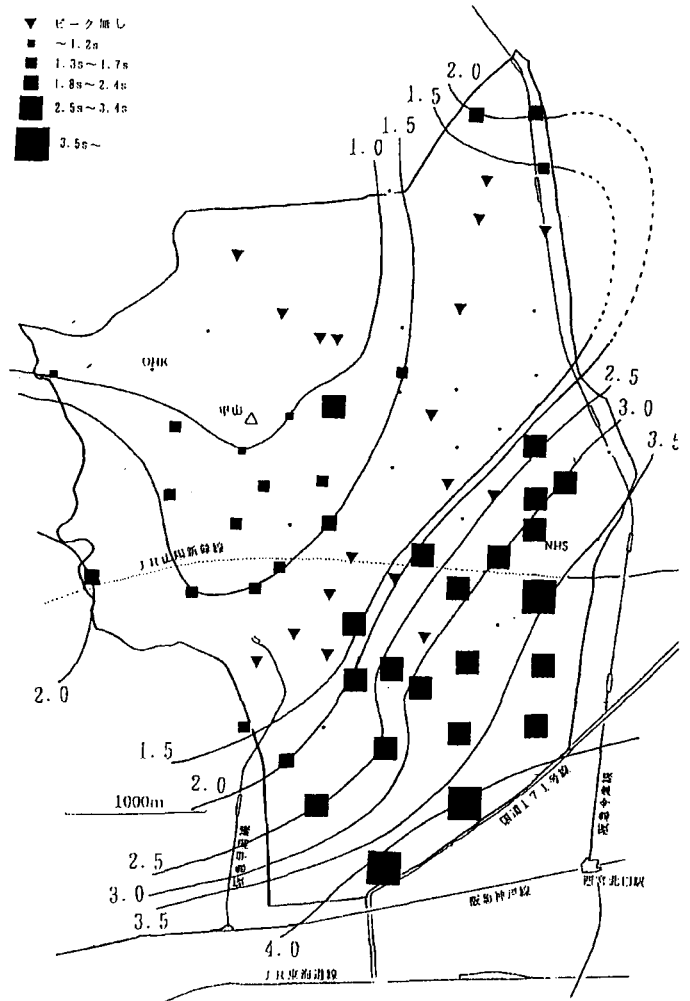


図-3.4.4 H/Vスペクトル比のピーク同期 T_p の分布

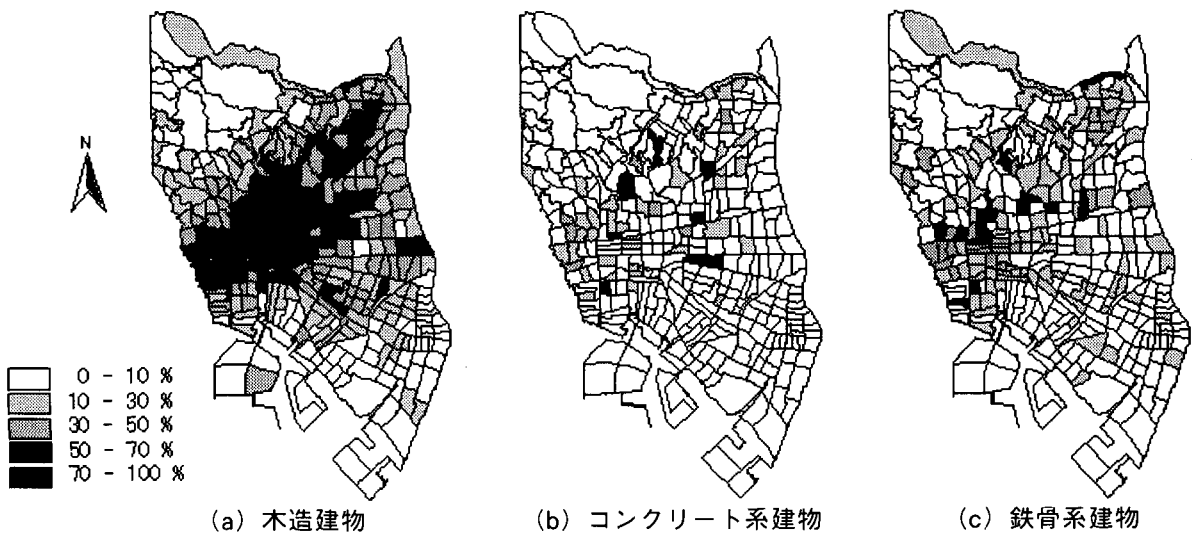


図-3.4.5 各種構建造物の町丁目別全壊率分布
(各種構造ごとの建物全棟数に対する全壊棟数の比;%表示)

3.4.5 建物の被害状況

西宮市は、市町村別では神戸市に次いで住家被害棟数が多い²⁸⁾。西宮市から提供された建物被災度判定データによると、入手した全155,435件の建物データのうち、独立の棟数として算定された件数は、124,308棟である。建物構造別の全壊・半壊・一部破損の棟数は表-3.4.1に示す通りである。西宮市の判定では「無被害」はない。木造は建物全数の54%を占め、全壊・半壊を合わせた棟数はその56%で半数以上となる。鉄筋コンクリートと鉄骨鉄筋コンクリートを含むコンクリート系建物の占める割合がそれに次いで多く29%で、軽量鉄骨を含む鉄骨造建物は8%となっている。その他建物としてまとめた項目の中には、れんが、コンクリート・ブロック、木質プレファブ、軽量鉄骨プレファブ、鉄筋プレファブなどが含まれる。

表-3.4.1 西宮市の被害建物棟数

	建物件数	全壊棟数	半壊棟数	一部破損棟数	無被害棟数
木造	67698	22842	14918	29938	0
コンクリート系	35539	2083	6129	27327	0
鉄骨系	9557	1059	1999	6499	0
その他の構造	11514	777	997	9740	0
計	124308	26761	24043	73504	0

住宅地として広がっている西宮市南部を対象とした、木造・コンクリート系(鉄筋コンクリートと鉄骨鉄筋コンクリート)・鉄骨造(軽量鉄骨を含む)の各構造ごとの町丁目別建物全壊率分布を図-3.4.5に示す。ここで全壊率は、各種構造ごとの建物全棟数に対する全壊棟数の比で表している。建物は各構造とも、被害の集中地域が、丘陵地に近接する沖積平野部を中心として分布している点で類似している。しかし構造別で明らかに被害レベルの分布が異なっていることがわかる。木造家屋の棟数は全建物の半数以上を占めるが、被害のレベルも分布の広がり具合も他の構造に比べて大きい。それに比して、液状化した地域(図-3.4.6参照)での建物被害は特に目立っているわけではない。後述するが、上水道配水管の被害は海岸部近くの比較的軟弱な地盤上で多くも認められ、建物被害分布と違っている。

3.4.6 西宮市における上水道施設の被害とその要因

解析に先立って、上水道の管路網と配水管の被害箇所のデータベース化を行った。上水道の管路網については、1/500の上水道管路網図を基にしており、管径200mm以上の配水管幹線管路網と阪神水道企業団の管路網とが区別できるようになっている。図-3.4.6に上水道の配水管路網と液状化の発生地域を示す。図中、太線は管径200mm以上の配水管幹線管路網を表す。図-3.4.7に配水管の管径別被害箇所と地形分類を示している。配水管被害箇所は、西宮市水道局によって配水・給水管の修繕工事が行われた場所などが記された1/500の水道管図を基に、配水管工事のみを抜き出して場所を決定した。配水管の修繕箇所は1,035点であった。また、配水管被害の内容は、西宮市水道局から提供された修繕派遣カードを基にした。なお、修繕箇所および修繕内容は1995年7月5日現在のデータである。






-  管径 200mm 以上
-  管径 200mm 未満
-  液状化発生域

図-3.4.6 上水道配水管路網と液状化発生地域

被害箇所は丘陵地と沖積平野の境界部分(宅

地造成が多く行われている地域)と沖積平野の海岸部に多い。南部ではSn値の分布を見ると、軟らかい地盤を表す $Sn \geq 0.2$ の点の分布(図-3.4.1)は、配水管の被害分布とかなり傾向が似ている。一方、被害箇所と液状化の発生地点を比較してみると、大規模な液状化が発生した明治(1870年)以降の埋立地にはほとんど被害がないことがわかる。特に西宮浜・甲子園浜・鳴尾浜などの埋立地では管の布設が比較的新しく、あらかじめ耐震継手付きダクトイル鑄鉄管などの耐震管を採用している場合の多いことが理由と考えられる。

配水管の分布は町丁目ごとに粗密の差があるため、町丁目ごとの配水管延長と被害箇所数から配水管延長1kmあたりの被害箇所数を計算した。その結果を示したものが図-3.4.8である。耐震管の被害率分布を建物の被害率分布(図-3.4.5)と比較すると、建物の被害率の高い地域

は、丘陵地に近接する沖積平野の縁辺部に沿っているが、配水管の被害の場合は、丘陵地と沖積平野の境界部分の、地形変遷部の帯状部分の宅地造成を行ったと考えられる地域と、海岸側の新旧の埋立地で被害率が高く、両者で被害分布傾向が異なっていることがわかる。

給水管の被害箇所の分布を図-3.4.9に示す。給水管破損箇所の分布も、北東から南西にのびる丘陵地帯から臨海部軟弱地盤地帯を経て埋め立て地へと広がっている。さらに沖積平野部にも全体的に被害箇所が見られる。丘陵地帯の沖積平野と丘陵地が複雑に入り組んでいる地域では、特に被害が集中していることがわかる。配水管と給水管の被害を比較すると、全体的には類似しているが給水管被害は配水管被害に比べて沖積平野での被害の広がりが大きく、沖積平野と丘陵地の複雑に入り組んだ地域では、密集度が更に高いことがわかる。これら埋設管の被害分布は道路の被害(地盤変状)との相関が強いが、建物被害とは異なっている。この被害分布の違いは、主に建物被害が地震動そのものの寄与が大きいことに対し、給・配水管の被害は地盤変状などの寄与が大きいためと考えられる。

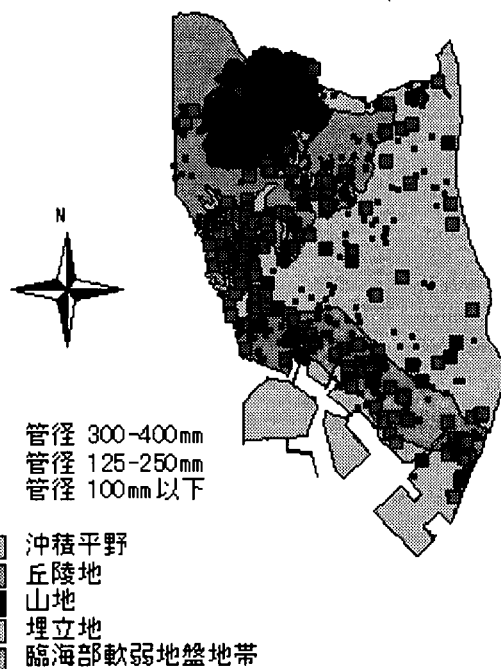


図-3.4.7 上水道配水管被害発生箇所と地形分類ならびに液状化発生地域

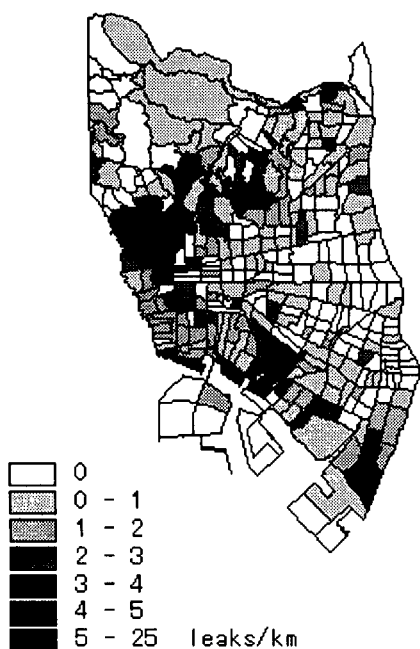


図-3.4.8 上水道配水管の町丁目別被害率(1km当たりの被害箇所数)

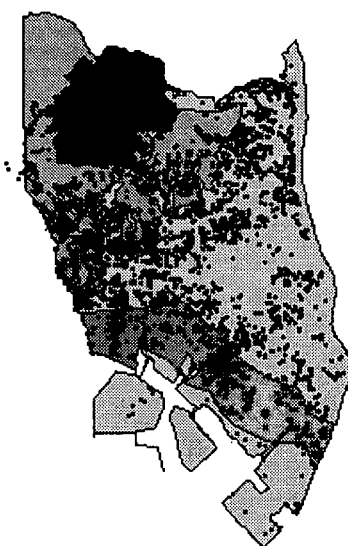


図-3.4.9 上水道給水管被害発生箇所と地形分類

(3)西宮市における配水管・給水管被害の要因分析

町丁目ごとの代表地形を先の地形図を基にして、「山地」・「丘陵地」・「宅造地」・「沖積平野」・「臨海部軟弱地盤地帯」・「埋め立て地」の6つに分類した。ここで「宅造地」とは丘陵地と沖積平野の境界部の込み入った地域で、宅地造成を行ったと考えられる地域を示している。地形条件別に配水管と給水管の被害率の町丁目数割合で表した結果を図-3.4.10に示す。配水管被害率を、各町丁目の配水管の総延長距離に対する被害件数の比で、また給水管被害率を、各町丁目の給水管の開栓装置数に対する被害件数の比でそれぞれ表した。宅造地は、配水管・給水管とも広い範囲で甚大な被害を受けている。給水管ではほぼ100%に近い範囲で何らかの被害を受けており、配水管では被害ありの町丁目数割合が80%を越えている。宅地造成をする際に行われる地形改変で、特に盛土が被害に影響していると考えられる。埋め立て地では、配水管に継手付きダクタイル鋳鉄管の耐震管が使用されていることが被害減少に役立っている。一方、給水管には耐震性の低い硬質塩化ビニル管が用いられ、配水管被害ありに比べて給水管被害ありの範囲が約2倍と差が大きくなっている。

以上の結果より、道路の被害率が高いところ、すなわち地盤変状が発生したと考えられるところで配水管・給水管の被害率が高いこと、また、地形の影響も大きく、特に造成地・埋め立て地で被害率が高くなっていることが統計的に確かめられた。

3.4.7 ライフラインの復旧過程とその影響

(1)上水道の復旧過程

図-3.4.11に、西宮市上水道の町丁目別の応急復旧終了までの日数を示した。全体として、上水道の復旧は配水施設に発する上流から進むが、その中で、管路被害が多数集中する地域では復旧が遅れる様相がわかる。地盤条件が悪い地域では末端の配水管にある程度の被害が発生するのは避けられないが、この場合、その後の復旧過程の迅速化が重要な課題となる。配水幹線を冗長性のあるネットワークとして構成することが、今後の課題として提起される。また、図-3.4.7の大口径管路の被害箇所を示した配水幹線の被害はこうした配水幹線の重点的な耐震化の必要性を示している。

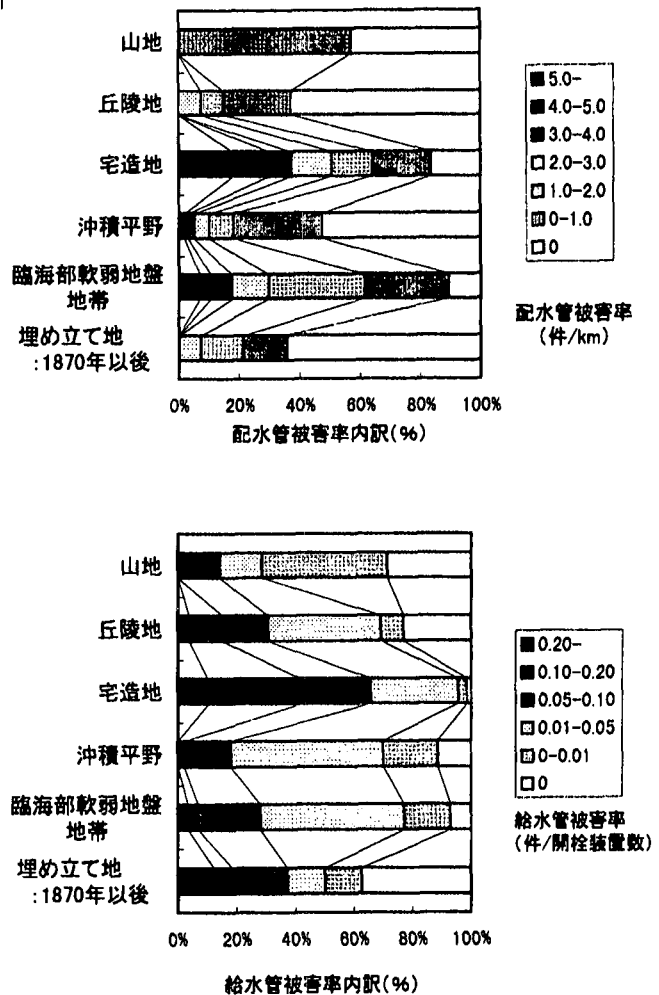


図-3.4.10 代表地形による配水管・給水管被害率

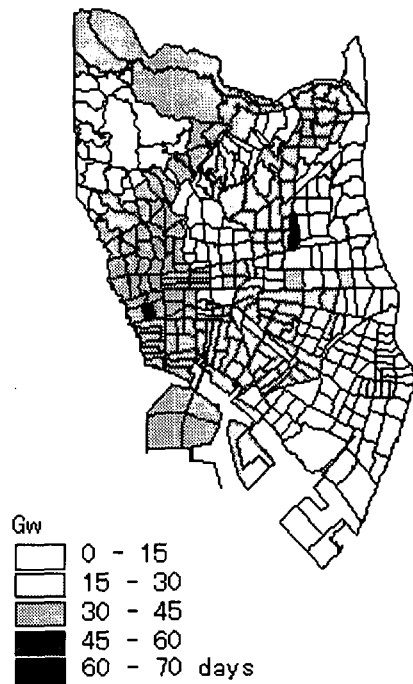


図-3.4.11 上水道の復旧までの日数

(2) 都市ガスと水道の復旧過程の対比

図-3.4.12に、大阪ガスによる復旧速報²⁹⁾を整理して得られた地震後の都市ガスの復旧完了までの日数を町丁目ごとに示した。同図における都市ガスの復旧過程は、先の水道の復旧過程と異なる経過をたどっている。阪神地区のような、水道と都市ガスに全面的に依存する地域においては、これらの異なる供給ライフラインの復旧状況が総体として都市生活機能に影響を与えるものと考えられる。このことは、過去の震災例の調査でも見られたことであり、今回の震災の中で、こうした影響が大規模に発生したと考えられる。

図-3.4.13に都市ガスの復旧までの日数と、水道の仮復旧までの日数との差を町丁目ごとに示した。示された日数が大きくなるほどガスの復旧が水道と比べて遅かったことを表している。震災時には、水道と比較して都市ガスの復旧に多くの日数を要するのがこれまでの一般的傾向である。この傾向は図-3.4.13においても顕著であり、大部分の町丁目でガスの復旧の方が遅れて達成されている。

しかしながら、同図において、以下の点でこれまでの震災と顕著な相違が見られる。それは、①水道とガスの復旧の時間差が30日以上に及んだ町丁目全体の半数近くに達したこと、および②ガスより水道の復旧が遅れた町丁目かなり多く、その差が10日以上に及んだ例が全体の7%あり、30日の差を生じた所もあったことである。今後、これらの事実が住民の生活支障にどのような影響を与えたかを考察するとともに、供給システムとしての異種ライフラインのバランスを考えた耐震対策のための有用な知見を得ることが必要であり、また調査も実施されている³⁰⁾。

(3) 避難所数の推移とライフラインの復旧過程の関係

西宮市における避難所の種別は、①地域防災計画で定められた指定避難所(73ヶ所)と緊急一次避難所(42ヶ所)、②およびその他の避難所(195ヶ所)からなる。①には主として小中学校や公民館が充てられているが、②は公民館などの公的施設から個人の住宅まで様々である。今回の震災では、①と②がほぼ同数であったことが特徴である。これらの避難所に、1月18日のピーク時で約45,000人、1月31日で約25,000

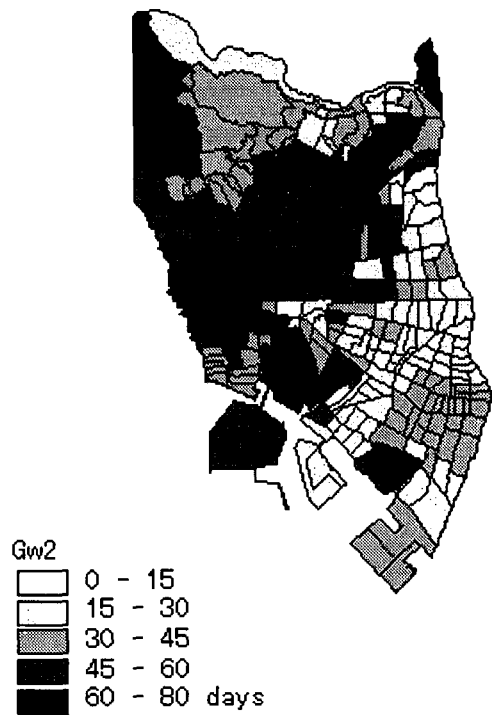


図-3.4.12 都市ガスの復旧までの日数

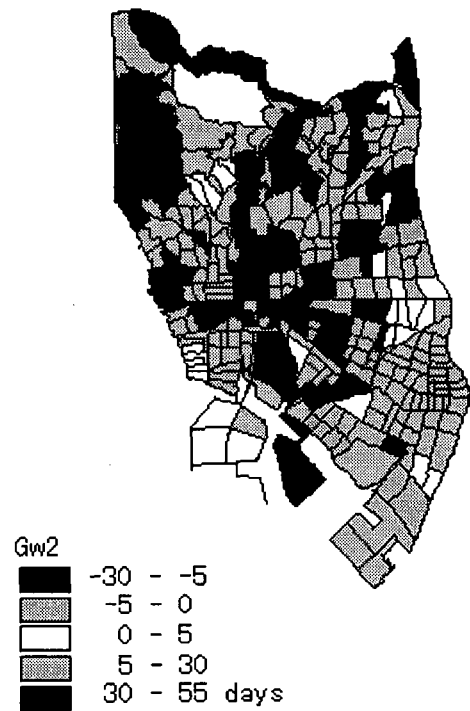


図-3.4.13 上水道の仮復旧までの日数に対する都市ガスの復旧までの日数の差

人、約1ヶ月後の2月19日で約16,000人の被災者が避難した。水道の復旧に30日以上を要した地区にも多くの避難所が存在する。このような防災拠点となる施設を考慮に入れた幹線網の整備が必要である。

図-3.4.14、15に、それぞれ1月31日と2月19日現在における避難所における被災者数と、その時点における水道の仮復旧の状況を重ねて示した。建物の全壊率が高い地域には、避難者数の多い避難所が多い。避難所に入った、避難所を出る理由は様々であり、多くの場合は家屋の被害に関わると考えられるが、ライフラインの途絶と復旧が避難所への出入りを促す面もあると考えられる。図-3.4.15で、建物の全壊率が比較的低い南部の海岸付近や北西部の丘陵地帯で、上水道の復旧とともに避難者数が減少しているように見られる。

上水道とガスそれぞれのライフラインの復旧状況と避難所の使用状況の推移とを時系列上で重ね合わせた(図-3.4.16)。復旧完了後5日以内に避難者数が減少した避難所の数は、上水道の場合で約30%、ガスの場合で約20%見られた。しかし、これらの避難所の地理的分布からはライフラインの被害・復旧との明らかな関係は見られない。他の要因と絡んでいるためライフラインの直接的な影響が出ていない可能性もあるが、こうした側面を詳細に検討すること、ならびに住民の意識調査により、ライフラインの復旧戦略に関わる有用な知見を得ることができると考えられる。

3.4.8 結論

①西宮市におけるライフライン・建物などの物理的な被害に関するデータ、上水道配水管管路・道路などの都市基盤データ、地形や地質などの自然データ、道路・行政界などの地理データ、ライフラインの復旧や避難所などの都市機能と緊急対応に関するデータ、などを収集してGIS上で統合して、ライフライン・建物の被害の相互の関連や地形・地質条件などが被害に与えた影響について分析した。また上水道の被害の分析を行った。

②上水道埋設管の配水管と給水管はともに宅造地と臨海部軟弱地盤地帯で甚大な被害を受けた。配水管と給水管の被害の分布は類似しており、それらの被害分布は道路の被害(地盤変状)

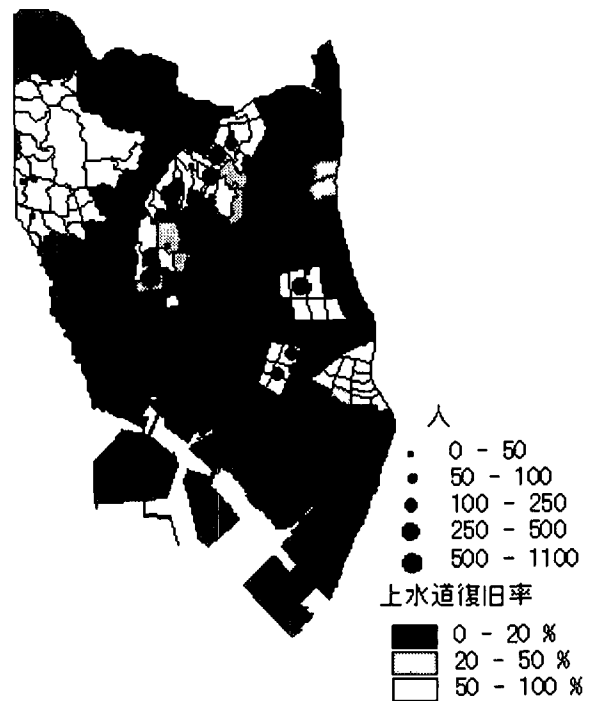


図-3.4.14 1月31日における各避難所の避難者数と上水道の復旧率(%)

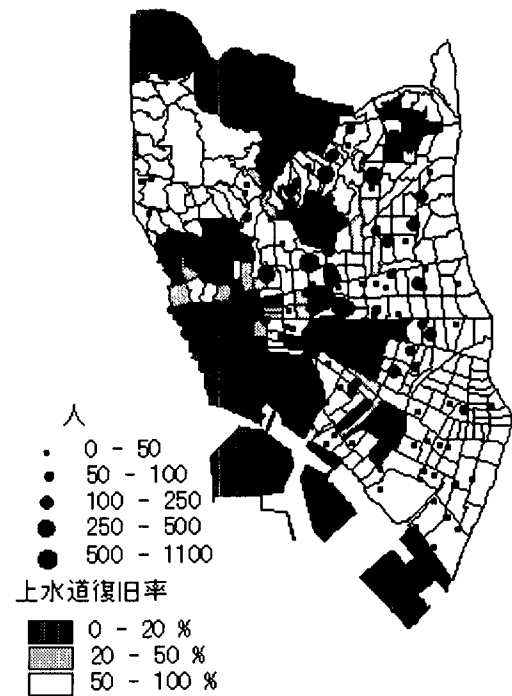


図-3.4.15 2月19日における各避難所の避難者数と上水道の復旧率(%)

との相関が強く、建物被害とは異なっている。この被害分布の違いは、主に建物被害が地震動そのものの寄与が大きいことに対し、給・配水管の被害は地盤変状などの寄与が大きいことによるためと考えられる。また宅地造成をする際に行われる地形改変、特に盛土が被害に影響していると考えられる。

③ガスの復旧は、上水道の復旧に比べると遅れたところが多い。水道とガスの復旧の時間差が30日以上に及んだ町丁目が全体の半数近くに達した。逆に、ガスより水道の復旧が遅れた町丁目もかなり多く、その差が10日以上に及んだ例が全体の7%あり、30日となった所もあった。

④建物の全壊率が高い地域には、避難者数の多い避難所が多い。逆に、建物の全壊率が比較的低い南部の海岸部付近や北西部の丘陵地部では、上水道の復旧とともに避難者数が減少する傾向が見られ、ライフラインの途絶・復旧が避難所への出入りに関わる面もあると考えられる。上水道・ガスの復旧完了後5日以内に人数が減少した避難所の割合が、上水道の場合で約30%、ガスの場合で約20%あることが認められた。

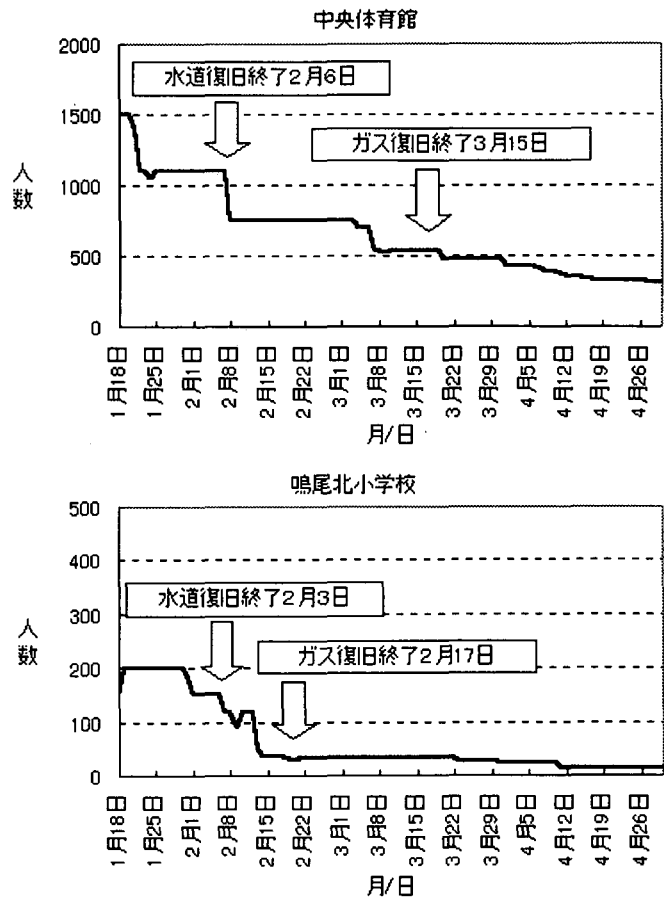


図-3.4.16 避難所人数の時系列推移

3.5 下水道管路施設の被災、復旧と今後の下水道ライフライン確保

3.5.1 はじめに

阪神・淡路大震災によって上水道、ガス、電気、道路などのライフラインが大きな被害を受けたことは、これらが直接人々の衣食住に影響を及ぼすことから、広く認識されている。しかし、その一方で、上水道と同じように深刻な被害を受けた下水道については、トイレの問題としては人々の意識に強い印象を与えたが、ライフラインとしての下水道の被害に対してはあまり関心が高くなかった。しかし、下水道ライフラインは生活の快適性、利便性を確保し、水環境保全に貢献しており、生活に不可欠のものである。ここでは、下水道管路施設の震災による被災状況とその特徴を解析し、その復旧過程で明らかになった下水道管路施設の問題点を示す。さらに、今回の教訓を受けて、下水道ライフライン確保のための課題を上水道と共に考察した。

3.5.2 管路施設の被災状況調査の概要

最も被害の大きかった神戸市の下水道は分流式下水道であり、汚水管きょと雨水管きょが布設されていることから、それぞれの管きょに対して次のように被害状況調査が実施された。

(1) 当日の緊急調査

地震発生当日には管きょの緊急調査が実施された。

緊急調査は、汚水幹線を中心に、直接目に見える道路や建築物等から被害状況を推定するとともに、管きょ破損等による大規模な汚水の溢水及び道路陥没の有無について実施している。

震災翌日の1月18日からは管きょ施設の具体的な被害状況を知るために、応急調査が行われた。応急調査は1次調査と2次調査の2段階で実施された。

(2) 1次調査（調査期間；1月18日～22日の5日間）

1次調査は迅速な被害状況の把握を目的に、①地表面の変状の目視調査、②主な道路交点にあるマンホール内等の目視調査を道路管理者から得た道路情報をもとに調査対象箇所を設定（エリアの広い北区及び西区）して実施した。調査内容は、①路面の変状、②マンホールの浮上・沈下、③施設（管きょ、マンホール）の損傷状況、④流水の状況、⑤土砂の堆積状況、⑥接続ますの外観等である。調査より、緊急に措置すべきものについては、応急、復旧の方法を検討した。

この1次調査の結果から2次調査の必要な範囲が決定された。なお、汚水幹線の調査は大量に流れている汚水のため、昼間の調査が困難であったため、水量が減少する深夜の時間帯にマンホールから管内を目視するという条件の厳しい調査であった。

(3) 2次調査

1) 汚水枝線（調査期間；1月23日から10月10日までの約9か月間）

汚水枝線は排水設備、接続ますと取付管を通じて流入してくる各家庭および事業所の汚水を幹線管きょや処理場・ポンプ場まで導く管きょで、分流式の場合、通常200mmから250mm程度の管径のものを指している。また、枝線の埋設深度は、土被りで1.2mから4m程度のもが多い。1次調査の結果から、汚水支線管きょ被害予想区域図を作成し、これをブロックに分けて2次調査が実施された。しかし、調査の進捗に伴って被害予想区域は拡大し、最終的には115ブロックの調査が実施された。調査実施範囲は、面積；約5,400ha、延長；約1,300kmである。

調査対象は、1次調査結果から設定された被害予想区域に含まれるブロック内のすべてのマンホールであり、①管内状況の目視調査、②マンホール状況の目視調査により、管きょでは破損、ずれ、たるみ等の状況の確認、マンホールでは破損、蓋やブロックのずれ等の状況の確認が行われた。

目視で、①5cm以上たるみ、②漏水、破損が見られた管きょについては、より詳細な調査が必要として、本管検査用テレビカメラにより管内状況の観察・記録が行われた。

2) 汚水幹線

汚水幹線の1次調査は流量が少なくなる深夜における人孔からの目視調査により実施された。しかし、深夜でもかなりの量の汚水で管きよが満たされていること、マンホール間隔が大きいことから1次調査で被害箇所を特定することは困難であったため、被災の可能性のあるすべての汚水幹線が調査された。調査は上下流のポンプ場や処理場の運転を制御した上で、流量の少ない深夜や明け方の時間帯を調査時間を選び、管内水位が断面の1/2程度とできたものについてのみ命綱をつけた潜水夫が管内を目視した。条件の非常に厳しい調査であった。管内水位を下げられなかった幹線については、幹線用の特殊な台船付テレビカメラにより調査した。

3) 雨水幹線（調査期間；1月23日から11月30日までの10か月間）

1次調査の結果、被害が予想される雨水幹線が調査対象であり、①管内全スパンの状況の目視調査と②マンホール内部状況の目視調査、③吐口付近などの水没箇所に対する潜水直接目視調査が行われた。調査実施範囲は、面積；約6,000ha、管きよ延長；約378kmである。

4) 取付管及び接続ます（調査期間；2月1日から3月10日までの約40日間）

取付管と接続ますは地表面に近く、多くの損傷が予測されたことから、建物等の被害が大きな地区について面的に状況を確認する調査が実施された。調査対象は建物等の被害が大きな地区の取付管等であり、該当地域のすべての接続ますを開け、取付管を手鏡等でチェックし、異常が確認された場合には、その場で応急修理が行われた。調査実施範囲は、120,000箇所（建物倒壊等により実際に調査できたのはこの1/2）である。

また、全市の処理区域を対象に、市民から寄せられる通報で上水道給水装置の応急復旧を行うとき、同時に排水設備の点検と併せて取付管及び接続ますの点検業務を実施している（委託期間1/23～3/11）。

さらに、倒壊家屋、焼失家屋などの接続ますと取付管の確認調査を実施した結果、当初の不明分に加え、半壊等の家屋の撤去時にも取付管やますは損傷を受けており、調査を行った約46,000箇所のますのうち、正常と確認できたものは23%、再調査や改修・保全措置が必要なものは77%であった。

3.5.3 管きよ被災状況

行政区別、処理区別の汚水管きよの被災率（=被災延長/調査延長）を図-3.5.1、3.5.2に示す。神戸市全体の汚水管路布設延長3,315kmの約2%にあたる63kmが被災している（調査延長は約1,278km、98.6m/ha）。また、図-3.5.3に神戸市の埋立地の汚水管きよ被害率の比較、図-3.5.4に埋立地と埋立地以外の汚水管きよ被害率の比較を示す。液状化を生じた埋立地では管きよの被害は大きく、特にヒューム管の被害率が高い。平均でも埋立地以外の5倍以上となっている。

汚水管きよの管種別、管径別の被災状況を図-3.5.5、3.5.6に示す。管種別では、陶管の被害率が平均24.3スパン/kmと他の管種に比較して非常に高く、1km当たりの総スパン数は30～50程度であるため概ね半分以上のスパンが被害を受けている。管径別では、ほとんどが被災した陶管を除くと被災割合（=被災路線延長/布設延長）に顕著な被災傾向は見られない。また、雨水管きよの管種別、管径別の被災状況を図-3.5.7、3.5.8に示す。石積み雨水管きよの被災率が6%を超えており、他の管種の被災率は2%弱である。したがって雨水管では、石積み製のものが被災しやすかったと言える。管径別では、管径による震災被害の顕著な傾向は見られないが、1,200mm以上の比較的大きな管きよの方が被災率は高くなっている。

3.5.4 管きよ被災状況調査、復旧工事における問題点

(1) 被災状況調査の問題点

管きよの被災状況を調査する際に苦労した事項として、次のことがあげられている。

- ①交通渋滞により移動に時間がかかった。
- ②倒壊家屋のガレキ等で調査できない箇所が多く生じた。

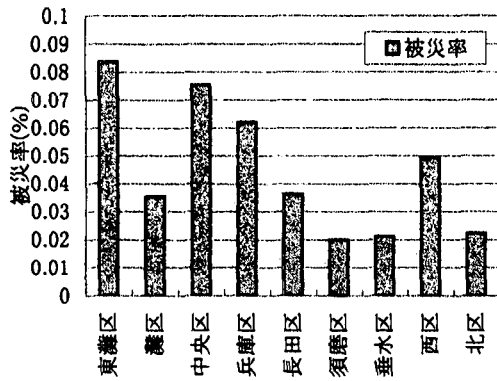


図-3.5.1 行政区別下水道管きよ被災率(汚水)

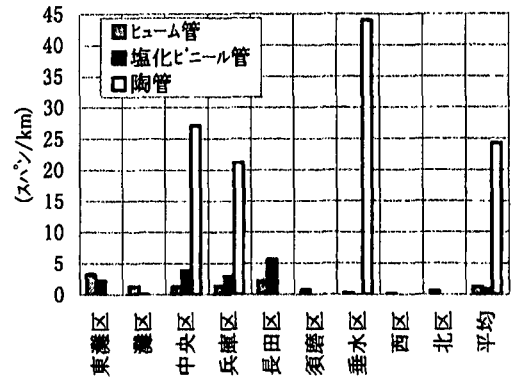


図-3.5.5 行政区毎の管種別被害率

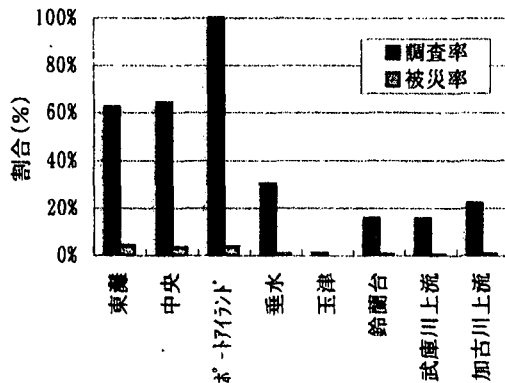


図-3.5.2 処理区別下水道管きよ調査率と被災率(汚水)

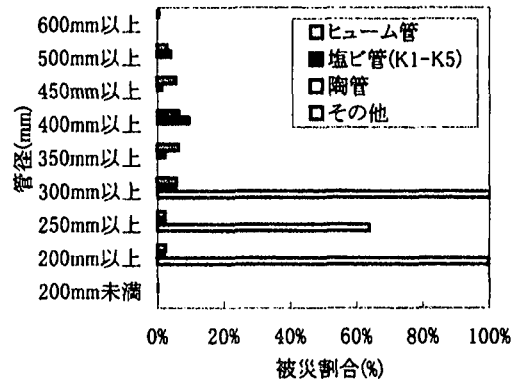


図-3.5.6 汚水(枝線)の管径・管種別被災割合

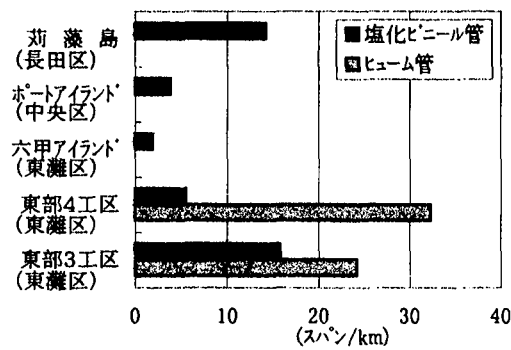


図-3.5.3 埋立地毎の汚水管きよ被害率

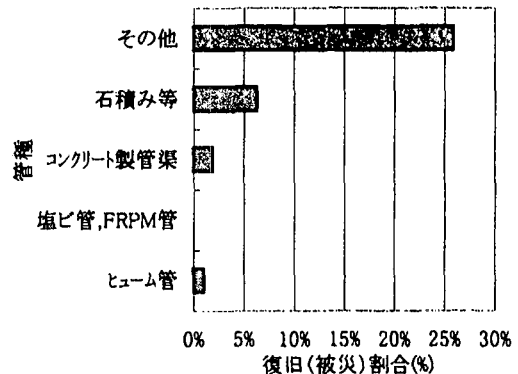


図-3.5.7 雨水幹線の管種別復旧割合(被災率)

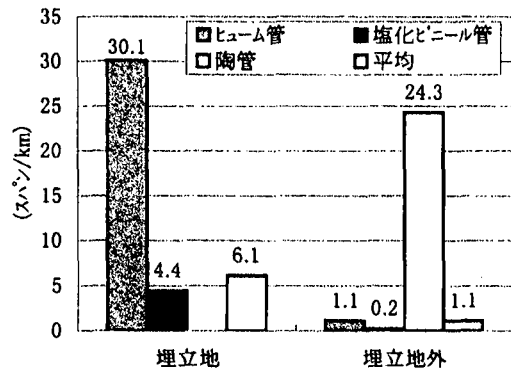


図-3.5.4 埋立地と埋立地以外の汚水管きよ被害率

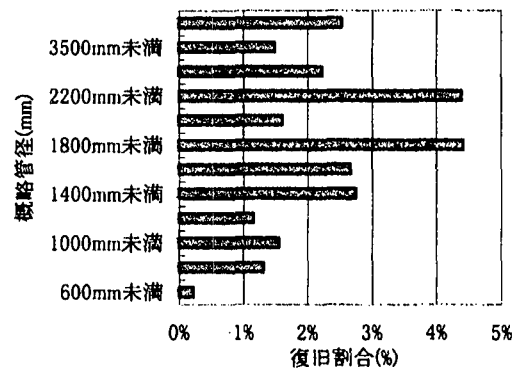


図-3.5.8 雨水幹線の管径別復旧割合(被災率)

- ③取付管や接続ますは家屋の倒壊によるガレキがかぶっていたり、その撤去時にますが破損し埋没しており、位置の確認ができないものが多かった。
- ④調査実施基準が定まっていなかったため、個人の判断によることになった。
- ⑤庁舎が崩壊したため、台帳図の確保に時間を要した。
- ⑥汚水枝線は小断面であるため、目視調査のみでは不十分で、他都市からの応援も受けてTVカメラ調査を実施した。このため、被害箇所の特定に多大な日時と労力を要した。
- ⑦汚水幹線調査では、常に大量の下水で管内が満たされており、調査方法（調査時間、潜水夫や台船付の特殊TVカメラの使用等）の選択、その実施に苦労した。
- ⑧雨水幹線の吐き口付近では常に管きよが水没しており、潜水夫による調査が必要になる。また、写真撮影も難しかった。

(2) 被災管きよの応急復旧、完全復旧における障害等

被災管きよの応急復旧、幹線復旧作業を実施する際に障害となった事項、苦労した事項として、次のものがあげられている。

- ①交通渋滞により、移動に時間を要した。また、復旧資材、人員等が円滑に移動できなかった。
- ②被害のほとんどが、多くの地下埋設物が輻輳する市街地で発生していることから、復旧工事が難しかった。
- ③埋設深度の大きい管きよは移設や防護が必要で、復旧工事が難しかった。
- ④家屋の撤去・復旧工事や他の地下埋設物の復旧工事が競合し、工事間の調整が多く生じた。
- ⑤汚水管きよに多量の不明水（地下水、海水）が流入したが、その箇所の特定が困難であった。
- ⑥雨水幹線では地震による擁壁崩壊等で、隣接する民地等との境界位置の特定ができず、施工に先立って境界の確定に時間を要した。
- ⑦海岸や河川の護岸付近で多くの被害が生じたが、工事箇所が水面下になるものが多く、補助工法や特殊工法が必要となった。
- ⑧避難している人の復帰と共に苦情が急増し、その対応に苦慮した。

(3) 問題点、障害等への対応

これらの事項への対応として、表-3.5.1に示すものが考えられる。

3.5.5 上水道・下水道ライフライン確保のための対策とその関連

震災被害の状況および被害の経験から、各種の関連団体により、上下水道ライフラインのあり方が提言されている。これらの内容を分類・整理した上で、上水道と下水道で対比した。その結果を表-3.5.2に示す。

なお、上水道と下水道それぞれの分野での提言等から、ライフライン確保のために検討することが望ましい事項について、独自に提言内容を書き加えた。

3.5.6 まとめ

排出側のライフラインである下水道は、上水道、ガス、電気といった供給側のライフラインとは異なり、そのライフラインの損傷が他のライフラインに影響を及ぼすことは少ない。しかしながら、そのライフラインの損傷や機能低下は、人々の健康的で快適な生活を阻害し、環境悪化を招くことから、他のライフライン同様に早期の復旧が重要である。その際に問題となるのが、下水管路の被災状況調査である。交通渋滞や倒壊家屋等の瓦礫により被災箇所と被災レベルの特定が非常な困難を伴ったことから、管路内への情報伝達ケーブル敷設等による各種情報取得と下水道台帳による管きよデータのデジタル化とその分散保管、可搬型メディアへのバックアップ等の対策をとる必要がある。また、他の地下埋設ライフラインとの共同溝設置と統合型情報管理システムの構築も重要な手段である。さらに、最近の情報機器の小型化を受けて、ポータブルコンピュータと携帯電話およびGPSシステムを組み合わせたポータブルな管路情報シス

テムの構築も考える必要がある。

このような管理システムでの対策に加えて、上水道と下水道は水を供給し、排除、処理するライフラインとしてが一体とした整備方針の確立が必要と考えられ、そのためにはここで示したような構造面、システム面、体制面での共通の指針づくりが必要となる。

表-3.5.1 管きよ被災状況調査、復旧工事における問題点、障害等への対応策

被災状況調査		対応策
問題点、障害、苦勞事項等 交通渋滞による調査の遅れ		<ul style="list-style-type: none"> ①小型作業車が通行できる程度の大きさを持ったライフライン共同溝を建設する（下水道だけでなく、上水道、電気、ガス、通信等のライフライン施設をひとつの管きよ内にまとめる）。これにより、地上の交通渋滞に關係なく問題箇所の調査を行う。 ②このような共同溝には自走式監視カメラを設置し、すべてのライフライン施設の状況を監視する。 ③共同溝や下水道管路内に情報伝達用ケーブンを敷設する。これにより、情報伝達の状態から被災管きよを特定する（このような情報管理システムを構築する）。
倒壊家屋等のガレキの障害		<ul style="list-style-type: none"> ①下水道台帳システムを完備すると共に、これをポータブルコンピュータと携帯電話で通信できるようにして、現場で必要な情報を取り出せるようにする。 ②下水道台帳システムとGPSを組み合わせ、管きよ埋設位置等の特定が可能となるようなシステムを構築する。
調査実施基準		<ul style="list-style-type: none"> ①今回の下水管きよ震災状況の解析から、震度と管きよ被災の關係を整理し、震災発生時の調査緊急度を設定する。 ②調査緊急度の設定に際しては、管きよ周囲地盤、管種、管径、管きよ埋設深、継手構造等を考慮する。
下水道台帳の確保		<ul style="list-style-type: none"> ①下水道台帳はデジタル化、データベース化して、コンパクトな記憶メディアにバックアップをとっておく。 ②作成したデータベースは分散保管する。 ③バックアップも分散保管する。
TVカメラ調査の時間と労力		<ul style="list-style-type: none"> ①主要幹線には管頂部にケーブルやレーザを設置して、そこを自走式のTVカメラ調査車が走行して内部状況を調査できるようにする。 ②この自走式TVカメラ調査車は人孔に格納できるようにする。 ③管理事務所などには複数のTVカメラ調査機材を常備し、枝線の調査に備える。常に自己点検できるような態勢を整えておく。 ④これらの管きよ常時監視情報はネットワークシステム化を図り、管理事務所等で一括情報管理する。
流下汚水量の多い汚水幹線、水没管きよの調査		<ul style="list-style-type: none"> ①浮上：管行型で遠隔操作可能な（有線、無線）調査ロボットを開発して、使用する。 ②主要な幹線には管頂部にケーブルやレーザを設置して、そこを自走式のTVカメラ調査車が走行して内部状況を調査できるようにする。 ③重要な人孔部には接続管きよを調査できるようなTVカメラをあらかじめ設置しておき、問題発生時に内部を観測する。
交通渋滞による復旧の遅れ		<ul style="list-style-type: none"> ①小型作業車が通行できる程度の大きさを持ったライフライン共同溝を建設する（下水道だけでなく、上水道、電気、ガス、通信等のライフライン施設をひとつの管きよ内にまとめる）。これにより、地上の交通渋滞に關係なく被災箇所の補修等を行うようにする。 ②また、この共同溝に設置する自走式監視カメラにより、被災状況を把握し、これに見合った復旧チームを派遣する。
地下埋設物の輸轉、他の地下埋設物の復旧工事との競合		<ul style="list-style-type: none"> ①下水道台帳のような各地下埋設物の管理情報を共有化できるように管理情報システムの統一を図る。 ②地下埋設物の復旧全体を計画、指揮する組織を震災等の災害時には構成して、地下埋設物全体としての復旧作業を効率的に進める。 ③復旧工事を実施する際の予算については、各地下埋設物毎でなく、ライフライン全体として考える。また、復旧工事も地下埋設物全体のプロジェクトチームを組織して一体として復旧に取り組む。
家屋の撤去・復旧工事との競合		<ul style="list-style-type: none"> ①家屋については個人財産であるため、その撤去・復旧工事との競合は避けられない。 ②このため、家屋の撤去・復旧を行う際には、住民に連絡してもらい、その家屋の取付管や接続するの復旧を実施する。
不明水流入箇所の特定		<ul style="list-style-type: none"> ①主要幹線の人孔には流量センサーを設置し、流量調査等の不明水に関する調査なしに不明水流入箇所を特定できるようにする。 ②この流量センサーに対して、排水ブロック単位等で監視管理ハブを設け、管理事務所、工事事務所内に監視センターを設置する。
境界の確定		<ul style="list-style-type: none"> ①下水道台帳システムに道路情報や宅地情報も取り込んだマッピング情報システムを構築する。 ②この情報システムから適宜情報を取り出して、宅地等との境界を特定する。 ③現場ではポータブルコンピュータと携帯電話によりマッピング情報を取り出し、GPSシステムにより境界の位置決定を行う。
水面下の復旧工事		<ul style="list-style-type: none"> ①水中作業ロボットを開発し、潜水作業者への負担を軽減する。

表-3.5.2(1) 震災被害を踏まえた上下水道ライフライン（管路）の在り方

明朝体：各提言における提案事項、ゴシック体：各提言内容を踏まえたい検討すべき事項

上 水 道		下 水 道	
(1)幹線の重要度 による耐震対 策の区別	施設の耐震性を強化するための整備目標期間を、緊急度に応じて A（できる限り 早急に補強すべきもの）、B（おおむね 5 年以内を目的に整備補強すべきもの） の 3 種に区分する。	1)	管きよを「下水道施設地震対策指針と解説-1981 年版-」の区分にしたがって、 重要幹線とその他管路に区分し、それぞれに対して地震対策を考える。
(2)管きよ周辺地 盤の耐震対策 —主として液状 化対策—	①下水道と同様に、液状化しやすい等、管きよ設置地盤に問題がある場合には、 地盤の耐震対策（地盤改良等）の実施、液状化の恐れのない埋戻し材の使用 を進める。 ②また、地盤の液状化を踏まえた施設基礎等の設置を行う。		3)
(3)地盤特性急変 への対応	下水道と同様に、地盤特性が管軸方向に急変する場合には、地盤改良等によっ て地盤特性が急変しないようにする。		3)
(4)管きよの耐震 性向上	1)大きな地盤変状が発生すると予想される地盤への布設 ①重要度の高いものから耐震性の高い管、継手を使用 ②必要に応じて、大変形継手、伸縮可とう管、厚肉鋼管等の採用を検討 2)フック継手部の免震化 フック継手部を伸縮管を用いて免震化を図る 3)以下の耐震性の低い管、継手の耐震性の高い管、継手への布設替え ①铸铁管（印刷継手）、②硬質塩化ビニール管（TS 継手）、③石綿セメント管、 ④コンクリート管 等	1) 2)	3)
(5)付属設備等の 耐震性向上	1)バルブ室—耐震性強化 2)バルブ、空気弁、消火栓等—構造上不安定なものは補強	2)	
(6)わかりやすい 耐震化指標の 確立	水道施設の耐震化を進めるため、具体的な耐震化の目標を定め、計画的に事業 を推進する。 ①施設毎の耐震化の優先度を検討し、目標年度を定めて、耐震化事業計画を策 定する。 ②優先度の検討のため、布設場所の地質、施設設計時の耐震基準、管きよの老 朽度合い等を調査し、耐震性の観点から弱点となる施設を特定する。 ③住民に耐震化の目標、費用等について積極的に広報する。 ④耐震化の必要性について各方面の理解を深めるために、全国的な水道施設の 耐震化の達成度合いをわかりやすく示す指標を作成する。	1)	上下水道で提案されているようなわかりやすい耐震化指標を下水道管きよにも導 入する。 これにより、具体的な耐震化の目標を定め、計画的に事業を推進する。 ①施設毎の耐震化の優先度を検討し、目標年度を定めて、耐震化事業計画を策 定する。 ②優先度の検討のため、布設場所の地質、施設設計時の耐震基準、管きよの老 朽度合い等を調査し、耐震性の観点から弱点となる施設を特定する。 ③住民に耐震化の目標、費用等について積極的に広報する。 ④耐震化の必要性について各方面の理解を深めるために、全国的な下水道管き よ施設の耐震化の達成度合いをわかりやすく示す指標を作成する。
(7)部品の統一	バルブ、キャップ等を全国統一規格品に揃える。	2)	使用する器具全てを全国統一規格品に揃える。
(8)水管橋、橋梁 添架の補強	1)水管橋 ①橋台基礎を護岸から独立させて基礎構造の耐震化を図る ②変形性能の高い伸縮可とう管の採用する。 2)橋梁添架管 ①支持取付部吊り金具等の強化 ②伸縮管の設置	2)	

1)厚生省水道耐震化施設検討会：地震に強い水道づくりを目指して、水道協会雑誌、Vol.64, No.9, pp.111-120, 1995 年 9 月。

2)日本水道協会：水道事業者が当面とるべき地震対策に関する提言、水道協会雑誌、Vol.64, No.9, pp.121-125, 1995 年 9 月。

3)下水道地震対策技術調査検討委員会：下水道の地震対策についての第一提言、下水道協会誌、Vol.83, No.404, pp.93-102, 1995 年 6 月。

表-3.5.2(2) 震災被害を踏まえ上下水道ライフライン（管路）の在り方

明朝体：各提言における提案事項、ゴシック体：各提言内容を踏まえたい検討すべき事項

上水道		下水道	
システム面	(1)重要幹線の複数系列化	①導送水管路等の主要管路の系統多重化 ②配水パイプ管路の設置	1) 重要幹線が破断するとシステム全体が長期に渡り機能停止に陥るため、二条化を図る。 2) 施設が損傷した場合にその機能を代替できるように、ネットワーク化を図る。
	(2)ネットワーク化	1)安定給水を確保するため、 ①送・配水幹線の相互連絡管設置 ②ループ幹線化 2)近接水道事業の水道システムとの相互連絡管の設置を検討	①主要幹線は相互連絡管を設置して、非常時に備える。 ②幹線を横断するループ幹線を建設して、横断的に下水を収集できるネットワークを形成する。
	(3)ブロック化	次の目的のために、配水管網のブロック化を進める。 ①緊急時の弾力的水運用、②断水区間の最小限化 また、管網メッシュを細分化していく。	1) 上水道の配水管網ブロックのように、下水も1系統で排除するのではなく、排水ブロック内に網状に排水管を布設し、ある系統が破損しても別系統によって下水を流下できるようなシステムとする。
	(4)重要施設へのライフラインの耐震化	以下の施設への配水管経路を耐震化し、被災時にもこれら施設への給水の回復を速やかに行えるようにする。 ①防災上重要な施設、②災害弱者の施設	1) 下水道においては提案されているように、下水道においても重要施設に接続する下水道については耐震化を早急に進め、そのレベルも高いものとする。 ①防災上重要な施設、②災害弱者の施設、③公共施設
	(5)管きよを用いた通信手段の確保	下水道管きよで計画されているような、管きよネットワークを用いた情報通信手段を構築して、平常時の情報伝達はもとより、非常時の情報伝達、被災箇所の特定等に活用する。	1) 埋設深の大きい管きよは地震の被害を受けにくいことから、光ファイバー等の下水道管管理用の通信網を整備する。
体制面	(1)データベースの耐震化	①管理図面、台帳等はコピーして分散管理する。 単に管理図面、台帳等はコピーして分散管理するだけでなく、下水道で取り組まれているようなバックアップ体制の強化を図る。 ①台帳等の施設復旧に不可欠な情報を管理する情報施設の耐震化を図る。 ②遠隔地にバックアップを設ける。 ③他都市との相互支援が行えるよう、できるだけ標準的なデータベースとする。	①下水道台帳等の施設復旧に不可欠な情報は、情報施設の耐震化を図る。 ②遠隔地にバックアップを設ける。 ③他都市との相互支援が行えるよう、できるだけ標準的なデータベースとする。
	(2)緊急時への対応能力の確保	被災した場合でも住民に水を供給できる機能を持たせるために、緊急時給水能力を強化する。 ①配水池容量の拡大（12時間分の給水量を貯留） ②緊急時用貯水槽や大口径配水管を整備し、貯水機能の強化する。 ③都市域では耐震性が高く、貯水容量を持った大容量送水管の整備を進める。 ④井戸等の既存小規模水源の維持・保全する。 ⑤緊急時用井戸、自家発電設備等の整備する。 緊急時給水能力を強化する場合には、下水道の持つ水資源の活用を考える。 ①雨水排除用の大口径幹線を貯留型として緊急時の水源を確保する。 ②雨水幹線の各所に貯留槽を設置して災害時に貯留水を利用する。 ③下水処理の高度化を進め、処理水を防火用水、水洗用水等に利用可能とする。	1) 上水道で提案されているような緊急時の下水排除能力の強化を進める。 ①処理水の水洗用水利用を進めて、断水時でも水洗トイレの使用を可能とする。 またそのための中水道施設整備を進める。 ②都市域では耐震性が高く、貯水容量を持った大容量下水幹線の整備を進める。 ③公民館、地域コミュニティセンター等には緊急時に備えて、下水道が整備されてあっても合併処理浄化槽を設置する（常時使用して処理水を下水道に流す）。また、これを停電時でも稼働させるための自家発電設備等を整備する。
	(3)広域バックアップ機能の充実強化	①隣接する都市間を結ぶ連絡管の整備 ②広域情報ネットワークの整備	①隣接する処理場間を結ぶ連絡管の整備 ②処理場、都市間を結ぶ広域情報ネットワークの整備
	(4)震災訓練の強化	①平素より防災訓練を強化、 ②定期的に職員の教育・訓練を実施 ③日常業務において震災を強く意識した維持管理を行う。	①被害を最小化し、優先度を考慮した防災訓練、復旧訓練を日頃から重ねる。 ②他都市との被災時の相互協力 ③必要機材の確保方法 ④各種対応策の確立
1)厚生省水道耐震化施設策検討会：地震に強い水道づくりを指して、水道協会雑誌、Vol.64、No.9、pp.111-120、1995年9月。 2)日本水道協会：水道事業者が当面とるべき地震対策に関する提言、水道協会雑誌、Vol.64、No.9、pp.121-125、1995年9月。 3)下水道地震対策技術調査検討委員会：下水道の地震対策についての第一提言、下水道協会誌、Vol.33、No.404、pp.93-102、1995年6月。			

3.6 下水道の被害特性と地震対策

3.6.1 はじめに

福祉の向上、健康で文化的な生活の確保において下水道は重要な施設との認識がされつつあるが、その役割を具体的に記述すると以下ようになる；すなわち、①消化器系伝染病の予防、②浸水の防止、③公共用水域の水質保全、および④生活様式の改善（水洗便所の使用）であり、最近では⑤都市の水資源の確保の観点でも注目されている。地震により、下水道の機能が発揮できない状態になると上記利便性が失われると共にそれらの二次被害が懸念される。すなわち、下水道が機能することが前提となっている地域においては、消化器系伝染病の蔓延、雨水排除機能の低下による浸水、水質汚濁、トイレの心配等が生ずる。

これら下水道の役割を果たすために、下水道施設は主として管渠（枿、マンホール等を含む）、ポンプ場、終末処理場および汚泥処理施設より構成され、また観点を換えれば、コンクリート構造物、機械類、電気施設、種々の配管など多様なもので構成されている。さらに、下水道の機能の維持には、これらの下水道施設だけではなく、水洗用水や電力等他の要因も不可欠である。

地震による下水道への影響およびその対策を考察する場合には、このような下水道の特性を考慮することが極めて重要である。

3.6.2 被害特性

関連地方公共団体および日本下水道事業団の調査結果^{34)、35)}に基づいて、管渠、ポンプ場、処理場および汚泥処理施設についての震災の概要を各々について述べる。

(1) 管渠

管渠の破損箇所を図-3.6.1に示す。管渠の破損は神戸市の西部から大阪市の南部にいたる区域でみられ、特に震源近くから震度の大きかった箇所に沿って多いが、さらに、海岸部や埋め立て地などの軟弱地盤の地域でも多いことが特徴である。

管渠、マンホール、取り付け管およびその他（閉塞は除く）で損傷し応急復旧の必要であった箇所は、神戸市、芦屋市、西宮市、宝塚市、伊丹市、明石市、尼崎市、三木市、大阪市、豊中市、川西市および池田市で合計約2,300箇所にもものぼる。

管渠の被災の大きかった神戸市においては、汚水管渠では埋設延長が3,315,392mあり、そのうち被災した可能性があるとして1,278,241mで調査された。その結果、延べ63,481m（埋設延長の1.9%）で被災し、応急復旧を要した件数は管渠、マンホール、取り付け管、閉塞等を併せて9,851箇所にもものぼった。その中で、取り付け管、閉塞、およびマンホールの応急復旧箇所が多く、各々5,720、1,933および1,595箇所にもなっている。管渠では307箇所であった。被災地区としては、神戸市全区にわたっているが、特に東灘区、長田区、中央区で多く1,400から3,000箇所程度にのぼり、ついで灘区、須磨区、兵庫区、垂水区で多く700から1,000箇所となっている。また北区で400箇所程度および西区で20箇所となっている。一方、雨水管渠では、埋設延長は483,722mあり、そのうち被災した可能性があるとして377,600mで調査された。その結果、延べ9,524m（埋設延長の2.0%）で被災し、応急復旧を要した件数は管渠、損傷、堆積を併せて461箇所であった。その中で、損傷が最も多く388箇所であった。被災の多かった地区の傾向としては汚水管渠と同様である。

神戸市を除く兵庫県下での管渠の被災状況については、芦屋市では、埋設延長が215,400mあり、その全部で調査され、延べ28,548m（埋設延長の13.3%）で被災し、応急復旧を要した件数は管渠、マンホール、および取り付け管を併せて5,336箇所にもものぼった。その中で、マンホールおよび取り付け管の応急復旧箇所が多く、各々2,733および2,163箇所にもなっている。西宮市では、埋設延長が916,900mあり、そのうち900,291mで調査され、延べ32,088m（埋設延長の3.5%）で被災し、応急復旧を要した件数は管渠、マンホール、取り付け管および公共枿を併せて4,777箇所にもものぼった。その中で、取り付け管、公共枿およびマンホールの応急復旧箇所が多く、各々1,845、1,845 および937箇所である。尼崎市では、延べ45,583m（埋設延長の4.5%）で被災し、応急復旧を要した件数は管渠、マンホール、取り付け管、閉

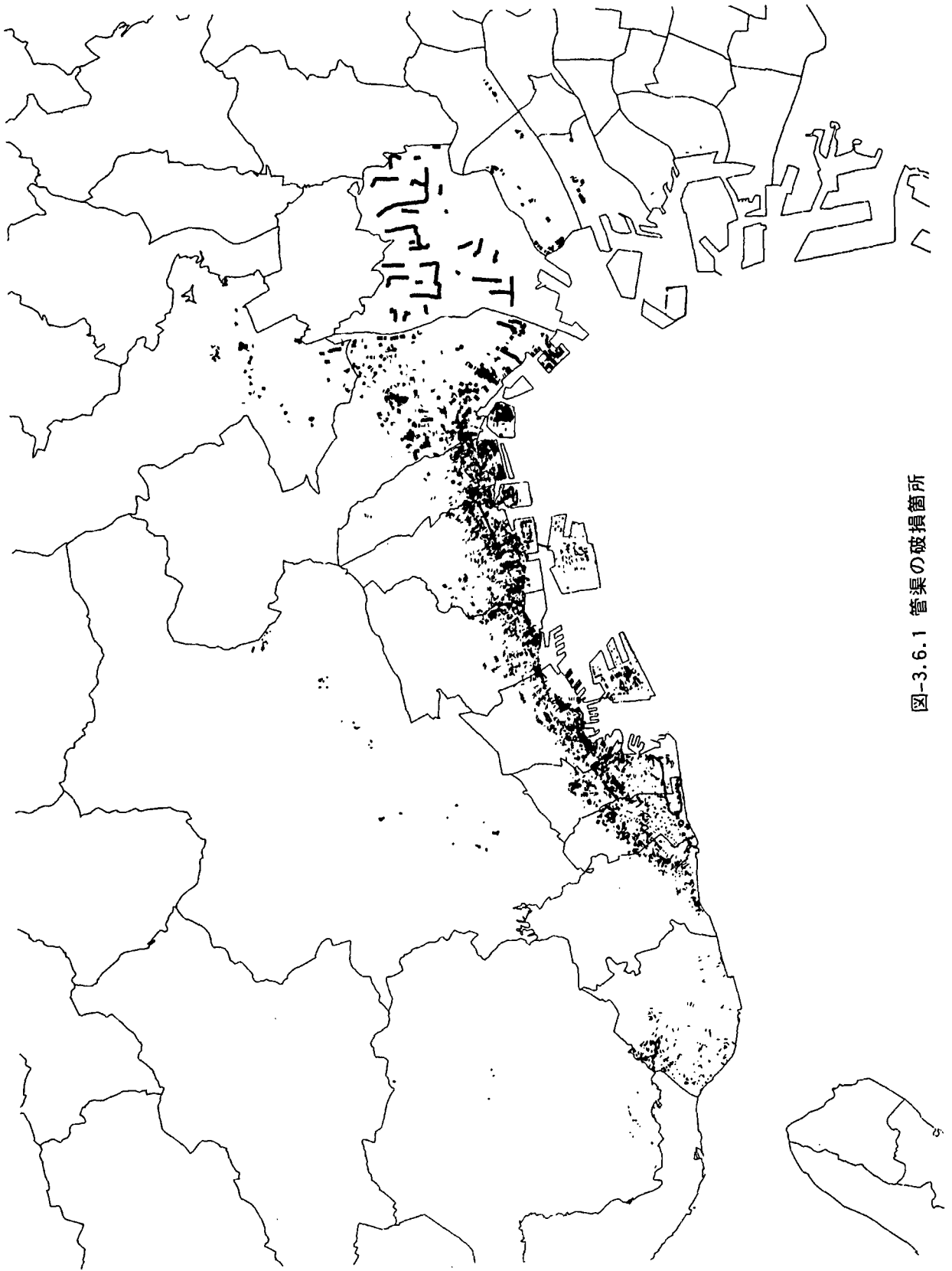


図-3.6.1 管渠の破損箇所

塞および公共柵を併せて365箇所であった。宝塚市では、延べ8,597m（埋設延長の1.6%）で被災し、応急復旧を要した件数はマンホール、取り付け管および公共柵を併せて835箇所であった。伊丹市では、延べ2,795m（埋設延長の0.6%）で被災し、応急復旧を要した件数は管渠、マンホール、閉塞および公共柵を併せて475箇所であった。明石市では、延べ3,334m（埋設延長の0.6%）で被災し、応急復旧を要した件数は管渠、マンホールおよび取り付け管を併せて454箇所であった。川西市では延べ214m（埋設延長の0.06%）で被災し、応急復旧を要した件数は204箇所であった。そして、三木市では、延べ4,346m（埋設延長の6.1%）で被災し、応急復旧を要した件数は30箇所であった。

以上より兵庫県では、管渠の被災延長は、神戸市を除き125,505mに達し、これに神戸市の汚水管渠63,481mおよび雨水管渠9,524mを加えると、198,510mにも達する。また応急復旧箇所は、神戸市の汚水管渠および雨水管渠をも加えた合計では22,788箇所にとほり、この中でマンホールや取り付け管関係が多いが、管渠も合計で1,053箇所にとほった。

大阪府での管渠の被災状況については、大阪市公共下水道では、被災延長は1,810mであり、応急復旧処置件数は、管渠507箇所、マンホール365箇所、取り付け管816箇所、その他275箇所であり、また閉塞のためのものは24,234mにとほった。豊中市公共下水道では、被災延長は30mであるが、応急復旧箇所は管渠16箇所、マンホール106箇所、取り付け管75箇所などで合計224箇所であった。池田市公共下水道ではマンホール12箇所の被災があった。以上、大阪府合計では、管渠の被災延長は1,840mで、応急復旧箇所は、閉塞によるものを除き2,182箇所、閉塞によるものは24,234mで17箇所であった。

また、以上に含まれないものとして、私人管理の柵を含めた排水施設、都市小河川、側溝の被災もはなはだしく、その対応も重要となった。

(2) ポンプ場

被害の生じたポンプ場は、海岸線や埋め立て地などの軟弱地盤の箇所に建設された、兵庫県下50箇所および大阪府下8箇所の合計58箇所のポンプ場で被害が生じた。

神戸市においてはポンプ場23箇所のうち、全く被害の無かったポンプ場は3箇所のみであり、また6箇所で機能面で支障をきたすような大きな被害を受け、さらに圧送管系統の支障により送水できなくなったポンプ場が3箇所であった。被害の主なものは、停電と発電用冷却水の不足による機能停止、管渠の破断に伴うもの、クレーン等機械類の破損に伴うものとなっている。

兵庫県での神戸市を除く市町村でのポンプ場の被災状況については、西宮市では14のポンプ場で、芦屋市では3のポンプ場で、尼崎市では6のポンプ場で、そして伊丹市、明石市および加古川市では各々1、2および1のポンプ場で被害が生じている。また兵庫県流域下水道でも3ポンプ場で被害が生じている。これら合計30のポンプ場のうち、機能低下を生じたポンプ場は14箇所であり、これは吐き出し水槽や管渠等の亀裂・破損、ポンプ軸受け・芯ずれ等損傷、ゲート開閉不能、スクリーンやチェーン等機械類の損傷、自家発電の冷却水不足、水没などによるものである。その他、多くのポンプ場で道路陥没や土木施設でのクラック、配管や機械類の軽微な破損等が生じている。

大阪府については、大阪市では5のポンプ場で、豊中市では2のポンプ場で、そして寝屋川南部流域下水道では1ポンプ場で被害が生じている。被害状況は兵庫県下のものと同様なものであるがその被害状況はより軽い傾向にある。

(3) 終末処理場

終末処理場では、震度の激しかった地域や軟弱地盤地域において被害が生じ、その被害処理場数は兵庫県下19、大阪府下17および京都府下1の計37処理場にのほっている。ここでは、処理場のうち水処理系について論述し、汚泥処理系については汚泥専用処理場も含めて汚泥処理施設の項で述べる。

神戸市では、7箇所全ての処理場で被害が生じ、そのうち東灘処理場、西部処理場および中部処理場では機能低下が生じた。東灘処理場では、近くの護岸の側方流動もあり、最初沈澱池の流入渠の破断、水処理施設の目地の破断、管廊の浸水など大きな被害が生じ、二次処理機能が停止した。このため、近接運河を堰き止め利用した簡易処理（凝集沈澱処理）で対応し、この状態が平成7年5月1日まで続いた。西部

処理場では、地盤沈下も生じ地下のポンプ水没、送風機室の浸水、最終沈澱池搔寄機損傷等が生じ、1系列の運転が平成7年3月7日まで停止した。中部処理場では、沈澱池搔き寄機の損傷や管廊の一部没水などにより50%の能力で運転せざるを得なくなったが、平成7年2月9日には機能的には復旧した。その他の処理場では、機能低下のなかったものの、放流渠破損、施設不等沈下、施設クラック、配管類変形・破損、機械類の破損などが生じた。

尼崎市では、2箇所全ての処理場で被害が生じた。これらの施設では、沈澱池の搔寄機が損傷し沈澱池搔き寄せ不能となったほか、構造物や施設のクラック、配管類の損傷、ゲート開閉不能などが生じており、東部第二施設では二次処理が一時停止する事態となった。

西宮市でも3箇所全ての処理場で被害が生じ、沈澱池の搔寄機が損傷し沈澱池搔き寄せ不能となったほか、構造物や施設のクラック、継ぎ手部破断、不等沈下、配管類の損傷などが生じている。芦屋市の芦屋市下水処理場でも同様の被害が生じ、送水管の破損もあって平成7年1月31日まで水処理不能の事態となった。

明石市では4処理場のうち3処理場で、高架タンク亀裂、道路陥没、配管類破損、汚泥搔寄機破損等の被害があった。高砂市では、3処理場のうち1処理場で被害が生じ構造物継ぎ手部のクラックが生じている。武庫川上流および同下流の両流域下水道の処理場でも一部機械類等の損傷が生じている。

大阪府下の下水道終末処理場（水処理系）については、大阪市では、12箇所のうち9箇所（うち1箇所汚泥処理系のみ）の処理場で被害が生じている。いずれも、機能の低下は生じていないが、平野、海老江および大野の処理場では汚泥搔き寄せ機での損傷がみられる。豊中市では1処理場存在しそれで、また吹田市では3処理場全部で被害が生じているがいずれの処理場でも機能低下は生じていない。しかし、豊中市の庄内ならびに吹田市の南吹田および川面処理場では汚泥搔寄機の損傷が生じ運転上の障害が生じている。

大阪府の流域下水道では4処理場で被害が生じている。安威川流域の中央処理場では1系列の放流管継ぎ手部に亀裂、汚泥搔き寄せ機の損傷などが生じ、水処理施設の一部を約1カ月間停止し他の系列で対応する事態となった。その他の処理場では、配管類の損傷や施設のクラックが生じている。南大阪湾岸南部流域下水道の南部処理場でも管廊のジョイント部にクラックが入ったということは、この地震による被害が広範囲に及んだことが窺い知れる。

この他、京都府亀岡市の処理場では水処理系では建屋の窓ガラスの破損等の被害が生じた。

(4) 汚泥処理施設

被災地域での汚泥処理専用処理場は、神戸市東部スラッジセンターおよび下水汚泥広域処理事業の4処理場であり、その他は水処理系と併設された汚泥処理系である。兵庫県下9、大阪府下7および京都府下1の処理場で被害が生じている。被害は加古川市から大阪府泉北に至る広い範囲で被害が生じている。主な被害状況は、汚泥脱水機関連の損傷、汚泥濃縮設備のFRP覆蓋や搔寄機の損傷、焼却炉・溶融炉および付帯設備関係の破損、タンクや管路の破損、建屋のクラックと場内舗装破損等、ジブクレーンの傾斜等である。

(5) 被害額

震災による管渠、下水ポンプ場、終末処理場（水処理系および汚泥処理系）、ならびに汚泥専用処理施設の被害総額は兵庫県下で約734億円、および大阪府下で約14億円で、総額748億円である。ただしこれらには、復旧のための実施設計費は含まれていない額である。

管渠については、兵庫県下では8市の公共下水道および2流域下水道で被害が生じ被害額は約366億円であり、また大阪府下では3市の公共下水道および1流域下水道で被害が生じ被害額は約5億6000万円となっており、2府県での合計被害額は約371億円となっている。この中で、神戸市では198億円、西宮市では83億円および芦屋市では49億円程度にものぼっており、また尼崎市および宝塚市で10億円を超え、大阪市では5億円を超えている。

下水ポンプ場管渠については、兵庫県下では6市の公共下水道および1流域下水道で被害が生じ被害額

は約20億円であり、また大阪府下では2市の公共下水道および1流域下水道で被害が生じ、被害額は約1億8000万円となっており、2府県での合計被害額は約22億円となっている。この中で、神戸市および西宮市ではそれぞれ8億円近くであり、芦屋市および大阪市ではそれぞれ2億8000万円および1億6000万円程度となっている。

終末処理場については、兵庫県下では5市の公共下水道および4流域下水道で被害が生じ被害額は約345億円であり、また大阪府下では3市の公共下水道および4流域下水道で被害が生じ被害額は約6億100万円となっており、2府県での合計被害額は約351億円となっている。この中で、神戸市では305億円および西宮市では28億円にもなっており、また芦屋市および大阪市でそれぞれ9億4000万円および4億5000万円程度であり、尼崎市で1億円を超え、そして明石市、豊中市等で数千万円となっている。

汚泥専用処理施設については、神戸市スラッジセンターで4億円程度の被害がでており、また下水汚泥広域処理事業では兵庫東、大阪北東および大阪南で合計1億円程度の被害額となっている。

3.6.3 地震対策

大きな地震は時として忘れられる頃に起こり、また日常生活中で起こることから、地震対策は、それ特有のものと日常生活と溶け込んだものとを総合したものであることが重要である。また、耐震化構造と共に震災後の影響の軽減化、迅速な応急対応・措置の可能性、復旧の容易さなどの観点も重要である。都市の水資源としてのように地震の緊急時に果たす役割も重要であることが認識される。

地震の被害特性の考察をもとに、下水道に求められる役割や機能の保持の観点から、地震対策として下水道に關与する対策を類型化し列挙すると以下のようなになる^{34)~39)}。

施設の耐震化：	構造物の耐震化	構造基準 一体構造水槽 可とう管、可とう継手、伸縮継手、材質 重要幹線の位置づけ
	地盤の強化・改良	
	建設位置の平面的余裕化	
復旧の難易度：	構造物 機械類 配管	
復旧の容易化：	ブロック化とバイパス 共同溝 ライフラインボックス 広域バックアップ機能	
システムの対応：	拠点方式、ライフスポット 自立機能 重点復旧 水の確保（水洗、冷却水等都市用水） 造水センター構想 都市・地域用水、水洗トイレ用水、冷却水等の確保 下水道におけるフローとストック 都市水代謝におけるフローとストック 施設の多目的化（雨水貯水池、修景池） 緊急代替措置（場所、処理法、技術） 仮設水洗トイレ（水洗トイレ車）、移動式施設 水害対策、都市の河川を大切に、大雨水管渠	
対応マニュアル：	職員の確保 職員の緊急対応	

柔軟なりアルタイム対応策と意志決定

コントロールセンターの分散化

バイク隊の活躍

防疫体制

広報窓口の設置

情報システムの充実と一元化、ネットワーク、携帯電話

支援方策：

共同使用機器

相互支援対策（情報の共通化、職員交換）、台帳システム

民間との相互支援

住民対応の教育（トイレのつまり対策など私人管理施設の対策）

都市環境に寄与する下水道：

都市の水資源

救援物資用空地の提供

3.7 道路交通システムの被害分析と今後の計画

3.7.1 はじめに

阪神・淡路大震災によって道路は甚大な被害を受け、地震直後においては、道路交通は大混乱に陥った。道路の復旧とともに道路交通は徐々に正常に戻ったが、その間に地域の社会経済活動に大きな影響を及ぼした。阪神・淡路大震災における被害について、主として道路交通の被害の実態、道路ネットワークの容量低下、信頼性、交通運用、他の交通モードとの連携、物資輸送等について調査研究を行ってきた。ここではその研究成果の報告を行なうとともに、阪神・淡路大震災による道路交通計画に関して得られた教訓および今後の道路交通計画のあり方について述べる⁴⁰⁾。

3.7.2 震災前の道路交通の状況

平成6年の道路交通センサスの結果を図-3.7.1に示す。これによれば神戸市の自動車発生集中交通量は236万トリップエンド/日、阪神間の自動車発生集中交通量は、206万トリップエンド/日である。

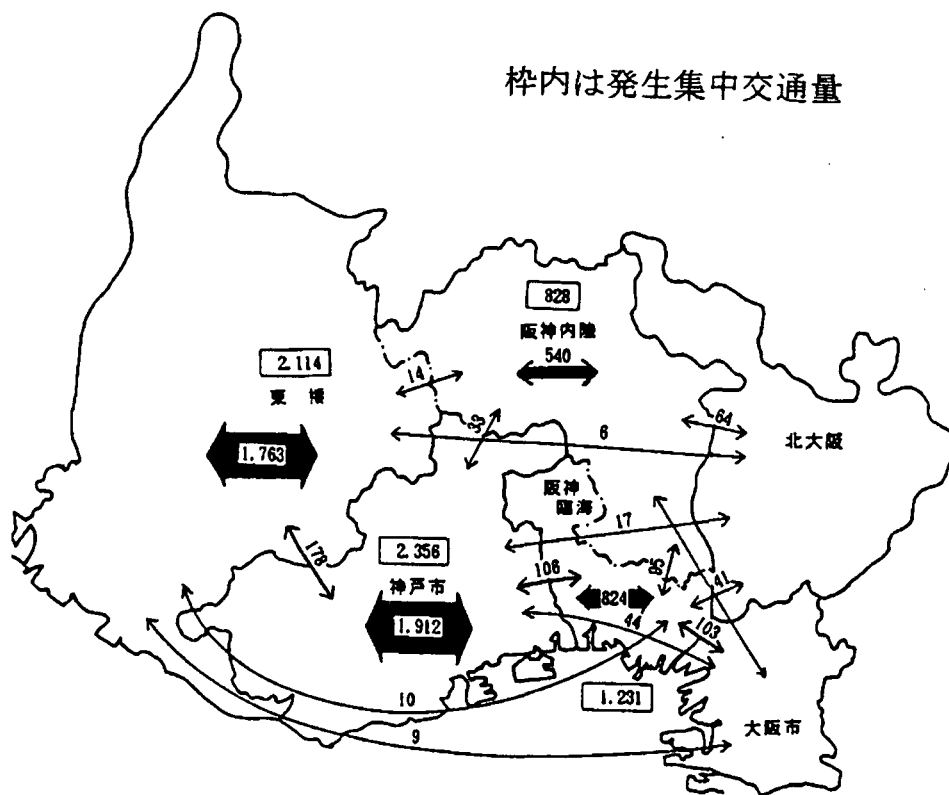


図-3.7.1 阪神地域間の自動車交通量 (平成6年道路交通センサス) (単位:千台/日)

地域間の自動車交通量を見ると、神戸市—東播磨が18万台/日、神戸市—阪神臨海が11万台/日、阪神臨海—大阪市が10万台/日、神戸市—大阪市が4万台/日等、臨海部の地域相互間の流動が多い。

平成6年の道路交通センサスにより阪神地域の道路交通量をみると、阪神高速道路神戸線は10万台/日程度の交通量を分担しており、臨海部の主軸となっている。また国道43号も約8万台/日の交通量である。国道2号は国道43号と並行する区間では、約4万台/日の交通量であり、これら3路線の合計交通量は約22万台/日である。阪神高速道路湾岸線の交通量は、3-5万台/日となっている。

内陸部では中国自動車道の西宮北以東が9万台/日に近い交通量があり、東西国土軸として多くの交通を分担している。また内陸部と臨海部を結ぶ国道171号の交通量は5万台/日を越えており、連絡路として重要な役割を果たしている。

3.7.3 震災後の道路交通の状況

図-3.7.2に震災約1週間後の道路規制状況を示す。震災直後は名神高速道路、中国自動車道、阪神高速道路をはじめ、阪神地域のほとんどの幹線道路が通行不能の状況となった。震災約1週間後では、名神高速道路の吹田以西、中国自動車道の豊中―西宮北間の上り、第二神明道路の伊川谷以東、阪神高速道路の神戸線、湾岸線、環状線、池田線、守口線等が通行止めとなっており、国道2号および43号は一般車両は通行止めとなった。また中国自動車道の下り方向は緊急車両のみが通行可能であり、事実上、一般車両の阪神地域の通過は不可能な状況であった。

図-3.7.3に震災約1ヶ月後の道路規制状況を示す。この段階では、完全な通行止めは名神高速道路の尼崎―西宮間、阪神高速道路神戸線、阪神高速道路湾岸線の中島以西等に限られ、阪神高速道路の大阪地区はほぼ復旧した。しかし、国道2号および43号についてはなお一般車両通行止めの状況であった。また第二神明道路の上りや新神戸トンネルの上り方向は時間規制が実施されている。

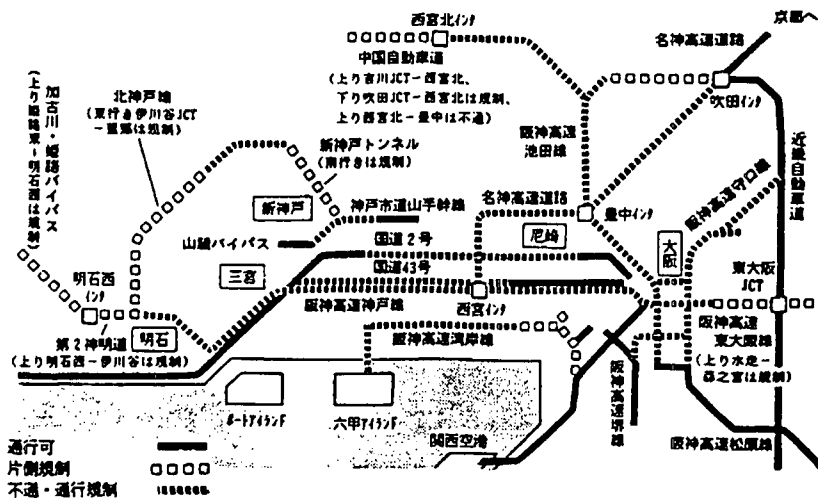


図-3.7.2 震災約1週間後の道路規制状況

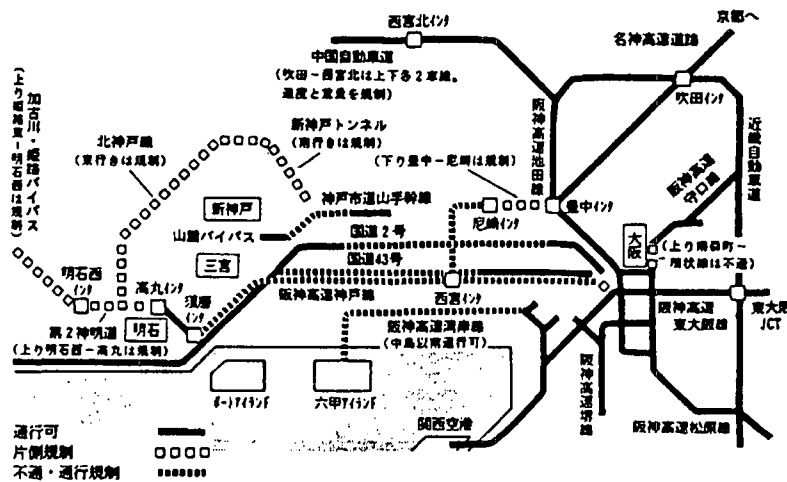


図-3.7.3 震災約1ヶ月後の道路規制状況

阪神地域の主要幹線道路の平成7年10月までの交通規制等の状況を整理すると、10月の段階では阪神高速道路神戸線を除き、全面的な通行止めの状況は解除されている。名神高速道路の尼崎―西宮間は緊急車両の利用に限られ、また第二神明道路や新神戸トンネル、国道2号および43号では、時間規制が続いている。

阪神高速道路の神戸線は平成8年2月19日に摩耶―京橋間が開通し、平成8年9月30日に全面開通した。また、国道2号についても平成8年2月に時間規制が解除されている。

阪神地域の主要断面における交通量の推移を図-3.7.4に示す。震災直後の平成7年2月の段階では、震災前と比較して武庫川断面では50%、芦屋川断面では30%、須磨―ノ谷断面では67%に交通量が減少した。

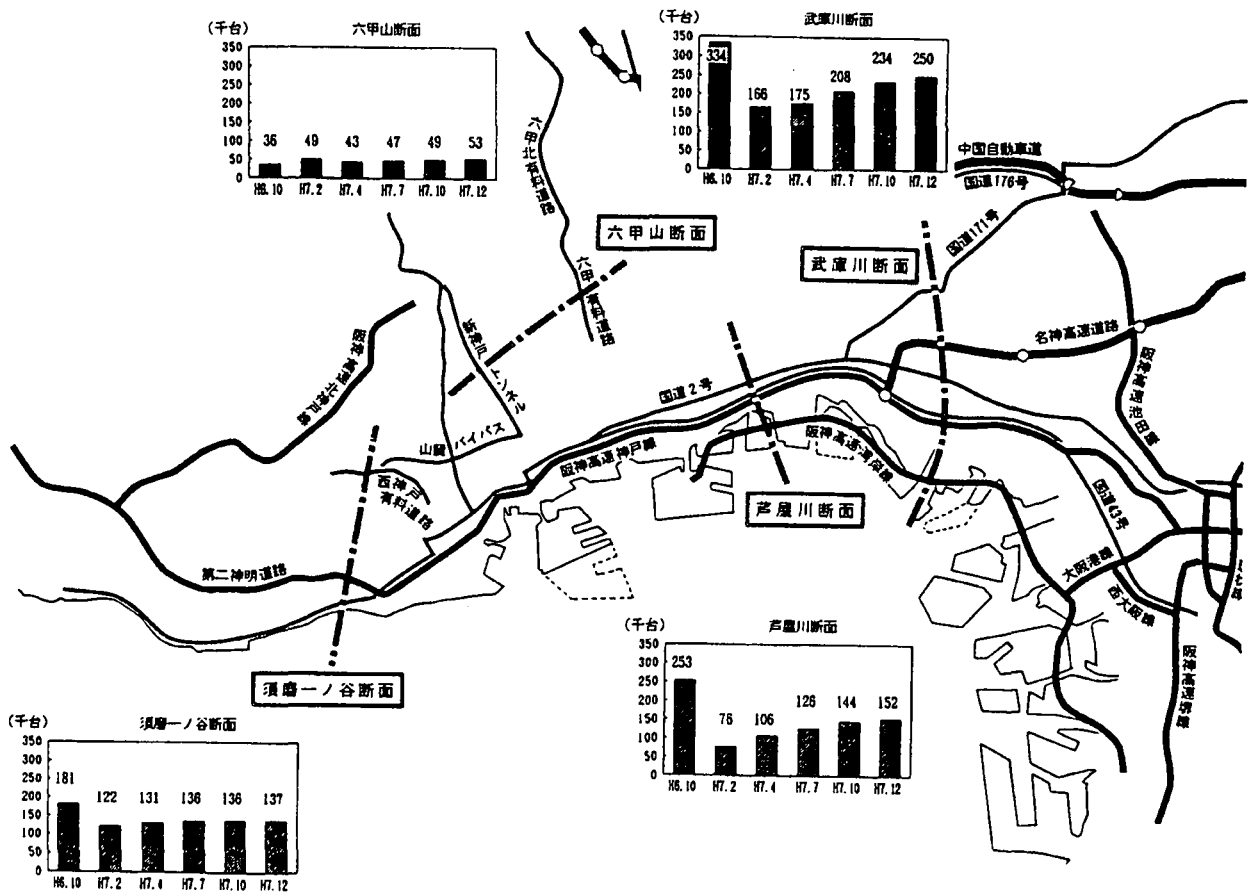


図-3.7.4 阪神地域の断面交通量の推移

一方、六甲山断面では36%増の交通量となっている。東西方向の断面交通量は徐々に増加し、平成7年12月では、震災前と比較して武庫川断面では75%、芦屋川断面では60%、須磨一ノ谷断面では76%まで回復している。六甲山断面でも増加が続き、47%増の交通量となっている。武庫川断面で見ると、特に阪神高速道路湾岸線と国道2号の交通量の増加が著しく、須磨一ノ谷断面では西神戸有料道路の交通量の増加が著しい。

道路網としての容量を計算した結果によると⁴¹⁾、震災によって阪神地域の道路網容量は、震災前の約1/3に減少した。道路網容量は道路のネットワークにおいて、どこかの1個所で孤立するノードが現れるときの全体の交通量を示している。従って、実際にはその容量よりも多い交通量が行き交うことは十分に有り得る事であり、東西方向の道路の断面交通量が震災前の30-67%に減少したことは理解できる。

一方、中国自動車道では平成7年12月において、震災前の8.9万台/日から21%増の10.8万台/日に、阪神高速道路北神戸線では震災前の1.6万台/日から81%増の2.9万台/日となっており、内陸部の幹線道路への迂回がみられる。また姫路以西から播但連絡道路等を経由して中国自動車道を利用するパターンや、神戸周辺から西宮北インター等を経由して中国自動車道を利用するパターンの増加が目立っている。阪神高速道路北神戸線については、播磨方面から北神戸線を経由して新神戸トンネル等を利用し、神戸市市街地にアクセスするパターン等が増加しているものと考えられる。

一般のドライバーに対するアンケート調査によると⁴²⁾震災約1週間後においては33%の人が自動車利用を中止し、20%の人が利用回数を減らしている。また、震災約1ヶ月後においても15%の人が自動車利

用を中止し、30%の人が利用回数を減らしている。自動車利用を中止あるいは利用回数を減少させた主な理由は通行規制と交通渋滞である。従って、道路の復旧に伴って通行規制が解除され、交通渋滞も緩和されると、自動車利用を控えていた人が自動車を利用するようになり、交通量が増加したと考えられる。

しかし、どうしても自動車を利用しなければならない理由のある人は、迂回路を利用せざるを得なかった。震災直後には、阪神地域の幹線道路が全面的に通行不能の状態であったので、舞鶴自動車道や国道9号を利用した迂回が見られた。舞鶴自動車道では交通量が震災前の平成6年10月には1.7万台/日であったものが、震災直後の平成7年1月には3.6万台/日に増加した。しかし、中国自動車道の復旧を契機にこのような広域的な迂回はほぼ解消している。

震災後の平成7年2月10日以降、建設省により調査された大阪市―神戸市、姫路市―神戸市間の走行実態調査結果の一部を図-3.7.5に示す。平均旅行速度の推移を見ると、大阪市、姫路市いずれの方向からも神戸市に入る方向の旅行速度が低く、大阪市―神戸市の場合には10-15 km/hの速度になっている。逆方向は概ね15km/hとなっているが、平成6年の道路交通センサスにおけるピーク時旅行速度20km/hに比べると5km/h以上の速度差がある。

姫路市から神戸市に向かう場合は20-30km/hの速度が確保されているが、やはり平成6年の道路交通センサスにおけるピーク時旅行速度45.9km/hをかなり下回っている。逆方向は45km/hとほぼ道路交通センサスにおけるピーク時旅行速度と等しい。この場合も道路の復旧とともに徐々に速度が回復してきている。

交通事故件数は震災後増加しており、平成7年7月と平成6年7月を比較すると、神戸市全体で31%増加し、兵庫県全体でも21%増加している。路線別に見ると、図-3.7.6に示すように震災以降、国道2号における交通事故件数が大幅に増加している。これは交通量が増加したことも一因であるが、渋滞によるイライラや、自転車・バイクの交通量の増加、歩道が倒壊建物によって閉塞されて、歩行者・自転車が車道にあふれてしまうこと等が原因になっていると考えられる。今回の地震直後には、鉄道が不通となり、幹線道路も規制されたために歩行者・自転車・バイクの交通量が著しく増加したことが特徴として挙げられる。これらの交通の安全を確保するためには道路構造面においても、緊急時に中央分離帯の位置や、車線を変更してフレキシブルに対応できるようにすることが考えられる。

また交通事故が増えた原因として、事故発生率の低い高速道路が使えず、事故発生率の高い一般道路へ転換した車両が多いことを挙げる事ができる。高速道路は高速性・安全性の両面において優れた特性を有しており、地震後の緊急時に高速道路をできるだけ早く通行できるように復旧することが重要である。

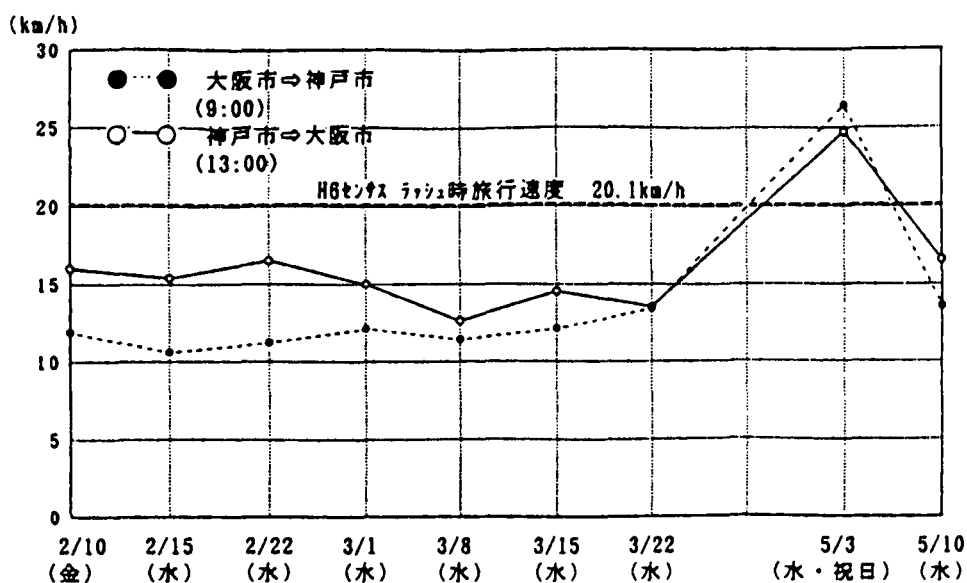


図-3.7.5 大阪―神戸間の震災後の旅行速度の変化 (国道2号、山手幹線等)

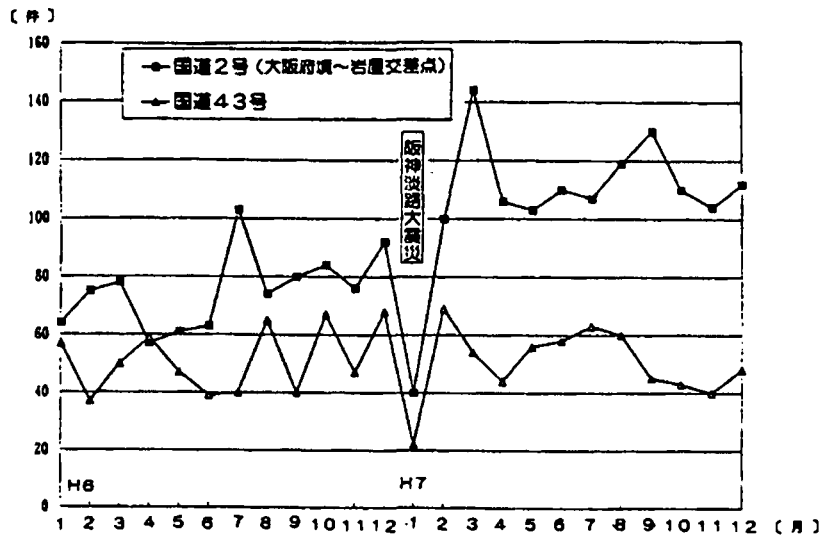


図-3.7.6 国道2号、国道43号の事故件数の推移

今回の地震後においては各所で道路の通行止めや通行規制が行われ、それが時間と共に変化していったため、一般のドライバーにとって正確な交通情報を得ることは困難であった。またトラック運送を行っている事業所においても地震直後の正確な通行規制情報、渋滞情報を得ることは大変困難であった。この原因として、情報通信網が地震によって寸断されてしまったために、道路管理者・交通管理者が思うように情報を収集できなかったことが挙げられる。もちろん交通量や速度を計測する感知器が被害を受けて作動しなくなった地点も数多く見られた。

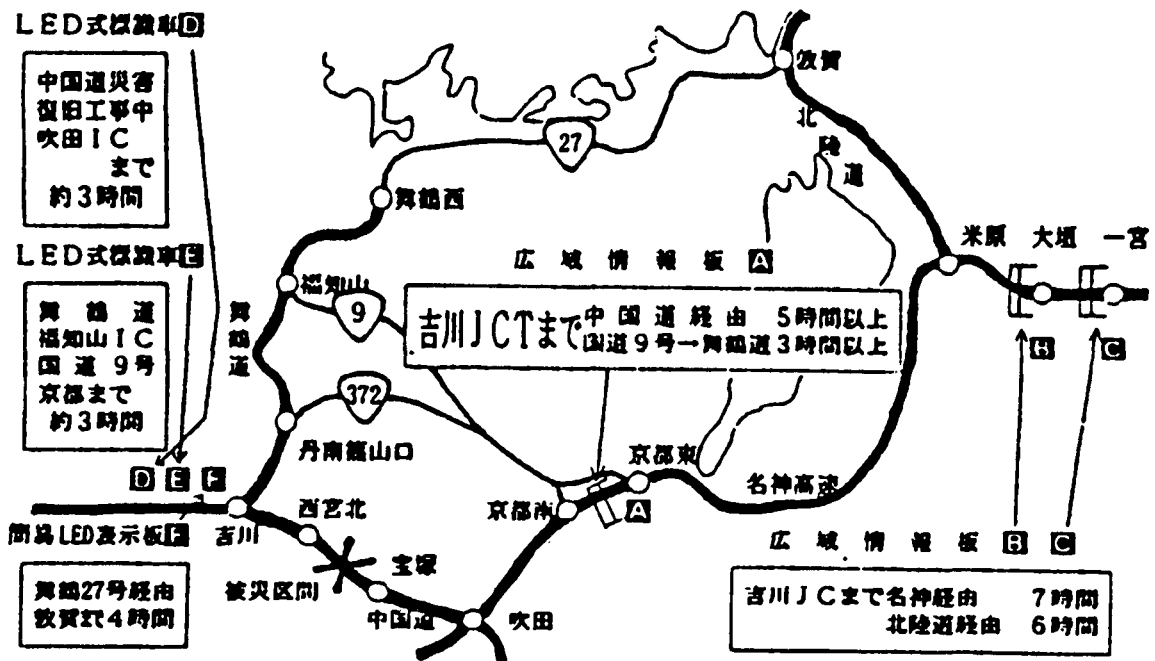


図-3.7.7 所要時間情報提供の例(名神高速道路および中国自動車道とその代替道路)

そのような状況の中で、中国自動車道では、中国自動車道だけに交通を集中させることなく、国道9号や27号にも交通を分散させるために、高速道路と迂回路の所要時間情報をドライバーに提供した。所要時間は、高速道路については通行券や車両感知器のデータ等を利用して算定し、一般国道についてはパトロールカーを走行させて、実測調査により計測した。図-3.7.7に所要時間情報提供の例を示す。

3.7.4 利用可能経路に基づく交通規制の影響分析

交通規制実施時の道路網の機能を検討するため、被災地域およびその周辺を含む道路ネットワークを対象として、OD間の利用可能経路ならびに震災前経路に対する震災後経路の迂回率を求めた。

OD間の利用可能経路の計算例として、図-3.7.8に大阪―三宮の経路を示す。最も大きな迂回を強いられているのは、1月21日時点の一般車両である。1月21日時点では国道43号が不通であり、国道2号が緊急物資輸送ルートに指定されていたため、一般車両に関しては東灘区内で東西交通が遮断された形となってしまった。そのため、計算上は図に示すような六甲山の北側を迂回する経路が求められる結果となった。

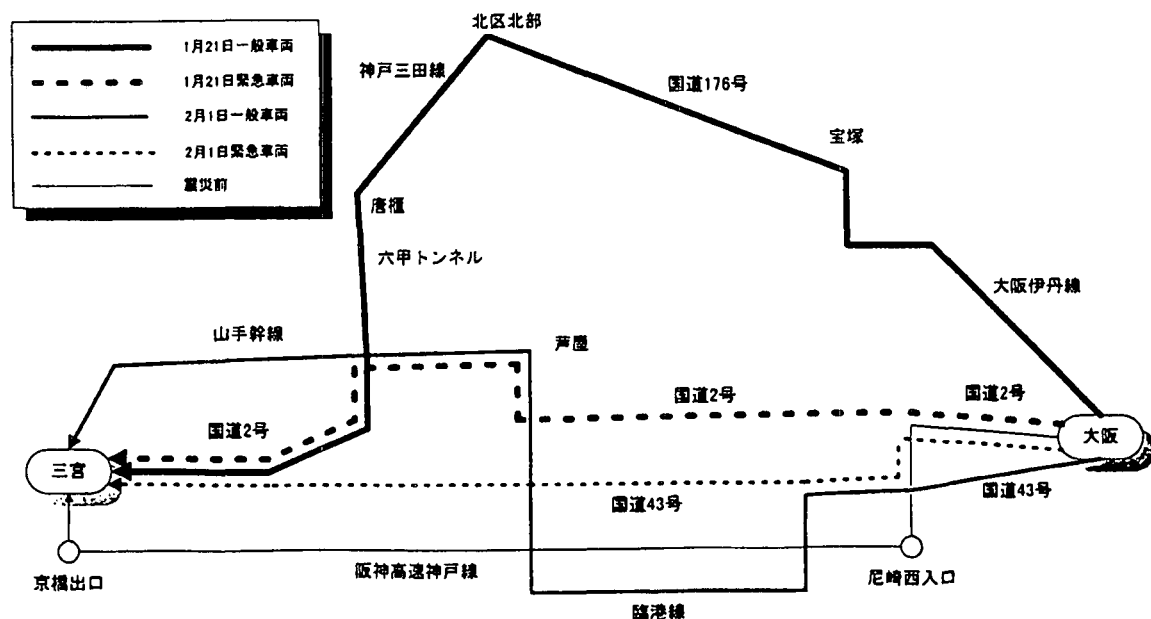


図-3.7.8 大阪・三宮間の利用可能経路

表-3.7.1 大阪（梅田）・三宮間の所要時間推計値

事業者	(1月23日時点)									合計
	鉄道			代替バス			鉄道			
	歩行時間	待ち時間	乗車時間	歩行時間	待ち時間	乗車時間	歩行時間	待ち時間	乗車時間	
阪急 区間	梅田－西宮北口			西宮北口－三宮			-			214
時間	5	5	18	6	60	120	-	-	-	
JR 区間	大阪－甲子園口			甲子園口－三宮			-			270
時間	5	5	18	2	120	120	-	-	-	
阪神 区間	梅田－甲子園			甲子園－三宮			-			240
時間	5	5	18	2	30	180	-	-	-	

事業者	(2月1日時点)									合計
	鉄道			代替バス			鉄道			
	歩行時間	待ち時間	乗車時間	歩行時間	待ち時間	乗車時間	歩行時間	待ち時間	乗車時間	
阪急 区間	梅田－西宮北口			西宮北口－三宮			-			134
時間	5	5	18	6	10	90	-	-	-	
JR 区間	大阪－芦屋			芦屋－三宮			-			116
時間	5	5	14	2	30	60	-	-	-	
阪神 区間	梅田－青木			青木－三宮			-			103
時間	5	5	23	10	20	40	-	-	-	

一方、緊急物資輸送車両・緊急車両等の交通規制の適用除外の車両については、阪神高速道路こそ利用できないものの、距離的には平常時の経路にかなり近いものが利用可能経路として求められている。

被災地域およびその周辺の道路ネットワークの機能低下を定量的に評価するため、震災前の経路に対する震災後の利用可能経路の迂回率を求める。

平均迂回率の大きなゾーン間交通に着目すると、以下の通りとなる。ただし、()内の数字はゾーン間平均迂回率である。

1月21日のゾーン1(芦屋市・西宮市)・ゾーン2(神戸市東灘区・灘区・中央区・兵庫区・長田区・須磨区)間の一般車両の交通 (3.83)

1月21日のゾーン1(芦屋市・西宮市)・ゾーン4(稲美町)間の一般車両の交通 (1.76)

1月21日のゾーン2(神戸市東灘区・灘区・中央区・兵庫区・長田区・須磨区)・ゾーン3(宝塚市)間の一般車両の交通 (1.51)

この結果を見ると、震災発生直後における芦屋市・神戸市東灘区の断面を横切る東西交通、中でも一般車両による交通の迂回率が大きく、道路網の機能低下および交通規制の影響が強く現れている。

3.7.5 バスレーン

震災後の鉄道の不通区間を埋める交通手段として代替バスが1月23日(月)より運行されたが、道路交通容量の低下と救援・救助物資の輸送等に伴う交通需要のために渋滞が発生し、代替バスの発着場にはバスを待つ長蛇の列ができた。そこで、円滑な代替バスの運行を確保することを目的として、1月28日(土)に国道43号に緊急車両・代替バス走行レーン(以下では代替バスレーンと称する)が設置され、国道43号を通行する三宮への直行便の運行が開始された。

代替バスの乗客数は、当初約3-5万人/日程度の利用であったが、代替バスレーン設置後、概ね2月下旬まで乗客数は上昇し続け、4月1日にJR東海道線が開通するまで、1日に約20万人が利用していた。

大阪(梅田)・三宮間の所要時間の推計値を、代替バスレーン設置前(1月23日)、代替バスレーン設置後(2月1日)で比較したものを表-3.7.1に示す⁴³⁾。代替バスレーン設置前後の1月23日と2月1日を比較すると、どの鉄道路線を利用しても代替バスレーン設置前の約半分の所要時間に短縮されており、この点からも代替バスレーン設置の効果を確認することができる。また1月23日と2月1日の代替バスの待ち時間を比べると、各社とも大幅に減少していたことが分かった。

3.7.6 階層構造から見た道路ネットワークの評価

これまでに開発されてきた平常時交通を対象としたネットワーク分析手法を用いて、震災前後で神戸・阪神地域の幹線道路網の機能にどのような変化が生じたかを分析した⁴⁴⁾。

道路に期待される機能(計画機能)のカテゴリーごとに、利用実態から見た道路機能の震災前後の変化を比較したのが図-3.7.9、図-3.7.10である。計画機能のカテゴリーは、国土幹線自動車道(以下では国幹道と称する)および都市高速道路、一般国道、主要地方道、一般地方道の4区分とした。図-3.7.9を見ると、震災前には幹線性を期待される国幹道や都市高速道路は他のクラスの道路に比較して交通量が多く、平均トリップ長も相対的に長い。従って、計画機能に見合う利用形態となっていると言える。一般国道は交通量の面では幹線性が強いが、平均トリップ長は短く、地域の生活交通が相当量混在していたものと考えられる。交通量とトリップ長から見た主要地方道と一般地方道の差は認められず、両者の実態機能にはほとんど差がない。要するに、震災前であっても国幹道クラスの主要幹線を除けば、必ずしも計画機能に整合した道路の利用がなされていなかった可能性がある。

一方、震災後の図-3.7.10を見ると、国幹道・都市高速道路の交通量とトリップ長が減少し、逆に一部の主要地方道では交通量やトリップ長の増加が著しい。結果的に、いずれのカテゴリーの道路も期待される計画機能と利用実態との不整合は震災前に増して顕著になったものと考えられる。生活道路化した幹線道路や、逆に幹線道路化した生活道路が混在した道路利用形態がネットワークの各所に出現し、道路利用者のモビリティを低下させているだけでなく、沿道の安全性や生活環境を悪化させているものと推察される。

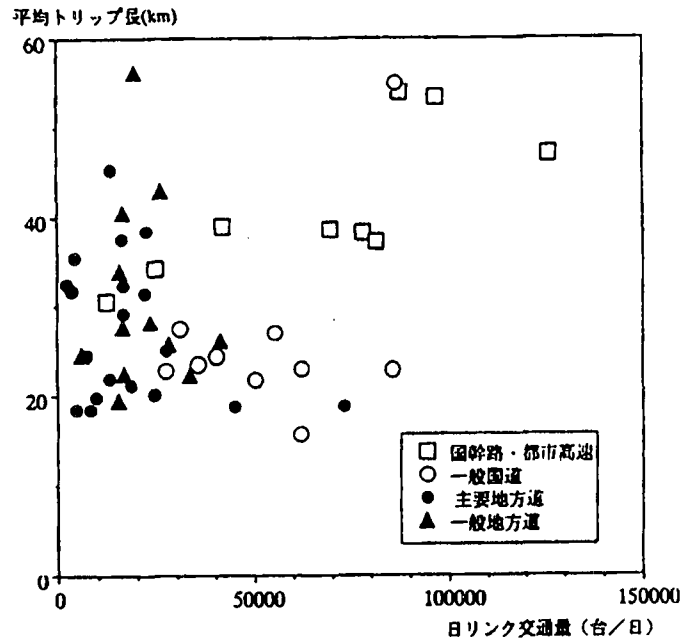


図-3.7.9 計画機能別の道路の利用形態（震災前、平成6年10月）

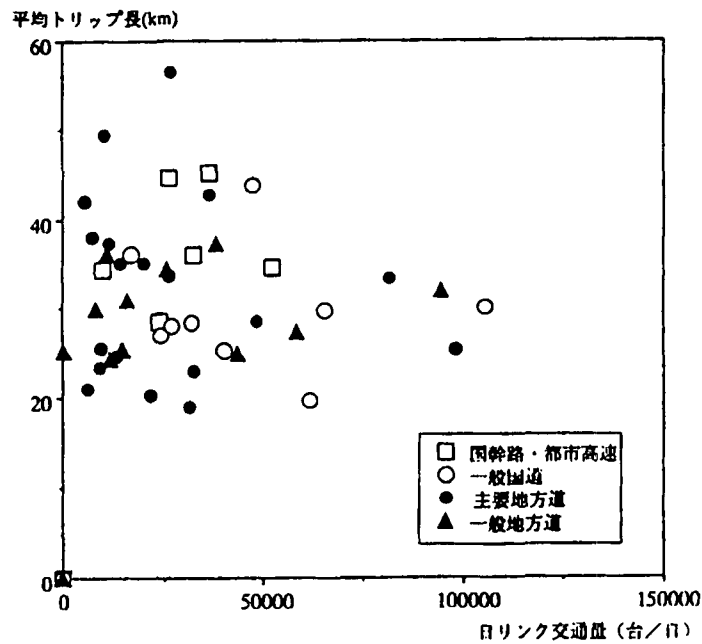


図3.7.10 計画機能別の道路の利用形態（震災後、平成7年5月10日）

3.7.7 道路交通計画に関する教訓および今後のあり方

道路交通計画に関して、今回の震災から得られた教訓および今後のあり方について以下に述べる。

- (1) 今回の大地震によって、阪神高速道路や中国自動車道等の高速道路が各地で大きな被害を受けたが、その代替ルートとなる道路が十分でなく、道路ネットワークとして余裕のないものになっていた。この点に関して今後の広域幹線道路網計画においては、大地震によってあるルートが通行止めとなっても必ず代替ルートが設定できるようなネットワークとすべきである。余裕のある道路ネットワークは防災面で効果を発揮するのみならず、平常時の交通に対しても交通を分散させる効果があり、環境や渋滞問題の緩和にも貢献すると考えられる⁴⁵⁾。

- (2) 道路の階層構造を考える事が重要であり、高速道路、幹線道路、補助幹線道路、細街路等の道路の階層構造を適切に考慮したネットワークを構築し、それが災害時にも生かされるような道路計画とすることが必要である。きちんとした階層構造を有する道路ネットワークは交通のモビリティを向上させるのみならず、交通安全の面でも効果があると考えられる。
- (3) 交通規制および迂回路に関する情報提供はテレビ・新聞・ラジオ等のマスメディア、道路上の案内情報板・ハイウェイラジオ等で行われた。しかし、道路の混雑状況や、所要時間について一般のドライバーが正確な情報を得る事は困難であった。震災後の混乱状態においては、正確な最新の情報をいかにして収集し、ドライバーに早く伝えるかということが問題であり、今後VICS (Vehicle Information Communication Systems、自動車情報システム) 等の普及を念頭において、震災時の交通情報提供の方法について検討する必要がある。
- (4) 代替バスレーンが国道43号に設置され、鉄道の代替バス輸送に大きな効果があった。鉄道が不通になり、道路も交通規制が行われていたため、公共輸送機関としてはバスが最適であり、バスの定時制確保のために代替バスレーンが有効であった。また船舶も代替交通機関として活用されたが、非常時には複数の交通モードの連携を円滑にすることが重要であり、道路計画においてもこの点を考慮する必要がある。
- (5) 地震後の道路ネットワークの容量は今回の大地震では約1/3に減少した。都市直下型の大地震においてはこの程度の容量低下があるものと想定すると、生き残った道路をいかに有効に活用するかということが重要な課題となる。車種別あるいは交通目的別の交通規制は有効な手段となると考えられる。この面でのITS (Intelligent Transport Systems、高度道路交通システム) の研究開発が期待される。また、道路構造をフレキシブルなものにしておき、非常時には簡単に車線数を増やしたり、中央分離帯の位置を変更したりできるようにすることも検討に値する。

3.8 バス・二輪車を対象とした震災時の補完交通システムの特性

3.8.1 はじめに

阪神・淡路大震災により阪神間の交通動脈は切断された。主要なものをあげると、鉄道では、JR神戸線（JRという）、同新幹線、阪急電鉄神戸線（阪急という）、阪神電鉄本線（阪神という）であり、道路では名神高速道路（名神という）、阪神高速道路神戸線（阪高神戸線という）、同湾岸線（湾岸線という）である。これらの交通支障により多大な影響が人流、物流において生じたが、不眠不休の復旧工事により、鉄道では、JRが1995年4月1日、阪急が同年6月12日、阪神が同年6月26日に開通し、震災後5カ月余にして従前の姿を取り戻した。一方道路では、湾岸線は1995年7月1日復興物資輸送ルートとして一般車を排除して、名神は同年7月29日一般車の通行の時間規制は継続しながらも上下4車に復旧した。そして、96年8月10日名神高速道路の規制も排除された。また、最も復旧が遅れていた神戸線は同年9月30日復旧した。

震災時に、この幹線系の動脈の損傷を補完したのが、自転車・バイクと代替バスであった。本節では、鉄道交通の補完の実態を、自転車・バイク、そしてバスを対象として探り、その特性を明らかにし、非常時の補完交通システムのあり方について考察する。

3.8.2 震災による交通支障と交通補完の実態⁴⁶⁾

平常時の阪神間の鉄道輸送人員（新幹線を除く上記3線）は、平日60万人であるが、震災によりこれらの人の足が奪われ、交通形態の変更を余儀なくされた。交通形態の変更では、主に次のことが考えられる。

- ①バスや二輪車（自転車、バイク）、自動車（マイカー、タクシー）、船などの他の交通手段利用への転換。
- ②交通手段は変更しないが、利用経路を変更する。
- ③職場の近くの親戚宅、ホテルや社宅などへ移るなどの住宅の変更。
- ④逆に、職場を自宅近くへ変更。
- ⑤休暇などによる交通発生自体の削減。

上記5形態のうち、もっとも多くの形態が発生したと思われるのは、①の交通手段の変更と、②の交通経路の変更であろう。交通手段の変更では、とりわけバスと二輪車への転換が多かった。交通経路の変更では、阪神間の道路利用者は中国道や国道9号に回るなど、また鉄道利用者は福知山線や山陰線、播但線などに回るなどの動きが見られた。ここでは交通手段の変更のうち、バス、そして自転車・バイクを中心に交通補完の特性を見ることにする。

3.8.3 鉄道復旧過程と代替バス運行、二輪車の発生

(1) 鉄道の復旧過程

阪神間は六甲山地と大阪湾に挟まれた南北5km程度の狭い地域に、東西に阪急電鉄、JR、阪神電鉄の3社の鉄道が集中しており、公共交通サービスの面からみれば恵まれた地域であった。しかし、震災によってこれらの3本の鉄道軸は寸断され、サービスレベルは著しく低下し、この3社の阪神間を結ぶ鉄道幹線が震災前の姿に復旧されるまでに、5ヶ月を要した。

その復旧過程を図-3.8.1をもとに概説すると、震災当日の1月17日はJR、阪神、阪急等、阪神間で運行しているすべての鉄道はほぼ運休（ただしJR大阪－尼崎は17日から運行再開）となったが、翌18日には阪急：梅田－西宮北口、阪神：梅田－甲子園が始発から運行を開始した。当時、各路線の神戸方面に最も近い駅周辺では、物資や情報を求める自転車、バイクであふれかえる光景が見られた。そして23日の代替バスの運行開始により、阪神間の公共交通による移動が震災後はじめて確保された。1月26日には阪神電鉄の梅田から青木駅までが開通し、震災後初めて鉄道が神戸市内に乗り入れることとなった。その後時間の経過とともに鉄道各社開通区間が増え、4月1日震災から75日目にJRが全面復旧し、大阪と三宮が鉄道によって直結された。4月8日には山陽新幹線が全通し、東西を結ぶ日本の大動脈が息を吹き返した。そして約2ヶ月後の6月12日に阪急が、6月26日に阪神が全面復旧し、阪神間を結ぶ3つの鉄道幹線はほぼ震災前の路線に復旧した。

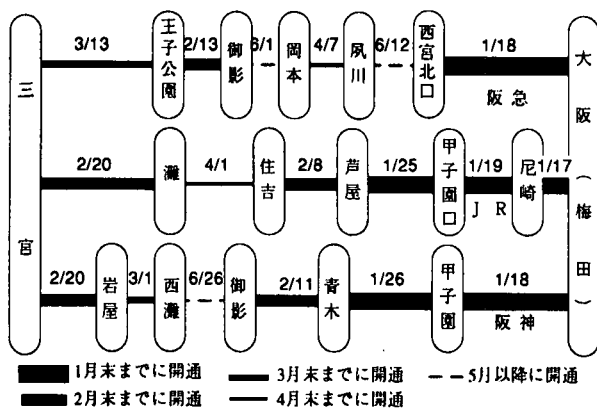


図-3.8.1 大阪-三宮間の鉄道の震災後の開通日

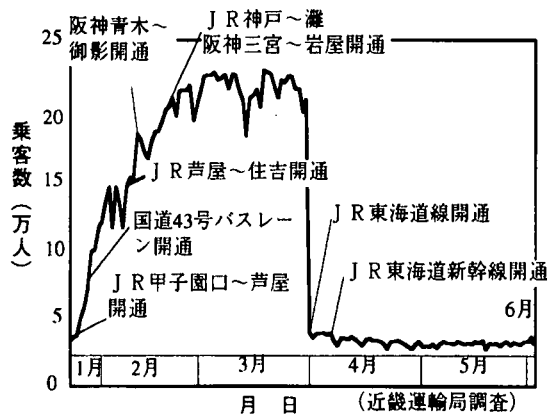


図-3.8.2 代替バスによる輸送乗客数

(2) 代替バスの運行¹⁷⁾

震災後の鉄道の不通区間を埋める交通手段として代替バスが1月23日より運行された。しかし、道路交通容量の低下と救援・救助物資の輸送等に伴う交通需要のために渋滞が発生し、代替バスの発着場にはバスを待つ長蛇の列ができた。そこで、円滑な代替バスの運行を確保する目的として、1月28日(土)に国道43号に緊急車両・代替バス走行レーン(以降「代替バスレーン」と略)が設置され、国道43号を通行する三宮への直行便の運行が開始された。

代替バスの乗客数は、当初約3～5万人/日程度の利用であったが、代替バスレーン設置後、おおむね2月いっぱいまで乗客数は上昇し続け、4月1日にJR東海道線が開通するまで、約20万人/日が利用していた(図-3.8.2)。各鉄道の全面開通にともなう代替バス路線の廃止までの約4カ月間で、代替バスの運行によってのべ1400万人以上の移動を確保してきており、震災後の阪神間の重要な移動手段として位置づけられてきた。

また、代替バスの便数においても代替バスレーン設置前は500便/日前後であったが、設置後は1000便以上のバスの運行が可能になった。その後、代替バス運行区間の減少に伴ってバスの回転効率が上がり、最大4000便に達した。これらのことから代替バス利用者の増加の一因として代替バスレーンの設置が考えられる。

(3) 自転車・バイクの発生¹⁸⁾

鉄道の復旧につれて、鉄道駅周辺の自転車・バイク駐車台数がどのように変化するかを調べるために、阪急、JR、阪神の阪神間の鉄道駅(図-3.8.3)について、昼間(9～17時)と夜間(1～5時)に分けて、駅周辺半径300m以内の駐車台数を調べた。調査日は、鉄道3線がともに寸断されていたときの3月22日、JRのみ開通した4月1日以降の5月10日、3線すべてが開通した後の6月28日の3日間である。

昼間の調査結果を図-3.8.4に示した。自転車とバイクの合計台数で見ると、阪急西宮北口、JR芦屋、JR西宮、JR住吉、阪神甲子園、JR甲子園口が多い。これらの駅は3000台から5500台を記録している。自転車では西宮北口では最大で5000台近くになる。バイクでは、JR住吉駅の北側は急勾配の坂が多く、また山際に住宅地が開発されているため、最も多く約2000台見られた。

また、この図より鉄道の復旧状況に合わせて増減が見られることがわかる。つまり、JRのみ全線開通している5月10日では、JRの各駅(甲子園口、西宮、芦屋、摂津本山)で顕著な伸びが見られる。鉄道3線とも全通した6月28日の調査では、西宮北口、JR西宮、JR芦屋、JR住吉において減少が見られたが、これは阪急全線開通により、JRや西宮北口で乗車していた人が、最寄りの徒歩圏内の駅を選択できるようになったため、自転車・バイク利用が減少したためと思われる。阪神各駅では、大阪方面へのターミナル駅であった阪神御影の減少以外には顕著な影響は見られない。

次に、3時点断面での格差(最大値-最小値)を比較すると、JR甲子園口、西宮北口、JR西宮、JR芦屋、JR住吉で大きく、1000～1500台となり、鉄道の開通にあわせて、二輪車利用に大きな影響がでることがわかる。

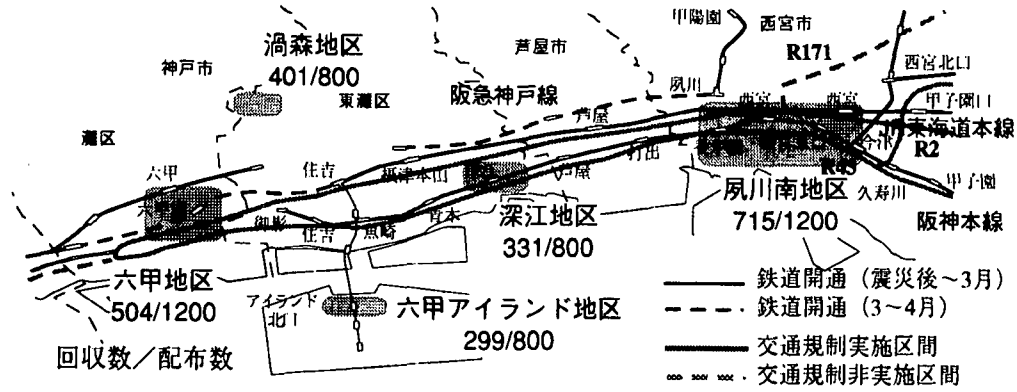


図-3.8.3 調査対象駅・地区と3月・4月の時点の鉄道の開通及び交通規制実施状況

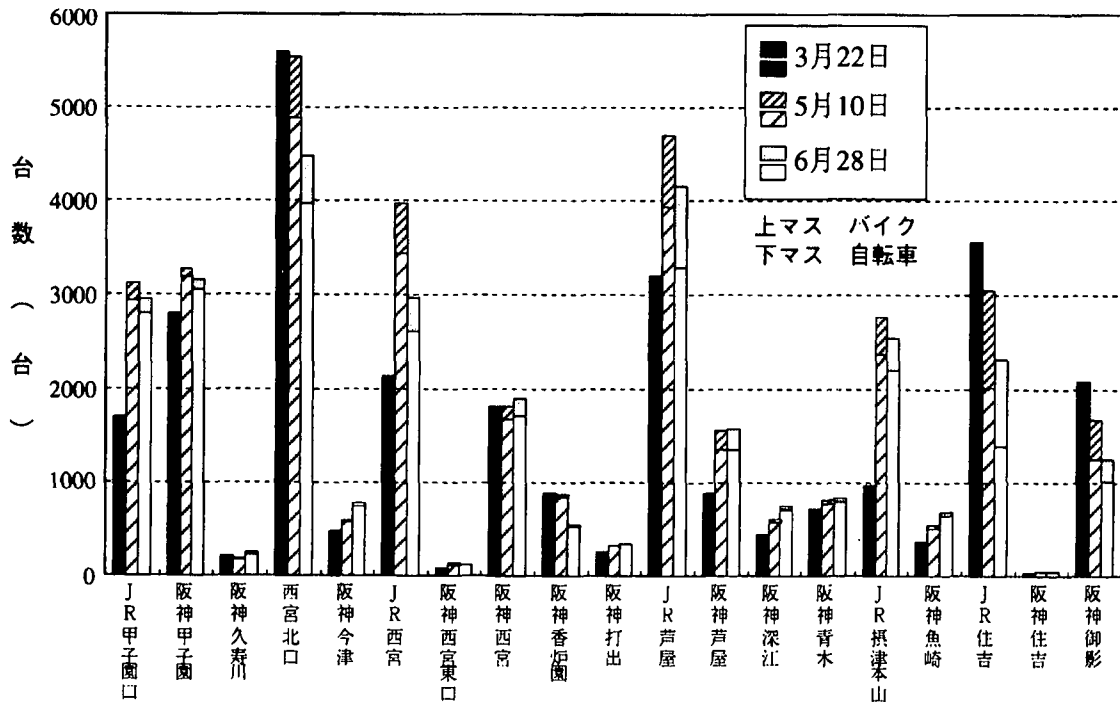


図-3.8.4 阪神間の鉄道駅周辺の自転車・バイク駐車台数(昼間)

3.8.4 震災後の通勤交通手段の変化⁴⁹⁾

(1) 調査の概要

震災前後の通勤交通行動の変化や代替バスの利用特性について実態を把握するために被災地住民を対象にアンケートを実施した。

その対象地区については、鉄道の不通区間および期間、震災前の公共交通サービスレベル、交通規制の影響の大きさ(交通規制対象道路である国道2号、43号からの距離)を考慮し、以下の5地区を選定した(図-3.8.3)。

- i) 夙川南地区(西宮市)
- ii) 深江地区(神戸市東灘区)
- iii) 渦森(うずがもり)地区(神戸市東灘区)
- iv) 六甲アイランド地区(神戸市東灘区)
- v) 六甲地区(神戸市灘区)

調査票を夙川南地区、六甲地区にそれぞれ600世帯1200部、深江地区、渦森地区、六甲アイランド地区にそれぞれ400世帯800部の合計2400世帯4800部配布し、有効回答数2252部(46.9%)を得た。なお、調査票は調査員が訪問配布し、1週間後に回収する形式をとり、1995年12月に実施した。

(2) 代表交通手段

鉄道の開通状況より公共交通サービスの変化が大きかったと考えられる震災前、2月下旬～3月初旬(鉄道3社とも不通区間あり)、4月初旬(JR東海道線のみ全通)の3時間断面において、交通行動の実態を把握する。

ここでは、特に日常生活に復帰していく過程において、重要な活動である通勤交通をとりあげ、その代表交通手段の変化を示した(図-3.8.5)。

自動車の分担率が震災前の19.6%から4月では14.7%と時間が経過するにつれて、徐々に減少していく一方、バイクの利用者が少し増加している。また、自転車利用者は減少している。これは代表交通手段としての自転車利用者は職場が近くにあり、その職場が震災により被災を受け、通勤不可能な層が生じた人も少なくなかったためと思われる。代替バスのみの利用者も鉄道利用に含むものとして考えると、3月の時点では若干鉄道利用者が増加しており、さらにJR東海道線が開通した4月の時点においてはさらに鉄道利用者が増加していたことがわかった。

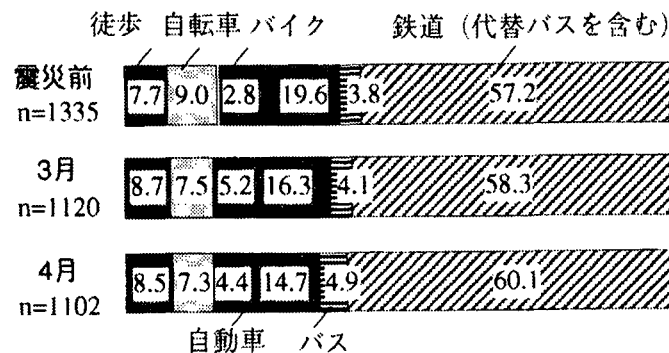


図-3.8.5 通勤代表交通手段の変化

(3) アクセス交通手段

震災前と3月初旬の時点でのアクセス交通手段の変化について着目する(表-3.8.1)。調査地区全地区において自転車、バイクの占める割合が大きく増加している。このことから、自転車、バイクは代表交通手段としてよりも、被災のため遠距離になった最寄りの鉄道駅までのアクセス交通手段として震災後の重要な交通手段と位置づけられていたことがわかった。特に、最寄りの鉄道駅が不通区間であった六甲、渦森、六甲アイランド地区では高い値となっている。大阪方面と1月下旬に鉄道が開通した深江、夙川南地区では他の地区と比べてアクセス交通手段の構成比の変化は小さいが、それでも自転車とバイクを合わせると10%近く上昇している。なお、震災後に六甲アイランドのバスの占める割合が高いのはJR住吉駅までのバスが臨時で運行されていたためである。

表-3.8.1 震災前後のアクセス交通手段の構成割合の変化

	六甲		渦森		六甲アイランド*		深江		夙川南		合計	
	震災前	3月	震災前	3月	震災前	3月	震災前	3月	震災前	3月	震災前	3月
徒歩	90.8	51.1	4.7	24.8	98.3	21.4	85.7	75.0	78.4	63.5	62.9	48.3
自転車	6.1	18.2	0.7	17.1	0.8	4.8	14.3	17.2	14.7	18.0	9.0	15.7
バイク	2.3	12.5	10.0	16.2	0.0	4.8	0.0	4.7	0.5	5.5	3.3	8.7
自動車	0.8	2.3	6.0	0.0	0.8	2.4	0.0	1.6	0.0	11.0	1.8	4.9
バス	0.0	15.9	78.7	41.9	0.0	66.7	0.0	1.6	6.4	2.0	23.0	22.4

3.8.5 被災地区住民の代替バス利用特性

前章で示した被災地区住民を対象としたアンケート調査をもとに、ここでは代替バスの地区別利用頻度、利用目的、利便性について調べることにする。なお、代替バスについては、震災後2カ月を経た3月時点のことについてである。

(1) 代替バスの利用頻度

図-3.8.6に代替バスの路線別利用頻度を示した。路線別に利用したことがないと答えた層をみると、阪急が最も高く8割を越え、つづいてJR（7割）、阪神（65%）となった。なお、阪急は阪急電鉄神戸線の代替バスであり、この路線の駅を結ぶ。他者の代替バスも同様であり、それぞれの鉄道駅を結んでいる。

次に地区別のサンプル数が異なることを考え、地区別に最もよく利用する路線の利用頻度をみることにした。図-3.8.7に示すように、六甲、渦森、六甲アイランドでは、JR代替バスの利用頻度が高い。とりわけ六甲アイランドの利用頻度が高い。これは先に述べたように、JR住吉駅までこの地区から臨時バスが運行されていたことによる。

一方、阪神間南部に位置する深江、夙川南は、阪神の利用頻度が高くなっており、深江において顕著である。いずれの路線においても代替バスの利用頻度が高いところは、大阪方面への利用者が多く、その路線の最寄り駅へのアクセスが容易なところであると考えられる。

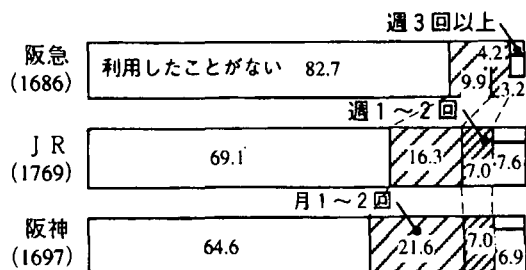


図-3.8.6 代替バスの利用頻度

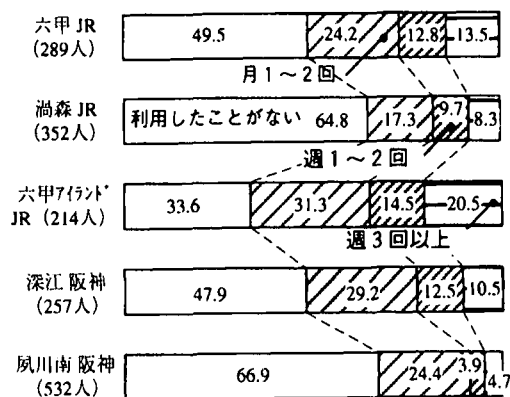


図-3.8.7 地区別代替バスの利用頻度 (ただし利用率の最も高い路線について)

(2) 代替バスの利用目的

代替バスの利用目的について地区別、年齢別にクロス集計を行った。図-3.8.8に示すように、各地区ともおおむね年齢が進むにつれて、通勤・通学の占める割合が減り、買い物やその他目的が増える。一方、利用目的別構成比をみると、地区により変動がある。この違いは地区の位置、および居住者の性格と代替バスの利便性とから来るものと思われる。

60歳未満の層では、通勤・通学の割合が高いのは、六甲アイランド、渦森、六甲である。これらの地区は買物も占める割合も高いが、どちらかという通勤・通学目的が卓越している。深江、夙川南といった大阪よりの地区においては、通勤・通学も多いものの、買物目的が優勢となる。60歳以上では、買物が増え、通勤・通学は減少するが、業務は各地区とも占める割合が比較的高い。

(3) 代替バスの利便性

代替バスの利便性について「便利だった」あるいは「不便だった」と感じた人の属性を調べるため、地区別比較を試みた(図-3.8.9)。5地区全ての地点において「不便だった」と回答している人が極めて多い。とくに本土との交通手段に乏しかった六甲アイランド地区では85%以上の人々が代替バスに何らかの不便を感じている。

次に代替バスが不便だった理由を尋ねたところ、図-3.8.10に示すように、所要時間の長さ、所要時間の不安定性、バス待ち時間の長さについて、不満を訴える人が多かった。

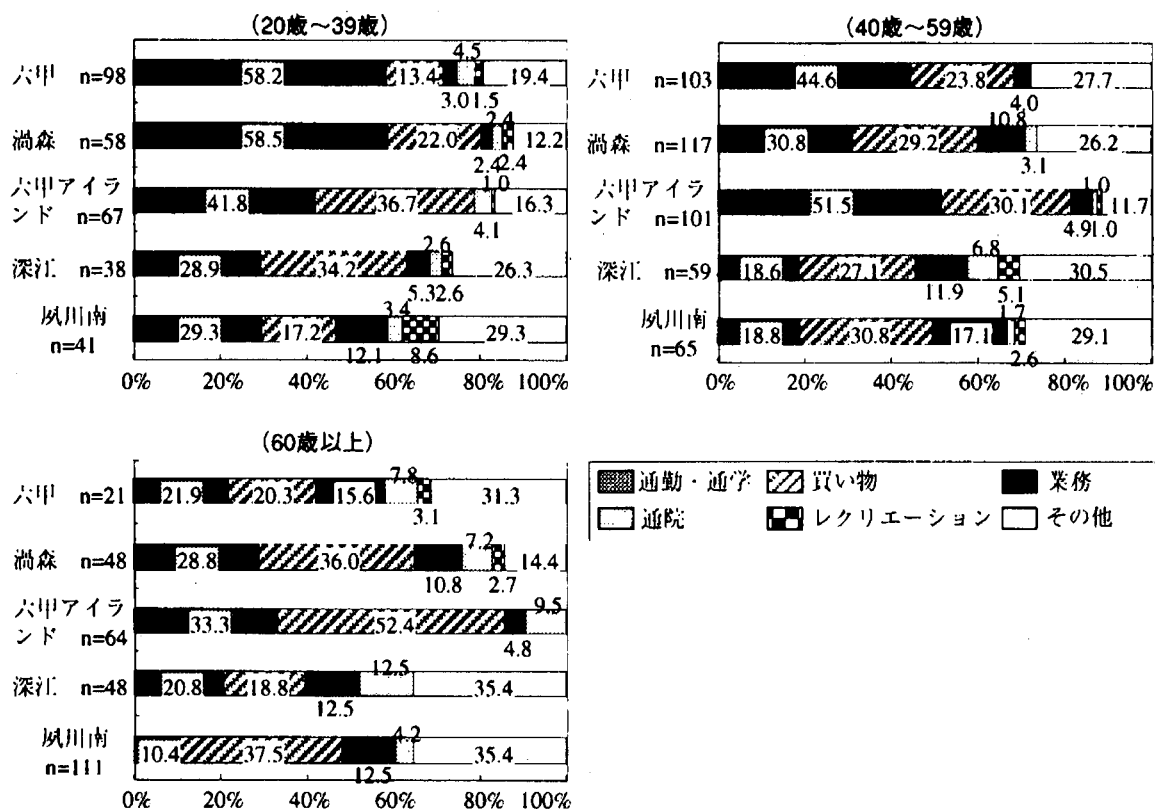


図-3.8.8 代替バスの利用目的(居住地・年齢階層別)

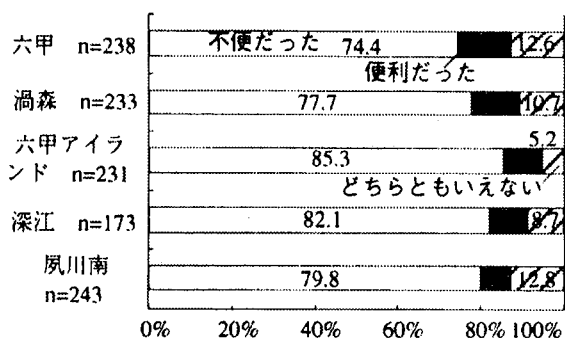


図-3.8.9 代替バスの利便性(地区別)
有効解答者数1118人

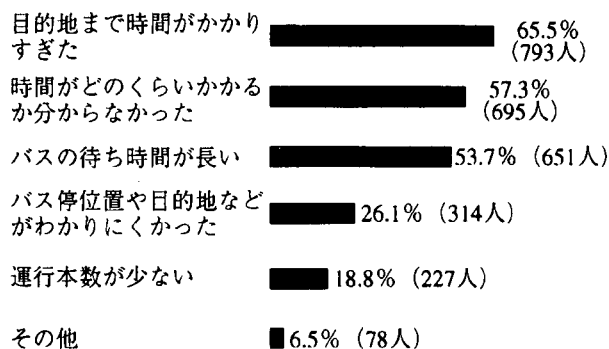


図-3.8.10 代替バスが不便だった理由にあげた割合

3.8.6 自転車・バイクの利用特性

3.8.4で示した被災地区住民を対象としたアンケート調査をもとに、ここでは自転車・バイクの危険感、震災直後の利用状況、震災前後の自転車利用回数の変化などについて調べることにする。

(1) 自転車・バイクによる危険感

表-3.8.2に示すように、震災直後に、自転車やバイクが歩道上を走行するために危険を感じた人は、かなりの割合にのぼる。鉄道駅からやや離れている渦森や六甲アイランドでは3割台と若干低く出るものの、他の3地区は50%前後の値を示す。また、車道を自転車・バイクが走行することによる危険感では、これはドライバーが感じるようになるだろうが、歩道上の危険感より相当高い値を示し、すべての地区で50%を越え、とくに深江では65%を示す。このことより、震災後に大量に発生した自転車・バイクにより、歩行者のみならず、ドライバーにとっても相当の危険性が感じられていた。

表-3.8.2 自転車・バイクの危険感と利用

	六甲	渦森	六甲 アイランド	深江	夙川南
震災直後、自転車やバイクが歩道をたくさん走っていて危険を感じた	49.2	38.7	36.7	54.7	48.7
震災直後、自転車やバイクが車道をたくさん走っていて危険を感じた	57.1	55.6	57.2	65.6	53.1
震災直後、自動車の渋滞を避けるために自転車を利用したことがあった	23.6	7.7	25.4	41.7	40.1
震災直後、自動車の渋滞を避けるためにバイクを利用したことがあった	14.3	13.2	11.0	14.5	10.9

注) 数字は「はい」と答えた人の割合 (%)

(2) 自転車の利用頻度

図-3.8.11に震災直後における震災前と比した自転車利用頻度の変化を示した。夙川南、深江、六甲においては、増えた人は4割を越える。これらの地区は平地であるとともに、大阪方面や神戸方面のターミナル駅に比較的に近いためと思われる。一方、これらの地区よりターミナル駅にやや遠い六甲アイランドや丘陵部の渦森では、増えた層はやや少なくなる。

さらに、震災直後から現在(調査を実施した95年12月)の利用頻度の変化をみると(図-3.8.12)、変わらない層が各地区とも多いものの、増えた層と減った層を比較すると、鉄道の全線開通により、最寄り駅に徒歩やバスでアクセスできるようになったため、減った層が多くなっている。それでも、六甲や深江、夙川南においては増えた層が10数%みられる。

地震前後と現時点との比較において、増えた層の割合と減った層の人の割合の差より判断すると、震災直後は、差し引き3割程度の人において自転車利用は増加し、震災直後と現時点とを比較すると、2割程度減少したものと推察され、1割程度が増加したまま残っているということができよう。

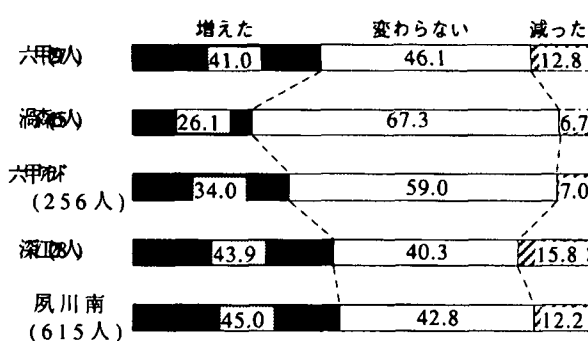


図-3.8.11 自転車利用頻度の変化
(震災前に比べて震災直後は?)

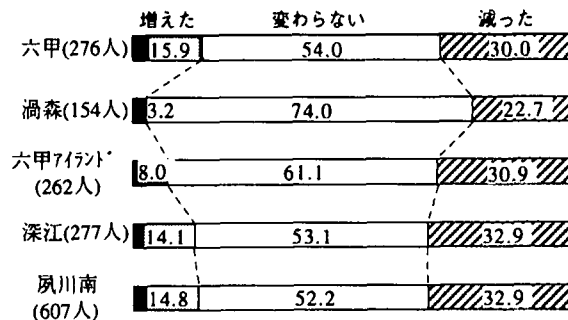


図-3.8.12 自転車利用頻度の変化
(震災直後と比べて現在は?)

3.8.7 まとめ

本節では、震災時、主に鉄道の補完交通システムとして機能した、代替バスと自転車、バイクを対象に、その特性を代替バスの運行実態調査、自転車・バイクの駅周辺駐車実態調査、さらに被災地区住民を対象としたアンケート調査により明らかにした。そしてその成果をまとめると、次のようになる。

(1) 代替バスについて

- ・代替バスレーン設置の効果は大きく、平時の鉄道輸送人員の1/3にあたる約20万人を、毎日、輸送した。
- ・代替バスの利用では、代替バスレーンに近接する阪神電鉄の駅を結ぶ代替バス(阪神)の利用が多く、

つづいてJR、阪急の順となった。

- ・地区別にみると、いずれの路線においても代替バスの利用頻度が高いところは、大阪方面への利用者が多く、その路線の最寄り駅へのアクセスが容易なところであった。
- ・利用目的では、通勤・通学、買物、その他が多いが、年齢が進むにつれて買物やその他が上昇する傾向がみられた。大阪寄りの地区においては、通勤・通学は多いものの、買い物目的が優勢となった。
- ・代替バスの利便性については、不便だと答えている人が7割以上を占めた。その理由には、所要時間の長さ、所要時間の不確かさ、待ち時間の長さなどの時間的な利便性の悪さを示すものがある。

(2) 自転車・バイクについて

- ・自転車・バイクは大阪方面のターミナル駅に大量に集中する傾向がみられ、鉄道の開通状況により変化した。
- ・震災時に大量に発生した自転車・バイクは歩行者のみならず、ドライバーにも深刻な危険感をもたらした。
- ・代表交通手段としての自転車分担率はやや減少したが、鉄道のアクセス交通手段としての分担率は大幅に上昇した。バイクは両者とも上昇したが、アクセス手段としての伸びの方が大きかった。
- ・自転車の利用頻度を震災前と直後の比較、さらに直後と鉄道全線開通後との比較でみると、地区で差はあるものの前者においては3～4割の人が増え、後者においては2～3割の人が減少したと答えた。この差し引き1割程度が震災前と比較して、鉄道全線開通後も増えたまま残っているものと思われる。

(3) 今後の課題

上述のことをふまえて今後の課題として次のようなことがいえる。

a. 代替バスについて

- ・バスの円滑な走行と目的地までの所要時間を短縮するための、鉄道駅と主要幹線道路を結ぶアクセス道路と駅周辺の整備
- ・鉄道の復旧状況、時間帯に応じた代替バスの運行とバスの増便のあり方
- ・事業者による、発・着時刻、運行ルート、所要時間、発着場所などといったバス運行に関わる基本的な事項の正確で親切な情報提供
- ・非常時に地域間の移動が確保できるように、平時も含めた交通事業者間の協力と連携

b. 自転車・バイクについて

- ・自転車の走行空間としての自転車道や広幅員の自転車・歩行車道の平時における整備
- ・中央分離帯や停車帯・路側帯の非常時による可変的運用による自転車やバイクの走行空間の創出
- ・駅周辺の自転車・バイク駐車場の平時における整備
- ・非常時における駐車空間創出のためのゆとりある駅前広場整備と周辺公園整備
- ・非常時における駅前広場や歩行空間における自転車・バイクの駐車規制措置

3.9 道路ネットワークの信頼性

3.9.1 道路網信頼性の定義と意義

本節では、道路網の信頼性について、その定義、計算方法および兵庫県現況および将来道路網への適用事例を示している^{50), 51)}。道路網の信頼性は大きく分けて2つの方法で定義できる⁵²⁾。1つは連結信頼性であり、もう1つは時間信頼性である。連結信頼性とは、所与の期間中、道路網の任意のノード間において、あるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率的指標と定義される。この信頼性は代替性の指標であり、ある経路が通行不能となっても、代替経路が確保されて一定のサービス水準以上で目的地へのトリップ可能な程度を表している。時間信頼性とは、所与の時間で目的地へ到達できる確率あるいは、ある確率で到達可能な走行所要時間の上限値(最大許容所要時間)である。この信頼性は、所要時間の安定性を示す指標であり、道路利用者に対し所要時間の正確性と迅速性の情報を提供する。今後、『ある経路の円滑な通行が不可能ならば別の経路が存在する(連結信頼性)』道路網や『〇〇まで確実に〇分で行ける(時間信頼性)』道路体系の整備が望まれる。交通システムの防災計画の第一段階では前者が重要であり、本節では連結信頼性を対象としている。

今回の地震被害を通じて、ネットワークの一部が機能不全に陥っても、ネットワーク全体としては機能を果たす⁵³⁾ことの重要性が再認識された。また、単なる連結信頼性ではなく、円滑な交通サービスで地域間を連結することの重要性も認識された。さらに、信頼性の高い通路の確保が、救急車や消防車等の緊急自動車の通行に便宜を与え、救出救急救命活動や消防活動によって災害の拡大を防ぐことに大いに貢献する⁵²⁾ことも再認識されたといえる。

本節では、阪神淡路大震災における交通システムの問題点を議論した上で、道路網の連結信頼性を計算し、信頼性を向上する観点から重要な区間を確率重要度で評価する方法を示す。本節の構成を述べる。まず、3.9.2では、阪神淡路大震災における交通システムの問題点を整理している。3.9.3では、信頼性の高い道路網の構築と防災交通計画について考察する。3.9.4では、ブル演算法と確率重要度の方法論を示し、簡単なネットワークにおける立体交差部の確率重要度を計算する。3.9.5では、震災時に兵庫県復興道路網が存在していたとしてその信頼度と確率重要度を計算し、3.9.6では、得られた成果と今後の課題をまとめている。

3.9.2 阪神淡路大震災における交通システムの問題点

今回の地震における交通システムの問題点は、(1)都市交通、(2)国土幹線交通、(3)地区内交通とに分けて論ずることができる。また、(4)立体交差部の問題点も指摘された。

(1) 都市交通ネットワーク

まず、都市交通ネットワークは、橋梁や盛り土の被害、斜面崩壊、地盤の液状化などにより寸断されたため、その交通がほとんど不可能となった。交通ネットワークが狭い地域に集中し、さらに鉄道システムも含めその多くが『震災の帯』地域に存在していたことから、交通システムはほぼ全滅状態となり、国道2号等の容量の小さい路線が生き残ったにとどまった。そのことが原因となって地震直後から大渋滞が発生し、消防活動、救出救急救命活動等が大きく阻害され地震被害が拡大することとなった。さらに、緊急物資輸送、復旧活動等にもきわめて大きな支障をもたらした。また、被害地域の交通システムが東西方向に発達し、南北方向には整備されていなかったことにより、代替経路はきわめて制約が大きかった。このため、冗長的に構成される信頼性の高い道路網の必要性が再認識された。

なおこの地震では、高架道路は、出入り制限のために被災地中心部まで緊急物資輸送の円滑な交通が保証される長所が再認識された反面、落橋可能性等の短所があること、平面街路は、地震被害が比較的軽微という長所がある反面、アクセス制限がしにくいために大渋滞が発生する短所があることが再認識された。これらから、平面街路、高架道路のバランスのとれた整備が重要であることも教訓となった。

(2) 国土幹線交通ネットワーク

国土幹線交通については、都市交通ネットワークと同じく、主要な交通システムが兵庫県南部に集中し

ていたために、重要な東西基幹交通が長期にわたって遮断され、わが国の物流人流に大きな影響を与えた。特に、中国自動車道および名神高速道路から阪神高速神戸線を経て第二神明道路に接続するルートは、西日本のロジスティクスの動脈であり、経済活動に与えた影響は大きいといえる。中国自動車道や名神高速道路、阪神高速神戸線が復旧中あるいは復興物資輸送ルートに指定され一般車両が通行止めとなっている期間、舞鶴自動車道や国道9号、27号が迂回する交通によって交通量が大幅に増加した。

このことから、議論は(1)と同様となるが、特に国民経済に重要な影響を有する国土幹線交通網は、地質学的に同じ地域を避けて冗長的に構成することの必要性を示唆している。従来、国土幹線交通軸は、採算性や経済性を重視して整備されてきたが、今後は、高い信頼性を維持するための路線整備を考える必要がある。この考え方は、従来交通路整備が進まなかった過疎地域の活性化にもつながるもので、人口の地方分散化にも寄与すると考えられる。また、道路交通と船舶交通等の連携等、異なるモードとの一体的運用も必要であろう。

(3) 地区内交通ネットワーク

建物倒壊によって地区内細街路の閉塞が生じた。これによって、地域住民の避難、避難所との往復、買い物等の日常交通が影響を受けたばかりではなく、水道・ガス・電力の復旧工事に多大の支障が出た。復旧工事では現場への車両の到達性が重要であるにもかかわらず、多数の閉塞によって復旧現場への経路がわからず、ほとんど迷路解き状態となった。このため、迅速な最短経路探索が必要とされた。家屋倒壊等に起因する地区内道路網寸断による影響とその対策は、今後の重要な課題となった。GISとの連携を研究することも課題であると考えられる。

(4) 立体交差部分の問題

今回の地震では、路線が輻輳的に構成されていたので、立体交差部分の落橋によって2つの交通システムの共倒れのシステムダウンが多数発生した。これは新しい地震被害の形態である。鉄道システムも含めると、例えば、阪神高速神戸線深江地区の倒壊による国道43号の通行障害、名神高速道路の落橋による市道の通行障害、国道171号門戸高架橋の落橋による阪急電鉄今津線の不通、新幹線高架橋の落橋による同じく阪急電鉄今津線の不通、JR、阪急、阪神電鉄等連続立体化区間の高架橋の落橋や擁壁の崩壊等による横断方向道路の通行障害等、県道市道も含めるときわめて多数であった。こうした立体交差部分の重要度が改めて認識され、設計基準の見直しや、その冗長性をどのように確保するかが重要な問題点として指摘された。

3.9.3 信頼性の高い道路システムの構築と防災交通計画

信頼性の高い道路システム構築のためには以下の2点が重要である。すなわち、

- ①ネットワークに余裕のある道路システム、
- ②横断面構成に余裕のある道路、

によって達成される。①は、代替路の存在およびその交通容量の余裕により連結性の面から信頼性が確保されることを表している。②は、ネットワークを構成する各道路区間において、余裕のある横断面構成によって当該道路区間における信頼性の向上に寄与するものである。1989年ロマ・プリエタ地震で処理能力の低下したサンフランシスコ湾岸道路網を対象にこの効果が定量化されている⁵⁴⁾。また、平成6年の道路審議会答申においては、広い路肩を確保して車線数を確保することが述べられている⁵⁵⁾。

次に防災交通計画として、耐災性の高い道路システム構築には以下の4点が重要であると考えられる。

- (i) 信頼性の高い道路システム
- (ii) 道路網の階層構成
- (iii) 柔軟性のある危機管理計画
- (iv) 平常時のシステムへのbuilt-in

(i)は既に述べたとおりである。(ii)は、トリップを大きく分けて、a)国土幹線交通、b)都市交通、c)地区内交通とすると、これらを可能な限り別々に流すことにより、それぞれの独立性を向上させ、結果的

に各システムの信頼性を向上させて防災力を高めようとするものである。道路網の階層構成は、平常時においても重要な考え方である。

(iii)の災害時の危機管理は、今回の震災における盲点であった。地震の発生直後から復旧過程に至るまで、規制・運用・情報提供を含む総合的な交通システム危機管理計画の構築が重要である。この危機管理計画は、震度別、発生時刻別、地域別、対策シナリオ別に策定されることが必要で、さらに時系列的（地震直後、その日の夕方まで、翌日、2～3日後、...）に構築される必要がある。例えば、震度が一定以上であれば、当該自治体のマンパワーは救急・救出活動で手一杯となることを想定して、周辺自治体での通行規制を含む後方支援体制が必要となろう。重要なことは、対策の相乗効果を高めるために一連の危機管理対策はパッケージとして提供すること、規制をしたら迅速に利用者に知らせることである。また、いくら詳細に危機管理計画を策定しても限界はあるから、臨機応変な対応を可能にするため、対策の主旨（マニュアルに載っていないなくても対応できる）を明記すべきである。危機管理計画の策定においては、行政の緊急対応の仕方を市民に知らせるべきであり、市民側で対応すべきことも知らせる必要がある。

最後に(iv)これらの防災対策は、平常時のシステムにbuilt-inしておき、平常時と災害時との連続性を保っておくことである。交通に限らず、非常時だけのためのシステムはあまり役に立たず、平常時から運用して慣れてきたシステムが、今回の震災で役に立ったことが多かった。これは、今回の震災で多くの関係者が共通に認識した重要な教訓であろう。道路システムにおいても、平常時の道路整備や交通の管理運用策にbuilt-inしておくことが重要である。前者は、事故通行止めや事故・工事車線規制、雪通行止め等、日常的あるいは季節的に発生する可能性の高い交通障害に対して信頼性を高めておくことが災害時にも役に立つ。また、後者は、平常時の交通運用をきめ細かく柔軟にしておくことで、平常時から使い込んでおくシステムが災害時にも役に立ち得ることをいっている。なお、本章では道路システムを中心に論じたが、これ以外に災害時には、他の交通モードとの連携が重要であることはいうまでもない。

3.9.4 ブール演算法と確率重要度

3.9.1で述べたように、本節では、信頼性を所与の期間中、道路網の任意のノード間において、あるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率的指標と定義する。同様に、リンク信頼度をそのリンク上においてあるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率と定義する。筆者らは、道路網の質的水準の評価指標として信頼性を提案し、種々の効率的計算法を提案している。ここでは、ネットワークにおけるノード間信頼度 R をブール演算法⁵⁰⁾で計算する。ノード間信頼度 R は、各リンクの信頼度ベクトル r の関数であり、

$$R(r) = E \left[1 - \prod_{s=1}^p \prod_{a \in P_s} (1 - \prod X_a) \right], \quad (3.9.1)$$

で与えられる。ここに X_a は、リンク信頼度 ra を $E[X_a] = ra$ で与える確率変数であり、 P_s は s 番目のミニマルパスセット、 p は選択パス数である。 p がノード間のすべてのパス数とすると R は信頼度の厳密値を与え、部分的なパスであれば下限値を与える⁵⁰⁾。本ブール演算法では、式(3.9.1)を記号処理的なアルゴリズムで多項展開し、ブール演算処理を行って信頼度を求めている。なお、リンク信頼度 ra の与え方については文献50)、51)を参照されたい。

リンク a の確率重要度 IPa は、

$$IPa = \partial R(r) / \partial ra \quad (3.9.2)$$

で与えられる⁵⁰⁾。確率重要度には $0 < IPa \leq 1$ という性質があり、そのリンクの信頼度の維持(もしくは向上/低下)がノード間信頼度の維持(向上/低下)に与える影響度を知ることができる。確率重要度の高いリンクでは信頼度の維持の重要性がより高く、またそのリンク信頼度の低下がノード間信頼度の低下に大きく寄与するために、冗長性を高める必要性も高いといえる。ブール演算法では計算過程で確率変数の情報が保存されるため、このような解析的な分析が可能である。

図-3.9.1上のような簡単なネットワークで立体交差を表現する。これをパス間でのリンクの共有(左図)で等価的に表現する。この図(タイプ1)では、高架部分の落橋が平面部分にも影響を与えることを、パス間の従属性表現で表している。これを通常の並列システム(右図)とを比較する。リンク7はダミー

リンクである。表-3.9.1に示すようなリンク信頼度を与えると、タイプ1(左図)とタイプ2(右図)とでノード間信頼度は同一にできる。しかしながら、確率重要度が大きく異なっており、立体交差部の高架部分のネットワーク信頼性への寄与が大きく算出されることがわかる。表-3.9.2のように、数値を若干変えてもこの傾向は変わらない。このように、確率重要度を用いることで、立体交差部の重要度を計量化できる。確率重要度が大きく算出される部分は、その信頼性の維持がネットワークの信頼性に大きな影響を与える。重要な区間は、その重要性に応じてさらに耐震性強化を行う必要があり、その合理的根拠の1つとして確率重要度を用いることができる。

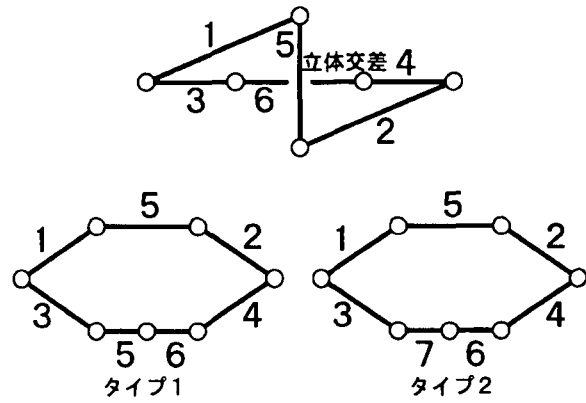


図-3.9.1 立体交差とその等価的表現(タイプ1)および通常の並列表現(タイプ2)

3.9.5 兵庫県復興道路網における信頼度と確率重要度

図-3.9.2は新聞等で発表された復興ネットワークとされる道路網である(実線が現況ネットワーク、破線が将来ネットワークを示す)。このネットワークの特徴は、従来は神戸市内は主に東西間交通路のみで構成され、南北軸交通路が不足していたのに対し、六甲山北部の東西道路と南北方向道路によって接続し信頼性を高めようとしている点である。このネットワークに対しノード間(大阪~三宮間)の信頼度と確率重要度を計算する。信頼性の基準となるサービスレベルは円滑な交通状態(HCMのサービスレベルEに相当する)を用いた⁵⁷⁾。

計算の前提及び使用したデータを述べる。

(1) ネットワークは復興ネットワークを用いているが、耐震性が強化されたこれらのネットワークを地震が襲い、ネットワークが損傷を受けるといったことはない。阪神大震災発生時に、仮にこれらに示す道路があったとして、どの程度の信頼性向上効果が見られるかを試算したものである。

(2) 交通量等のデータは地震直後の諸状況を考慮し、自力入手容易なものとして

表-3.9.1 立体交差部確立重要度(ケース1)

信頼度		確率重要度	
		タイプ1	タイプ2
リンク信頼度	link 1	0.9000	0.1710
	link 2	0.9000	0.1710
	link 3	0.9000	0.1710
	link 4	0.9000	0.1710
	link 5	1.0000	0.9639
	link 6	1.0000	0.1539
	link 7	1.000(Type2)	--
ノード間信頼度		0.9639	0.9639

表-3.9.2 立体交差部確立重要度(ケース2)

信頼度		確率重要度	
		タイプ1	タイプ2
リンク信頼度	link 1	0.9000	0.2195
	link 2	0.9000	0.2195
	link 3	0.9000	0.1385
	link 4	0.9000	0.1385
	link 5	0.9000	0.9485
	link 6	0.9000	0.1385
	link 7	0.900(Type2)	--
ノード間信頼度		0.8537	0.9068

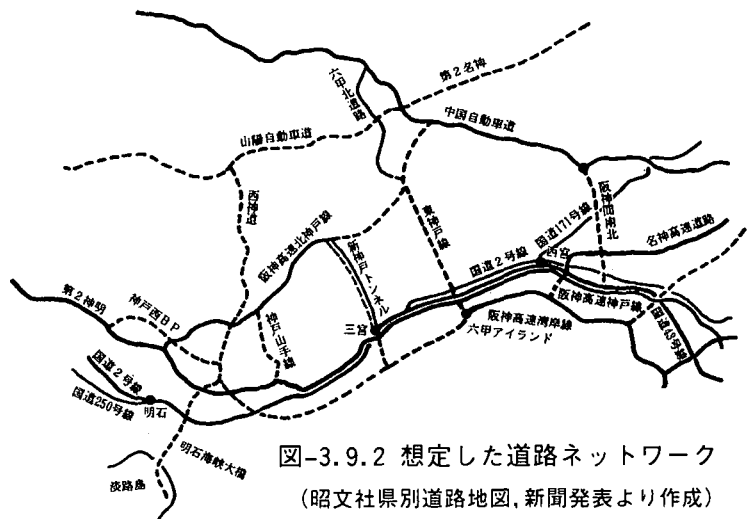


図-3.9.2 想定した道路ネットワーク(昭文社県別道路地図, 新聞発表より作成)

土木学会緊急報告会資料⁵⁸⁾、阪神高速道路交通
量調査資料⁵⁹⁾、『高速道路と自動車』⁶⁰⁾等の交通
量データ(1994年10月実績値)を用いた。将来
ネットワークに対しても同じ交通量を用いて
いる。計算のフローは図-3.9.3に従った。

(3) 迂回交通量に関しては、影響を受けると考
えられる大阪～三宮間の交通が可能な限り迂回
して三宮を通過するものと仮定して計算した。
この計算は、対象地域の道路がほぼ飽和状態と
なっている性質を利用した。得られた結果は、
後述のように比較的常識的で妥当な結果を与
えているが、あくまでも地震直後の緊急的な計
算である。迂回交通量の厳密な考慮は、厳密な交
通量配分を行うことによって再計算可能であ
る。

(4) 6でも述べたようにこの種の計算では膨大
な事象数を対象とする必要がある。この問題を
回避するため、本研究では事故解析的手法すな
わち、ネットワークの損傷ケースとしていくつ
かのルートが寸断された場合を設定した(シナ
リオ設定法)。

(5) リンク信頼度 ra の推定に用いる交通量変動
値は大阪地域で観測された値⁶¹⁾を用いた。な
お、この計算過程で、交通容量(時間単位)と
リンク交通量(1日単位)の単位が異なるため、
時間係数を用いてリンク交通量を時間交通量に
変換している。それぞれの数値は、交通容量が
2000v/h/車線(高速道路)、1000v/h/車線(平
面街路)、時間係数は0.10を用いてラッシュ時
の想定としている。

震災時におけるネットワーク評価法には、震災直後のOD交通量の推定、その後の変化等にはじまり未
解明の問題が多い。このため、以上の諸前提を設定した。その結果、地震前後の交通需要は変化せず、観
測されたリンクフロー値を用いて、現実が発生した損傷ケースの他に仮想的な種々のネットワーク損傷
ケースを比較計算していることになる。すなわち、通常交通需要が通常交通変動のもとで損傷した
ネットワークに殺到した場合を想定し、ネットワーク増強による信頼度向上効果を評価している。

得られた結果を表-3.9.3に示す。この結果はピーク時交通に対応している。平常時の信頼度(BASE)お
よび、神戸線・湾岸線・43号(の1/2容量)・中国道が通行不能となり2号が代替経路となって迂回交通を
引き受けた場合(CASE6:今回の地震に相当する)、およびその中間的な被害想定について信頼度を計算し
ている。この表では、横方向に追加していく経路を表現している。例えば、BASEケースでは、国道2号、
43号のみでは連結信頼度は約0.49であり、これに阪神高速神戸線が追加されても信頼度に大きな変化が
ない。これは、2号、43号、神戸線では渋滞が発生し、平常時でも連結信頼度があまり高くないことが
わかる。さらに阪神高速湾岸線を経路として追加すると、同線に容量的な余裕があるために信頼度が1.0
となり、信頼度が格段に向上することがわかる。表の右2列は、これらの経路に中国道から六甲山北側
ルートを使用した経路を加えた場合である。また、確率重要度はきわめて多数(ケース毎にリンクの数だ
け)算出されるため、最も高く算出された経路のみを示している。また、CASE1では、六甲山北部ルート
によって信頼性は向上するが、そのルートが中国自動車道の信頼度に大きく依存するため中国道の確率重

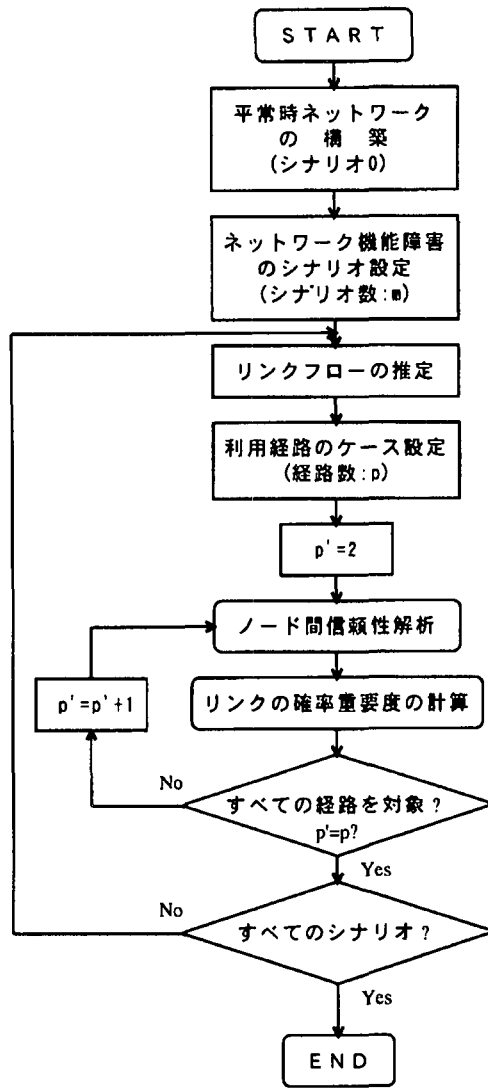


図-3.9.3 ネットワーク信頼性評価のフロー

要度が大きく算出され、何らかの対策が必要等のことが明らかとなった。また、CASE2以下では、迂回交通量が大きいために、六甲山北部ルートによっても信頼性は大きくは向上しないことがわかる。しかしこの場合も、中国道の確率重要度は大きく算出されるので、このルートの信頼度を維持することが重要である。

このように、信頼性指標と確率重要度を用いることでネットワークのサービスの質的水準が評価できることがわかる。確率重要度の高いリンクでは、そのリンク信頼度の低下がノード間信頼度の低下に大きく寄与するために、信頼度の維持の重要性がより高いといえる。すなわち、この指標を耐震強化の基準や費用制約のもとでの優先度の決定に用いることができる。また、当該区間の冗長性を高める必要性もあるといえる。

表-3.9.3 兵庫県復興ネットワークの信頼度と確立重要度の高いリンク
(連結信頼度：大阪～三宮，時間係数0.10)

想定ケース	追加経路	国道2号+国道43号	+阪高神戸線	+阪高湾岸線	+名神・阪高	+中国・北神戸・TN	+中国・東神戸・43
BASE	全リンク健全	0.4849	0.4849	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	確率重要度	2号(0.6046)	2号(0.6046)	湾岸(0.5151)	湾岸(0.5151)	湾岸(0.0793)	湾岸(0.0097)
CASE1	神戸線のみ不通 代替：2号，湾岸 (43号余力なし)	0.0095	0.0095	0.2800	0.2800	0.5735	0.5735
	確率重要度	43号(0.0392)	43号(0.0392)	湾岸(0.4776)	湾岸(0.4776)	中国道(0.5868)	中国道(0.5868)
CASE2	神戸線・43号不通 代替：2号，湾岸	0.000006	0.000006	0.000006	0.000006	0.00005	0.00005
	確率重要度	2号(0.0001)	2号(0.0001)	2号(0.0001)	2号(0.0001)	中国道(0.0062)	中国道(0.0062)
CASE3	神戸線・43号1/2不通 代替：2号，湾岸	0.0021	0.0021	0.0063	0.0063	0.0237	0.0237
	確率重要度	43号(0.0097)	43号(0.0097)	湾岸(0.0378)	湾岸(0.0378)	中国道(0.2207)	中国道(0.2210)
CASE4	湾岸線のみ不通 代替：神戸線	0.4849	0.4849	0.4849	0.4849	0.5522	0.5522
	確率重要度	2号(0.6046)	2号(0.6046)	2号(0.6046)	2号(0.6046)	2号(0.5256)	2号(0.5256)
CASE5	中国道のみ不通 代替：湾岸線	0.000006	0.000006	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
	確率重要度	2号(0.0001)	2号(0.0001)	湾岸(0.0476)	湾岸(0.0476)	湾岸(0.0476)	湾岸(0.0476)
CASE6	神戸・湾岸・43・中国全滅 代替：2号	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	確率重要度	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)

3.9.6 まとめ

本節では、阪神淡路大震災における交通システムの問題点を議論した上で、道路網の連結信頼性を計算し、信頼性を向上する観点から重要な区間を確率重要度で評価する方法を示した。本節での成果は以下のようにまとめられる。

(1) 阪神淡路大震災における交通システムの被害特色は、都市交通と国土幹線交通の両交通システムが狭い地域に集中していたため、地域レベルおよび全国レベルで大きな影響もたらされたこと、また、立体交差部分の落橋が2つの交通システムの同時共倒れのシステムダウンを多数引き起こした点である。これらを、都市交通ネットワーク、国土幹線交通ネットワーク、地区内交通ネットワークに分類して議論した。

(2) 日米における最近の都市地震を、経済活動への影響度とネットワークの損傷の程度の2軸で分類し、阪神・淡路大震災の位置づけを明らかにした。さらに、道路網における信頼性の重要性を述べ、信頼性の高い道路網構築のための要件を整理した。

(3) 信頼性解析に関する従来の研究をレビューした後、交通フローの変化を内生化して道路網の信頼性解析を行う方法を示した。ノード間信頼度とリンクの相対的重要度を示す確率重要度解析を算定する方法を示した。この方法は、リンクの平均交通量と交通容量からリンク信頼度を簡便に推定でき、1回の交通量

配分のみでノード間信頼度が推定できる構造となっている。このため、交通量の推定手法に組み込んでネットワークの信頼性解析を簡便に行えるという大きな特徴を有している。ネットワークの交通状態のケース間比較、交通管理運用策の代替案比較等に有用である。

(4)簡単なネットワークの立体交差部の重要度を定量化し、さらに兵庫県の現況および復興道路網に対し、被害想定シナリオを多数設定し、信頼性と確率重要度の計算を行った。得られた結果の概要は、①六甲山北部ルートによって神戸市への連結信頼性は向上するが、②①のルートが中国自動車道の信頼度に大きく依存するため中国道の重要度が大きく算出され、何らかの対策が必要等が明らかとなったことである。

最後に、今回の地震での教訓は、道路網と道路構造は平常時からもっと余裕のある計画を実現する必要があることである。わが国の道路網は、その容量ぎりぎりの状態で運用されているとあってよく、またリーズナブルな代替経路はあまりない。また、大量輸送機関も混雑した状態で運行がなされており、道路交通を代替する余力はあまりない。このようなわが国の状況においては、予めよく計画された道路網運用策を構築しておかないと、災害時には再度、交通の大混乱が予想される。効果的な防災交通計画のため、災害時交通計画の体系的な研究が望まれる。

3.10 上水道管路の被害解析に基づく耐震診断法の開発

3.10.1 はじめに

昨今、大地震が相次ぎ、その度に水道管路などの地中埋設管の被害が報じられている。水道管路の破壊は直接人命を奪うことはないが、火災などの二次災害の拡大を招くと共に飲料水の断絶が地震後の生活を困難なものとする。このような被害を防ぐためには水道管路の耐震化を推進する必要があるが、既存の管路網を即時に耐震化することは、時間的、経済的制約から極めて難しいと言える。

そこで本研究では、兵庫県南部地震の被害事例を基に地震による被害を受ける可能性の高い地域を特定するとともに、液状化による被害が顕著に発生したポートアイランドの水道管路網と、激震地域に含まれた東灘区の一部の管路網を対象として、地盤の永久変位と地盤ばね定数の低減を考慮した水道管路の応答解析を実施し、それらの結果より被害を受ける可能性の高い管路を特定するための水道管路耐震診断法を開発する。

3.10.2 上水道管路耐震診断手法

診断手法のフローを図-3.10.1に示す。診断は簡易診断法および詳細診断法の2段階から成る。

(1) 簡易診断法

簡易診断法では、地盤条件を基に地震被害危険度の推定を行う。本研究では、標準貫入試験、表層地質図、活断層履歴図などの既存データより得られる、表層付近の N 値、微地形、液状化の有無、活断層の有無を地盤条件として用いる。これらの各指標に対して危険度のランク付けを行い、診断地域の危険度マップを作成する。さらに、これらのランクを足し合わせることで総合危険度マップを作成し、これにより診断地域の危険度を算出する。なおこの手法は上水道のみならず、他のライフラインについても適用できる。

(2) 詳細診断法

詳細診断法では、上水道管路網に対して修正伝達マトリックス法を用いた地震応答解析を行う。本研究では埋設管路網の解析を応答変位法で行い、管路に作用する断面力、継手部における変位量、回転量を算出することで、安全性の照査を行う。解析は管路網全体に対し同時に行う。応答変位解析に必要な地盤入力変位は、本解析では以下のように算出する。

1. 想定断層より、設計基盤面における入力地震動を設定する。
2. 重複反射理論を用いてボーリング点における地表面加速度を算出し、2回積分することによってボーリング地点ごとの地表面変位を求める。
3. 各ボーリング地点のある時刻における地盤変位量をKriging法を用いて空間的に補間し、解析管路網に沿った地盤変位分布を求める。

ただし、液状化地盤であるポートアイランドにおける応答変位解析は、今回の解析ではポートアイラ

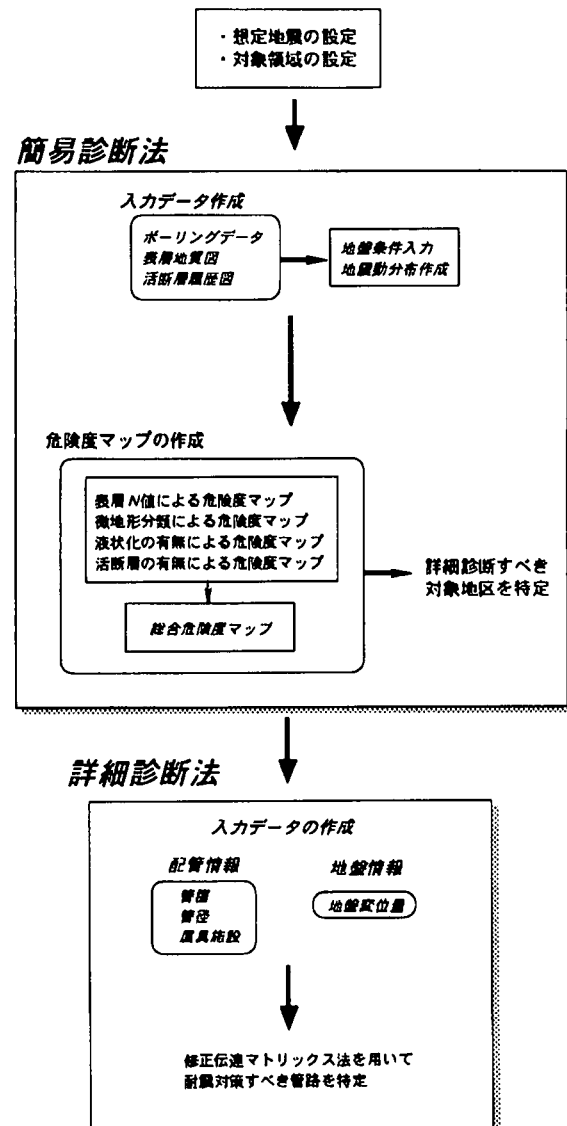


図-3.10.1 診断フロー

ンドの地盤変状図⁶²⁾から解析対象管路周辺の水平変位量、地盤沈下量を読み取り、Kriging法を用いて補間したものを管路に作用する入力地盤変位量としている。

3.10.3 兵庫県南部地震におけるケーススタディ

(1) 簡易診断法

3.10.2で示した地盤条件を基に地震被害危険度の推定を行う。対象領域としては神戸市および周辺市街地とし、各指標に危険度ランク付けを行ったあと、診断地域の総合危険度マップを作成する。指標ごとの危険度ランク付けは以下のようにする。すなわち上水道配水管の敷設延長距離あたりの被害数⁶³⁾より求めた被害率(件/km)を基に、危険度ランクを危険性小(ランク1)、危険性大(ランク2)の2段階とする。

本研究では、各要因のランク分けの基準として地震直後の機能停止を示す断水率(断水戸数/全給水戸数)を用いる。図-3.10.2に近年の地震による上水道配水管被害率と断水率の関係を示す⁶⁴⁾。図より配水管被害率0.2件/kmを境に断水率が急激に変化し、0.8件/kmを越えるとはほぼ完全に断水すると言える。したがって、今回の診断では各要因の危険度ランク分けの境界値を上水道配水管被害率0.8件/kmと設定する。

a) 表層N値による危険度マップ

神戸市および周辺市街地における地表面から地下5mまでの平均N値⁶⁵⁾と、そのメッシュ内における上水道配水管被害率の関係を図-3.10.3に示す。図に示すように表層N値5以下を除くと、N値が大きくなるに従い被害率が減少する傾向が見られる。表層N値5以下の被害率が0.29件/kmと低い値となった理由としては、軟弱地盤における液状化対策としてS型、S-II型と呼ばれる耐震継手を採用した管路が多く敷設されているからであると考えられる。以上より危険度ランクは平均N値20以上をランク1に、それ以下をランク2に設定する。

b) 液状化による危険度マップ

神戸市および周辺市街地における液状化分布と上水道配水管被害率の関係を図-3.10.4に示す。液状化分布については、航空写真等による調査結果⁶²⁾を基にメッシュ化したものである。図に示すように液状化が上水道被害に対して大きく影響することが分かる。今回の解析では、

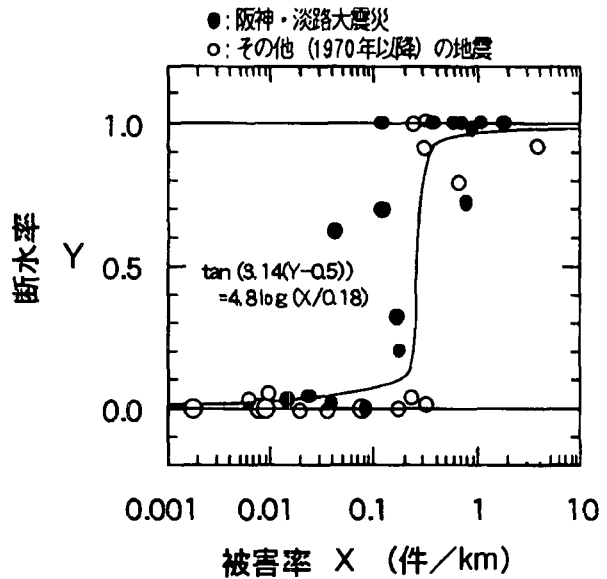


図-3.10.2 上水道配水管被害率と断水率の関係⁶³⁾

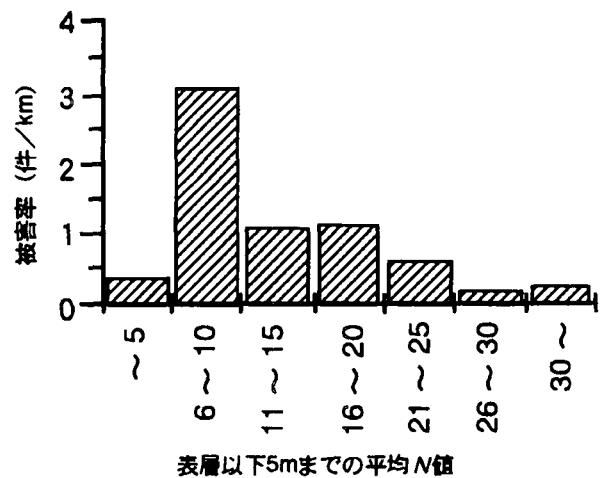


図-3.10.3 5mまでの平均N値と配水管被害率の関係

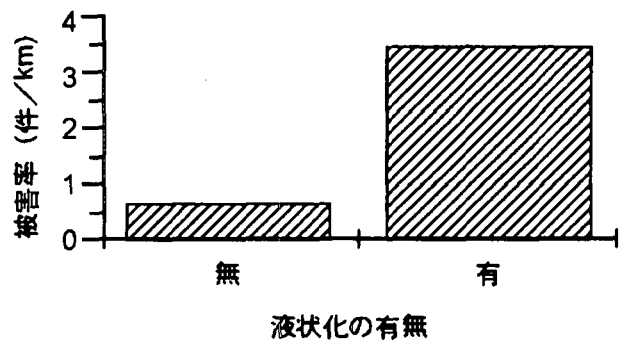


図-3.10.4 液状化の有無と上水道配水管被害率の関係

液状化予測結果を用いる代わりに液状化の痕跡を用いた。すなわち、危険度ランクは液状化の痕跡がないところをランク1に、液状化の痕跡のあるところをランク2に設定する。

c) 微地形による危険度マップ

神戸市および周辺市街地における微地形分布と上水道配水管被害率の関係を図-3.10.5に示す。微地形分布は、航空写真及び2万分の1古地形図から作成された調査資料⁶⁶⁾を基にメッシュ化したものである。図に示すように、埋立地などの比較的形成年代の新しい地盤での被害率が高く、山地斜面、段丘地形の被害率が低くなっている。したがって山地斜面、低位・高位扇状地段丘を危険度ランク1に、それ以外をランク2に設定する。

d) 活断層による危険度マップ

兵庫県南部地震は、淡路島から神戸市にかけての断層が活動したことによる直下型地震であった。そのため、本診断では活断層の存在が被害要因となると考え、活断層分布図⁶⁷⁾と上水道配水管被害率の関係を求めた(図-3.10.6)。図に示すように断層のある地区では、被害率がやや高くなっていることが分かる。

したがって、危険度ランクは活断層が分布していないところをランク1に、活断層のあるところをランク2に設定する。

e) 総合危険度マップ

以上4要因の危険度マップを重ね合わせた総合危険度マップ上に上水道被害率をプロットしたものを図-3.10.7に、総合危険度と上水道被害率の関係を図-3.10.8にそれぞれ示す。本研究では危険度マップを4枚重ね合わせて診断を行うことから、総合危険度ランクの最小値は4、最大値は8となる。図-3.10.7に示すように解析対象地域では危険度8という地区は現れなかった。また、図-3.10.8に示すように危険度が高くなるに従い被害率も高くなることから、本解析により耐震対策すべき管路網が特定できることになる。

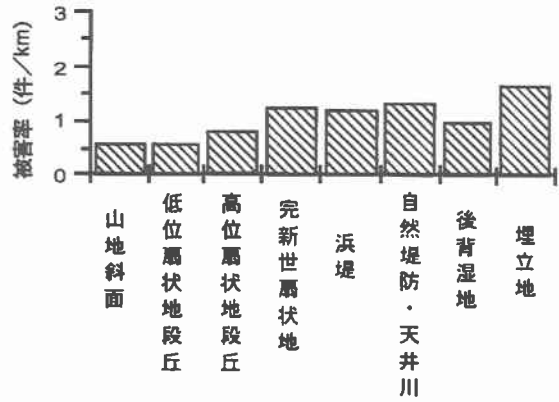


図-3.10.5 微地形と上水道配水管被害率の関係

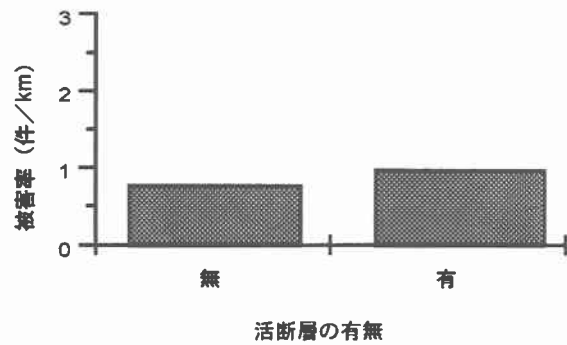


図-3.10.6 活断層と上水道配水管被害率の関係

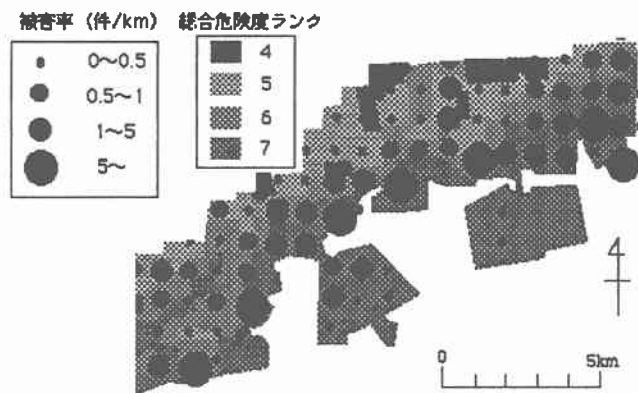


図-3.10.7 総合危険度ランク

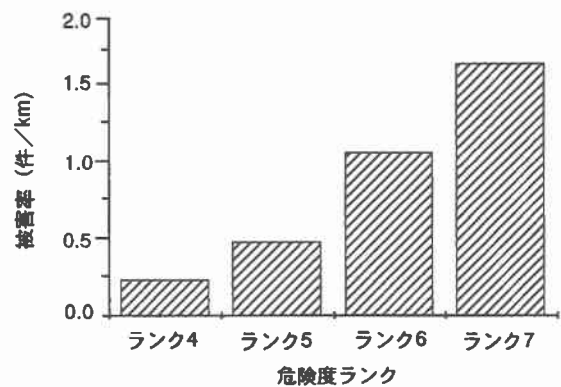


図-3.10.8 総合危険度ランクと上水道被害率の関係

(2) 詳細診断法

簡易診断の結果を基に詳細診断すべき上水道管路網を特定し、それらに対して応答変位法による地震応答解析を行う。解析手法としては、梁状構造物の解析に適している修正伝達マトリックス法⁶⁸⁾を用いる。修正伝達マトリックス法は伝達マトリックス法を精度的に改善したものである。対象領域は、簡易診断法で診断した地域のうち危険度ランクが高く、かつ被害事例が多く報告された地域とし、液状化による地盤変状の報告があったポートアイランドにおける上水道管路網と、そのような報告のなかった神戸市東灘区における上水道管路網とする。入力変位については、液状化による影響を考慮する場合には地盤変状図⁶²⁾から読み取った地震後に観測された地盤の永久変位量を、地震動による影響を考慮した場合にはポートアイランド地下83mでの強震記録を距離減衰を考慮し補正した波形に対し、重複反射理論を用いて求めた地表面変位を空間的に補間した値とする。解析の結果得られる曲げ応力、せん断応力は管体部の破損に、継手部の変位は継手部の離脱に対する安全性の照査としてそれぞれ用いる。

1) 液状化による地盤ばね定数の低減を考慮した管路の応答解析

a) 被害概要

図-3.10.9にポートアイランドの上水道管路の被害地点を示す。ポートアイランドの上水道管路の被害はすべて一般継手A、K、T型を有するダクタイル管であり、その被害形態のほとんどが継手の抜けによる漏水であった。耐震継手であるS、S-II型を有する管路においては被害が発生しなかった。また、この辺りの地盤は埋め立て地であるため、液状化による被害が激しく、地盤の永久変位や墳砂がポートアイランドのほぼ全域にわたって観測された。全体的に内陸部から護岸に向かって地盤が変形しており、護岸付近では2~3mにも及ぶ永久変位が生じていた。上水道管路は液状化による地盤の変形に追随させられて破壊したものと思われる。

b) 解析結果

ポートアイランドの上水道配管図において、管路が交差する点と点の間の直線部分で管の破壊が確認されている場合、その区間をひとつの解析対象地点とした。それぞれの解析地点について管路に永久変位量を作用させ、その応答値について検討した。その際、地盤ばね定数の低減係数として1.0、0.1、0.01の3種類の値を用いて解析を行った。また、ポートアイランドではほぼ全域にわたって墳砂や永久変位の被害が見られているので、地中埋設管周辺地盤はすべて液状化しているものと考えた。

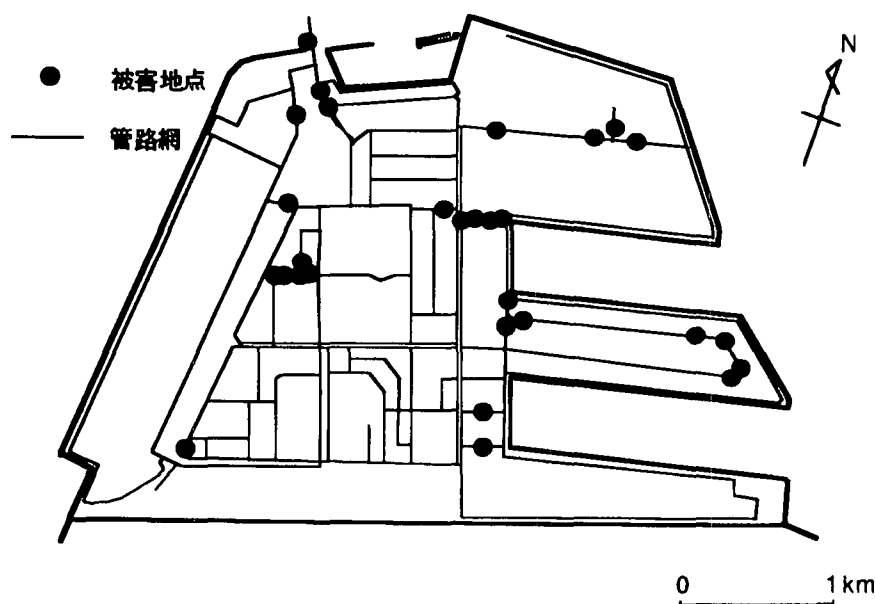


図-3.10.9 ポートアイランド管路被害地点

図-3.10.10(a)、(b)、(c)は管路に作用させた地盤の永久変位量から算出した、管軸方向、管軸直角方向、管軸鉛直方向の地盤最大ひずみと管路継手部分での最大引き抜け量との関係を示したものである。ポートアイランドで破壊した管路の継手種類はすべてA、K型であり、これらの許容引き抜け量は38mmである。図より、低減係数に関係なく、引き抜け量と管軸方向の地盤最大ひずみとの間にはほぼ比例関係の傾向がみられるが、その他の方向の地盤最大ひずみと引き抜け量の間にはあまり相関は見られない。このことから継手部の破壊は管軸方向の地盤ひずみと関係が深く、管軸方向の地盤ひずみから継手部の破壊を推定することができると考えられる。しかしこの場合には、液状化した地盤を表現するための地盤ばね定数の低減係数を推定しなければならない。

図-3.10.10の(a)、(b)、(c)を比較すると、地盤ばね定数の低減係数が小さくなるに従って、応答値である継手の引き抜け量が小さくなっていることが分かる。そこで、管路に軸方向のみの地盤ひずみを与えて、ばね定数を低減させていき、そのときの引き抜け量が許容引き抜け量と同じ値になるときの低減係数を解析的に求めた。また一方で、実際に観測された3方向の地盤のひずみを管路に与え、同様にすればね定数を低減させた。その両者を比較した結果が図-3.10.11であり、軸方向地盤最大ひずみと低減係数の関係を示している。図中の点線が前者の軸方向のみの結果、実線がポートアイランドでの実際のひずみを与えた結果を表している。図-3.10.10(a)、(b)、(c)より、同じ地盤最大ひずみが作用した管路では、低減係数が低いほど管路の応答値が低くなることがわかったので、図-3.10.11の任意の低減係数において、図中の線より大きい軸方向ひずみが管路に与えられれば、管路に破壊が生じることを表している。同図より、軸方向にのみひずみを与えた場合と、実際の観測されたひずみを与えた場合の結果では、同じ軸方向の地盤最大ひずみに対して、後者の方がより小さい低減係数で継手部を破壊することが分かる。

ポートアイランドで破壊が確認された管路における軸方向の地盤最大ひずみの平均値は0.8%であった。図-3.10.11における実線でこの値に対応する低減係数を調べると0.3になり、

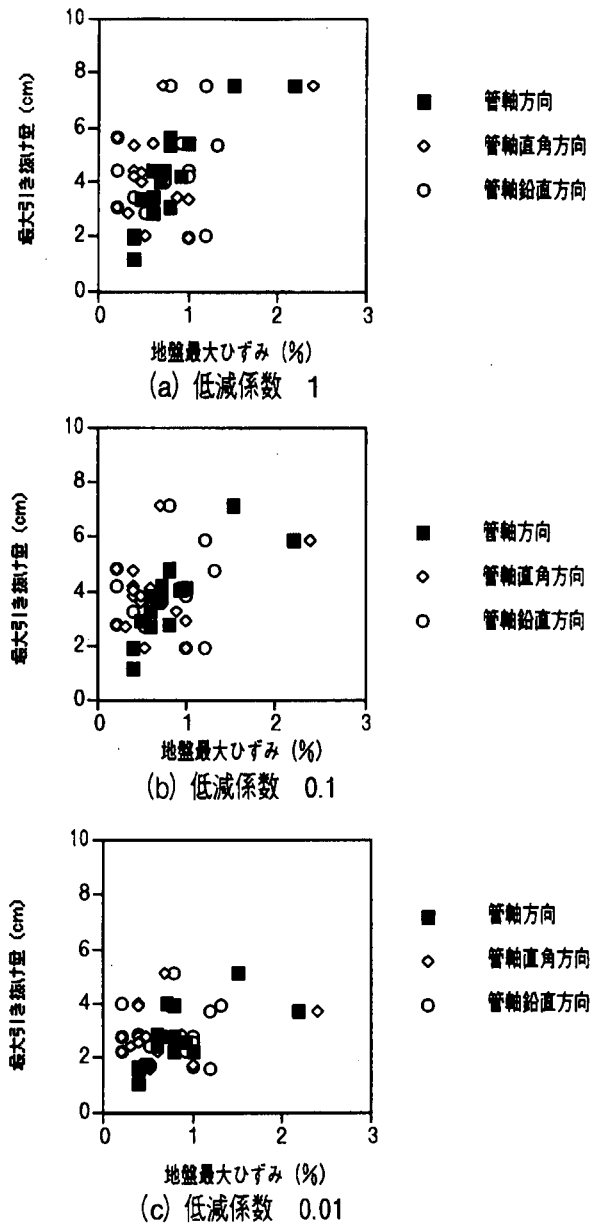


図-3.10.10 地盤最大ひずみと継手引き抜け量の関係

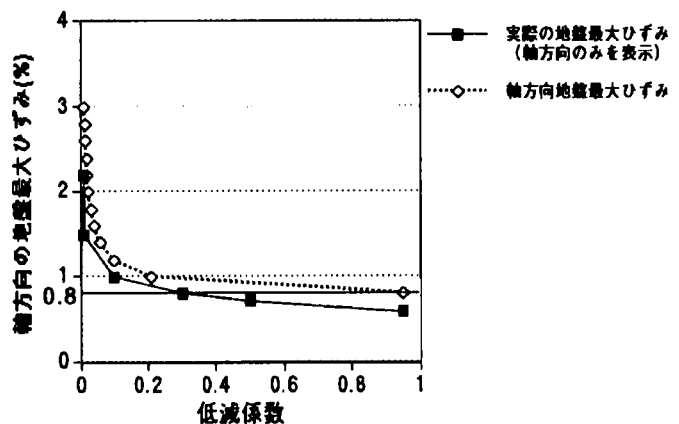


図-3.10.11 地盤最大ひずみと低減係数の関係

低減係数0.3以下の値では管路は破壊に至らず、0.3以上では破壊に至ることになる。したがって、平均的には管路周辺の地盤ばね定数の低減係数は0.3以上であったと考えられる。

2) 非液化化地盤における管路網の応答解析

a) 被害概要

図-3.10.12に東灘区の解析対象管路網を示す。管路はA、K型継手で連結されたダクタイル管である。属具施設破損、管体破損、継手の抜けなどの管路の被害が主に異形管付近で発生していた。この辺りは激震地域であると言われており、管路は地震動による地盤の変位に追従させられて破壊したものと思われる。

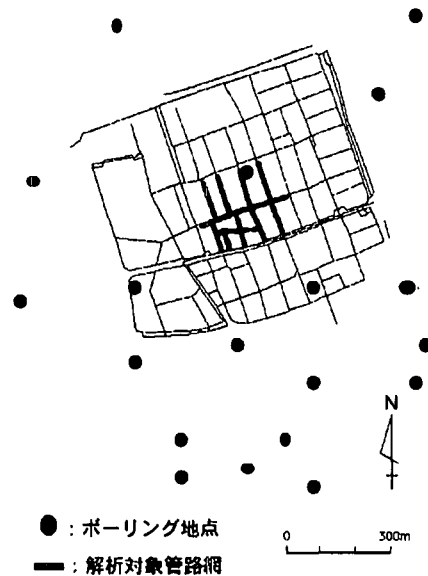


図-3.10.12 東灘区解析対象管路とボーリング地点図

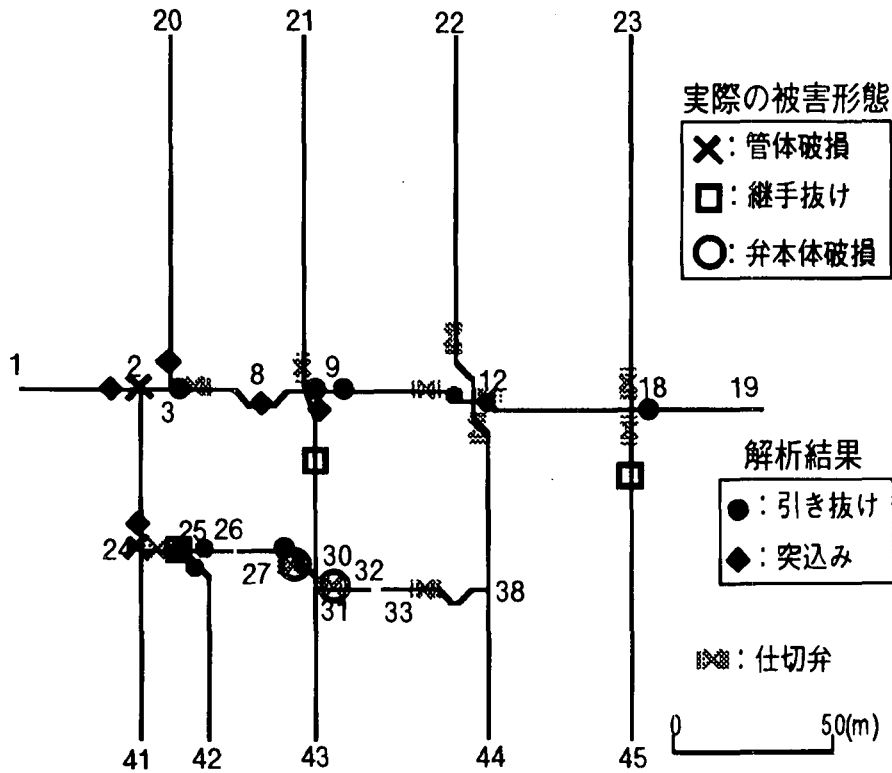


図-3.10.13 実被害と解析結果の比較

b) 解析結果

図-3.10.13は解析対象管路網において実際に確認された管路網の被害形態とその被害位置、解析結果による被害形態とその被害位置をまとめたものである。なお、図中の番号は、管路が交差する部分の節点番号である。

図-3.10.13の解析結果より、管路の破壊はT字や十字管などの異形管付近で発生しており、実際の被害箇所と良い対応を示している。しかし、各々の破壊形態について見ていくと実際のものと解析の結果によるものに食い違いがある。

節点番号2、3付近の管路では実際の被害形態は管体破損であるが、解析結果は継手の突っ込みとなっている。これは解析で継手特性をばねでモデル化した際、線形ばねとしたのでどこまでも突っ込みを起こすことが可能となり、管体の応力は継手部で逃され、管体破損が表現されなかったものと思われる。継手部のばねのモデル化に工夫を加えれば、管体破損が表現できたものと思われる。また、節点番号27付近の仕切弁周辺で継手の引き抜け破壊が解析結果として表現されているが、実際の被害調査では、仕切弁周辺の継手の破壊も仕切弁の破損と表記される場合もあるので、破壊をある程度は表現することができるものと考えられる。

3.10.4 まとめ

簡易診断法では、診断指標として表層N値、液状化、微地形、活断層の4指標を用い、それぞれ作成した危険度マップを総合することにより、総合危険度を求めた。その結果、この手法を神戸地区に適用したところ、診断対象地域における危険地区が特定できることが示された。

詳細診断法においては、修正伝達マトリックス法による地震応答解析を、T字、十字、曲管等の異形管を含む上水道管路網全体に適用することにより管体部、継手部の安全性を照査した。その結果として、液状化地盤を対象とした解析では、

- ①管路の破壊は軸方向の最大地盤ひずみと関係が深い。
- ②地盤ばね定数の低減係数が小さくなるに従って、管路の応答値は小さくなる。
- ③本解析によれば、ポートアイランドにおいては管路周辺の地盤ばね定数の低減係数は、平均的には0.3以上であろうと考えられる。

また、地震動による管路の影響を検討した結果より、

- ④管路の破壊はT字や十字管などの異形管付近で発生しており、本解析によって、破壊をある程度表現することができる。

3.11 水供給システムの地震リスク分析と適正防災投資

3.11.1 リスク管理の概念

リスクマネジメント(危機管理)は、1930年代のアメリカ社会に登場した経営管理手法で、その後、1970年代に企業リスク全般を対象に体系化された。リスクという用語は、さまざまな概念で把握されているが、損害の発生するプロセスとして、危険事情(ハザード)・危険事故(ペリル)・危機(リスク)・損害(ロス)を取り上げるのが一般的である。ハザードとは、特定の危険事故(ペリル)の原因となる種々の危険事情で、損害の遠因を構成する。ハザードには社会の動態的変動にかかわる動態的ハザードと、それにかかわらない静態的ハザード(例えば、地震、暴風雨、洪水、火災など)に分けることができる。他方、ペリルは損害の原因そのもので、人的損害、物的損害または責任損害などに対する直接的原因である。したがってリスクとは、人または物に対する経済的不利益発生の客観確率、言い換えれば危険事故発生に伴う損害発生の可能性といえることができる。このように安全をおびやかす損害にいたる過程を科学的に分析し、客観的なデータと正確な論理に基づいて適切な対策を立てることが極めて重要である。そのために、リスク管理(リスクマネジメント)と呼ばれる、危険を不確定性として捉え科学的に管理する手法が発展してきている。基本的にはそれら危険のもつ不確定性を現在の確定的費用に置き換えることで、合理的に処理しようとする手法である。水供給システムを含む社会基盤施設をその総合的な枠組みの中でリスクを評価し、低頻度巨大災害に対する防災投資の費用対効果を定量的に分析、検討することで、それら地震防災対策の説得力を高めることができる。そのために、社会基盤施設における地震に対する危険をリスク管理の一連のプロセスとの同定を行うことで、それら不確定性を科学的に処理する必要がある。さらに、これらの地震リスク分析を実行することによって、地震防災対策の意思決定を支援することが可能となる。

3.11.2 水供給システムにおけるリスク管理

本項では水供給システムにおける地震リスクに対して、従来の物理的な対策にとどまることなく幅広い観点から費用対効果の高い対策を採用することの必要性を述べ、それら対策を合理的に決定する手法を提案する。図-3.11.1に地震リスク分析のフローを示す。この際、リスク管理の目的は地震による被害の軽減を図るために、水道事業者管理者が採るべき地震防災対策を効果的に実施することである。

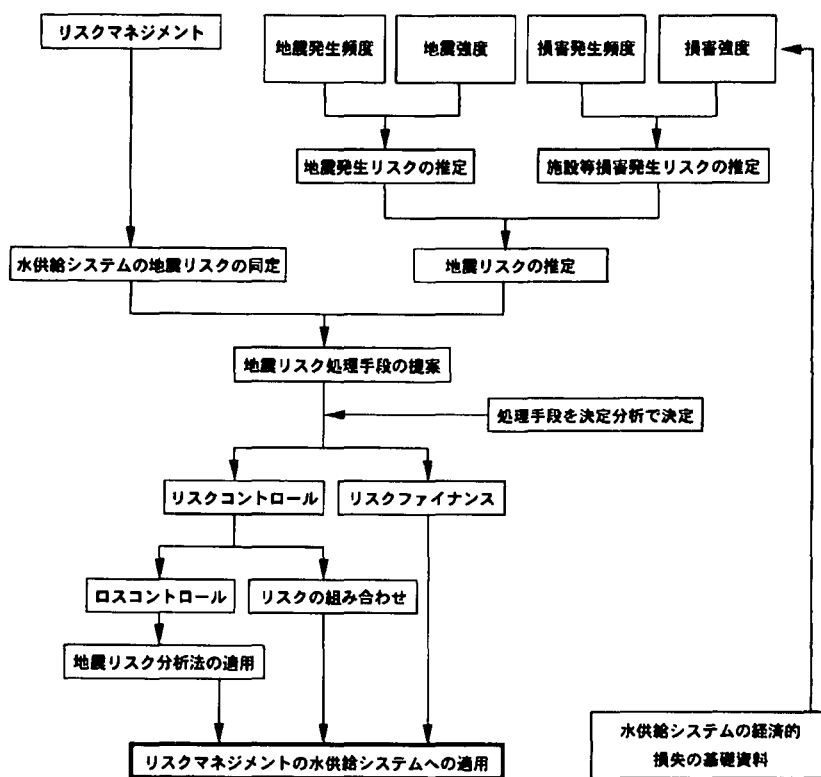


図-3.11.1 地震リスク分析のフロー

地震によって水供給システムに生ずるリスクは表-3.11.1で示される。ここで対象としている地震リスクは地震発生リスクと、地震に伴う損害発生リスクに分けて考慮される。とくに送配水管路に着目すると管路に生ずる被害は管路上で一様かつランダムに発生するものと仮定すると平均発生率は地震動強度、地盤特性ならびに口径に依存するものと判断できる。この場合、損失(ロス)は確率量で表される管路被害修復費である。兵庫県南部地震における分析結果から損失は管路口径に最も依存することが知られている。かかるリスクを回避すること(例えば水供給事業を継続しない)は不可能である。ただし、とくにある地域で被害が起こる可能性が高いことが分かっている場合に(例えば、液状化対策が施されていない埋立地など)水供給を停止し、他地域へ需要者を移転することも考えられるが現実的には難しい。従って、ロスコントロール、リスクの組み合わせによってリスクコントロールを行う必要がある。表-3.11.2に処理手段とそれに伴う具体的な内容を示す。

表-3.11.1 水供給システム地震リスク

(a) 有形資産			
損失の客体	ペリルと損失形態	ハザード	
取水施設	地震動による設備の損傷	高いレベルの地震動	
	地震動による施設の損傷	耐震性の不備	
	液状化による施設の損傷	地盤改良の不備	
	停電による稼働停止	電力供給停止	
ポンプ施設	地震動による設備の損傷	高いレベルの地震動	
	地震動による施設の損傷	耐震性の不備	
	液状化による施設の損傷	地盤改良の不備	
	停電による稼働停止	電力供給停止	
浄水施設	地震動による設備の損傷	高いレベルの地震動	
	地震動による施設の損傷	耐震性の不備	
	停電による稼働停止	電力供給停止	
調整池施設	地震動による設備の損傷	高いレベルの地震動	
	地震動による施設の損傷	耐震性の不備	
	停電による稼働停止	電力供給停止	
導水管渠	地震動による管体破損	耐震管の不導入	
	地震動による継手破損	耐震継手の不導入	
	地震動による屈曲破損	高いレベルの地震動	
送水管渠	地震動による管体破損	耐震管の不導入	
	地震動による継手破損	耐震継手の不導入	
	地震動による屈曲破損	高いレベルの地震動	
配水管渠	地震動による管体破損	耐震管の不導入	
	地震動による継手破損	耐震継手の不導入	
	地震動による屈曲破損	高いレベルの地震動	
管理庁舎	地震動による設備の損傷	耐震性の不備	
(b) 無形資産			
管網図面	火災による焼失	消火設備の不備	
		二重保管の不備	
	管理庁舎の倒壊による滅失	耐震性の不備	
データ類	コンピュータ転倒による滅失	固定機具の不備	
		スプリンクラー破損	
	冠水による滅失	(スプリンクラーの)誤作動	
(c) 労働災害			
従業員	管理庁舎倒壊による死亡	耐震性の不備	
	超過勤務による過労死	復旧業務体系の不適切	
(d) 収益			
利益	供給停止に伴う水道料金収入の減少	地震対策の不備	
	復旧に伴う必要経費の増加	地震対策の不備	
(e) 賠償責任			
賠償請求者	賠償請求者の損害形態	賠償請求者の損失形態	リスクの発生要因
	管渠破損による家屋浸水	修理費用 代替費用	耐震性の不備 復旧作業の不適切

表-3.11.2 管路の地震リスク処理手段

リスク処理手段			内容例
リスク コントロール	ロスコントロール	発生頻度を下げる	敷設距離を短くする
			耐震管への敷設替え
		損害強度を下げる	液状化対策を施す
			漏水の早期発見機器開発
	リスクの組み合わせ	分離	資材の備蓄や規格化 復旧工事における競争入札の導入 管路の管理体制を特殊法人と共同管理とする
リスク ファイナンス	リスク保有		準備金の設定 国庫補助
	リスク転嫁		地震保険に転嫁
			管材メーカーと地震損害支払契約締結

上記の例における送配水管路のリスク処理手段の決定は図-3.11.2で示されるような決定樹木が利用される。リスク処理のための代替案 a_i があり、地震動 α が発生した時 (A) に x 箇所の管路被害が生じた場合 (B) に損失額の期待値を算出することによって代替案の採択有無を決定しようとする考え方である。上記の α 、 x は確率量とする。

この決定問題を解くためには決定樹木における各経路の損失を評価する必要がある。ここでの損失は ① 初期投資額 ② 維持管理費 ③ 地震に伴う損失額の 3つに大別される。ただし、これら損失額は時間価値を持つので、リスク管理対象の耐用年数や社会的割引率を考慮して評価しなければならない。同定したリスクすべてについて同様の決定問題を解くことで、各々の最適なりリスク処理手段が判断される。

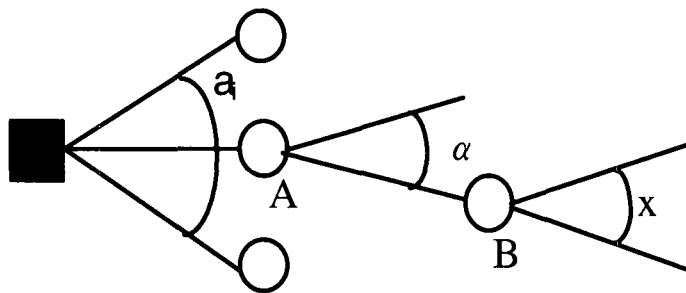


図-3.11.2 地震リスク処理手段検定のための決定樹木

3.11.3 送配水管路の地震リスク分析例と適正防災投資

図-3.11.3に水道管路(管路長1km、口径500mm)を分析対象としたときの事象樹木と損失を示す。ここで軽微な被害とは被害が1箇所である場合、重大な被害は3箇所以上ある場合とし、兵庫県南部地震の復旧費用記録から平均的に各々100[万円]、350[万円]としている。側方流動による損失は重大な被害の約7割と仮定して250[万円]とした。図-3.11.3に示すように管路の被害誘因事象として側方流動と震動被害の2つを考える。側方流動、震動被害の発生確率が図-3.11.4のような最大地盤加速度のフラジリティ関数で与えられるとすれば、ハザード発生確率を用いることによって図-3.11.3に示す任意のPGAに

対する条件付き期待損失が求まる。図-3.11.5からPGA400[Gal]に対して現状の期待損失は口径500[mm]の管路で1kmあたり約550[万円]であることが分かる。神戸市の配水管路総延長は約4,000[km]であるから概算220[億円]程度となる。神戸市水道局の被害によると管路の物理的被害額は183億円と推定されており、本推定額と良い一致を示す。これらハザードやベリルの発生確率、損失額は評価法や社会情勢に対する不確実性が大きいので精度向上を計ると同時に各パラメータに対する感度分析を行うことが必要である。

次に、ロスコントロールの代替案として側方流動対策(対策a)と耐震管導入(対策b)の2案の費用対効果を評価する。対策を行ったことで側方流動、重大な震動被害の発生確率が各々対策前の1/3、1/2になると仮定する。現状の条件付き期待損失に対する対策後の条件付き期待損失の割合を低減率と定義する。計算された条件付き低減率を図-3.11.6に示す。これにより、当該地域にPGA600[Gal]以上の地震が来襲する確率が低いのであるならば対策bを、PGA600[Gal]以上の地震が来る確率が高いのであれば対策aを採択するべきであることが分かる。防災対策の意思決定者が当該地域の地震危険度をPGA1,000[Gal]と判断した場合は図-3.11.5、図-3.11.6より対策aで約165[万円/km]、対策bで約150[万円/km]が投資限度となる。なお、面的に広がりを持った水供給システム全体に拡張するには取水施設から需要家までのリンク毎に期待損失を求めてその総和をとればよい。

地震発生	[被害程度]		損失[万円]
	側方流動被害	振動被害	
なし	あり	無被害	0
		軽微な被害	100
		重大な被害	350
		重大な被害	250

図-3.11.3 管路事象樹木

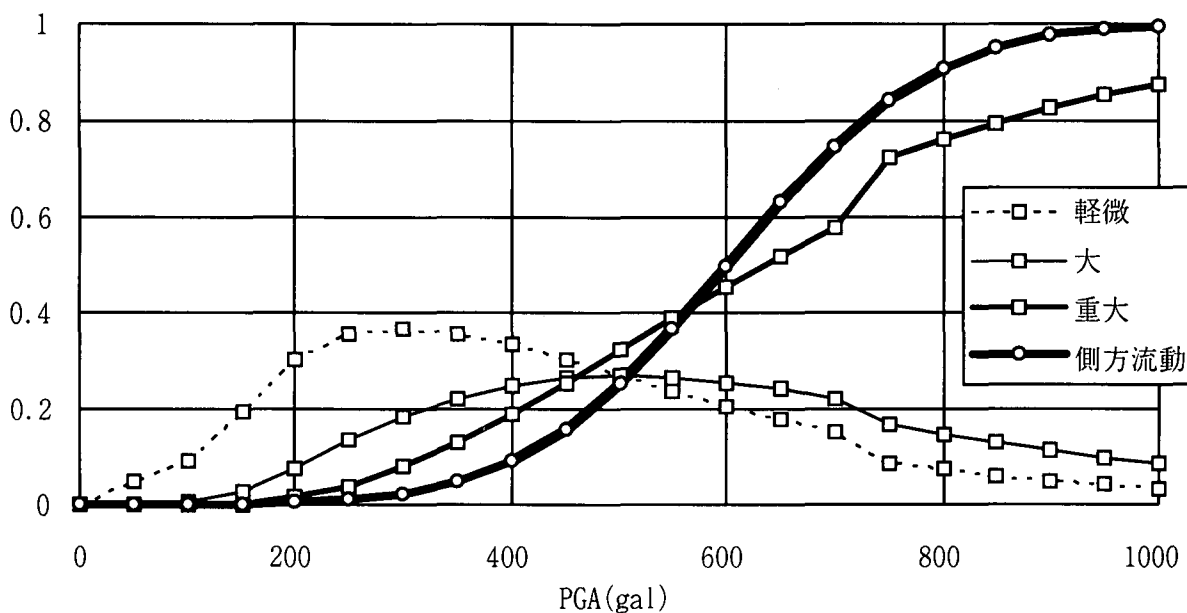


図-3.11.4 管路のフラジリティ関数

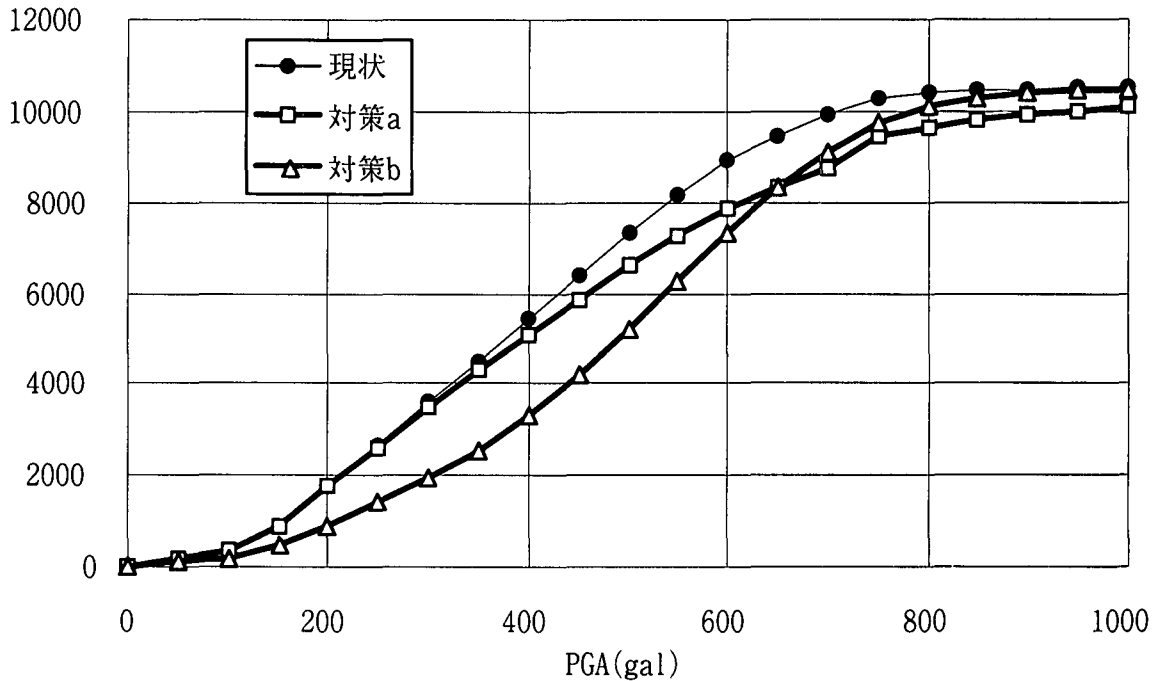


図-3.11.5 条件付き期待損失

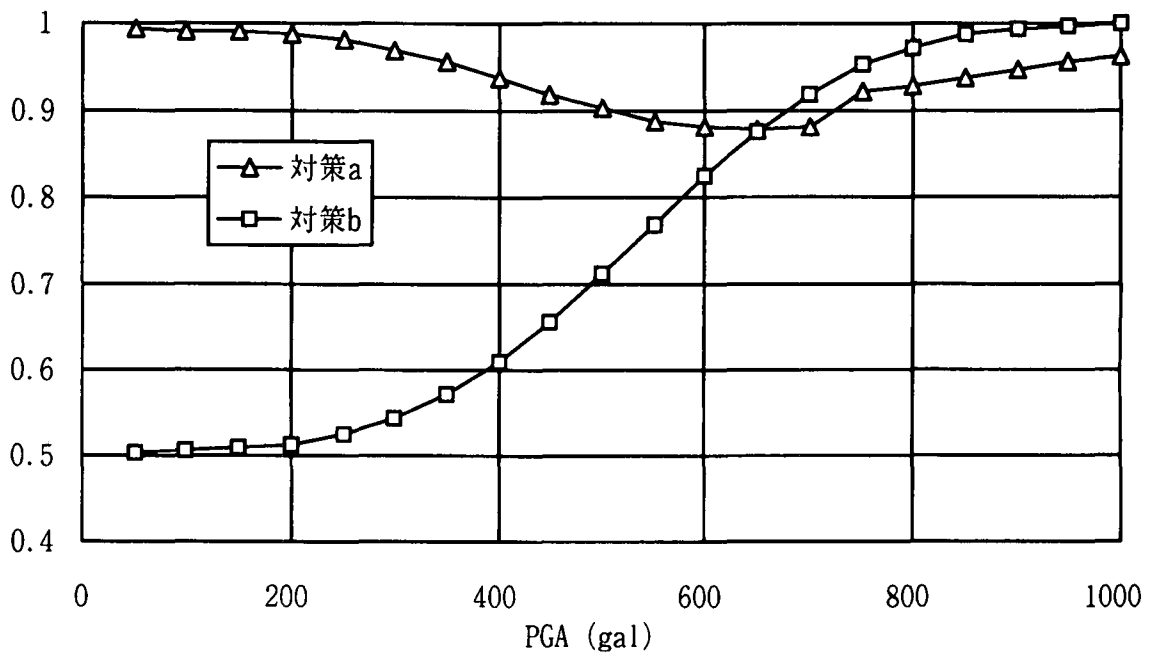


図-3.11.6 条件付き低減率

3.11.4 むすび

地震時における水供給システムの機能被災は不可避である。しかし、水供給システム全体の中で、どのサブシステムまたは要素が機能被災を不可避にする可能性があるのかを同定した上で、バランスのとれた防災投資を進める必要がある。そのために本文では水供給システムの地震リスク分析の考え方について紹介し、送配水管を例として最適防災投資の決定法について例題を示した。かかる地震リスク分析は過去の地震被災における事例とデータの集積があって始めて実施されるものである。兵庫県南部地震の際のデータを十分に吟味してかかる手法が防災対策の意志決定に適用されていくことを期待したい。

参考文献

- 1) 土木学会関西支部:都市地震防災からみたライフライン系の相互連関と災害情報システムに関する調査研究委員会(委員長:亀田弘行)平成3年度講習会テキスト、1991年。
- 2) 能島暢呂・亀田弘行:地震時のシステム間相互連関を考慮したライフライン系のリスク評価法、土木学会論文集、No.507/I-30、pp.231-241、1995年1月。
- 3) 能島暢呂・亀田弘行:ライフライン相互連関を中心とした阪神・淡路大震災の被害連鎖構造分析、第23回地震工学研究発表会講演概要集、pp.627-630、1995年7月。
- 4) 関西電力(株):阪神・淡路大震災復旧記録、1995年。
- 5) 野田茂:電気・ガス・通信システムの被災とその影響、鳥取大学工学部公開講座、1995年。
- 6) 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年。
- 7) a. 朝日新聞1995.2.23夕刊、b. 読売新聞1995.2.22大阪版朝刊、c. 読売新聞1995.7.15大阪版夕刊、d. 読売新聞1995.3.10大阪版夕刊、e. 毎日新聞1995.2.7兵庫版。
- 8) 日本病院学会:第45回日本病院学会講演集、「大災害と病院」1995年。
- 9) 細井由彦・上月康則・野田茂・能島暢呂:兵庫県南部地震における排除系システムの被害及び復旧プロセス、第23回地震工学研究発表会講演概要集、pp.639-642、1995年7月。
- 10) 大阪ガス(株)広報部:がす燈震災特別号「阪神大震災 ガス復旧の軌跡」、1995年。
- 11) 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年。
- 12) 野田茂・能島暢呂・細井由彦・上月康則:水道を中心とした阪神・淡路大震災の被害連鎖、土木学会論文集、No.556/I-38、pp.209-225、1997年1月。
- 13) 能島暢呂・亀田弘行:1993年釧路沖地震における都市ライフライン系のシステム間相互連関について、第22回地震工学研究発表会講演概要集、pp.427-430、1993年7月。
- 14) 細井由彦・上月康則・野田茂・能島暢呂:兵庫県南部地震における静脈系ライフラインの被害および復旧、阪神・淡路大震災に関する学術講演会、土木学会、pp.627-634、1996年1月。
- 15) 能島暢呂:交通システムの地震被害と災害対応について-1994年ノースリッジ地震と1989年ロマ・プリアタ地震の事例-、第1回地震防災シンポジウム、日本建築学会、pp.41-481、1994年10月。
- 16) サンケイリビング新聞社編:阪神大震災 主婦115人の証言、1995年。
- 17) 室崎益輝:火災、日経アーキテクチュア編「阪神大震災の教訓」、pp.85-89、1995年。
- 18) 神戸市消防局:阪神・淡路大震災における消防活動の記録、1995年。
- 19) 能島暢呂:「第6章 社会・住生活に及ぼす被害 6.3 ライフライン停止による生活支障」、1994年北海道東方沖地震・1994年三陸はるか沖地震災害調査報告、日本建築学会、pp.132-137、1996年9月。
- 20) 神戸市下水道局、宝塚市下水道部、神戸市水道局、尼崎市水道局、芦屋市水道部との私信による。
- 21) 神戸市下水道局:阪神・淡路大震災における下水道復旧の記録、1995年7月。
- 22) 環境庁環境法令研究会編:環境六法(平成6年度版)、中央法規、1994年2月。
- 23) 兵庫県阪神・淡路大震災復興本部保健環境部医務課:災害医療についての実態調査結果、1995年6月。
- 24) 神戸市環境局との私信による。
- 25) 月岡和紀・藤本護・亀田弘行・岩井哲・碓井照子・盛川仁(1996):兵庫県南部地震による西宮市の都市施設被害のGISデータベース化と多重分析、京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告、別冊第20号。
- 26) 岩井・亀田・碓井・盛川(1996):1995年兵庫県南部地震による西宮市の都市施設被害のGISデータベース化と多重分析、GIS-理論と応用、Vol.4、No.2、pp.63-73。
- 27) 亀田弘行・神田仁・杉戸真太(1990):震害要因とその経年的影響に基づく上水道の耐震健全度評価、構造工学論文集、Vol.36A、pp.813-825。
- 28) 国土庁(1995):防災白書、平成7年版。
- 29) 大阪ガス株式会社(1995):兵庫県南部地震に対する大阪ガスの対応状況について、資料、平成7年1月18日～。

- 30) 古田幸寛・能島暢呂・亀田弘行(1996): アンケート調査に基づく阪神・淡路大震災における生活機能障害の分析、土木学会年次学術講演会講演概要集、I-B378.
- 31) Capon, J. (1969): High-resolution frequency-wave number spectrum analysis, *Proc. IEEE*, Vol. 57, pp. 1408-1418.
- 32) 香川敬生・澤田純男・岩崎好規・南莊 淳 (1992): 常時微動アレー観測から見た大阪平野の地盤構造、関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シンポジウム発表論文集、pp. 127-134.
- 33) 和賀俊治・川崎慎治・西村敬一 (1996): 小アレー余震観測から推定された甲陽断層付近の基盤構造、都市耐震センター研究報告、京都大学防災研究所、別冊 18号、pp. 107-114.
- 34) 津野洋: 地震発生から現在までの経過および課題、第32回環境工学研究フォーラム講演集、シンポジウム「阪神・淡路大震災における環境衛生施設の被害状況と対策及び危機管理に関する提言」.
- 35) 土木学会: 第3章下水道、ライフラインの被害と復旧、阪神淡路大震災調査報告、1997.
- 36) 高田至郎: ライフライン施設全般、第32回環境工学研究フォーラム講演集、シンポジウム「阪神・淡路大震災における環境衛生施設の被害状況と対策及び危機管理に関する提言」.
- 37) 市川新: ライフラインの復旧について: 下水道を中心として、第32回環境工学研究フォーラム講演集、シンポジウム「阪神・淡路大震災における環境衛生施設の被害状況と対策及び危機管理に関する提言」.
- 38) 土木学会: 阪神大震災震災調査第二次報告会資料.
- 39) 月刊下水道、1995.
- 40) 土木学会土木計画学委員会 阪神淡路大震災調査特別小委員会: 道路交通分科会報告書、1997年6月.
- 41) 谷口栄一・則武通彦・山田忠史・国分潔: 震災による道路網容量の減少と新規路線の整備効果、土木学会シンポジウム「阪神・淡路大震災に学ぶ——土木計画からのアプローチ」pp. 217-222、1997年9月.
- 42) 宇野伸宏・飯田恭敬・谷口栄一・牛場高志: 阪神・淡路大震災後の道路網の機能低下と交通規制の影響、土木学会シンポジウム「阪神・淡路大震災に学ぶ——土木計画からのアプローチ」pp. 201-208、1997年9月.
- 43) 新田保次・松村謙慶・中村圭吾: 震災時の補完交通の特性——自転車・バイクと代替バスを中心として、土木学会平成8年度関西支部年次学術講演会講演概要集、pp. IV-73-1 - IV-73-2、1996年5月.
- 44) 藤原健一郎・朝倉康夫・柏谷増男: 道路ネットワークの階層性と信頼度の関係についての一考察、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、第4部門、pp. 50-51、1996年9月.
- 45) 若林拓史: 迂回交通量を考慮した阪神間道路網の連結信頼性評価と重要区間評価: 現況および将来道路網に対して、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp. 709-716、1996年1月.
- 46) 新田保次: 交通の相互補完システム-阪神・淡路大震災の教訓を踏まえて-、都市問題研究 Vol. 47, No. 12, 27-36、1995年12月.
- 47) 新田保次、松村暢彦: 代替バスを対象とした震災時の補完交通システムの特性、土木計画学研究委員会 阪神・淡路大震災調査研究論文集、363- 370、1997年9月.
- 48) 新田保次、松村謙慶: 地震後の鉄道復旧過程との関連で見た自転車・バイク利用特性、土木学会 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、673-676、1996年1月.
- 49) 松村暢彦、新田保次、西尾健太郎: 震災後の被災地域住民の通勤交通手段に関する分析、第2回土木学会阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、535-540、1997年1月.
- 50) 若林拓史: 地震災害時における道路網連結信頼性と確率重要度による耐震強化重要区間の決定法、土木計画学シンポジウム「阪神・淡路大震災に学ぶ——土木計画学からのアプローチ」阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集、pp. 237-246、1997.
- 51) 若林拓史: 阪神淡路大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価、土木計画学研究・論文集、No. 13、pp. 391-400、1996.
- 52) 若林拓史・飯田恭敬(1991): 交通管理運用策による道路システムの信頼性向上効果、土木計画学研究・講演集14(2)、51-54.

- 53) 飯田恭敬・若林拓史(1988):ODパターンと道路網パターンの相違による道路網信頼性のマクロ的考察、交通工学、Vol.23、No.3、9-19.
- 54) 若林拓史・亀田弘行(1995):ロマ・プリエタ地震後のサンフランシスコ湾岸地域の道路網運用の効果分析と災害時の道路網計画、都市計画論文集、No.30、91-96.
- 55) 建設省道路局企画課(1995):道路審議会答申『21世紀に向けた新たな道路構造のあり方』—新時代の“道の姿”をもとめて—について、道路交通経済、1995-1、No.70、21-22.
- 56) 飯田恭敬・若林拓史(1988):ブール代数を用いた道路網ノード間信頼度の上・下限値の効率的算出法、土木学会論文集、No.395/IV-9、75-84.
- 57) Transportation research Board(1985). *Highway Capacity Manual 1985*. Special report 209.
- 58) 土木学会(1995):阪神大震災震害調査緊急報告会資料、53-61.
- 59) 阪神高速道路起終点交通量調査報告書、阪神道路公団.
- 60) 高速道路統計月報、高速道路と自動車、Vol.38、No.1、92-95、1995.
- 61) 寺田幸紀・西村 昂・日野泰雄(1991):感知器データによる自動車交通量の変動特性の分析、平成3年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集、pp. IV-10.
- 62) Masanori Hamada, et al. : *The 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake, Liquefaction, Ground Displacement and Soil Conditions in Hanshin Area*, (財)地震予知総合研究振興会、1995.8.
- 63) 神戸市水道局:1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析、(社)日本水道協会、1996.5.
- 64) 川上英二:10kmに1箇所以上の被害が、上水道の機能を左右する、土木学会誌震災フォーラム、p.43、1996.1.
- 65) 神戸市都市整備公社:神戸の地盤、神戸市企画局、1980.3.
- 66) 日本地質学会・日本応用地質学会編:阪神大震災緊急合同報告会、1995.3.
- 67) 活断層研究会編:[新編]日本の活断層、東京大学出版会、1991.3.
- 68) 中村秀治:数値誤差の改善を考慮した伝達マトリックス法の提案、土木学会論文集、No.289、pp.43-53、1979.9.