

兵庫県南部地震による都市災害について

亀田 弘行

THE URBAN DISASTER CAUSED BY THE HYOGOKEN-NANBU EARTHQUAKE

By *Hiroyuki* KAMEDA

Synopsis

An overall view and observations are presented on the urban disaster caused by the Hyogoken-nanbu (Kobe) Earthquake of January 17, 1995, or the Great Hanshin Earthquake Disaster. First, complexity of the urban disaster in this earthquake is structuralized and illustrated. Then "inadequate seismic risk perception" that was said to prevail in the Kansai Region is discussed. The main part of the text deals with several engineering issues regarding damage of social infrastructures. A historical sketch is presented regarding the seismic structural design and technologies for engineering structures, and its implication to the damaged structures is discussed. Evidences of large structural deformation are shown to demonstrate excessive inelastic behaviors. Physical and functional damage to lifeline systems as well as system interactions among them are also described. Finally, importance of disaster information management is emphasized on the basis of a volunteer activity to assist a municipal office, and its future perspective is proposed.

1. はじめに

兵庫県南部地震による都市災害は、かつてない惨害を神戸市とその周辺地域にもたらした。本稿では、この複合災害の中で特徴的に現れた種々の事象に関する筆者の見解を示すこととする。

この地震とその災害は、少なくとも4つの名前で呼ばれている。気象庁が命名した「兵庫県南部地震」は自然現象としての地震を表すのに対し、政府機関が用いている「阪神・淡路大震災」は、被災地を平等に表すことを主旨とし、マスコミ報道で用いられる「阪神大震災」は、この地震による都市災害を表現する文脈で用いられている。さらに海外では、神戸の知名度が高いことから、もっぱら「Kobe Earthquake」と呼ばれている。このように、同じ地震に対して多くの名が用いられることは、それだけこの地震の影響が多面的で、社会的に大きな意味を持ったことの証であろう。本稿では、文脈に応じて、兵庫県南部地震または阪神大震災のいずれかを用いることとする。

以下の本文では、震災直後に行われたワークショップにより、大規模な複合災害として経験された阪神大震災の全貌を把握し、そこから提起されている防災課題を体系化した結果を紹介する。次に、近年の被害地震の来歴をふりかえり、我々の社会、特に関西において地震災害への認識の欠如を検証する。

続いて、いくつかの工学的課題について、今回の震災に関する見解を述べることにする。すなわち、耐震技術の発達とそれが果たした役割と問題点を論じたのち、道路橋と鉄道高架橋に見る構造物の弾塑性挙動を

紹介する。次にライフラインの被害の特徴、特にシステム間の相互連関の問題を論ずる。さらに、災害時の情報処理について、防災情報システムの観点から、筆者の災害後の情報ボランティア活動と、関連する経験に基づき、今後の課題を論ずることとする。

この震災における個々の被害については、詳細な被害調査報告が多数刊行されている。文部省科学研究費による突発災害調査（研究代表者：藤原佛三）の報告書¹⁾には、筆者も道路・鉄道・ライフラインの関連ですでに報告を行っている。また、神戸大学によりまとめられた報告書²⁾は、地元大学としての使命感が溢れ、またそれだけの優れた内容を持っていて特筆される。個々の被害の客観的記述はこれらの報告書にゆずり、本稿では筆者が特に関わりを持った事項に絞って、それらに関する見解と、今後へ向けての問題提起を述べることにしたい。

2. 阪神大震災が提起した防災課題の体系

1995年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震は巨大な都市災害を引き起した。それは、戦後半世紀にわたって発展してきたわが国の大都市圏が初めて経験するM7クラスの直下地震であった。ぼう大な数の木造建物と多数のRC/鉄骨建物の建物の倒壊、延焼火災の発生、高速道路・鉄道構造物の倒壊による交通システムの機能喪失、電力・ガス・上下水道などのライフラインの広域的・長期的な機能喪失、埋立地の液状化等による港湾機能の喪失など、あらゆる種類の地震災害が、最近の地震では例をみない大きな規模で発生した。その中で、5,500人を超える人命が失われ、避難所生活を余儀なくされた人々の数は、最大時で30万人を超えた。

都市震災は、これらの被害が同時多発し、それらが相互に影響して複合災害として拡大するところに特徴がある。阪神大震災では、それが大規模な災害連鎖として発生した。個々の災害事象を科学的に解明することが重要であることは論をまたないが、複雑な災害連鎖の防災科学的問題点を整理し、体系化することが同様に重要である。それは、個々の専門領域を超えた総合的な問題把握を要請している。

今回の震災で提起されている防災課題の総合的整理と構造化を目的として、地震後2カ月間、2度のワークショップと災害調査を含む活動が行われた³⁾。この活動は、文部省緊急プロジェクト「兵庫県南部地震をふまえた大都市災害に対する総合防災対策の研究」として実施されたもので、全国から56名の研究者が参加し、筆者が研究代表者を務めた。

プロジェクトから得られた成果の一部をFig. 1に示した。同図は、ワークショップにおける全員討議から、兵庫県南部地震をふまえた大都市災害に対する総合防災対策の課題を集約し、体系化したワークシートである。同図の主要部には、横軸に、本震を挟んで左側に事前対策、右側に事後対応に属する防災課題と災害現象の時系列的展開が示されている。縦軸には、下方に物理的課題（natural world）、上方に社会的課題（social world）があり、その2つをつなぐ要素として、情報（information）が災害のすべての時間フェーズで関与する構造となることが示されている。これにより、時系列展開の中で、A～Fなる6つのゾーンが示される。また、こうした展開の前提となる社会的・文化的背景や防災の哲学に対する的確な認識を持つことに関わる項目がGゾーンに示されている。さらに、今回の災害の教訓を将来に生かすためには、個別対策だけでなく、それらを包括するべき戦略的な事項について検討がなされるべきであることから、関連する項目がHゾーンに示されている。

このような災害連鎖の構造化の作業は、こころある研究者によって試みられてきているが、今回作成されたこのワークシートの特徴は、実際に発生した災害における「事実」に基づいて、多くの研究者の視点を集大成したところにある。もちろん、この結果もまだ最終的なものではなく、震災後2カ月余の時点での見解であって、今後さらに新しい問題が加わっていくべきものである。そして、個々に挙げられている項目については今後とも深く研究が行われるべきであるし、また、それらの項目間の関連性について、さらに詳細な検証と体系化を行うべきである。

文部省緊急プロジェクト「兵庫県南部地震をふまえた大都市災害に対する総合防災対策の研究」ワークショップ（3）
 （最終結果）

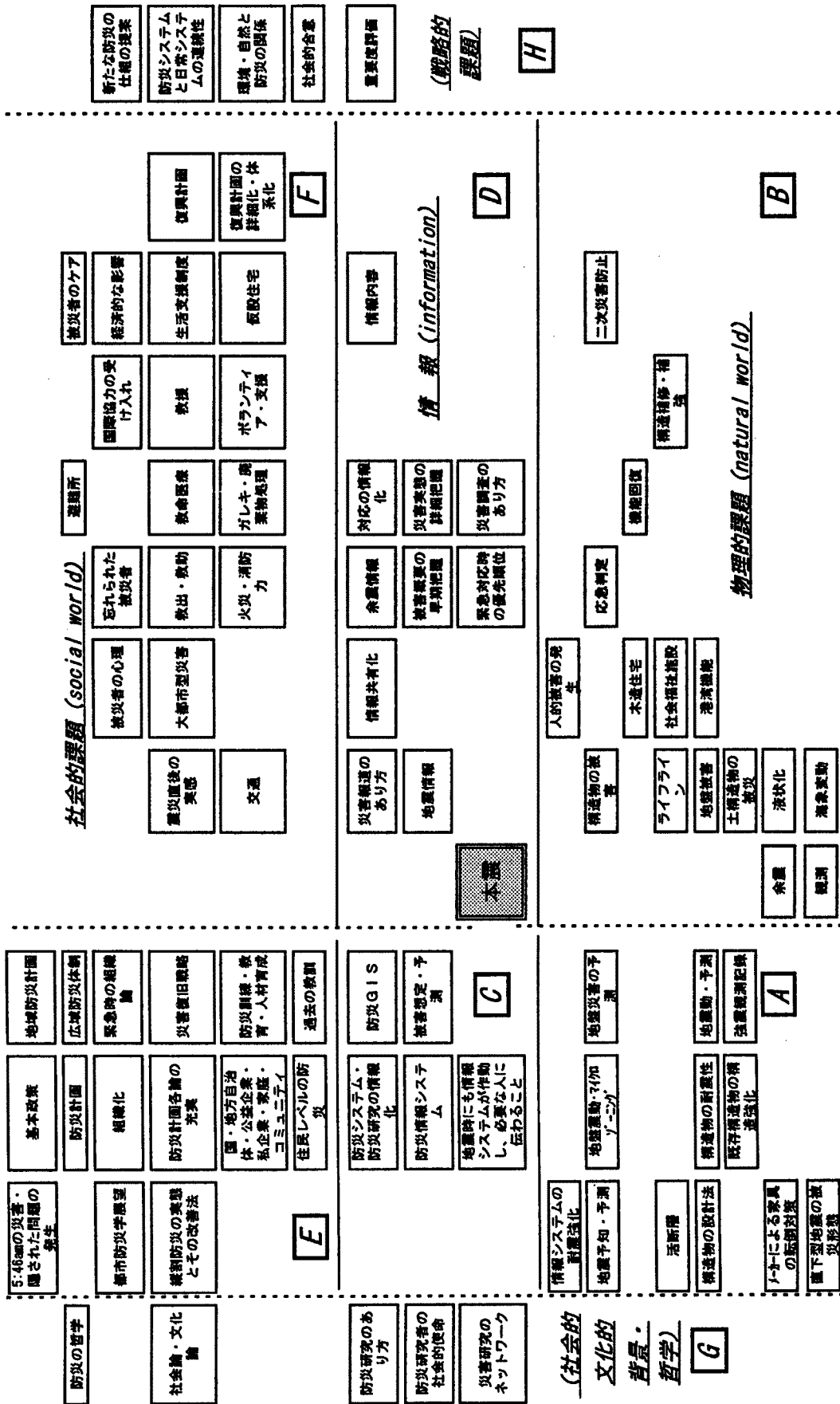


Fig. 1 Integrated research on countermeasures against urban disasters considering the 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake (A worksheet developed through workshop discussions)

Fig. 1に関する詳細な討論やその作成経過については、プロジェクトの報告書³⁾に記載しているので参照されたい。また、このプロジェクトでは、このワークシートをさらに集約する形で設定された18の主要な防災課題に関する分科会討議を行い、その結果得られた問題提起を分科会報告としてとりまとめた。さらに、本稿でも後に述べる防災GIS活動を行って、ワークショップ討議の参考に供したが、そこで提起された課題のとりまとめも行った。これらの結果も、上記報告書に収録されている。

3. 関西の「地震安全神話」をつくりあげたもの

「関西には地震がない」という、思いこみが社会的に行渡っていたとされる。Fig. 2に、明治以後の120余年におけるわが国の主な被害地震と、それによる死者・行方不明者の統計を図示した。この図をみるとそれがいかに根拠のない考えであるかは明らかである。しかし、このような安全神話がどのようにして生れたかを考察することは、今後へのいましめとして意義あるものと考え、本章ではこの問題を論ずることとする。

Fig. 2では、プレート間地震を中心とする海洋型地震と、プレート内で発生する内陸型地震を、それぞれ立体文字と斜体文字で区別した。また、それらのうち、関西とその周辺で発生した地震を下線で示した。同図中にはさらに、関東地震以後の耐震技術の発達史の中で、本章の議論に関連する重要事項を簡単に示したが、これについては次章で論ずる。

関西では、紀伊半島沖にマグニチュード8以上の巨大地震（南海道地震）が90年～150年の間隔で起っている。江戸時代以降では、慶長地震（1605年）、宝永地震（1707年）、安政南海道地震（1854年）、昭和南海道地震（1946年）と続いており、21世紀のどこかで次の南海道地震が起ることは間違いのないことと考えなければならない（少なくとも、その前提のもとに地震への備えを行わねばならない）。

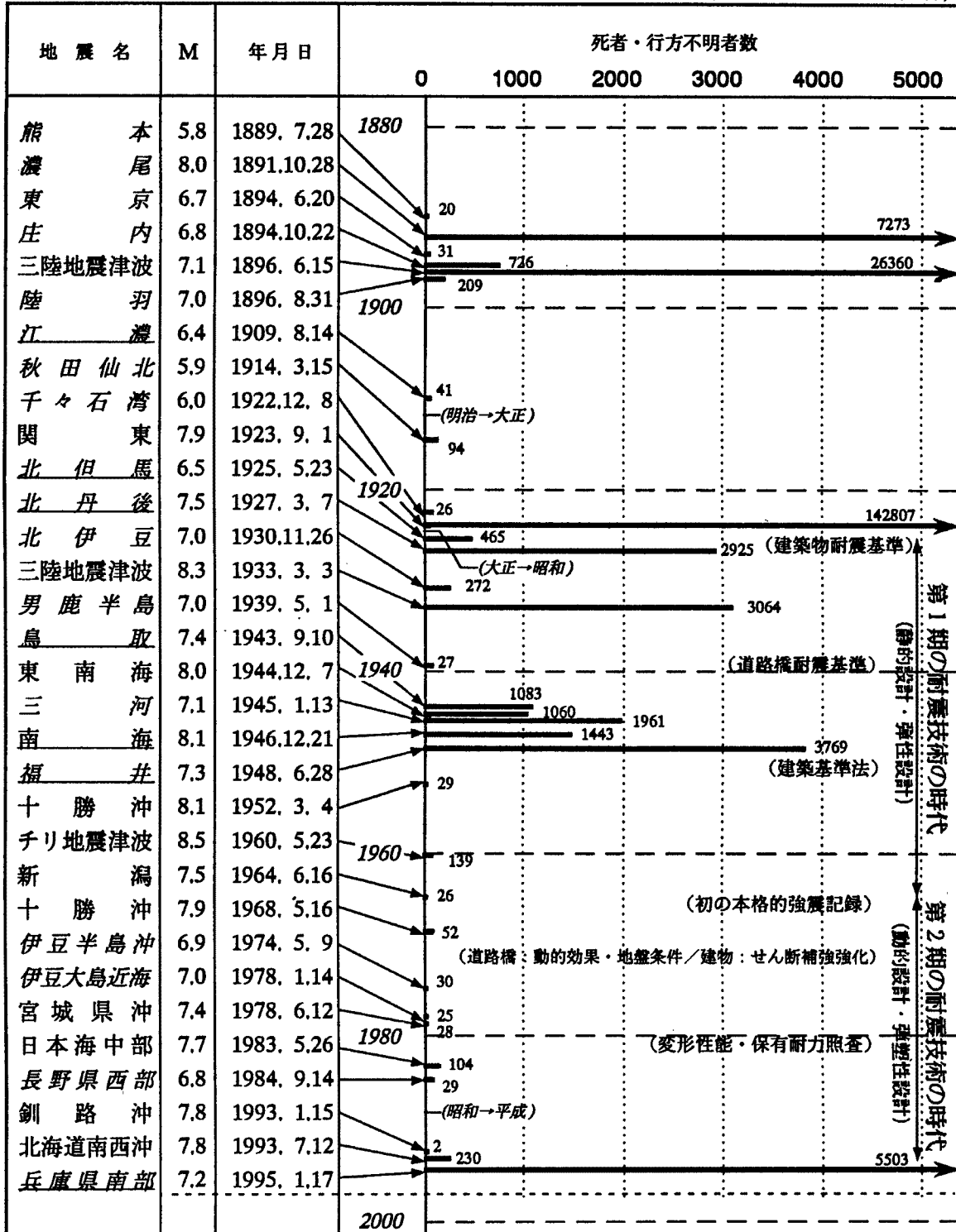
南海道地震のあと関西は地震の静穏期に入るが、静穏期の終焉とともにまず内陸部が地震の活動期に入り、その状態が40～50年続いた後、次の南海道地震が発生する。この内陸部の活動期に発生する地震が、震源断層近傍の地域に大きな被害をもたらしてきた。昭和南海道地震に至る前回のサイクルでは、Fig. 2の江濃地震から鳥取地震に至る系列がこれにあたる。今回の兵庫県南部地震により、次の活動期のサイクルが始ったと我々は考えるべきである。

こうした地震発生のサイクルが存在することが指摘されたのは、すでに20年以上前のことである。筆者は、過去における関西の多くの被害地震の記録と目の前の関西の静かさのギャップに悩んでいた1970年代に、当時京都大学理学部の小沢泉夫教授が上記のシナリオを提唱されるのに接して、この問題に工学的に取り組むことを決めた。同じ頃、関西の社会基盤整備に相当の影響力を持つある高官が、関西は地震が無いから、耐震設計を関東並と言わず、もっと切下げても良いのではないかと発言されたことが、工学の研究者として、さらに強い動機となった。

地震サイクルのシナリオは規則的であるが、実際の発生間隔にはかなりの不確定性を伴うので、確率モデルの手法を用いた。南海トラフの大地震を、打切り指数型の再生過程、その間を埋める内陸の地震を、静穏期と活動期を表す非定常ポアソン型のモデルで表し、地震危険度解析を行った⁴⁾。その結果を示したのがFig. 3である。同図(a)において、将来の地震危険度は、絶対時間のどの時点から将来を見るかによって異なる。すなわち、将来の50年程度の地震危険度は、静穏期から見ると低く、活動期から見ると高くなる。すべての地震発生を定常ランダムとする等価ポアソンモデルの結果は両者の平均的な値を示しており、これは時間軸をずらしても変化しないから、静穏期や活動期の説明には使えない。この計算を行った1979年の時点から将来を見た危険度は、Fig. 3(b)のように、すでに等価ポアソンモデルのレベルまで上昇していた。これによって、戦後数十年の関西の平和な時代の意味を納得できると同時に、それは来るべき活動期への警告でもあることが確認できる。この結果に基づき、関西において地震の危険度が決して低くないこと、現在、かりそめの静穏期を過しているに過ぎないことを、機会ある毎に発言してきた。

こうした主張を、筆者だけが言っていたのではないことは勿論である。この地域の地震の危険を指摘して

(京大防災研・亀田弘行)



注) アンダーラインは、関西とその周辺に発生した地震を示す。
 立体文字は海洋型(プレート境界)地震、斜体文字は内陸型(プレート内)地震を示す。

Fig. 2 Major damaging earthquakes in Japan with statistics of casualty and description of the developments of seismic design and construction technology

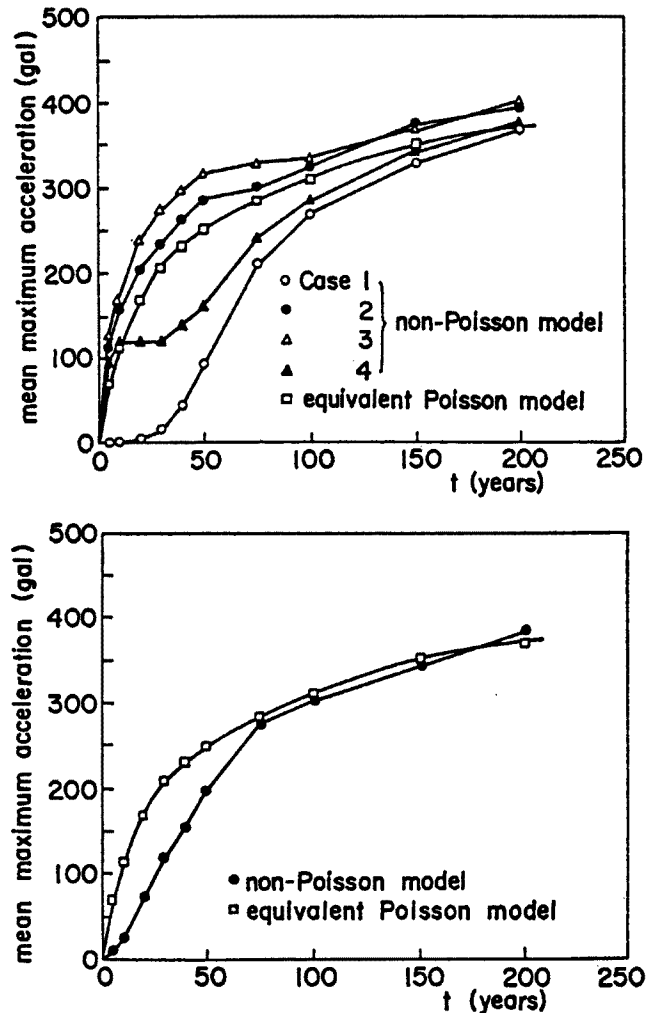


Fig. 3 Comparison of seismic hazard using a non-Poisson model and an equivalent Poisson model. (In (a), Case 1: quiescent period; Case 3: active period; Cases 2 and 4: intermediate cases./ In (b), results for the non Poisson model stands for looking from 1979 AD.)

きた関西の耐震工学者や地震学者，断層学者は少なくない。さらに，自治体の防災担当者や，ライフライン事業者で地震防災への地道な活動を続けてきた人達が多数あることも忘れてはならない。しかし，力及ばず，今回のような災害を経験すると，社会全体としては，その認識において，多くのものが欠けていたと言わざるを得ない。

昭和の初期から終戦直後までの間に，関西とその周辺では激的な地震災害が続いたことは，Fig. 1に示したとおりである。アンダーラインをつけた関西地域の地震による死者・行方不明者を江濃地震から福井地震まで合計すると9,700人を超える。これほどの災害の記憶が，福井地震以後の静穏期の中で，人々の意識からかくもきれいにぬぐい去られてよいものであろうか。災害文化（過去の災害経験が蓄積され，その結果人々に広く定着した自然への理解，防災の心構えとそのノウハウの全体⁵⁾）として定着しなかった理由は何であったのか，阪神・淡路大震災を経験した（してしまった）いま，腰を据えて考え，それを社会的に定着させないと，この経験も再び風化する恐れがある。

北但馬地震・北丹後地震・鳥取地震から福井地震に至る前回の内陸部の活動期には，大都市圏からやや離

れた近畿北部の日本海沿岸地方が順に被害を受けた。被災者にとっての悲劇はどの場所でも変りはないが、都市圏への警鐘と言う点からは、首都が壊滅的な被害を被った関東大震災のような大きな影響力を持たなかったであろう。しかも、これらの地震が発生したのは、戦争という、もっと大きな災厄に直面していた時代、そして戦後の混乱がまだ収まっていなかった時代である。後世への教訓を全社会的に受けとめる条件は十分ではなかったと言わざるを得ない。加えて、福井地震以後の関西の静穏期は、まことに静寂そのものであった。微小地震の観測はこの地域の応力場の状態を伝えていたが、有感地震の少なさは、多くの人々に地震のことを忘れさせるに十分なほど静かな時代であった。

このように、災害文化は災害を経験した時代の背景と地理的条件の強い影響を受けている。特に、地震災害のような低頻度・巨大災害の場合は、特にその時代の特殊な条件の影響を受けやすい。

一方、兵庫県南部地震を経験したいま、耐震研究者としての自己の内部にも落とし穴があったことを痛感している。それは、震源断層近傍の地震動の破壊力についての認識の甘さである。阪神大震災の第一報とともに目にした倒壊家屋の写真は、濃尾地震や福井地震など、遠い過去と思われていた光景を再現するものであった。都市直下地震の危険性はその激しい地震動にあり、局所的にきわめて激烈な被害をもたらすことにある。こうした被害はすべて、強震観測プロジェクト (SMAC) が始った昭和27年以前の経験であったことが、地震動の定量的な把握を阻んできた。しかしながら、関西の内陸部の地震活動期への備えを訴えるのであれば、地震動の破壊力に関する定量的目安を一緒に提供できるようにする努力がもっと必要であったというのが、筆者がいま最も強く感じている悔恨である。強震記録がなく、震害資料も少なく、建造物の特性も異なっていたであろう時代の地震動を推定するのは大きな困難を伴う。しかし、研究には困難がつきものであり、これは、何が重要かという、認識の問題であろう。例えば、体験談と地震気象から1923年の関東地震の多重震源の再現を試みた竹村・池浦の最近の研究⁹⁾のような努力である。思えば、筆者の恩師である故後藤向男先生が耐震研究の道に入られたのは、福井地震による橋梁の被害調査をきっかけとした。筆者の若い頃、先生が書かれた論文から、その被害の激しさを感じたことを想いおこすと、この感は更に深い。

1993年の釧路沖地震で0.9gの加速度記録が得られたが、むしろその特殊性が議論されていた。1994年にはノースリッジ地震により震央域で1g前後の強震記録が多数得られた。この状況のもとで、土木学会耐震工学委員会地震荷重小委員会（委員長：伯野元彦・東洋大学教授；；筆者は幹事長を務める）では、直下地震のもとでの地震荷重の議論を集中的に行いつつあった。兵庫県南部地震による強震記録は、この議論をさらに重点的に行うべきことを要請している。

4. 耐震技術の発達過程と阪神大震災における建造物の被災状況

兵庫県南部地震によって多くの都市施設が破壊された様は、耐震技術者に深刻な問題をつきつけることになった。関東地震以来、営々と築き上げられてきたわが国の耐震技術を空しく思わせるほどの衝撃であったと言えよう。この事態を正確に評価し、将来の防災対策としての確かな指針を打出すことは、耐震技術にとっても、そして耐震技術が担保すべきこれからの社会の安全性にとっても重要である。

Fig. 2には、わが国の耐震技術の変遷を表すいくつかのキーワードを記入した。簡単なため、耐震基準の変遷は建築物と道路橋関連のみに限ってある。

関東地震において震度法による耐震設計の有効性が確認された翌1924年に建築物の耐震基準が制定され、さらに福井地震を経て、1925年に建築基準法として強制力を持つに至った。その間、1939年に道路橋に震度法による耐震基準が導入された。

わが国初の本格的な強震記録が得られるのは1964年の新潟地震である。それまでの時期は、研究・開発の領域での胎動を別にすれば、静的設計・弾性設計が行われた時代であり、これを「第1期の耐震技術の時代」と呼ぶことができよう。

新潟地震を経て、1968年十勝沖地震でさらに充実した強震記録が得られたが、同時に多くの鉄筋コンク

リート建物が被害を受け、塑性領域での変形性能の重要性が認識された。1971年には建築物で鉄筋コンクリートのせん断補強の強化が行われ、道路橋耐震設計指針において動的効果（修正震度法）と地盤条件の影響を取入れるなどの設計法の信頼度の向上がはかられた。これはさらに、1980年の道路橋示方書におけるRC橋脚の変形性能照査、1981年の建築基準法施行令における保有耐力照査の形で明確化された。このように、新潟地震以降は、動的設計・弾塑性設計が志向された時代で、これを第2期の耐震設計の時代と呼ぶことができよう。

問題をかなり単純化して考察したが、第2期の耐震技術の時代は、1964年の新潟地震を契機に本格化した地盤の液状化とその対策の研究開発、1971年のサンフェルナンド地震をきっかけとし、1978年の宮城県沖地震によって全国的な流れとなったライフライン地震工学の発達など、わが国の都市化社会の進展とともに、その領域を広げていった。例えば、耐震継手を持つダクトイルによる耐震管路は1974年開発され、1979年に規格化されている。

こうした耐震技術の発達史が、阪神大震災にどのように現れたかの一端をTable 1に見ることができる。同表は兵庫県南部地震による高速道路高架橋の橋脚の被災度に関する統計を示しており、As, Aは修復不可能な被害、Bは耐荷力に影響を受けたが修復可能な被害、Cは表面的な損傷はあるが耐荷力に影響がなかったもの、を意味する。また、同表は（a）1971年の道路橋耐震設計基準以前の設計と、（b）1980年の道路橋示方書耐震設計編以降の基準による設計とに分けて被災の程度を示している。

まず、1971年以前の基準による橋脚（a）の被害と1980年以後の基準による橋脚（b）の被害の間に明らかな差異が認められる。特に、（a）のグループでAs, Aをあわせて13.6%ある大破が（b）ではゼロである点と、Dの無被害が（a）の45.8%に対し（b）の78.3%であることが注目される。

実際には、グループ（a）は阪神高速道路3号神戸線、グループ（b）は同5号湾岸線の被災状況を示している。両者では通過地点の地盤条件も異なるし、橋脚の形式も異なるものが多いので単純な比較はできないが、大局的な議論としては、Table 1の結果は、静的設計・弾性限照査の体系から動的設計・弾塑性照査へと発達してきた耐震技術の方向が基本的には正しかったことを示すものと考えらるべきであろう。

ただ、5号湾岸線も種々の被害を受けた。この意味で、現代の道路橋の耐震技術も再点検を迫られている。特に、同路線が通過する海岸の埋立地における地盤の側方流動に起因する橋脚基礎の移動が西宮港大橋の側径間の落下を引き起こしたこと、大小の桁を支える剛性支承の多くが強い地震力のもとで破損したことなどにより、長期にわたり機能を喪失したことは課題として残った。今後は、直下地震の影響を取り入れ、施設

Table 1 Damage statistics for bridge piers (Hanshin Expressway)

damage state	As	A	B	C	D	total
pre-1971 design	68 (5.8%)	92 (7.8%)	119 (10.1%)	358 (30.5%)	538 (45.8%)	1175 (100%)
post-1980 design	0 (0%)	0 (0%)	14 (5.6%)	40 (16.1%)	195 (78.3%)	249 (100%)

As: Heavy damage (completely collapsed)

A: Heavy damage (to be demolished)

B: Moderate damage (considerable structural deterioration)

C: Slight damage (cracking)

D: No damage

の重要度と要求耐震性能の関係を明確化する方向でさらに耐震技術の向上を図るべきと考えられる。

建築物の被害についても、同様の議論が可能である。建築物の弾塑性設計への節目となったのは、上記のように1971年と1981年であるが、三宮付近の約100棟の建物について建設年代を分類した被害調査結果により、その差は明瞭に現れている⁷⁾。特に、この調査の範囲では、1981年以降に建設の建物では大破・倒壊の例は皆無であったと報告されている。

5. 道路・鉄道高架橋の非弾性挙動

兵庫県南部地震による強震動のもとでは、構造物は弾性範囲で挙動した構造物は少なく、崩壊を免れるか否かは、非弾性領域の変形性能に依存したと考えられる。そこでは、大変形に追従できず崩壊したもの、大

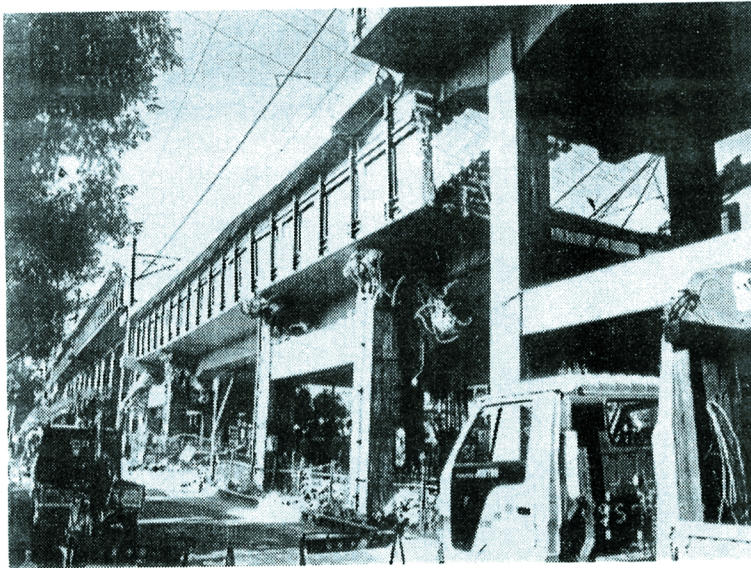


Photo 1 Collapsed Shinkansen viaduct

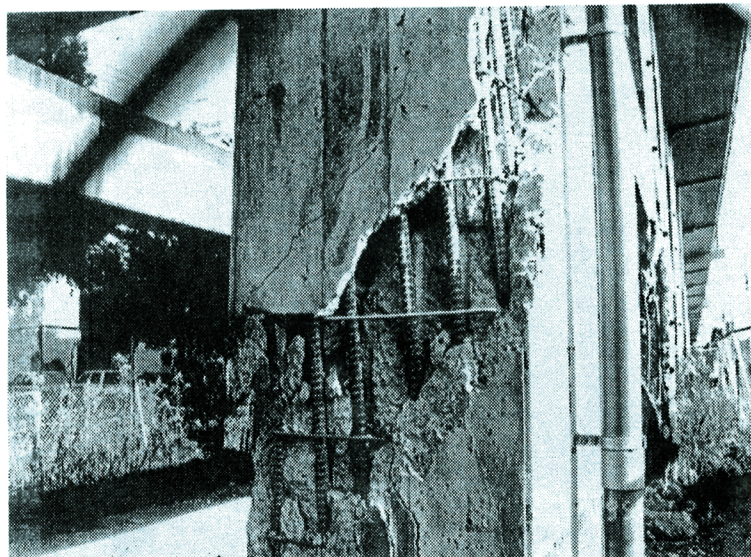


Photo 2 Shear failure of a Shinkansen viaduct column

変形に耐えて存続したものなど、種々の場合が見られる。本章では、道路・鉄道の高架橋から、この問題に関わるいくつかの事例について考察する。

鉄筋コンクリート高架橋の破壊はせん断破壊と曲げ破壊に分けられるが、**Photo 1**は、せん断破壊による山陽新幹線高架橋の高架橋の崩壊の例である。ここまで崩壊が進むと、破壊のメカニズムは判然としなくなる。むしろ**Photo 2**のように、破壊がわずかに進んだ状態でとどまっている方が状況がよくわかる。せん断破壊が先行して発生している状況が明瞭である。一方、鉄道構造物に塑性領域での変形性能照査を取入れた1983年以降の設計による構造物は、ほとんど無被害で今回の地震を耐えている。

道路の中央分離帯に建設された鉄筋コンクリート単柱式橋脚では、曲げ破壊とせん断破壊の両方が観察されたが、その中で、**Photo 3**は阪神高速道路3号神戸線、**Photo 4**は神戸新交通ポートライナーにおける曲げ破壊ないし曲げ—せん断破壊を示す。大変形により、主鉄筋が一旦大きく塑性引張り変形を起した後に座

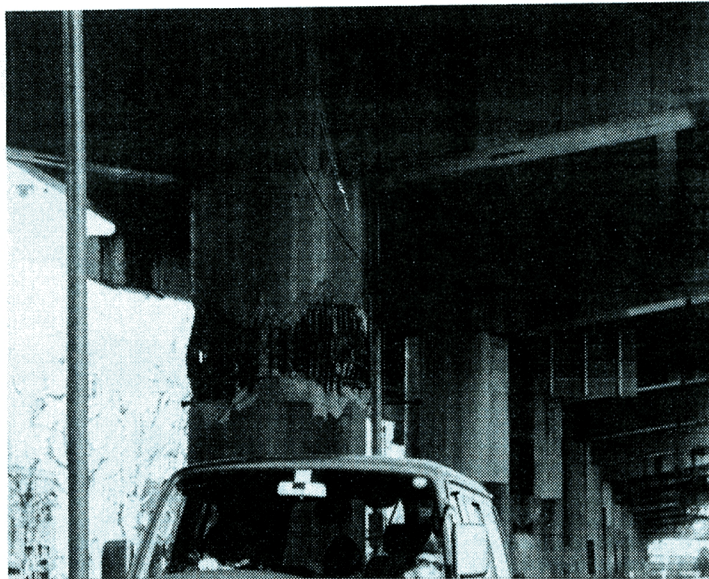


Photo 3 Bending-shear failure of a single column type highway viaduct pier

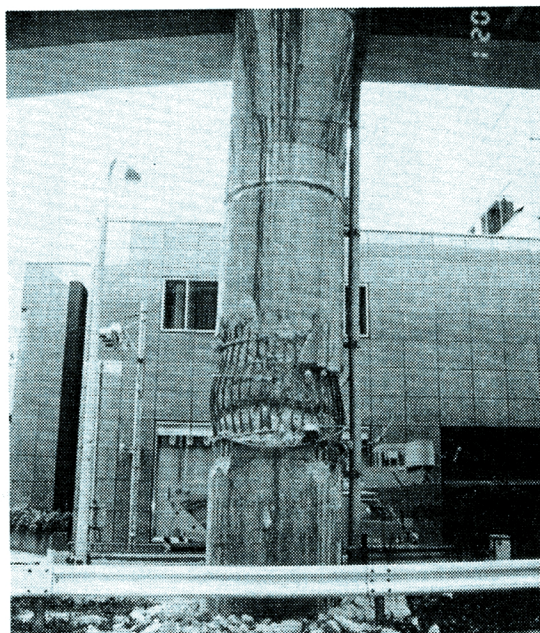


Photo 4 Bending failure of a single column type Portliner pier

屈している状況がわかる。このような単柱の中間部の曲げ破壊は、これらの2例を含め、ほとんど例外なく主鉄筋の段落し部で発生している。1980年の道路橋示方書で、原則として主鉄筋の段落しを行わないか、必要な場合はその位置をそれまでの方法より断面幅だけ上方に置くなどの改訂が行われた。その結果、新しい橋脚の曲げ損傷は橋脚基部に発生し、その場所はフーチングにより有効断面積が拡大するので、曲げクラックからせん断クラックが成長することはなく、いわゆる靱性制御の効果があがっている。Table 1に示した結果は、このような状況も反映している。

他にも、構造物が大変形を生じた証拠は随所に見られた。一例として、古い鉄道高架橋の挙動を示す。鉄道の整備の歴史は道路より古く、昭和10年に三宮付近のJRと阪急の高架橋が建設された。この時代は、機械化施工以前の「手作り」のコンクリート時代であるが、これらの高架橋の多くは軽微な被害で地震を耐えている。その中で比較的損傷が激しかった箇所は、JRの三宮一元町間の高架橋があるが、この区間もRC

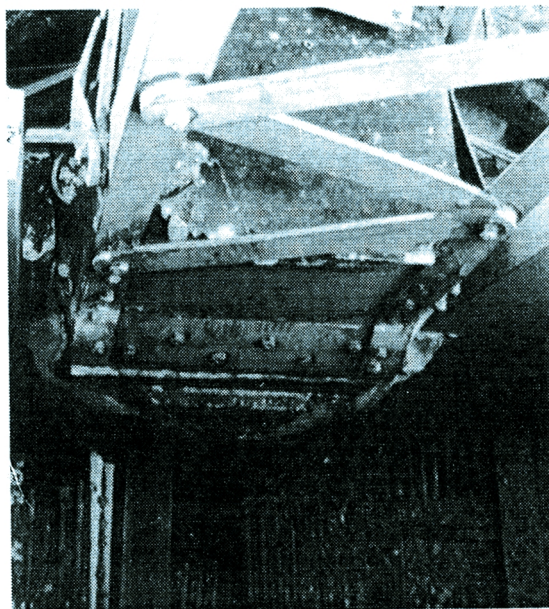


Photo 5 Pounding of adjacent railway viaducts (total deformation=68cm)

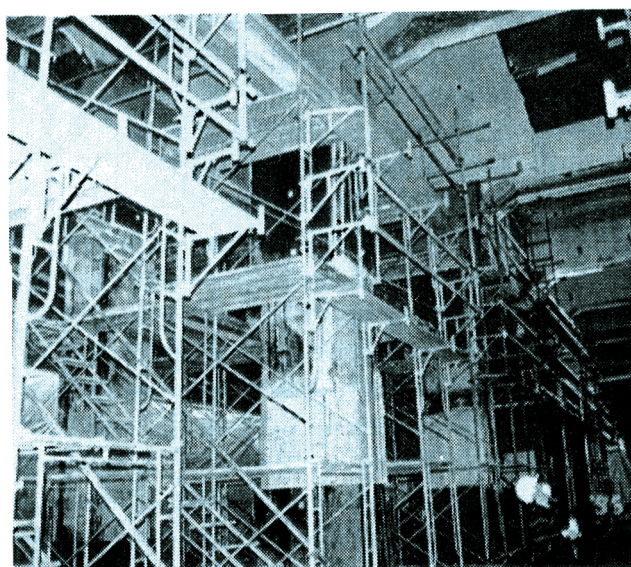


Photo 6 Repair works of the JR viaduct frame at the location of Photo 5

ラーメンの柱頭と基部に塑性ヒンジが形成され、隣接する阪急から神戸高速鉄道に接続する部分の高架橋に衝突 (Photo 5) するほどの大変形でも崩壊せずに、柱の上下端の補修により (Photo 6)、運転再開に至っている。

Photo 7は、阪神高速道路3号神戸線の単柱式鋼製橋脚の曲げ損傷の状況であるが、圧縮側が局部座屈する形で変形している。作用した地震動の強さを示すと考えられるが、一方、Photo 8は、阪神高速道路5号湾岸線の東神戸水路橋の西側からのアプローチ部の鋼製2層ラーメン橋脚であるが、中間の横梁の腹板が座屈ではらみ出している。この部分に大きなせん断変形が生じた証拠と考えられる。これほどの大変形を起しながら構造系全体は健全なまま残っている。

こうした構造物の挙動の種々の特徴は、時代々々の耐震技術を反映するものと考えられるが、この点を含め、さらに地盤条件、構造特性、地震動特性を考慮した検討が加えられるべきと考えられる。

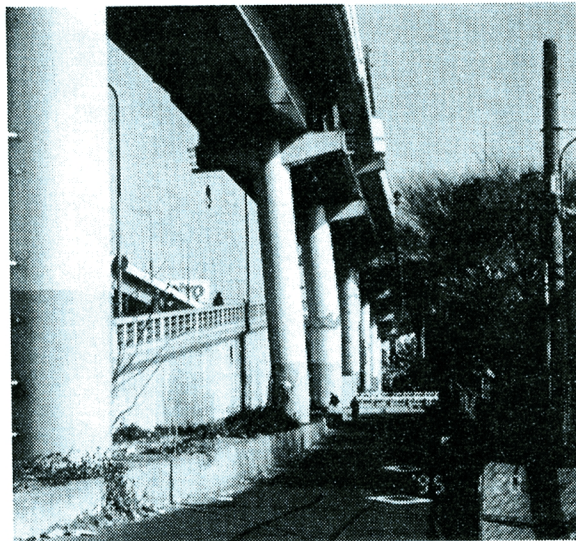


Photo 7 Bending failure of single column type highway viaduct metal piers

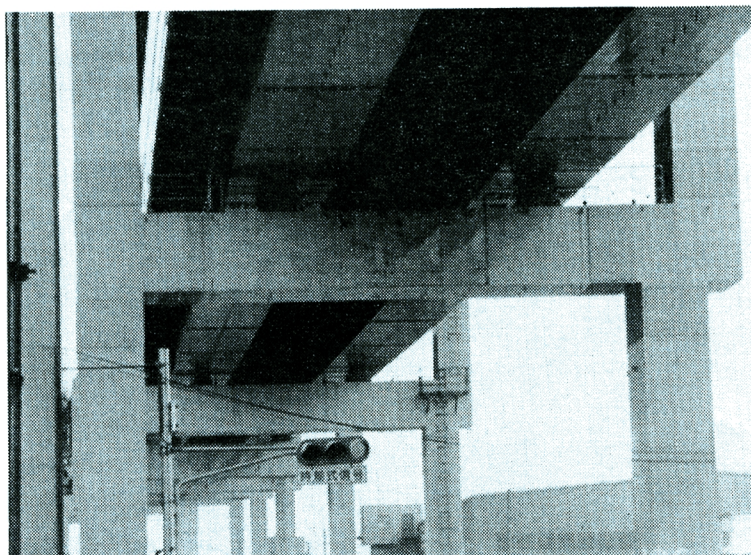


Photo 8 Buckling of web plates at center beam of a highway viaduct bent frame

6. ライフラインの被害

現代都市の構造は、i)人口の集中、ii)空間利用の高密度化、および iii)都市の巨大化による空間と時間のハンディキャップを補うためのライフラインシステムへの高度の依存によって特徴づけられる。兵庫県南部地震による阪神大震災のもとでライフライン系の被害は広範に及び、地震発生直後の緊急対応と、地震後の市民生活・産業活動の両面に大きな影響を与えた。最近の20年余の間に芽生え、発達してきたライフライン地震工学は、その真価を問われることになった。ライフラインの地震防災は、i)個々の施設の耐震強化、ii)冗長性があるネットワーク構成、iii)緊急時の自動制御による防護、およびiv)発災後の復旧戦略を適切に組み合わせることにより成立しており、それぞれについて多くの技術開発と実際への適用ははかられてきた⁸⁾。これらの成果がすべてテストを受けることになった。

ライフライン系は、上下水道・電力・ガスなどの供給処理システム、電話・データ通信などの通信システム、および鉄道・道路などの交通システムからなり、その内容は多岐にわたる。以下、各論的にその概要を報告するが、本稿の執筆の段階では、ライフライン系の多くはようやく仮復旧を終えたところであったり、まだ復旧段階にある。その意味で、以下は被害の要点を述べるものであり、その全貌は今後の調査をまって明らかにされる点が多々あることをお断りしておく。

6.1 供給・処理システム（上水道・下水道・電力・都市ガス）

(1) 上水道

断水が発生した地域は、兵庫県内で、9市5町の約120万世帯に及んだ。この数は、最近のわが国の顕著な被害地震であった釧路沖地震における約300戸、北海道東方沖地震の8600戸と比較してきわめて大きな数であり、この地震の影響の大きさがわかる。また、復旧に要した日数も長期にわたっており、上記の2つの地震では地震後4日以内に通水率が90%を超えたのに対し、今回は38日間を要した。その間、自衛隊や他地域の水道事業者からの応援を中心に、給水車による応急給水が行われた（Photo 9）。

復旧に長期を要したところについては、以下のようないくつかの理由が挙げられる。

- 1) 破壊した管路からの漏水が激しく、管路網全体の水圧を上げて漏水箇所を見つける作業（水張り検査）を行えなかったため、まず配水幹線から枝線へのバルブを閉めて、幹線のみ水張り検査で漏水箇所を発見し、以後幹線、支管へと進む方法を使った。これは、上流から順次水密性を確保すると



Photo 9 Emergency water service

いう、ガスシステムの復旧と似た方法であり、通常の方法よりはるかに手間と時間を要したものと考えられる。

- 2) 阪神地域の上水道は、水源の3/4を淀川に頼っており、その供給を受持つ阪神水道企業団の浄水設備と送水施設の被害のため約3週間にわたって通常水量の60~70%の供給にとどまったことも、水張り検査を困難にし、1)の方法を採らざるをえないまひとつの理由であった。
- 3) 神戸市の場合、崩壊した市庁舎1号館(旧館)の6階に水道局があったため、仮本部での緊急対応体制をとるまでに時間を要した。
- 4) 他地域からの応援は作業能率の向上に大いに貢献したが、芦屋市や西宮市などは、神戸市が加入する12政令指定都市間の応援協定のような事前の体制がなかったため、個別の申入れが殺到し、最終的に日本水道協会が調整体制を確立するまでの1週間は、本格的な復旧作業にとりかかることができなかった。

これらの事項は、管路被害と漏水との関係の明確化、災害時の復旧体制の改善などの課題を提起していると考えられる。

以上の状況下で、管路の破壊は種々の形態が見られた。この地域の配水管路は、神戸市で90%、西宮市で64%がダクタイル鋳鉄管となっており、耐震化は進められていた。しかし、継手の大部分は抜けだし防止のストッパーを持たないタイプ(A型、K型)であり、ストッパー付の耐震継手(S型、SII型)は、埋立地を中心に神戸市で5%、西宮市で3%の普及にとどまっていた。ダクタイル鋳鉄管のA型、K型継手の離脱による漏水が多数発生した。これらは旧市街地で多数発生しているが、地震動の激しさとそれに伴う地盤変状が関与していると考えられ、今後詳細な調査が必要である。その他、旧式のねずみ鋳鉄管や塩化ビニール管の管体の割れによる破損は同程度の件数を示している。一方、耐震継手を有するダクタイル鋳鉄管では、これまで顕著な被害は報告されていない。

次に、神戸市水道の緊急遮断システムがどのように働いたかに触れておく。神戸市の旧市街地と埋立地の水道システムは、六甲山の斜面上に配水池を東西に配列する構成となっているが、これらの配水池は2つの配水槽を持つ2池式となっており、そのうち21カ所では、配水槽のうちの1つに、感知した地震動と水の流出の状況から自動的に作動する緊急遮断弁が備えられている。今回の地震で、18カ所の配水池で緊急遮断弁が作動し、これによって約30,000トンの水が確保され、応急給水の水源として役立った。一方、緊急遮断弁を持たない配水槽からは、漏水を覚悟で水を流し続ける仕組みになっているが、漏水が激しかったことと水源

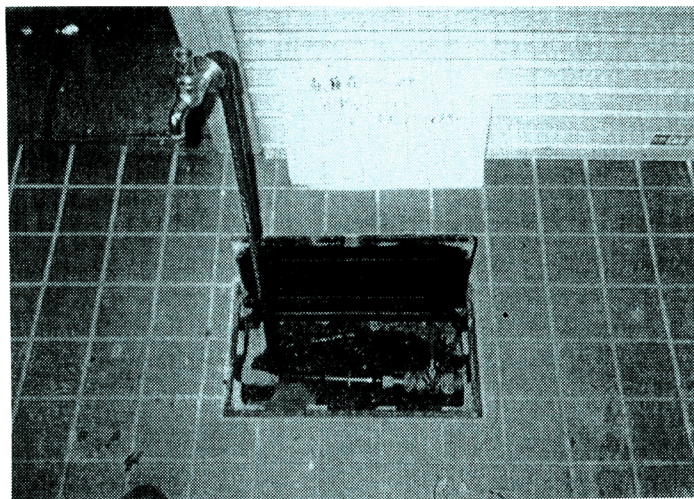


Photo 10 Temporary restoration for household water service

からの送水が一時的に止ったため、早いもので1時間、遅いものでも8時間ですべての水が失われた。これにより、地震当日から翌日にかけて発生した延焼火災の消防水利としては、水道システムは機能しなかった。

現在は仮復旧が終った段階である。個人の敷地内の給水設備の被害が大きいところでは、**Photo 10**のような仮給水栓のみが立てられた状態の世帯もある。こうした事態が解消されるにつれ、今後本格復旧に向けて、システム全体の耐震化計画が立てられる。今回の震災により、水道システムの防災体制に関して種々の教訓が得られた。耐震継手式のダクタイル鋳鉄管など、最も進んだ耐震管路の耐震性が確かめられたことは特筆されてよく、今後、配水管路の中の基幹的な路線や防災拠点に直結する路線などの重要路線の耐震化に確かな方法を示したといえよう。また、緊急遮断弁の有効性も基本的に確認されたと言えよう。さらに、情報管理のありかたや、他地域の応援受け入れを含め、地震後の復旧体制について、今後生かすべき経験が得られたと考えられる。



Photo 11 Dislocation of an inlet sewer conduit

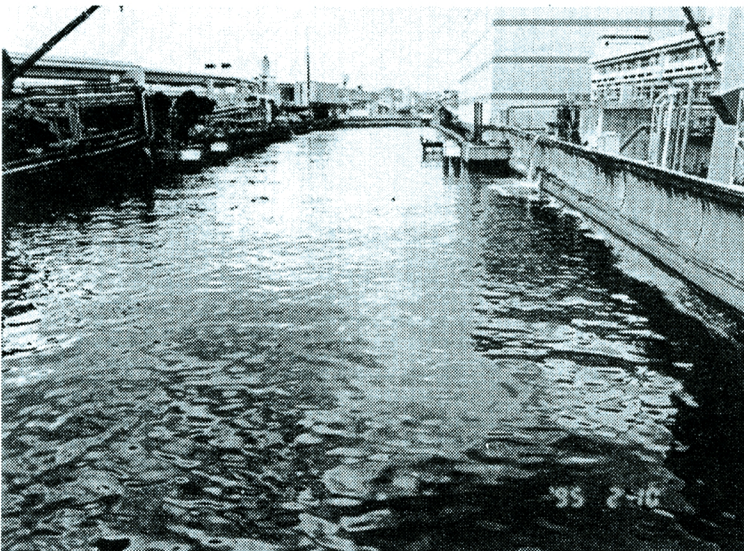


Photo 12 A canal was closed for use as a temporary sewage treatment chamber.

(2) 下水道

下水道では、管渠と処理場において大きな被害があった。下水道システムの大部分は、上水道のように被圧状態で流下するわけではないので、漏水を簡単に発見できないこと、それに関わらず、未処理の汚水の漏洩は環境問題にかかわるので、入念に検査する必要があることなどの困難な条件を抱えている。また、下水道システムの基幹施設である終末処理場は下流端に位置するので埋立地など軟弱な地盤に建設されることが多く、それだけ地震被害を受けやすい。兵庫県南部地震では、管渠の被害の他に、神戸市最大の処理場である東灘処理場（処理能力225,000m³/日）が埋立地の背面地盤の液状化による側方流動の影響を受け、沈殿池の目地の開口、流入幹線管渠の移動など多くの被害を被った。そのため、処理場に隣接する幅40メートルの魚崎運河の両端を300メートルの間隔で締切って、一時臨時の沈殿池に用いるという緊急対応策がとられた（Photos 11 and 12）。

(3) 電力

電力は、現代の都市化社会の中で、水道と並んで最も重要な供給系ライフラインである。しかも、緊急時の情報伝達のための通信システムのエネルギー源として、他のライフラインの復旧を含め、震災からのあらゆる復旧作業に必要なエネルギー源として、電力供給は重要である。

冬の未明の時刻、関西電力管内全体で約1,200万キロワットの負荷で推移していたところに、午前5時46分の地震発生により一挙に約300万キロワットの需要減少となった。この急激な変化により、約10機の火力発電機がトリップして機能停止。瞬間的には260万軒が停電したが、系統切替えにより、午前7時30分までに停電中の需要家数は被災地を中心とする100万軒に限定された。その後、広範囲に被害が出た配電設備を中心に復旧作業が行われ、1月23日夕刻までには、受電可能な需要家への応急送電が完了した。停電地域が変化した状況をFig. 4に示した。

釧路沖地震や北海道東方沖地震では、停電は24時間以内に解消したのと比較して、今回ははるかに長時間を費やしている。その理由は、倒壊家屋が多く配電柱の被害も多かったこと、道路事情の悪化により作業効率が悪化したことなどにあるとされている。

(4) 都市ガス

今回の被災地へのガス供給は大阪ガス㈱によって行われている。供給エリアは、あらかじめブロック割りが行われており、全領域を8つのスーパーブロック、さらに、それらを55のミドルブロックに分割している。地震後約6時間の1月17日午前11時50分頃に、ガス漏れ通報の分布と圧力監視の基礎情報をふまえて、ミドルブロックのうちFig. 5に示した5ブロック約85万戸でガス供給を停止する意思決定が行われた。

ガスの供給を停止すると、一定の作業地域内（3,000～4,000戸程度）の各需要家の元栓を一旦全部閉め、地域内の導管の漏洩箇所を気密検査により行い、修理を終え、さらに需要家の内管のテストと修理を行ってから開栓する。作業は膨大な量になるので、自社の社員と関連企業の6,000人に加え、事前の協定に基づき、全国のガス事業者

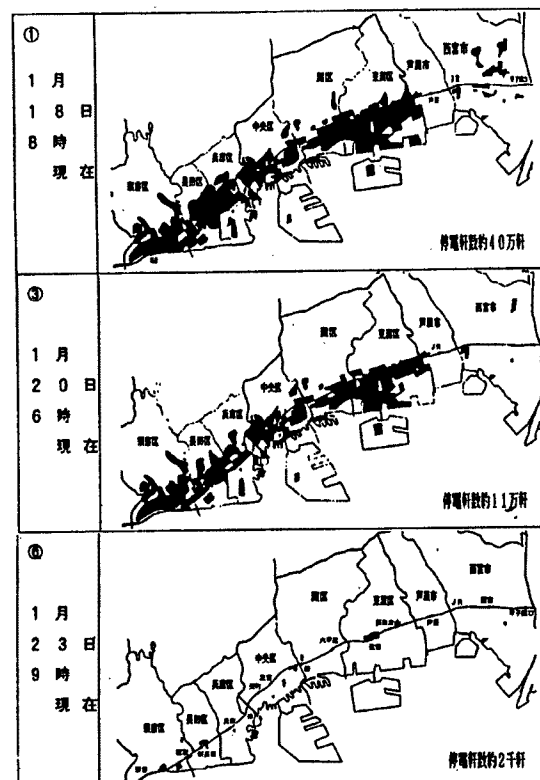


Fig. 4 Progress of power supply recovery works (courtesy of Kansai Electric Power Co.)

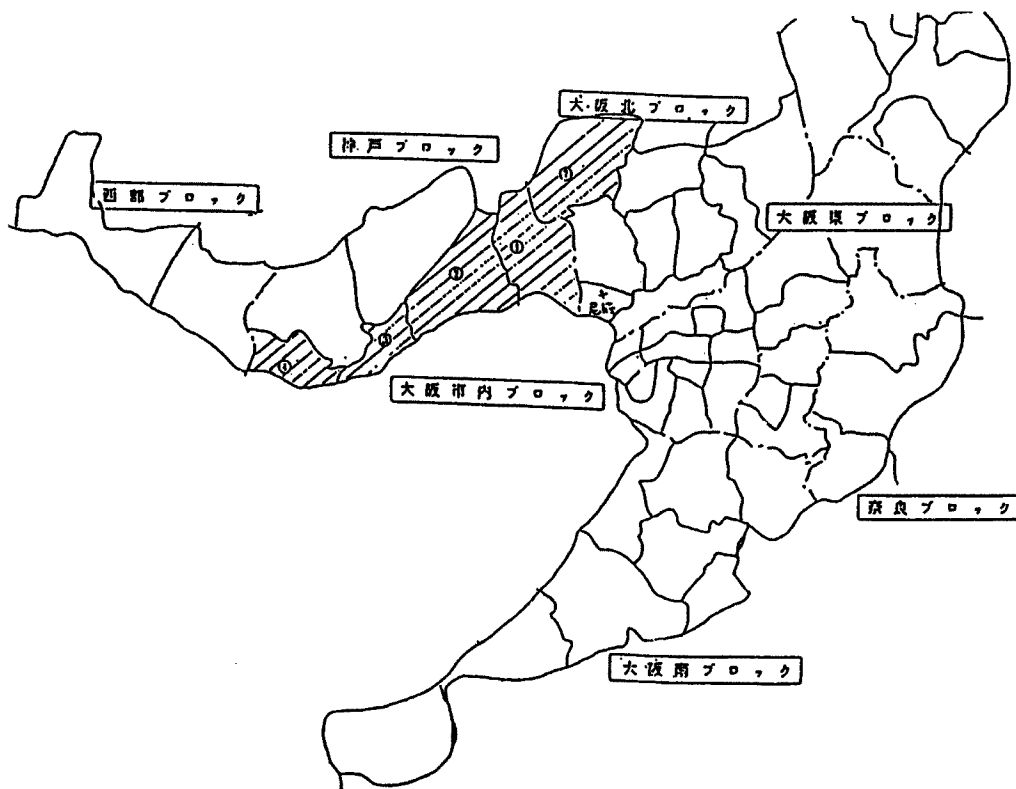


Fig. 5 Block gas supply suppression (shaded area: courtesy of Osaka Gas Co.)

から2,300人の応援を得て復旧にあたった。その結果、4月10日で、供給可能な需要家全てへの復旧を終えた。

ガス供給設備は、製造工場、供給用のガス導管、蓄積用のガスホルダーなどからなる。製造工場は被災地からはなれた大阪・泉北と加古川の2カ所にあり、無被害であった。また、被災地の神戸市内にあるガスホルダーも無被害であった。被害はもっぱらガス導管に集中した。ガス導管は高压導管（圧力10kg/cm²以上）、中圧導管A（3kg/cm²以上）、中圧導管B（1kg/cm²以上）、および低压導管（0.2～0.3 kg/cm²）からなっており、この順に末端の細かいネットワークを構成する。各需要家へは低压導管から供給する。溶接鋼管からなる高压導管は無被害、中圧導管は軽微な被害であった。被害はもっぱら低压導管に発生したが、主としてネジ鋼管（全体の30%を占める）が破壊した。現在被害状況の集計が行われており、順次詳細な内容が判明すると考えられる。

今回のような複合的な災害のもとでは、ガスシステムの復旧過程も、他のシステムから種々の影響を受けた。特に、水道管や下水管渠からの漏水がガス導管に流入し、ガスの漏洩検査のため圧力を掛けると水が噴出す例が多く見られた。また、倒壊建物により街路が塞がれた場所が多かったため、修理不可能であったり、修理場所に到達できないことがあった。そのため、現場へのルートを特定するための作業班を特別に編成する必要があった。

6.2 通信システム

電話通信システムの被害は、i)地震直後のデジタル交換機の機能喪失と、ii)家屋の倒壊や電柱の傾斜による加入者系の通信ケーブルの切断が主な形態である。これにより、地震直後には、約28万回線の電話が不通になった。デジタル交換機のマヒは、交換機自体の破壊によるより、停電が長時間に及んだためバックアップのバッテリーが切れたか、バッテリー自体の破損による。その後、移動電源車などにより交換機能を回復

し、上記のうち i)の原因による不通は1月19日までに解消した。残りは電力と同様、加入者端近傍での架空線の修理が主たる作業として残り、約6万戸への回線の修復を1月31日までに終了した。また、NTTでは、車載式の衛星通信設備を用いて、被災者のための無料電話カウンターも開設した (Photos 13 and 14)

6.3 交通システム

兵庫県南部地震による道路・鉄道高架橋崩壊の被害は衝撃的であり、大きな耐震構造学上の課題を残したが、これらの被害により交通体系が受けた影響もまた深刻であった。この問題は、1989年のロマ・ブリエタ地震による被害でサンフランシスコオークランド・ベイブリッジが1か月間閉鎖されたときに、大都市圏特有の問題として初めて露呈したもので、筆者らはこの問題の分析に取組み (例えば文献⁹⁾)、わが国のケースへの適用を目指してきたのであるが、今回の地震により交通システムが受けた影響の深刻さはサンフ



Photo 13 Mobil satellite telecommunication equipments



Photo 14 Free telephone service for public disaster aids

ランシスコの場合をはるかに上回るものである。阪神間の回廊は、山陽新幹線と3本の通勤鉄道を含む4本の鉄道で、1日あたり70万人の断面通過乗客を持ち、2本の国道と2本の都市高速道路により、1日あたり20万台の断面交通量を持っていた。それらのすべてが東西に分断された地震直後の状態は、阪神間の交通にとどまらず、東日本と西日本の間の交通の主要なリンクを失った状態をもたらした。

この事態は、地震後の復旧活動にも深刻な影響をもたらし、特に国道43号線を緊急車両に限定する交通規制が、当初は罰則を伴わない災害対策基本法によっていた間は効果が不十分であったが、2月25日から、罰則を伴う道路交通法による規制に切替えてから、ようやく軌道に乗った。鉄道は、JR在来線が4月1日、山陽新幹線が4月8日に全線営業を再開し、阪急神戸線は6月12日に開通の見込みとなっている。さらに、阪神電鉄も6月下旬に開通の見込みで、鉄道に関しては地震後半年間で、ようやく阪神間の足は回復する。しかし、阪神高速道路3号神戸線の再開にはまだ1年を超える期間が必要である。

交通システムが受けた影響に関する詳細は、文献¹⁰⁾等を参照されたい。

6.4 ライフラインシステム間の相互連関

兵庫県南部地震では、広範囲で水道とガスの停止が長期化したのをはじめ、道路・鉄道の交通機能は完全なマヒ状態となり、電力と通信は比較的早期に復旧したものの、これまでになく大規模な機能障害が発生し、市民生活は困難を究めた。個々のシステムの被害が甚大であったのみならず、従来から問題視されてきた被害の相互連関¹¹⁾が顕在化し、被害拡大・復旧遅れの要因として事態を一層悪化させた。被災地での現地調査、調査報告会、新聞記事などから得られた資料をもとにして、システム間の相互連関の様相をとりまとめることを試みた¹²⁾。

整理の枠組をFig. 6に示した。すなわち、インフラストラクチャーのレベルにおける被害の相互連関を、空間的波及・フロー流出に関する波及・機能的波及・復旧段階での波及の4種類に分割した上で、これに建物層、エンド・ユーザー層での被害の相互連関を加えて6層とし、全体像を捉えることを試みた。詳しくは文献¹²⁾を参照されたい。

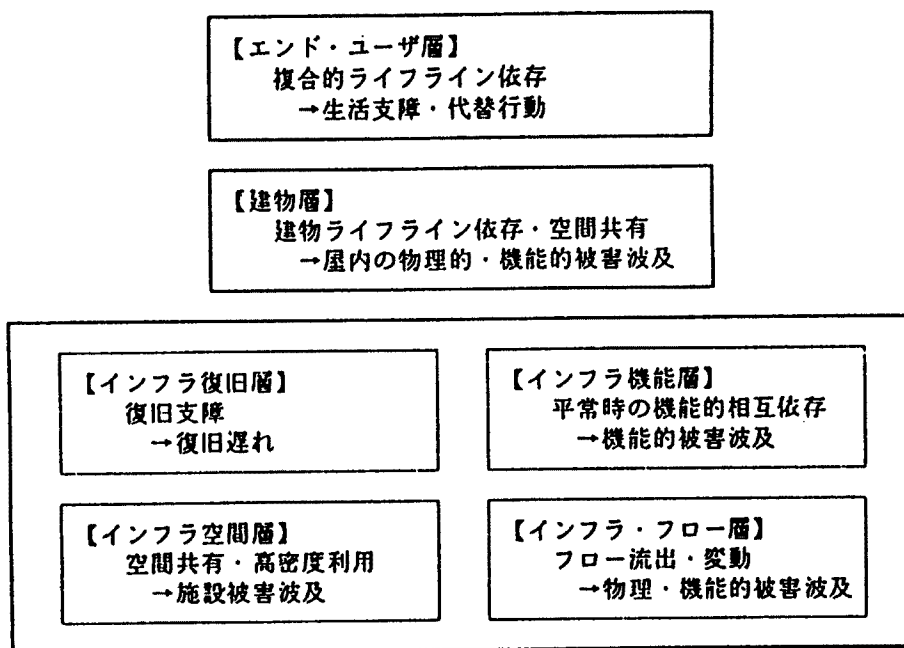


Fig. 6 Scheme of lifeline system interactions

今回の地震災害がこれほどに拡大した原因は、都市機能の相互依存、生活機能のライフラインへの複合依存と他律化、都市空間の立体的な高度利用という都市の特徴が、ことごとくマイナス要因として働き、さまざまな相互連関が発生したことにあると思われる。今後、相互連関による悪循環の防止、建物・屋内レベルでのライフライン機能喪失防止、ユーザーの備え強化と自助努力など、多面的な方策を検討し、その役割分担を明確にすることが、地震時のユーザーの困窮を低減するために重要である。

7. 災害情報システムの課題

7.1 被災地における情報ボランティア活動の経験

今回の震災の中で、災害緊急時の情報マネジメントの重要性が強く認識され、それにふさわしい情報システムが欠如している現状が明らかになった。今後、真に役立つ災害情報システムの構築に向けて多くの努力が行われるべきであるし、阪神大震災の中での経験が有効に役立てられるべきである。

筆者は、過去約3年、地理情報システム(GIS: geographic information system)を災害研究に応用するためのささやかな研究会をもち、災害現象の分析ツールとして、また災害緊急時の情報処理ツールとして、防災GISの概念構築とその実現へ向けての議論を行ってきた。今回の震災の発生とともに、研究会メンバーの中から、今手持のツール(まだ未完成の段階にあった)を改良しながらでも、現地での錯綜した情報の状況の改善に役立つボランティア活動ができないかという提案が盛上がってきた。紆余曲折の結果、神戸市・長田区における被災家屋の公解体撤去の住民からの申込み受付と発注までの事務処理をGISとデータベースを中心とするパソコンシステムを用いて効率化する活動を行った。活動の期間は準備期間を含めて本年2月上旬から4月まで及び、さらにその発展形がこれからも模索されつつある。

この活動は、筆者が主査を務める地理情報システム学会・防災GIS分科会の活動として位置づけられ、長田区役所での情報処理ボランティア活動の一方で、こうした活動のバックアップとなる情報を収集し、GIS上に展開した。拠点を京都大学防災研究所・都市施設耐震システム研究センターに置き、同・地域防災システム研究センター、奈良大学文学部地理学科、東京大学生産技術研究所などの研究者の協力と、GIS学会事務局の全面的バックアップのもとに活動が展開された。

長田区の現地では、都市施設耐震システム研究センターの角本 繁客員助教授(防災GIS分科会副主査:日立製作所中央研究所)が泊り込みで陣頭指揮にあたり、区役所の担当者と緊密に連携しつつ、同氏のスタッフ、京都大学防災研究所と奈良大学地理学科の学生がシステムの立ち上げから運用を担当し、さらに作業量がぼう大になった時期には、生協のボランティアの応援も得た。

活動を開始した時点ではすでに解体受付が始まっており、すべて紙の上の処理で煩雑をきわめていたが、コンピュータ化することにより、特に場所の特定・確認と、その後の検索機能の活用により、受付から解体発注までの流れは飛躍的に効率化されたと考えている。

もっとも、もともと何もなかった所に持込んだシステムであるから、決して理想的な形ですべてが推移したわけではない。むしろ、状況に応じて方法を編出し、それをシステムにのせていった現地での苦労は並大抵のものではなかったというべきである。しかしながら、この経験は、防災課題に真に役立つ情報システムのありかたについて、多くの得難い経験をもたらした。ボランティアモードから、その内容を普遍化する研究モードへと重心を移しながら、今後は優れた災害情報システムの構築に向けて、関係者と努力していきたいと考えている。実践の中から育つシステムの強さをその中に実現することを目指したい。

これらの情報ボランティア活動の内容については、別途記事を参照されたい^{13) -15)}。

7.2 阪神大震災の災害状況のGIS上の分析

長田区での情報ボランティア活動と並行して、災害の状況を把握するための情報収集活動が行われた。収録された災害情報は、被災建造物の地点データ(国土地理院による震災直後の航空写真からの判読結果)、

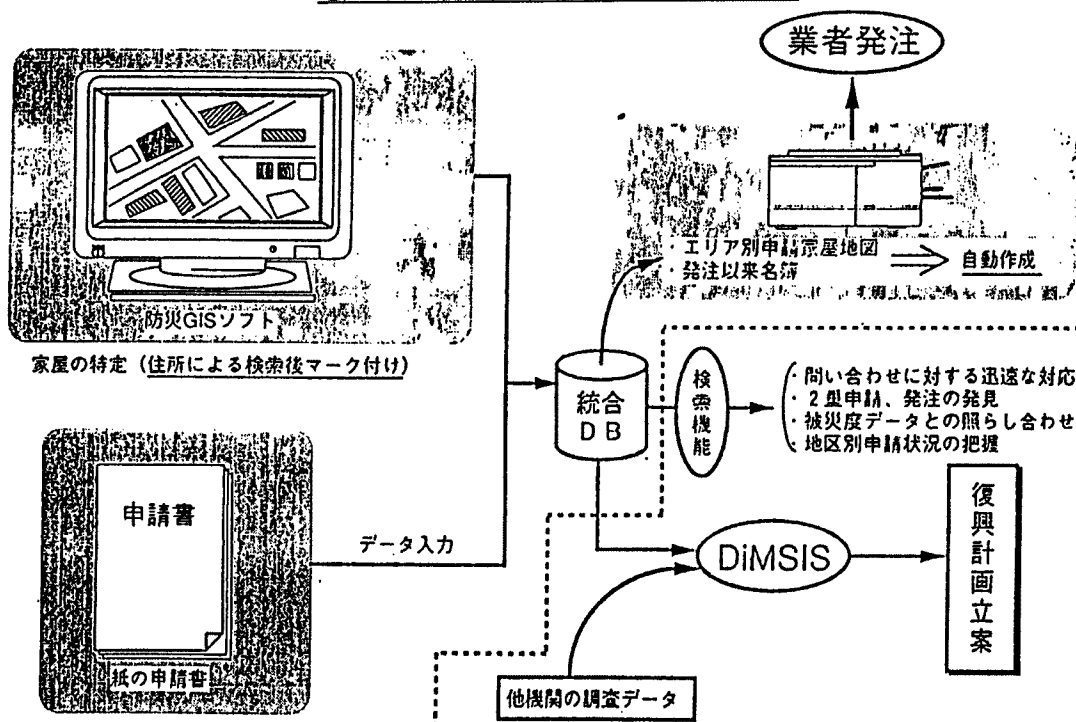


Fig. 7 Personal computer systems used for disaster information management as a volunteer activity at Nagata Ward Office, Kobe City

倒壊家屋で塞がれた街路のデータ（奈良大学地理学科・碓井照子助教授の指揮のもとに、同大学の学生が現地踏査）、死亡の発生地点データ（毎日新聞調査の原簿による）などであり、それらを国土地理院の1/10,000数値地図を基盤図としてGIS（DiMSIS/RINZO-DM）に収録した。カラー図面でなければ十分な把握ができないので本稿には図示しないが、それらの基本的な出力について、またこれらのデータの持つ意義と今後の防災への生かし方については文献^{1), 13)}を参照されたい。

7.3 防災情報システムの課題

物理的現象としての災害と社会的現象としての災害を繋ぐ要が、災害情報システムであり、それは災害対策の有効性を強く規定する。今回の阪神・淡路大震災では、こうした観点に立った災害情報システムが事前対策として整備されていなかった。そのため、災害情報システムの必要性から論を起す必要があった。

今回の大震災において、被害状況の把握ができず、個々の対応状況も把握できなかったことが、発災当初の対応の混乱を招いたことは多くの人が認識している。また、発災の時点で情報発生が終了するのではなく、その後の緊急対応、応急対応、復旧・復興過程において次々と処理すべき新しい情報が発生し、その処理能力の如何が災害対応の質を強く規定していることも明らかになった。こうした事後対応期の災害情報処理では、筆者が知る限り、6.1で紹介した家屋解体処理に関する情報処理活動が唯一であり、それもシステムを被災地で一部試験的に構築し、適用する試みがなされたに過ぎない。したがって、災害情報システムのあり方については、依然として未来形で語られている部分が多い。しかし、これらの経験と、その過程で論ぜられた多くの討議事項から、災害情報システム構築にあたっての問題点は十分抽出できたと考えられる。

災害情報システムに関する課題は、i) 災害の予測、発災時の被害早期把握、および緊急対応における情報処理のそれぞれについて、どのようなシステムを構築すべきかという問題と、ii) 災害情報のデータベース化と共有化をどのように実現するか、という問題に分かれる。そのうち、i) については今回の経験を大いに生かして研究・開発が行われるべきであるし、事態はそのように動くと考えられる。一方、ii) については、震災から将来への教訓を十分に学びとるために、災害関連の情報の共有化を進めることが不可欠であ

る。

ここに述べた事項は、2. で説明した文部省緊急プロジェクトのワークショップでの討論に基づくものである。同プロジェクトの報告書¹⁾では、防災情報システムのありかたについて、さらに広範な討論の結果が示されているので、ぜひ御一読頂きたい。

8. むすび

阪神大震災は、わが国の防災課題の基本構造の根本的な再検討を迫るものであるとともに、われわれ災害研究者にも自己点検を迫るものであった。震災の発生以来、考えるべきことは多く、従来の自己の専門領域からの発言と、それだけではすまない、新たな研究パラダイムの構築へ向けての取組みの狭間に揺れ動く自分を見いだすことも再三である。しかし、この事態の中では、あえてそのような状態に身を置いて、次の展開を見定めるまで、流動的な状態をあえて作り出す冒険も必要なのではないかと、身の程知らずにも考えている。

本稿は、このような現在の筆者の状態を反映してまとまりがなく、読みづらいものとなったのではないかと恐れるものであるが、その責は当然筆者に帰するものであり、読んで頂いた方々のご批判を頂ければ幸いである。

阪神大震災の被災地はなお、復興の長い道を歩まねばならない。尊い犠牲のもとにわれわれは多くの教訓を学んだ。それらは今後の防災に真に役立ててこそ意味を持つ。災害研究に携る者の一人として、その使命を共有する決意とともに、この稿を終ることとする。

謝 辞

本稿の執筆までには、震害調査で多くの関係省庁、自治体、ライフライン事業者の関係各位のお世話になった。震災対応、復旧・復興のため、日夜を分たず奮闘される姿に敬意を表するものである。被害調査では、広島工業大学・能島暢呂講師、京都大学工学部・盛川 仁助手の多大の御協力を得た。また、長田区における災害情報処理のボランティア活動は、京都大学防災研究所・角本 繁客員助教授をリーダーとする現地チームの寝食を忘れた活躍によってはじめて可能になったことを特筆したい。これを含む防災GIS活動では、奈良大学地理学科・碓井照子助教授、京都大学防災研究所・岩井 哲助手の多大の貢献と、東京大学生産技術研究所・山崎文雄助教授ならびに柴崎亮介助教授、さらに東京大学工学部・岡部篤行教授（GIS学会事務局長）のご支援があった。これら各位に深謝の意を表する。

震災の犠牲になられた方々のご冥福を祈り、被災された方々の生活復興と地域の復興が早からんことを祈って本稿を結ぶこととしたい。

参考文献

- 1) 平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究，文部省科学研究費，総合研究A（06306022；研究代表者：藤原悌三）報告書，平成7年3月。
- 2) 神戸大学工学部建設工学科土木系教室兵庫県南部地震学術調査団：兵庫県南部地震緊急被害調査報告書（第2報），1995年3月。
- 3) 文部省緊急プロジェクト「兵庫県南部地震をふまえた大都市災害に対する総合防災対策の研究」報告書，京都大学防災研究所（研究代表者：亀田弘行），平成7年3月。
- 4) Kameda, H. and Takagi, H.: "Seismic Hazard Analysis Based on Non-Poisson Models," *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University*, Vol. 43, Part 3, July 1981, pp. 397-433.
- 5) 亀田弘行：「安全な社会」を目指して，京都大学防災研究所公開講座「生活と防災」，総説，平成5年8月，pp. 1-11.

- 6) 竹村雅之・池浦友則：短周期データからみた1923年関東地震の多重震源性，地震，第2輯，第47巻，1994，pp. 351-364.
- 7) Fujiwara, T., Suzuki, Y., Nakashima, M., Iwai, S., Kitahara, A. and Bruneau, M.: "Overview of Building Damage from the 1995 Great Hanshin Earthquake," DPRI News Letter, Special Issue, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, February 1995, pp. 13-20.
- 8) Kameda, H. and Nojima, N.: "Developments of Lifeline Earthquake Engineering," IDNDR Symposium on Earthquake Engineering Disaster Reduction Technology, IISEE, Tsukuba, 1992, pp. 111-128.
- 9) 若林拓史・亀田弘行：ロマ・プリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域の交通サービスへの被害分析と交通運用策の評価，土木計画学研究・論文集，No. 10，1992年，pp. 103-110.
- 10) 中川 大：交通，平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究，文部省科学研究費突発災害（研究代表者：藤原悌三），平成7年3月，pp. 326-333.
- 11) 加藤多郎・能島暢呂・亀田弘行：相互連関を持つ都市ライフライン系の地震被害波及構造の分析とリスク評価法に関する研究，都市耐震センター研究報告，別冊第10号，京都大学防災研究所都市施設耐震システム研究センター，平成4年9月。
- 12) 亀田弘行・能島暢呂：相互連関，平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究，文部省科学研究費突発災害（研究代表者：藤原悌三），平成7年3月，pp. 334-343.
- 13) Kameda, H., Kakumoto, S., Iwai, S., Hayashi, H. and Usui, T.: "DiMSIS; A Geographic Information System for Disaster Information Management of the Hyogoken nanbu Earthquake," Journal of Natural Disaster Science, Vol. 16, No. 2, 1995, pp. 89-94.
- 14) 角本 繁・亀田弘行：次世代地理情報システムと災害情報管理への応用 — 阪神大震災の被害状況分析と災害情報管理への試み — ，都市耐震センター研究報告，第9号，京都大学防災研究所都市施設耐震システム研究センター，平成5年4月，pp. 86-94.
- 15) 大野茂樹：長田区役所での家屋解体撤去受付業務の防災GISによる支援活動，都市耐震センター研究報告，第9号，京都大学防災研究所都市施設耐震システム研究センター，平成5年4月，pp. 180-182.