ＩＳＳＮ　0386-5878
土木研究所資料第3599号

マイクロフィルム用資料

土 木 研 究 所 資 料

平成９年度防災技術課調査研究成果
概要報告書

平成10年10月

建 設 省 土 木 研 究 所
耐震技術研究センター・防災技術課

Copyright © (1998) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は，土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって，本報告書の全部又は一部の転載，複製は，土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料
第3599号1998年10月

平成９年度防災技術課調査研究成果
概要報告書

耐震技術センター長　横山　功一*1
防災技術課　課　長　杉田　秀樹
主任研究員　野崎　智文
主任研究員　金子　正洋*2
研究員　濱田　禎*3
管理係長　田島　明*4
研究員　遠藤　和重*5

要旨

平成９年度に防災技術課が調査研究の成果をまとめたものである。震災防災計画の高度化、都市型震災における土木構造物の社会経済的影響評価手法、地震時早期被害予測・情報伝達システム、道路ネットワークの耐震性・防災機能の向上技術、河川施設の耐震強化事業計画、強震計の点検調査等の調査研究の他に、付属資料として学会などでの口頭発表論文を含んでいる。

キーワード：公共土木施設、地震防災、防災情報システム、道路ネットワーク、被害検知、道路占用施設・沿道施設、社会経済影響評価、河川堤防、被害予測、強震観測

*1　現　茨城大学工学部都市システム工学科教授
*2　現　耐震技術研究センター振動研究室主任研究員併任
*3　現　建設本省道路局道路交通管理課道路交通情報係長
*4　現　企画部国際研究協力推進室国際係長
*5　現　沖縄開発庁沖縄総合事務局開発建設部道路建設課長

目　　次

調査研究

1．震災対策の高度化に関する研究 …… 9
2．強震計管理費 …… 15
3．都市型防災における土木構造物の社会経済的影響評価手法に関する研究 …… 19
4．震災対策体制のパフォーマンス評価に関する基礎的研究 …… 23
5．都市震災の社会経済的影響評価システムに関する研究 …… 27
6．地震の脅威の定量化に関する交流育成 …… 31
7．河川施設の耐震強化事業計画に関する試験調査 …… 35
8．地震時早期被害予測・情報伝達システムに関する調査 …… 39
9．道路構造の都市防災機能の向上に関する調査 …… 43
10．道路ネットワークの耐震性・防災機能の向上技術に関する試験調査 …… 47
11．河川施設の強震計の点検調査 …… 53
12．道路施設の震害予測システムに関する調査 …… 57
13．震害予測システム構築に関する調査 …… 61

（付属資料）

投稿・発表

1．土木学会第53回年次学術講演会　（H10年10月4日～6日・兵庫県神戸市）

・交通施設の地震被害による経済的影響評価システム …… 69

・震災対策体制のパフォーマンス評価手法の提案 …… 73

・地震計ネットワークを使った公共土木施設の即時震害予測手法 …… 77

2．第10回日本地震工学シンポジウム　（H10年11月25日～27日・神奈川県横浜市）

・交通施設の地震被害による経済的影響評価システム …… 83

・震災対策体制のパフォーマンス評価手法の提案 …… 91

・公共土木施設における即時震害予測システム …… 99

3．天然資源の開発利用に関する日米会議

耐風・耐震構造専門部会　第30回合同部会

UJNR-WIND SEISMIC EFFECTS

（1998.5.12～15、Gaithersburg, Maryland, U.S.A.）

・SEISMIC INFORMATION SYSTEM FOR CIVIL INFRASTRUCTURES …… 107

4．第7回ライフライン施設の災害防止に関するワークショップ

7th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline System

（1997.11.4～7、Seattle, Washington, U.S.A.）

・DEVELOPMENT OF REAL-TIME EARTHQUAKE DDAMAGE ESTIMATION SYSTEM FOR ROAD FACLLITIES …… 125

・SYSTEM TO ASSESS SOCIO-ECONOMIC EFFECT OF EARTHQUAGE DISASTER …… 141

5．日米地震防災研究ワークショップ

U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Resarch　（H10年6月22日～23日、東京）

・COUNTER-EARTHQUAKE TECHNOLOGIES FOR TRANSPORTATION SYSTEMS …… 157

6．第2回日米地震政策シンポジウム

U.S.-JAPAN Earthquade Policy Symposium　（H9年9月17日～19日、神戸市）

・STRENGTHENING OF CIVIL INFRASTRUCTURE/BUILDINGE AND URBAN PLANNING/DEVELOPMENT FOR EARTHQUAKE HAZARD REDUCTION …… 173

7．三陸はるか沖地震シンポジウム　（H10年1月7日～8日、八戸市）

・道路施設の即時被害予測システムの開発 …… 189

Development of Real-time Earthquake Damege Estimation System for Road Facilities

8．防災セミナー　（H10年1月27日～28日、東京）

・公共土木施設の地震防災研究の現状 …… 197

1997（H9）年度
調査研究
概要報告書

防災技術課

研究課題　震災対策計画の高度化に関する研究
研究機関　平8～平10
担 当 者　杉田秀樹　野崎智文
予算科目　試験研究費
本　　文

地震発生後、公共土木施設の管理者は、被害状況の把握、緊急対応、復旧対策などの対策を迅速かつ的確に実施することが求められる。したがって、混乱期の中で所管施設の被害状況・対策状況に関して適切な情報管理を行う必要がある。このような体制計画にあたっては、必要な機器システムの構築、それらを扱う体制のあり方等に関して、平常時から意を払う必要がある。本研究では、最近の情報・通信技術を活用した震災情報システムの構築法、震災状況を検知する各種の技術ならびに震災対策体制のパフォーマンスを評価する手法等について検討し、震災対策計画の高度化に資する具体策をまとめるものである。平成9年度は、防災技術課においては震災情報システムの効率的な構築法、施設の被害を直接検知する被害検知技術についてまとめ、システム課においては高解像度の衛星画像を用いた震災状況のリモートセンシング技術について検討を行った。

研究課題　強震計管理費
研究機関　昭56～平12
担 当 者　杉田秀樹　田島明
予算科目　試験研究費
本　　文

土木研究所では、局所的な地形・地盤条件が地震動特性に及ぼす影響の解析を目的として特定地域に多数の強震計を系統的に配置する高密度強震観測と、構造物や周辺地盤上に強震計を設置して構造物や地盤の地震地震動特性を把握するための一般強震観測を実施している。本課題は、これら観測施設の継続的な維持管理と観測記録の処理・蓄積を行うことを目的とする。平成9年度は、昨年度に更新・拡充を実施した高密度強震観測システムの稼動状況の整理、一般強震観測施設の維持点検、観測記録の改修と一次処理を実施した。なお、一般強震観測施設の維持点検は、地方建設局からの依頼による調査（河川施設の強震計の点検調査）とあわせて実施している。

研究課題　都市型震災における土木構造物の社会経済的影響評価手法に関する研究
研究機関　平8～平10
担 当 者　杉田秀樹　野崎智文
予算科目　試験研究費
本　　文

大規模地震が発生し交通施設に被害が生じた場合には、物流が阻害されることにより生産活動が低下するため、その影響によって被災地域の生産活動が低減する。さらに被災地域内における生産活動の低下は全国の生産活動にも影響する。交通ネットワークの耐震補強計画にあたっては、このような長期的な経済損失の観点にも基づいて検討する必要がある。本研究においては、交通ネットワークの被災による経済損失を推計する手法について検討するものである。平成9年度は、鉄道施設の被災の道路交通への影響、経済推計部分の高度化を図った。開発された手法は、画面上で被災箇所を設定し推計を自動的に行うアプリケーション(EASSE: Earthquake Assessment System for Socio-economic Effect)に組み込み、ケーススタディーを行った。

研究課題　震災対策体制のパフォーマンス評価に関する基礎的研究
研究機関　平9
担 当 者　杉田秀樹　野崎智文

予算科目　科学技術振興調整費
本　　文
地震発生直後、社会基盤施設を管理する組織は、広範にわたる所管施設の被害状況を迅速かつ的確に収集することが求められる。このような体制は、通常多くの人や情報伝達・処理を行う機器の集合体であり、それらの要素の連携によって情報が収集され、集約されてゆく。ところで、体制全体としての情報収集の迅速性・的確さ（すなわちパフォーマンス）は、個々の人・機器のみの効率を高めるだけでは必ずしも実現されず、それらの要素が有機的に連携した「システム」として評価されなければならない。平成９年度には、震災対策体制をネットワーク表現することによって、体制全体としての被害情報収集に関するパフォーマンスを評価する手法を提案した。

研究課題　都市震災の社会経済的影響評価システムに関する研究
研究機関　平７～平９
担 当 者　杉田秀樹　野崎智文
予算科目　科学技術振興調整費
本　　文
公共事業に関するプロジェクトを計画する際に、事業実施の影響・効果を測定し、複数事業間のプライオリティーを把握する必要がある。たとえば交通ネットワークの耐震対策を計画する場合、ネットワーク中の複数の区間・施設における補強事業等によって耐震性向上を図るが、個々の事業の組み合わせにより、その効果は異なる。本研究では、地震により地域の交通施設が被災した場合の長期的な経済損失を推計するためのシステム(EASSE: Earthquake Assessment System for Socio-economic Effect)を開発する。EASSE の実行時には、想定された地震被害や補強計画に応じて交通ネットワークの被災箇所を入力することにより経済損失額が得られ、複数の耐震補強計画に対応した被災パターンとそれに伴う経済損失額のセットを比較検討しながら、長期的な点から見た補強計画の判断を行うことができる。平成９年度には、これまで開発された手法をプログラム化し、GUI アプリケーションとして EASSE を開発した。

研究課題　地震の脅威の定量化に関する交流育成
研究機関　平９
担 当 者　杉田秀樹　野崎智文
予算科目　科学技術振興調整費
本　　文
日米コモンアジェンダに謳われている「地震の脅威の定量化」を受け、これを実現するための地震情報システム(Seismic Information Systems)に関する日米間の研究協力の枠組みとなる作業部会を、UJNR 耐風耐震構造専門部会のもとに設立するため、部会の目的、検討内容等について関係機関(FEMA, NIST, FHWA)の担当者と打ち合わせた。また、同作業部会と関連する既設作業部会の活動、現在進んでいる関連分野の研究、米国の耐震基準システム等に関する情報交換を行ったほか、米国研究所の施設を視察した。

研究課題　地震時早期被害予測・情報伝達システムに関する調査
研究機関　平７～平11
担 当 者　杉田秀樹　濱田禎
予算科目　道路事業調査費
本　　文
兵庫県南部地震以後、各種公共・公益施設の耐震性の向上が図られる一方で、大規模地震により施設被害が生じた場合にこの影響を最小限に押さえるためのソフト的危機管理技術の開発・導入が求められている。本課題では、災害情報を適切に管理・活用することで震災直後の道路管理者の初動活動を支援する道路施設の震害予測システムおよび情報伝送システムの開発を実施するものである。平成８年度までに、道路橋被害と路線沿いの液状化危険度の予測所報と、情報伝送システムの検討を行っている。平成９年度は、①地中構造物及び法面の震害予測の可能性、②占用・沿道施設被害の影響予測手法、③情報伝送システムの高度化に

関する検討を実施した。なお、本研究は道路技術五箇年計画の「地震時早期被害予測・情報伝達システム」及び「人に優しい道路空間の地震防災技術」の一環として実施するものである。

研究課題　道路構造の都市防災機能の向上に関する調査
研究機関　平8～平11
担 当 者　杉田秀樹　濱田禎
予算科目　道路事業調査費
本　　文

兵庫県南部地震の教訓に、人口・産業が集中した都市圏では、道路の防災機能の良否が震災時の緊急活動や地域社会への影響を大きく左右することが挙げられる。道路の防災機能を向上するために、道路管理者には、占用・沿道施設及び環境施設帯を含めた道路空間としての耐震性・防災性をあらかじめ把握し、適切な震前・震後対策を講じることが求められている。本課題はこれを具現化する技術的方策の調査を行うものであり、平成9年度は道路空間の被災状況把握技術のうち、①占用・沿道施設の影響の予測手法、及び、②被害予測に用いるデータベースの検討を実施した。なお本研究は、道路技術五箇年計画の「人に優しい道路空間の地震防災技術」の一環として実施するものである。

研究課題　道路ネットワークの耐震性・防災機能の向上技術に関する試験調査
研究機関　平8～平11
担 当 者　杉田秀樹　野崎智文
予算科目　道路事業調査費
本　　文

大規模地震が発生した場合、地震発生直後の救急・救援活動、緊急輸送活動を支える道路ネットワークの機能は非常に重要であり、ネットワーク全体としての耐震性を確保する必要がある。本研究においては、道路ネットワークの各区間の被災リスクを考慮し、ネットワーク全体としての耐震性、各道路区間の耐震性に関する重要度を定量的に評価する手法を検討する。平成9年度は、防災技術課においては昨年度に検討された道路ネットワークおよび区間の耐震性評価手法を整理し、テストプログラムによってその妥当性を検証した。また、防災活動OD表あるいは区間の耐震性を評価するために収集が必要な情報について検討した。一方道路研究室においては、道路区間の耐震性すなわちリスクを確率的に表現するフラジリティーを定式化し、GISベースのテストプログラムによってその有効性を検討した。

研究課題　河川施設の耐震強化事業計画に関する試験調査
研究機関　平8～平10
担 当 者　杉田秀樹　濱田禎
予算科目　河川事業調査費
本　　文

兵庫県南部地震においては多くの公共土木施設が被災し、これを契機に堤防を初めとする河川施設の耐震強化事業が7年度より本格的に開始された。しかし、耐震強化の水準としてどの程度の地震力を設定するのが妥当かについての方針は必ずしも確立されておらず、耐震強化水準としての設計地震外力を定めることは将来計画を策定する上で重要である。本課題は、耐震強化によってもたらされる便益とこれに要する費用の算定手法を提案するものである。本研究の成果は、費用対効果の視点に基づく最適な耐震強化水準や、耐震強化水準を達成する設計地震外力の設定に資するものである。平成9年度は、便益の測定方法、耐震強化法策と費用の整理、代表的な堤防モデルにおける便益のケーススタディーを実施した。

研究課題　河川施設の強震計の点検調査
研究機関　平10
担 当 者　杉田秀樹　田島明

予算科目　直轄河川改修費
本　　文
建設省が所管する公共土木施設の一般強震観測は、昭和３２年に近畿地方建設局管内の猿谷ダムにＳＭＡＣ型強震計を設置して開始された。平成１０年３月現在、建設省・公団・自治体が所管する３５６箇所の施設で観測が実施されており、観測された地震記録は各種構造物の耐震設計基準や地震動特性の研究に活用されている。本課題は、一般強震観測のうち建設省が河川施設に設置した観測施設を対象として、強震計の維持点検、地震記録の改修、数値化等の一次解析を行うことを目的とする。平成９年度は、ＳＭＡＣ型強震計１４箇所２８台、普及型強震計１２箇所３３台の点検補正、平成８年度に取得されたアナログ記録の数値化、および、平成８年度に作成した「河川堤防における強震計配置計画（第３期）」の一部見直しを実施した。

研究課題　道路施設の震害予測システムに関する調査
研究機関　平5～平9
担 当 者　杉田秀樹　濱田禎
予算科目　一般国道直轄改修費
本　　文
関東地方建設局では地震計ネットワークの構築を進めており、これにより管内約100箇所の震度、最大加速度、SI値等の地震動特性値を震後即時に収集することが可能となった。本課題は、これらの情報を利用して管理路線の液状化および橋梁の被害等を震後即時に概略予測するシステム（震害予測システム）を開発することを目的とする。平成８年度までにプロトタイプの開発を終了し、平成９年度はシステムの総合評価及び事例検証を実施した。なお本研究は、道路技術五箇年計画「地震時早期被害予測・情報伝達システム」の一環として実施するものである。

研究課題　震害予測システム構築に関する試験調査
研究機関　平9～平11
担 当 者　杉田秀樹　濱田禎
予算科目　一般国道直轄改修費
本　　文
関東地方建設局では、平成７～９年度の３箇年で、管理施設近傍の地震動情報を震後即時に収集する地震計ネットワークの整備が進められている。土木研究所では関東地建との共同により、本局に収集された地震動情報を活用して震後即時に施設被害の可能性を概略推計する震害予測システムの開発を実施しており、道路沿いの液状化危険度と橋梁被害を予測できるプロトタイプシステムの開発を終了している。本課題は、既存のプロトタイプシステムに河川堤防の被害状況を概略予測する機能を付加するものであり、平成９年度は①河川堤防の液状化危険度予測システムの開発、及び②河川堤防の沈下量予測手法の検討を実施した（図１）。

土木研究所刊行物以外の刊行物に載せた論文（土木技術資料に掲載した論文は除く）

（防災技術課）

論文名　地震動特性値分布の即時予測手法に関する研究
口頭発表者名　濱田禎
執筆者名　濱田禎、杉田秀樹、金子正洋
書籍名　第24回地震工学研究発表会講演論文集
発行所　土木学会地震工学委員会
巻号
頁　193～196
発行年月　平成9年7月

論文名　都市基盤施設の被害検知体制に関する研究
口頭発表者名　野崎智文
執筆者名　野崎智文、杉田秀樹、遠藤和重
書籍名　第24回地震工学研究発表会講演論文集
発行所　土木学会地震工学委員会
巻号
頁　1273～1276
発行年月　平成9年7月

論文名　震災による交通ネットワーク被害の生産活動への影響評価について
口頭発表者名　杉田秀樹
執筆者名　杉田秀樹、野崎智文、遠藤和重
書籍名　第24回地震工学研究発表会講演論文集
発行所　土木学会地震工学委員会
巻号
頁　1277～1280
発行年月　平成9年7月

論文名　建設省における震後即時被害予測システムの開発
口頭発表者名　金子正洋
執筆者名　金子正洋、杉田秀樹、濱田禎
書籍名　土木学会第52回年次学術講演会
発行所　土木学会
巻号　I-B
頁　816～817
発行年月　平成9年9月

論文名　交通基盤施設の地震被害による社会経済的影響評価システムの開発
口頭発表者名　杉田秀樹
執筆者名　杉田秀樹、野崎智文
書籍名　土木学会第52回年次学術講演会
発行所　土木学会
巻号　I-B
頁　818～819
発行年月　平成9年9月

論文名　地震被害の初動検知体制パフォーマンスの評価に関する研究
口頭発表者名　野崎智文
執筆者名　杉田秀樹
書籍名　土木学会第52回年次学術講演会
発行所　土木学会
巻号　I-B
頁　826～827
発行年月　平成9年9月

論文名　堤防の地震被害の影響の推定法
口頭発表者名　濱田禎
執筆者名　濱田禎、杉田秀樹
書籍名　土木学会第52回年次学術講演会
発行所　土木学会
巻号　I-B
頁　850～851
発行年月　平成9年9月

論文名　リアルタイム地震対応を目指した地震計ネットワークの整備
口頭発表者名
執筆者名　杉田秀樹
書籍名　地震工学振興会ニュース
発行所　（財）震災予防協会

巻号　No. 157
頁　42～46
発行年月　平成9年11月

論文名　震後早期啓開を支援する即時被害予測システムの開発
口頭発表者名　濱田禎
執筆者名　濱田禎、杉田秀樹、飛田忠一
書籍名　第22回日本道路会議一般論文集(B)
発行所　（社）日本道路橋会
巻号
頁　1018～1019
発行年月　平成9年12月

論文名　道路施設の即時被害予測システムの開発
口頭発表者名　杉田秀樹
執筆者名　杉田秀樹、濱田禎
書籍名　三陸はるか沖地震シンポジウム論文集
発行所　八戸工業大学
巻号
頁　139～144
発行年月　平成10年1月

論文名　公共土木施設の地震観測
口頭発表者名　杉田秀樹
執筆者名　杉田秀樹
書籍名　日本地震学会ニュースレター
発行所　日本地震学会
巻号
頁
発行年月　平成10年3月

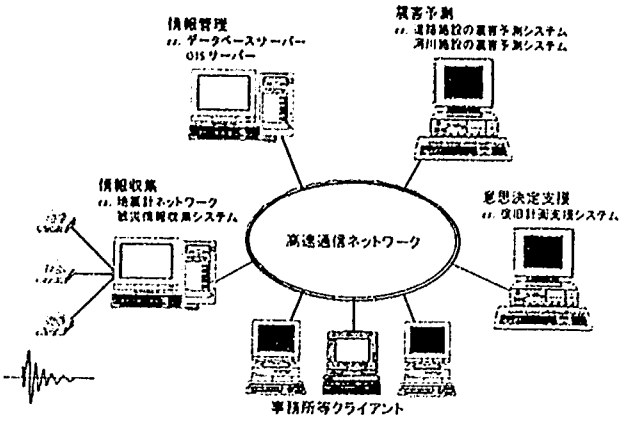
1. 震災対策の高度化に関する研究

研究機関：平８～平10

担当：防災技術課　　課長：杉田秀樹，　主任研究員：野崎智文

【要旨】

地震発生後、公共土木施設の管理者は、被害状況の把握、緊急対応、復旧対策などの対策を迅速かつ的確に実施することが求められる。したがって、混乱期の中で所管施設の被害状況・対策状況に関して適切な情報管理を行う必要がある。このような体制計画にあたっては、必要な機器システムの構築、それらを扱う体制のあり方等に関して、平常時から意を払う必要がある。本研究では、最近の情報・通信技術を活用した震災情報システムの構築法、震災状況を検知する各種の技術ならびに震災対策体制のパフォーマンスを評価する手法等について検討し、震災対策計画の高度化に資する具体策をまとめるものである。平成９年度は、防災技術課においては震災情報システムの効率的な構築法、施設の被害を直接検知する被害検知技術についてまとめ、システム課においては高解像度の衛星画像を用いた震災状況のリモートセンシング技術について検討を行った。



１．研究方法

本研究を進めるにあたって、以下のような課題を設定した。

①現在、建設省工事事務所において導入されている、施設管理・災害に関する情報システムにはどのようなものがあるか調査し、その状況・問題点・改善点を分析する。

②ユーザーとしての施設管理者の立場に立ったシステム構築法を検討するため、地震発生後の工事事務所の震災対策業務を分析し、それらを効率化するための情報技術を列挙し、各々の業務を効率的にサポートする震災情報システムの機能を検討する。

③従来行われてきた、規模の大きな震災情報システムの構築法と、最近の技術を活用した分散型の震災情報システムの構築法の利害得失を分析し、手戻りや過大なコストがかからないシステムの構築法について検討する。

④地震による所管施設の被害等を迅速かつ効率的に検知する技術を提案する。

⑤今後充実してゆく高解像度衛星画像を、震災対策に活用するための技術、活用方法を、施設管理者の視点に立って検討する。

２．研究成果

２．１　モデル地建における情報システムの導入状況

モデル地方建設局として関東地方建設局を選定し、施設を管理する各事務所における情報システムの導入状況および各事務所で取り扱われている情報を調査表により調査し、まとめた。対象施設は河川管理施設、砂防施設、道路であり、これらについて、災害情報に関するシステムのほか、平常時の管理に関するシステ

ムについても含めて調査した。その結果、将来稼動予定の17システムを含む50のシステムが稼動中あるいは計画中であることが判明した。それらのうちあるものはパーソナルコンピューター(PC)上で、また他のものはワークステーション(WS)上で開発されている。ただし一部のシステム群をのぞいて、各システム同士がネットワーク上で有機的に連携しているケースは少ない。これらの調査結果は表としてまとめており、各システムの目的、扱っているデータ、ネットワーク接続の状況、使用機器などが一覧できるようにしている。表－1にそれらを抜粋したものを示す。

表－1　既存情報システムの例

分野	システム名称	システム概略	用途	データ	実現方法	ネットワーク	使用機器	表示機能
共通	地震情報システム	収集	地震動の記録	震度計データ	独自開発	事務所～本局	PC、WS	文字・数値、地図
	レーダー雨量計システム	収集	降雨情報収集	雨量	独自開発	事務所～本局	WS	地図
道路	道路管理データベースシステム	データベース管理	道路維持管理	道路施設情報の保管	独自開発	接続なし	PC、WS、一部汎用機	文字・数値、写真・画像、地図、図面
	道路情報システム	収集、処理、伝達	災害状況記録、復旧活動支援	気象、交通、道路状況	独自開発、専用	現地～事務所／出張所	PC、WS、汎用機	文字・数値、写真・画像
道路・河川	防災管理システム	情報管理・計画・伝達	災害状況記録、復旧活動支援	地図、河川・道路・測量基地等	独自開発	庁舎内、事務所～本局	PC	文字・数値、写真・画像、地図
河川・ダム	河川情報システム	収集	河川管理、洪水対策	雨量・水位	独自開発	事務所～本局	WS	文字・数値、図面
	洪水予測システム	予測	洪水時の水位予測	降雨分布、水位	独自開発	接続なし	WS	文字・数値、グラフ
河川	河川管理システム	データベース管理	河川台帳管理	法定台帳、各種調書	独自開発	事務所～本局	WS	文字・数値、図面
	静止気象衛星画像受信システム	データ受信	気象情報収集	ひまわり画像	専用ソフト	接続なし	PC、その他	写真・画像
ダム	ダム放流設備制御装置	制御、監視、管理	ダム管理	関連設備の運転、監視、管理情報	独自開発	接続なし	汎用機	文字・数値、図面
	地すべり自動観測システム	収集	貯水池周辺の地すべり観測	自動計測データ	独自開発	接続なし	PC	文字・数値、地図、グラフ
砂防	砂防指定地台帳情報管理システム	収集、処理、伝達	砂防指定地管理、災害対策	砂防指定地台帳	独自開発	接続なし	PC	文字・数値、写真・画像、地図、図面

2－2　震災対策業務と情報技術の活用可能性

多数の機能を持った大規模な震災情報システムを構築する場合、非常に高機能であるにもかかわらず、実務に活用するには操作が複雑であったりデータの管理が煩雑なものとなる可能性がある。そこで平成9年度の研究においては、施設を管理する工事事務所の震災対策業務を①フェーズ、②作業、③動作、④情報技術、⑤実現方法の観点でまとめた。たとえば地震発生後の「緊急調査」のフェーズのうち「地震、津波、気象条件に関する情報の収集」という作業にあたっての動作として、「気象庁より地震情報、津波情報、気象情報等を入手する」ことが必要であると分析し、その動作を実現し、あるいは効率化するために必要な情報技術は「電話等の通信技術、情報伝送技術」であると結論づけた。そしてそれらの情報技術を実現する方法として「電話・ FAX、専用システム・インターネット」を提案した。このような方法により、複雑な震災対策業務であっても、個別の作業は「記録する」、「状況を伝える」といった動作の組み合わせであって、それらを高度化する個別の技術が比較的容易に導入できることが示される。これらの検討結果を抜粋したものを表－2に示す。この検討により得られた情報技術、実現方法は必ずしも最先端のものばかりではないが、現在普及している技術を適切に組み合わせることでも、個別の作業は十分に効率化できる可能性があることを示している。さらにこの結果に基づき、具体的にいくつかの作業を効率化するシステムの、機能等について提案した。

表－2　震災対策業務分析の例

フェーズ	作業	動作	情報技術	実現方法
初動体制の確立	地震情報の把握	地震が発生したことを認知する	同報通信技術、放送技術	テレビ・ラジオ、地震計・同報装置
緊急調査 応急調査 詳細調査	施設構造物点検	現地において施設構造物被害状況の目視点検や動作点検を行い、点検結果を記録する	映像・画像・音声等の電子化技術、モバイル通信技術、情報伝送技術、データベース技術	電子野帳・ディジタルカメラ・GPS受信機、モバイルGIS、ITVカメラ・ビデオカメラ・・・
対策の検討・判断	収集した情報の分析	入手済みの情報から、震度海入手部分の状況を推定し、二次被害の予測や影響度の評価	シミュレーション技術、即時被害推定・二次被害予測技術	LAN・クライアント／サーバーシステム、GIS、データベースサーバー・・・
緊急措置 応急復旧 本復旧	規制・避難誘導	交通規制に関する情報を現地の情報掲示板に表示する。または掲示板を設置する。	ITS技術、遠隔操作による情報表示	カーナビ・VICS、路中コントロールによる情報表示板
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・

2－3　震災情報システム構築法の検討

2－1の結果より、現時点でも各工事事務所等において多様な情報システム導入されつつあること、それらの多くは震災情報システムの部分的な機能を有していることがわかったが、各システムは多くの場合独立しており、ネットワーク接続されているとしても、他の機能を持ったシステムと連携しながら稼動しているわけではないことがわかった。また2－2の結果より、震災対策業務の部分的な作業に対して、現時点で普及している技術あるいは最新の技術を応用することによって、効率化を図りうることがわかった。

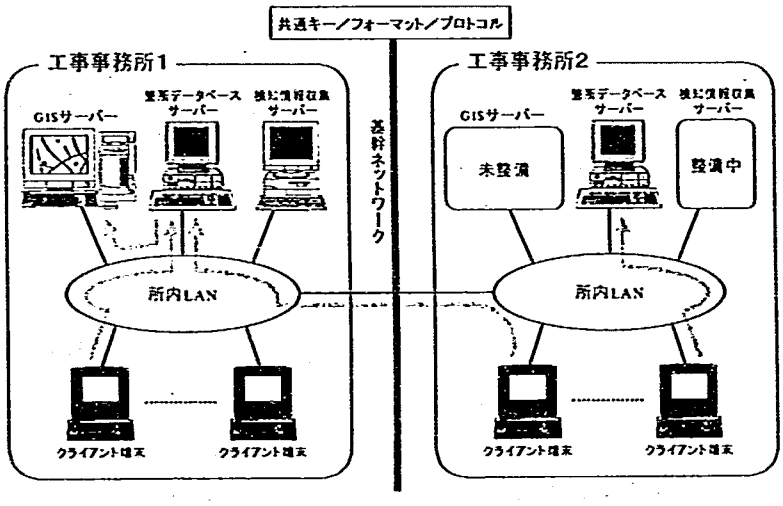
これまで震災情報システム等の情報システムを組織で導入する場合、比較的大規模なコンピューターを用い必要とされるすべての機能を一度に組み込む方法（ホストシステム）が多かった。このような巨大なシステムは、いくつかの部分的機能を担当するサブシステムの組み合わせで設計されているとしても、それらは常に全体システムの中で規定されるため、開発速度が遅く完成時にはその仕様が陳腐化するなどの弊害が生じる。一方、昨今の情報・通信技術の発展・普及により、震災情報システム構築に関連した次のような状況の変化が見られる。

①大量の画像、音声、数値データ等を、PC、WS などの小型で安価な機器で扱えるようになってきた。

②ネットワーク技術の発達・普及により、機器間での情報の伝送・共有が可能となってきた。

このような状況のもと、PC ベースの機器で比較的高度な個別の処理を行うことができ、またそのデータをネットワーク上でやり取りできるようになっていることは大きな進歩といえる。しかしながら、データベースサーバー、地図情報システム、メールシステム、予測推計システムなどを各工事事務所が異なるアプリケーションや異なるデータ構造で整備した場合、当該事務所内ではある程度の効率化がはかれるが、一旦それを地方建設局あるいは建設省内共通の情報として管理しようとした場合に齟齬が生じることは明白である。このような事態を避けるために、各システムの仕様、データ構造、アプリケーション等を全体で規定することも考えられるが、その場合は結局、前述のホストシステムの開発と同様の弊害が生じる。

本研究では、このような完全なホストシステムと完全な分散型システムの中間的な位置づけとなるシステムの構築方法について提案した。具体的には、所管施設の管理に関するデータベース、地図情報システム、被災情報収集伝達システム等の各システムが、互いのデータを活用しながら自分の機能を実現できることとし、後から新たな機能を持ったシステムを追加・拡張する場合にも柔軟に対応できることとする（図－1）。そのために少なくとも統一しておくべき事項として以下のようなものが必要と結論された。



図－1　効率的なサーバー／クライアントシステム

①施設等の管理あるいは被災情報に関するデータのうち、最低限必要な情報（すなわち共有する情報）のデータ項目・データ型等

②データ通信のプロトコル

たとえば施設の被災情報をある事務所が入手した場合に、そのデータに含まれる位置情報を用いて GIS サーバー上に位置等を表示することができるが、その位置座標が他の事務所、本局等のデータ要求側でも統一されていれば、そのデータのみを用いて各々の場所における GIS サーバーで表示させることができる。この場合前者の事務所と後者のデータ要求側でまったく同じ GIS システムを用いる必要はなく、単に双方で必要なデータの構造が統一されていて、同じプロトコルで通信できればよい。このように工夫することによって、各々の事務所で必要に応じて個別の機能を付加あるいは改良してゆけばよいため、各機能が早期に稼動できるとともに、データ資源の共有化が可能となり、ひいてはシステム全体の開発に関するコストを削減することができる。②についてはインターネットで用いられている TCP/IP などがその候補であり、①の統一すべきデータの例としては施設の位置情報（経緯度）や組織共通で用いられる ID、名称などが挙げられる。そ

れらのあるものは測量・測定し、あるものは新たに定義しなければならないが、全体的なコストを考えたとき、巨大で身動きが取りにくいシステムを構築するよりもその手間ははるかに小さい。

2．3　被害検知システム

震災対策のコストと効率を考えるとき、被害の検知についても一考が必要である。たとえば橋梁の被害を地震発生後即座に検知することは、緊急輸送路の機能確保、復旧対策の迅速な決定のために必要なことであるが、この場合、ITV カメラの画像による被害確認、変位計や歪計といった測定技術を用いる方法などが考えられる。ところが、それらは特定の施設の被害を集中的に監視する場合には有効であるが、連続する高架橋梁のような場合には、沿線すべてにこのようなシステムを設置することは費用面から見ても現実的ではない。そのような場合、たとえばワイヤーによる断線検知や光ファイバーによる歪検知によって、広範に分布する施設の被害の可能性をある程度大きな区間単位で検知する方法も対策上十分有効であると考えられる。今回の検討では、道路橋梁、土構造物等について、①集中的に被害を監視すべき特定の施設・箇所と②精度はある程度下がっても連続した範囲を監視する必要がある箇所・区間に分けて、有効な検知システムを検討した。たとえば、広範囲に分布する連続高架橋の被害を検知するセンサーについて検討した結果を表－3に示す。この場合正確な検知が可能なセンサー群でも被害は検知できるが、より安価なセンサー（ワイヤーセンサー等）によって被害の有無、可能性を検知できるだけでも震災対策上は非常に有向と判断できる。

表－3　連続高架橋の被害検知システム

測定項目	被害形態 / センサー	落橋	遊間の開き	路盤段差	各部の破壊		
		床版・桁	床版・桁	床版・桁	床版・桁	橋脚	橋台
変位（水平動）	伸縮計	○	◎	○	△	－	－
	変位計	○	◎	○	△	－	－
変位（上下動）	伸縮計	○	△	◎	△	△	△
	変位計	○	△	◎	△	△	△
	沈下計	○	△	◎	△	△	△
変位（3次元）	光波測距儀	◎	◎	◎	△	△	△
	GPS	◎	◎	◎	△	△	△
断線検知	ワイヤーセンサー	○	○	○	△		
変状検知	光ファイバーセンサー	○	○	○	△		
間接的検知	ITVカメラ等	◎	○	○	○		

◎：事象の有無、程度・位置等を検知
○：事象の有無を検知
△：事象の可能性を検知

2．4　今後の方針

本研究の検討内容は、混乱した状況下で的確な情報管理を求められる震災対策業務を高度化するための方法について検討するものであり、平成9年度は、このうち情報管理をサポートする震災情報システムについて検討を行った。次年度では、震災時の混乱状況下でも効率よく活動できる組織のパフォーマンスを評価する手法をまとめ、平常時における震災対策体制の検討に資する計画法を検討する。それまでに検討された内容は、「震災対策計画の高度化マニュアル」としてまとめる予定である。

3．主な研究成果物

・野崎智文、杉田秀樹、遠藤和重，都市基盤施設の被害検知体制に関する研究，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，1273 頁，平成 9 年 7 月

・野崎智文、杉田秀樹，地震被害の初動検知体制パフォーマンスの評価に関する研究，土木学会第 52 回年次学術講演会，826 頁，平成 9 年 9 月

・杉田秀樹，リアルタイム地震対応を目指した地震計ネットワークの整備，地震工学振興会ニュース No. 157，42 頁，平成 9 年 11 月

・SUGITA Hideki, HAMADA Tadashi, DEVELOPMENT OF REAL-TIME EARTHQUAKE DAMAGE ESTIMATION SYSTEM FOR ROAD FACILITIES, Seventh U. S. -Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, November, 1997

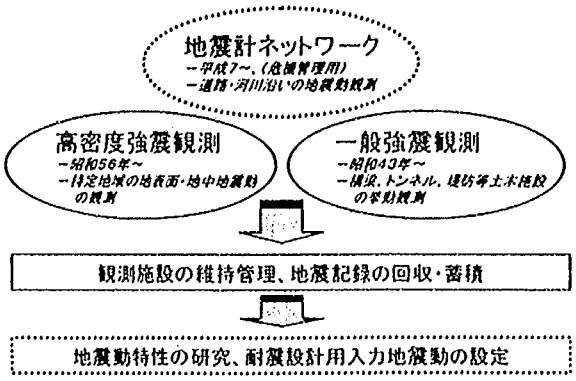
2. 強震計管理費

強震計管理費

研究期間：　昭和５６～平成１２

担当：　防災技術課　課長：杉田　秀樹　管理係長：田島　明

【要　旨】



土木研究所では、局所的な地形・地盤条件が地震動特性に及ぼす影響の解析を目的として特定地域に多数の強震計を系統的に配置する高密度強震観測と、構造物や周辺地盤上に強震計を設置して構造物や地盤の地震時振動特性を把握するための一般強震観測を実施している。本課題は、これら観測施設の継続的な維持管理と観測記録の処理・蓄積を行うことを目的とする。平成９年度は、昨年度に更新・拡充を実施した高密度強震観測システムの稼働状況の整理、一般強震観測施設の維持点検、観測記録の回収と一次処理を実施した。なお、一般強震観測施設の維持点検は、地方建設局からの依頼による調査（河川施設の強震計の点検調査）と合わせて実施している。

１．研究方法

１．１　高密度強震観測施設

高密度強震観測施設は、平成７年度補正予算により、相良、焼津、沼津、松崎、幕張・習志野、館山、神戸西地区、神戸東地区及び土木研究所構内の１０地区に拡充され、平成９年４月から観測を開始している。新しい観測システムでは、各観測地区から土木研究所への観測記録の自動伝送と、土木研究所に設置したワークステーションを用いた観測点の遠隔点検が可能である。平成９年度は、平成９年４月以降の観測システムの稼働状況、観測データの整理、観測精度の確認を通じて観測システムが正常に機能していることを確認し、今後の検討が必要な課題を抽出した。

１．２　一般強震観測施設

平成１０年３月現在における観測箇所数を表１に示す。平成７年兵庫県南部地震を背景に地建・公団・自治体において新規観測点が増加傾向にあること、設置から数十年が経過して老朽化・旧式化した観測点については更新が必要であることなどから、一層体系的かつ効率的な観測点の維持管理が求められている。平成９年度は、表１に示す３５６箇所のうち建設省管理分８１箇所の維持点検、平成８年度から３箇年計画で整備が進められている「河川堤防における強震計配置計画（第３期）」の一部見直しを行った。

表１　公共土木施設への強震計設置状況（平成１０年３月現在）

対象施設	箇所数	強震計型式		
		SMAC型	電磁式	普及型
		箇所数(台数)	箇所数(成分数)	箇所数(台数)
道路施設	178	91(169)	22(189)	65(351)
河川施設	51	17(29)	9(63)	25(68)
ダム施設	121	15(30)	56(614)	50(129)
下水道施設	6	6(13)	0(0)	0(0)
合計	356	129(241)	87(866)	140(548)

２．研究結果

２．１　高密度強震観測施設

１）観測システムの稼働状況：現地点検（平成９年９月）と土木研究所からの遠隔点検（平成９年９月、平成１０年１月）により、全観測点の機能診断を実施した。現地点検では、感振器の基本動作・ケーブル系の接続・電源の設定を重点的に調査し、１４箇所の不良観測点の修復を行った。また遠隔点検では時刻精度、内部メモリ残量、感振器の記録精度、通信機能を重点的に調査し、沼津地区（今沢中央公園）と小田原地区（森戸公園）の２

箇所で異常を検出した。原因は観測点側の動作不良と考えられ、次年度早期に現地での詳細調査が必要である。

2）観測データの整理：平成９年４月から平成１０年１月までの間に、土木研究に設置された通信サーバには１０１０成分の振動記録が蓄積された。これら振動記録には地震記録のほかに遠隔点検時のセンサーテスト記録や常時微動記録が含まれるため、気象庁が発行する地震火山台帳と比較することにより１１地震８３成分の実地震記録を選別した。ここに地震火山概況との比較が可能なのは平成９年９月までであり（平成１０年１月現在）、これ以降の地震については地震火山台帳の発行を待って改めて整理する必要がある。比較的大きな地震動が観測された平成９年９月８日東京湾を震源とする地震（Ｍ５．１）について、幕張習志野地区（花見川緑地）の観測記録を示すと図１の通りである。

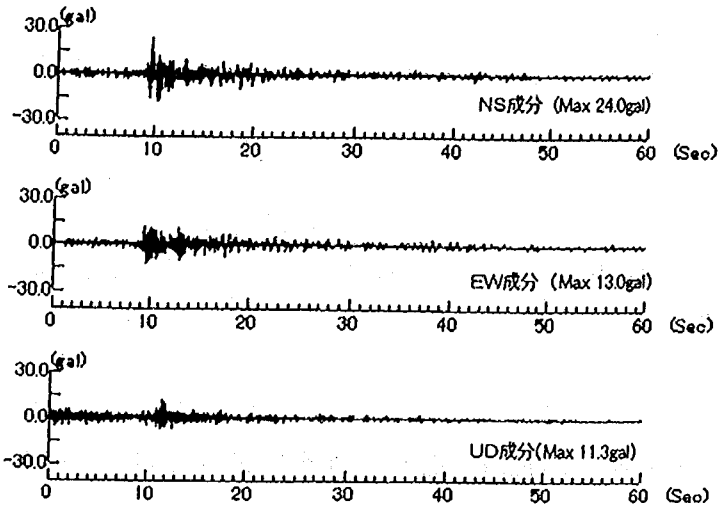


図１　幕張習志野地区における観測記録（花見川緑地、GL-2m）

3）観測精度の検証：地震記録の観測精度は、観測装置の性能、感振器の埋設精度、通信装置の通信精度等の要因に左右される。観測システムの竣工時にそれぞれ要求仕様を満足することを確認しているが、実観測における観測時刻と最大加速度値を防災科学技術研究所 k-net の地震記録と比較し、大きな不整合がないことを確認した。

4）今後の課題：高密度強震観測システムに関して、①観測システムを常時良好な状態に維持するための定期的な遠隔点検と現地点検の継続、②センサーテスト記録や常時微動記録を自動的に判別するためのシステム改良、③地震火山概況を利用した地震記録の整理、④同一地区内での欠測状況の整理と欠測原因の解明について検討する必要がある。

２．２一般強震観測施設

1）観測施設の維持点検：土木研究所が設置した１２箇所１９台を含むＳＭＡＣ型強震計６５箇所１２０台と、普及型強震計１６箇所４６台の現地点検結果を表２に示す。軽微な不具合や消耗は点検時の調整により、大きな不具合については管理担当事務所等に修理要請を行うことにより、良好な観測状態を維持している。

表２　強震計の点検補正結果（河川堤防）

観測所名	強震計型式	故障内容	必要な対策
安倍川堤防	SMAC型	時刻基盤不良	修理不可、要更新
紀ノ川堤防	SMAC型	線間絶縁不良	要詳細調査
岩木川堤防	SMAC型	地中・堤体：本体電源故障	要修理（修理中）
久慈川堤防	普及型	地表・地中：感振器動作不安定	要再埋設
姫川堤防	普及型	感振器ケーブル切断	要再埋設
六角川河口堰	普及型	記録部不良	要修理

2）河川堤防における強震計配置計画（第３期）の一部見直し：地中感振器と間隙水圧計の設置方法を一部見直し、事務連絡により強震計管理担当部署に周知した。

3）今後の課題：一般強震観測について、①観測点の新設・更新に際しての標準的な仕様、②地震記録管理の効率化・データ処理時間の短縮を図るためのデータフォーマット及びデータベース、③地中地震計の設置精度の検証法と観測記録の補正法、について検討する必要がある。

３．主な研究成果物：1)杉田、山中、野崎ほか：土木構造物における加速度強震記録(No. 22)、土木研究所彙報、Vol. 65、1998. 2、2)杉田：公共土木施設の地震観測、日本地震学会ニュースレター、Vol. 10-5、1998. 5、3)K. Yokoyama, K. Tamura et. al.：New Strong Motion Array Observation System of the PWRI, 29th U)NR Panel on Wind and Seismic Effects, 1998. 5、4)高密度強震観測システムの稼働状況、土木研究所資料、とりまとめ中

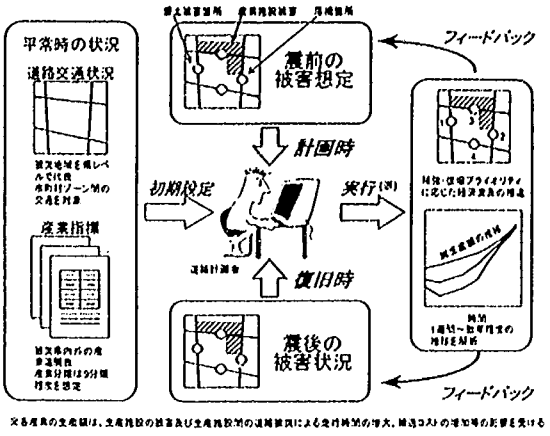
3. 都市型防災における土木構造物の社会経済的影響評価手法

都市型震災における土木構造物の社会経済的影響評価手法に関する研究

研究機関：平８～平10
担当：防災技術課　　課長：杉田秀樹，　主任研究員：野崎智文

【要旨】

大規模地震が発生し交通施設に被害が生じた場合には、物流が阻害されることにより生産活動が低下するため、その影響によって被災地域の生産活動が低減する。さらに被災地域内における生産活動の低下は全国の生産活動にも影響する。交通ネットワークの耐震補強計画にあたっては、このような長期的な経済損失の観点にも基づいて検討する必要がある。本研究においては、交通ネットワークの被災による経済損失を推計する手法について検討するものである。平成９年度は、鉄道施設の被災の道路交通への影響、経済推計部分の高度化を図った。開発された手法は、画面上で被災箇所を設定し推計を自動的に行うアプリケーション(EASSE: Earthquake Assessment System for Socio-economic Effect)に組み込み、ケーススタディーを行った。



１．研究方法

手法の流れは図１のように三つのモジュール（交通推計、変換、経済推計）から成り立っており、モジュールごとに独立した開発、改変、導入が可能である。都道府県等の交通計画者は、道路・鉄道の複数の被災箇所を指定し、交通ネットワークデータ、社会経済データに基づいて推計を行い、被災地域および全国の損失波及額を得る。交通推計モジュールは四段階推定法を基本とし、変換モジュールでは交通推計の結果であるゾーン間旅行時間に基づいて被災地域内の生産活動の変化を計算する。経済推計モジュールは、産業連関分析の手法により、変換モジュールの出力である低減後生産額に基づいて、被災地域内および全国での波及額を計算する。平成９年度は、特に①交通推計モジュールにおける鉄道被災の影響推計法、②経済推計モジュールの改変を行った。

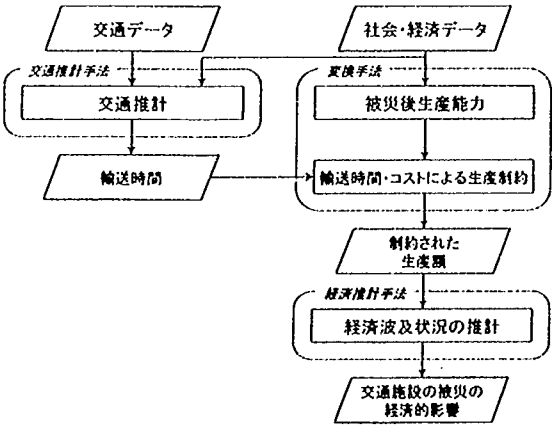


図１　手法の流れ

２．研究成果

２－１　鉄道被災の道路交通への影響

鉄道を利用するトリップは、各ゾーンから最寄りの駅までバスで移動し、駅間を鉄道で移動した後に再びバスで目的ゾーンへ移動する。鉄道トリップは機関分担率によりあらかじめ分離しておき、そのトリップがバス（25km/h、25 人／台）および鉄道（50km/h）で移動すると考える。また鉄道のあるリンクが被災し不通となった場合、そのリンクを利用していた鉄道トリップがバスによる移動に切り替わると考える。このと

きバス交通は道路ネットワークに対して負荷を与えるため、鉄道が被災した場合の道路ネットワーク各リンクの走行速度が増大する。この状態を図式化したのが図2である。

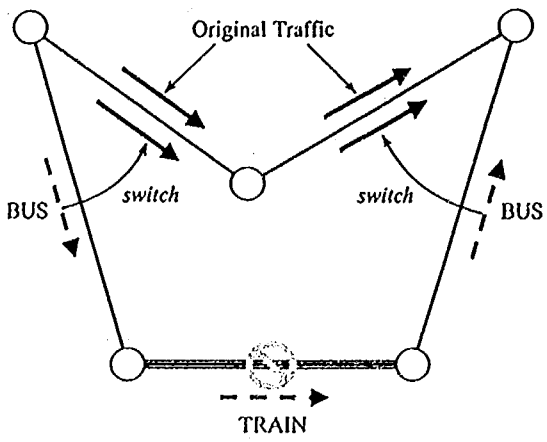


図2　鉄道施設被災の道路交通への影響

2－2　経済推計手法の改変

昨年度までの検討においては、経済波及モデルとして、最もシンプルなReontiefモデルを用いていた。すなわち、変換モジュールから得られた被災地域の生産額の震災前後の変化量Δp^1とし、から域内の最終需要額の変化分Δf^1を計算し、それがそのまま全国の最終需要額の変化Δf^0として表れると考えて、全国の生産額の変化分Δp^0を計算するものであった。

$$\Delta f^1 = (I - A^1)\Delta p^1$$
$$\Delta f^0 = \Delta f^1$$
$$\Delta p^0 = (I - A^0)^{-1}\Delta f^0$$

平成9年度はこの考え方を拡張し、被災県内および被災県を除く全国の、震災による波及生産額の影響を、図3の流れで算定する。被災県内については、変換モジュールの出力である震災後の実現生産額を一次波及とし、生産額が平常時より減少することによる所得の変化→消費の変化→最終需要の変化を通して、生産額の二次波及を計算する。一方全国への波及については、県内の最終需要に対して移入依存率を乗じて、その変化が全国に波及するとして生産額を計算する。このようにして計算された被災県内外の生産額をもって、震災後の全国ベースの経済損失額を得る。

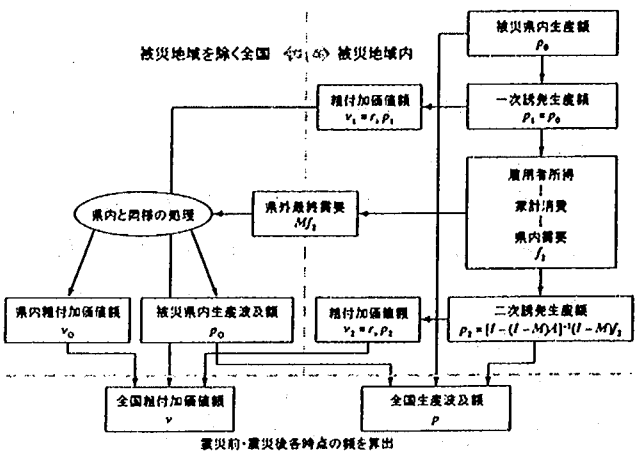


図3　経済推計モジュール

2－3　ケーススタディー

改変された手法をプログラム化し、宮城県のデータおよび平成8年の仙台市における被害想定に基づき、道路、鉄道の複数箇所を被災箇所としてケーススタディーを行った。

①長期的な経済損失の観点からは、道路の被災の影響が鉄道の被災の影響より大きい。

②経済損失を指標とする道路区間のプライオリティーは、必ずしも交通量の大小と一致するとは限らない。

③特に高速道路のICに接続する路線の重要度が高い。

3．主な研究成果物

・杉田秀樹、野崎智文、遠藤和重，交通基盤施設の地震災害による経済的影響の評価手法，土木技術資料39-9，26頁，1997年9月

・杉田秀樹、野崎智文，交通基盤施設の地震被害による社会経済的影響評価システムの開発，土木学会第52回年次学術講演会，818頁，1997年9月

・杉田秀樹、野崎智文、遠藤和重，震災による交通ネットワーク被害の生産活動への影響評価について，第24回地震工学研究発表会講演論文集，1277頁，1997年7月

4. 震災対策体制のパフォーマンス評価に関する基礎的研究

震災対策体制のパフォーマンス評価に関する基礎的研究

建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課

1．平成9年度予算額　6，073千円

2．研究の目的・意義

地震発生直後、社会基盤施設を管理する組織は、広範にわたる所管施設の被害状況を迅速かつ的確に収集することが求められる。このような体制は、通常多くの人や情報伝達・処理を行う機器の集合体であり、それらの要素の連携によって情報が収集され、集約されてゆく。ところで、体制全体としての情報収集の迅速性・的確さ（すなわちパフォーマンス）は、個々の人・機器のみの効率を高めるだけでは必ずしも実現されず、それらの要素が有機的に連携した「システム」として評価されなければならない。本研究では、震災対策体制をネットワーク表現することによって、体制全体としての被害情報収集に関するパフォーマンスを評価する手法を提案するものである。

3．研究の内容・成果

本研究においては、人・機器など体制を構成する要素を情報を処理する「ゲート」と考え、それらを情報の流れに沿って接続することによって体制をネットワークとして表現した。地震発生の時間帯によってヘリコプターの利用可能性、参集の必要性などの条件が異なるため、状況に応じてネットワークの形態を変化させる。ケーススタディーとして4つの路線の緊急点検を行う工事事務所を設定し、時間帯、被害パターンを変化させて体制のパフォーマンスを評価した。

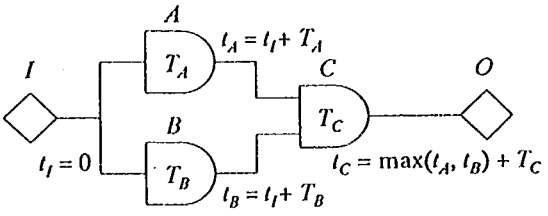


図1．簡単なネットワークの例

(1) ゲートの構築

地震計や同報装置の動作、参集や点検のための人の移動、点検活動など、前段の動作の終了を受けて動作し、情報を生成・加工して出力する要素を、ここでは「ゲート」として定義した。たとえば「最早動作ゲート」は、複数の入力情報のうち最初に受け取った情報に基づいて必要な処理を行い、情報を出力するものである。このようなゲートは、いくつかの特性（複数の入力を持つ、一つの出力を持つ、情報に関して何らかの処理を行う）を備えており、それにバリエーションを付加することで体制における要素に対応して、様々なゲートを表現できる。ここではこれを実現するためにオブジェクト指向の考えを導入し、シミュレーション・テスト・プログラムの開発の効率性・柔軟性を高めた。

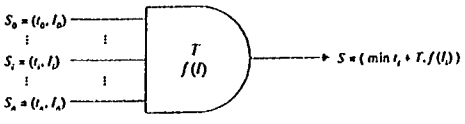
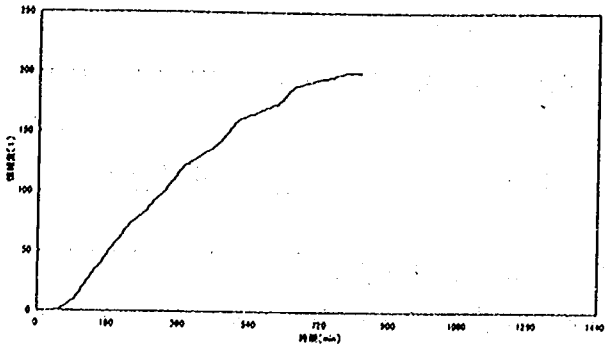


図2．最早動作ゲートの例

(2) ネットワーク表現とケーススタディー

構築したゲートを接続し、震災対策体制をネットワーク表現する。ネットワークは地震発生を表すゲートから起動し、ケースに応じて地震検知、ヘリコプターによる点検、参集、地上点検などのゲートが順次動作する。ゲートで処理される情報は、この場合各箇所の被災度（大、小、なし）を確認できた確からしさと、それらが各ゲートで処理された時刻である。情報量は被災度が確実に確認できた場合に 1.0、ヘリコプターから被害が小さい箇所を点検する場合など不完全な確認の場合には 0.5 の値を箇所ごとに与える。各箇所からの情報量が時間とともに累積されてゆく例を示したのが図．3 である。想定した工事事務所組織について、地震発生の時間帯、点検箇所数や被害分布を変えて、同様の出力等により体制のパフォーマンスを検討した。



図．3　情報量が蓄積されてゆく様子

4．考察

複数の路線間に偏りがある場合、固定的な点検人員配分では情報収集の効率が悪くなること、被災度の大きいものから順番に点検することによってより効率的な点検が可能となることなどが、ケーススタディーの結果把握できた。重要なのは、本手法によれば、このような判断を、実際の各現場の体制について、条件を変更しながら定量的に検討できることである。

5．研究成果の発表状況

(1) 口頭発表

ア．野崎智文、杉田秀樹：第 53 回年次学術講演会(1998)
「震災対策体制のパフォーマンス評価手法の提案」（予定）

イ．杉田秀樹、野崎智文：UJNR 耐風耐震構造専門部会第 30 回合同部会(1998)
「震災対策計画の高度化に関する研究」（予定）

(2) 論文発表

杉田秀樹、野崎智文：土木技術資料 Vol. 40-4(1998)
「震災対策計画の高度化に関する研究」（予定）

(3) 出願特許等

特になし

(4) その他

特になし

5. 都市震災の社会経済的影響評価システムに関する研究

研究課題名「都市震災の社会経済的影響評価システムに関する研究」

研究期間：　Ⅰ期　平成７～９年度

研究項目	大項目名	市民の安心と安全を確保し市街地を創出するための総合的な地震防災に関する研究
	中項目名	地震防災の理解を深め安心な市街地を計画するための研究
	担当項目名	都市震災の社会経済的影響評価システムに関する研究
担当機関名・研究室名・研究者名		建設省土木研究所耐震技術研究センター　横山功一、杉田秀樹、野崎智文

１．研究目的

公共事業に関するプロジェクトを計画する際に、事業実施の影響・効果を測定し、複数事業間のプライオリティーを把握する必要がある。たとえば交通ネットワークの耐震対策を計画する場合、ネットワーク中の複数の区間・施設における補強事業や、新たな路線の追加によってネットワークとしての耐震性向上を図るが、個々の事業の組み合わせにより、その効果は異なる。本研究においては、地震により地域の交通施設が被災した場合の長期的な経済損失を推計するためのシステム(EASSE: Earthquake Assessment System for Socio-economic Effect)を開発した。EASSE はスタンドアローンの PC 上で稼動し、実行時には、想定された地震被害や補強計画に応じて交通ネットワークの被災箇所を入力することにより、その被災パターンに応じた経済損失額を得る。ユーザーは、複数の耐震補強計画に対応した被災パターンとそれに伴う経済損失額のセットを比較検討しながら、長期的な点から見た補強計画の判断を行う。同様の実行は、地震発生後に、実際の被害に基づいた復旧計画の策定にも応用することができる。EASSE の利用イメージを図１に示す。

２．研究方法

EASSE の主要部分は、図２に示すように、推計を実行する三つのモジュールと推計に必要なデータベースからなる。ここで各モジュールは、①交通推計モジュール、②交通推計結果を経済推計への入力に変換するモジュール（変換モジュール）、③経済推計モジュールである。これらのモジュールは各々の計算に必要なデータをデータベースから読み込み、計算を行った後に、結果をデータベースに書き込む。各モジュールはデータベースを介して独立しており、各々の部分に変更が生じたときに、全体を意識することなく改変することができる。交通推計モジュールは、道路ネットワーク等の交通データ、発生集中量を決定するための社会データを入力とし、被災地域内各ゾーンおよび他の都道府県相互の旅行時間を出力する。この旅行時間は生産活動に必要な貨物輸送の輸送時間として、変換モジュールに入力される。変換モジュールは、貨物輸送に要する時間が平常時から増加した場合の生産額低減を計算する部分で、この出力は次の経済推計モジュールへの入力となる。経済推計モジュールは、交通施設被害の影響によって低減した被災地域の生産額の、被災地域および全国への波及額を計算する。

鉄道の被災については、被災した鉄道区間を利用するトリップがバスに転換するとして、これによる道路ネットワークの負荷を通じて、経済的影響が生じると考えた。

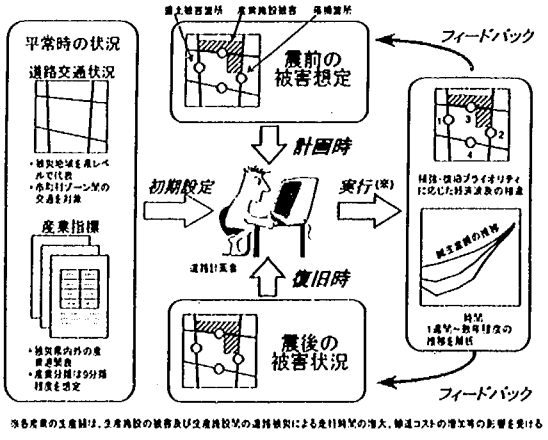


図１　EASSE の利用イメージ

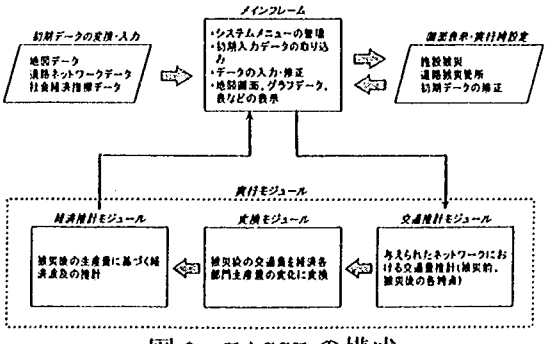


図２　EASSE の構成

3．研究成果

開発したシステムを用いて、宮城県を対象としたケーススタディーを行った。平成 8 年の仙台市による被害想定結果に基づき、図 3 のように道路および鉄道のいくつかの箇所を被災箇所として設定し、経済損失額を計算した。その際の EASSE の画面上での操作状況を図 4 に示す。ケーススタディーの結果、以下のような結果を得た。

①長期的な経済損失の観点からは、道路の被災の影響が鉄道の被災の影響より大きい。

②経済損失を指標とする道路区間のプライオリティーは、必ずしも交通量の大小と一致するとは限らない。

③特に高速道路の IC に接続する路線の重要度が高い。

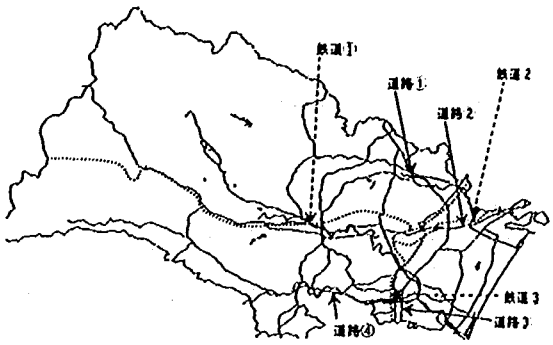


図 3　ケーススタディーの被災箇所

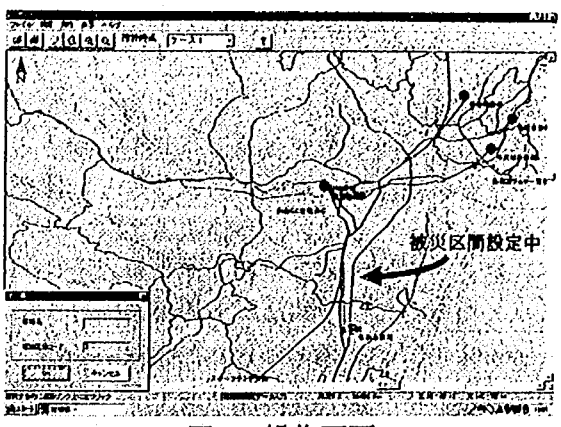


図 4　操作画面

4．成果の達成度

地図画面上でネットワークの被災を入力しながら推計計算を行う、操作性のよいシステムを構築した。これにより、様々な被災パターンにおける経済損失額を、計画担当者が簡易に検討できる。

5．今後の問題等

道路ネットワークデータ、社会経済データが整備された場合には、推計計算は簡易に行えるが、これらのデータをインポートする作業に大きな労力を有する。特に正確な道路ネットワークデータの整備、一般化が望まれる。また推計手法の多くは兵庫県南部地震の際のデータおよびその被災地域に関するデータに基づいているため、一般化あるいは他の地域へ適用する際の変更方法が必要である。

6．研究発表、特許状況

①原著論文による発表

1）国内紙（和文）　発表者名、発表題名、発表誌名等（雑誌名・ Vol ・頁・年等）

† 杉田秀樹・野崎智文・遠藤和重、交通基盤施設の地震災害による経済的影響の評価手法、土木技術資料・ 39-9、1997 年 9 月

† 杉田秀樹・野崎智文、交通基盤施設の地震被害による社会経済的影響評価システムの開発、土木学会第 52 回年次学術講演会・ 1997 年 9 月

† 杉田秀樹・野崎智文・遠藤和重、震災による交通ネットワーク被害の生産活動への影響評価について、第 24 回地震工学研究発表会講演論文集、1997 年 7 月

2）国際紙（欧文）　発表者名、発表題名、発表誌名等（雑誌名・ Vol ・頁・年等）

† EARTHQUAKE ASSESSMENT SYSTEM FOR SOCIO-ECONOMIC EFFECTS (EASSE); PWRI Newsletter, Vol. 67, Jan. 1997

②原著論文以外による発表（レビュー等）

1）国内誌（和文）

2）国際誌（欧文）

③口頭発表（発表者名、発表題名、発表場所等）

† NOZAKI Tomofumi, SUGITA Hideki; SYSTEM TO ASSSESS SOCIO-ECONOMIC EFFECT OF EARTHQUAKE DISASTER; 7th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems; Seattle WA, U.S.A; Nov. 4-5, 1997

④特許出願等（出願年月日、発表の名称、発表者氏名等、特許等番号）

6. 地震の脅威の定量化に関する交流育成

(1) 研究テーマ
地震の脅威の定量化に関する交流育成

(2) 派遣研究者
耐震技術研究センター防災技術課長　　杉田秀樹
同防災技術課主任研究員　野崎智文

(3) 行　程
平成10年（1998年）3月23日～28日

(4) 訪問機関等
米国標準技術研究所(NIST)建築防火技術研究所研究協力課長　Noel J. Raufaste
連邦危機管理庁(FEMA)リスク評価部門地震学者　Stuart Nishenko
連邦道路庁(FHWA)ターナー・フェアバンク道路研究所構造部長　James D. Cooper

(5) 結果の概要
日米コモンアジェンダに謳われている「地震の脅威の定量化」を受け、これを実現するための地震情報システム(Seismic Information Systems)に関する日米間の研究協力の枠組みとなる作業部会を、UJNR 耐風耐震構造専門部会のもとに設立するため、部会の目的、検討内容等について打ち合わせた。また、同作業部会と関連する既設作業部会の活動、現在進んでいる関連分野の研究、米国の耐震基準システム等に関する情報交換を行ったほか、米国研究所の施設を視察した。

①FEMA（2月24日）

- NIST の Raufaste 氏（UJNR 耐風耐震構造専門部会米側事務局長）の同席のもと、陸軍工兵隊地形工学センター(US Army TEC)の William Roper 所長、FEMA の Nishenko 博士と新作業部会の方針(Mission Statement)について打ち合わせた。
- Mission Statement の打ち合わせに先立ち、FEMA、ArmyTEC の組織、活動内容に関して紹介があった。
- FEMA においては、全米共通のリスク評価手法 HAZUS を検討し、PC 上で動作するソフトウェアが提供されている。この計画は、FEMA、USGS、NSF、NIST の 4 機関で実施されている NEHRP(National Earthquake Hazard Reduction Program)の一つ。
- ArmyTEC は陸軍工兵隊の 4 つの主要研究組織の一つ。災害対策等に活用される様々なシステムに対する GIS の応用に関して研究を進めている。
- Mission Statement に関する打ち合わせに際しては、米側当初案、日本側の対案を前にして活発な討議がなされた。主な内容は次のとおり。
  - 作業部会で検討される地震情報システム(Seismic Information System: SIS)の利用目的として、損失／リスクの評価、災害対応、基礎的研究の 3 つと定義。
  - 作業部会は、部会全体の目的を視野に入れつつ、コモン・アジェンダの思想を支援するために、技術分野と政策分野の橋渡しを行うためのイニシアティブをとることで合意。
  - Mission Statement については、両国案と打ち合わせ結果に基づき、米側で案を作成のうえ調整。
- FEMA 政策マネージャーの Zeizel 博士より、FEMA の活動システム、ハザードマップ等に関する説明を受けた。
  - FEMA はワシントン DC と本部のほか 10 地方局からなり、分野ごとの局長のもと、特定の Program 活動と分野別 Division 制の併用方式で事業を行っている。FEMA 自体は研究組織を持たず、自己の予算をもって大学・民間会社等に研究開発を委託する。
  - 主要な事業として、地震を含む災害に関する事前対策、事後の復旧に際して必要な予算を自治政府（主として州）に対して補助する。その分野は避難施設、食料から、連邦政府の建築物、地方政府管轄下の道路といった公共土木施設も含む。民間の施設は含まれない。
  - 災害対応、復旧にあたって、FEMA は連邦の 26 機関を調整する。施設復旧の補助率は案件・事例によって異なるが、75％程度。
  - 以上のような機能、予算執行の形態から、FEMA は日本の国土庁と各省庁の公共土木施設国庫負担法を

所掌する部局を一体化した組織と考えられる。

②NIST（2月25日）

－ Raufaste 氏より、NIST に関する背景情報の説明を受けた。

・ NIST は機密事項に属さない各種の規格・基準を策定・提案する機関。

・ 基準の対象は単位長さ、単位時間、物理定数といった物理量の決定、素材の規格、設計指針・基準の提案など。

・ 職員数は全体で 3500 人。建築防火基準研究所(BFRI)のほか、化学、情報技術、原子力等に関する研究所が集まっている。

－ H.S. Lew 博士、Reily Chung 博士らより、米国における耐震基準の採択システムに関する説明を受けるとともに、新作業部会の方針に関して情報交換を行った。

・ 建築物の耐震基準については、NEHRP において、150 人のメンバーにより、3 年ごとに連邦のマニュアルが改定される。

・ 各大学等のメンバーにおいて必要事項に関する研究開発を行うが、必ずしも全域を網羅したものではない。このため NIST でも独自の研究開発を行っている。

・ 米国を東部、西部、南部の 3 地域に分けて評価。

・ 既存建築物の耐震補強については、NEHRP において Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings を検討。

・ その後民間団体によるガイドラインが報告書に基づき改訂され、各州において必要箇所が適用される。

③FHWA（2月26日）

－ Cooper 部長、Philip Yen 博士らと新作業部会への FHWA の参加に関して打ち合わせたほか、FHWA において進められている道路網の地震による損失評価に関する研究について説明を受けた。

・ NCEER(National Center of Earthquake Engineering Research)への委託研究により道路の耐震設計手法、耐震補強法、リスク評価手法等に関する研究を行っている。

・ その中でもリスク評価については最近大きなブームになっているが、FHWA は、リスク評価手法の用途として(a)震前の被害予測、(b)地震直後の被害推定を考えている。

・ 手法は大きく分けて、道路施設（特に橋梁）のフラジリティー、施設被災後の道路ネットワーク機能の評価、経済的影響の評価からなる。

・ これらの手法のデモンストレーションを、Memphis、Los Angeles において実施。前者は入力地震動と被災データがある条件下でのモデルの検証が目的。後者は必要なデータの構築を含めて現在実施中。

・ 橋梁のフラジリティーについては、日米の地震およびそれによる施設被害の実データを交換し、手法のキャリブレーションが非常に重要だと考えている。今後日米で、データとモデルの交換ができないか。

－ 曲線橋に関する実験施設

・ 実物大の曲線橋の桁の死荷重等について計測。

・ 今後実際の床板を取り付けて実験。

－ Hi-performance material

・ 高強度のアルミ材について静的載荷により曲げ試験。

－ 交通標識と証明に関する実験

・ 様々な色の交通標識模型とハロゲン、ナトリウムおよび波長を変えたそれらの照明の間の視認性に関するデモンストレーション。

・ 実際の路側標識と照明の関係を再現する実験設備の紹介。

－ 橋脚の洗掘に関する実験設備

・ 開水路実験設備が主体。

・ 様々な種類の洗掘防止工のパフォーマンスを実験・検証。

(6) 本研究テーマの今後の進め方について

地震損失の定量的評価については、コモン・アジェンダでその必要性がアナウンスされて以降、米国内で活発に研究が進められている。日本においても当所が都市震災による社会経済的影響評価手法に関する研究を進めており、耐震対策事業の透明性、アカウンタビリティーの確保のために、これらの課題の研究は重要な位置を占めると考えられる。今後とも UJNR の枠組みのもと、特に技術的な観点から当該研究テーマの推進を図ってゆく。

7. 河川施設の耐震強化事業計画に関する試験調査

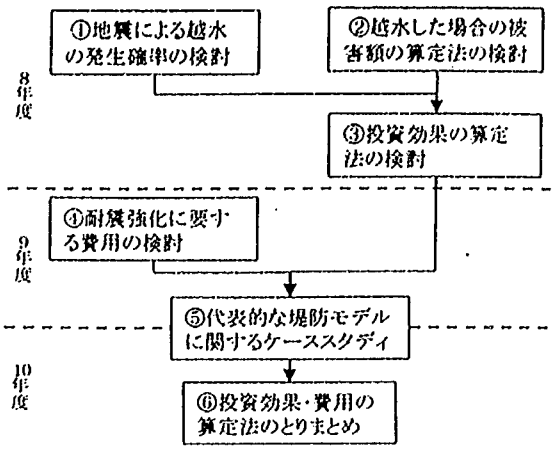
河川施設の耐震強化事業計画に関する試験調査

研究期間：平８～平10

担当：防災技術課　課長：杉田秀樹，　研究員：濱田　禎

【要旨】

兵庫県南部地震においては多くの公共土木施設が被災し、これを契機に堤防を始めとする河川施設の耐震強化事業が７年度より本格的に開始された。しかし、耐震強化の水準としてどの程度の地震力を設定するのが妥当かについての方針は必ずしも確立されておらず、耐震強化水準としての設計地震外力を定めることは将来計画を策定する上で重要である。本課題は、耐震強化によってもたらされる便益とこれに要する費用の算定手法を提案するものである。本研究の成果は、費用対効果の視点に基づく最適な耐震強化水準や、耐震強化水準を達成する設計地震外力の設定に資するものである。平成９年度は、便益の測定方法、耐震強化方策と費用の整理、代表的な堤防モデルにおける便益のケーススタディを実施した。



図－１　研究の全体計画

表－１　堤防の耐震強化の方策・費用

（参考：河川堤防液状化対策工法設計の手引き）

	工法	メカニズム	単価 (円／m³)	改良範囲 幅(m)	深度(m)	延長(m)	ボリューム(m³)	施工価格 (百万円)
地盤系対策工法	押さえ盛土工法	押さえ盛り土の荷重により地盤に働く上載圧を増し液状化を抑制する。	4,760	—	—	—	2,400	11,424
	緩傾斜盛土工法		4,760	—	—	—	6,250	29,750
	振動締め固め工法（サンドコンパクション）	地中に砂杭を形成することにより周辺地盤を側方に圧縮するとともに、振動を加えることにより、周辺地盤の密度増大を図る。	12,000	5.5	10.0	100	5,500	9,900
	静的締め固め工法（特殊石灰パイル）	特殊石灰と混合材料を地盤中にパイル上に造成し、その圧力と材料の水和反応による膨張圧によって地盤を静的に締め固め、密度の増大・地盤の側方拘束の増加を図る。	40,000	7.1	10.0	100	7,100	47,428
	グラベルドレーン	地盤中に排水材の柱を設置し、水平方向の排水経路を短縮することにより排水効果を高め、飽和砂層内の間隙水圧上昇を軽減する。	31,000	11.2	10.0	100	11,180	85,951
構造系対策工法	固結工法（深層混合処理工法（CDM））	セメントを主体とした固化材と現地盤を攪拌混合し地盤を固化させ、改良体を土留め構造物と見なし液状化により発生する外力に抵抗させる。	6,500	19.0	14.5	100	27,550	140,573

１．研究方法

１．１便益の測定法のﾚﾋﾞｭｰ

公共財による便益を測定する手法について最近の研究成果をレビューし、河川堤防への防災投資問題に適する方法を検討した。

１．２耐震強化に要する費用の検討

耐震強化を目的として標準的に用いられる方策と平均費用を調査した。

１．３代表的な堤防モデルに関するケーススタディ

平成８年度には、代替法によりリスクを定量化する手法を提案している。平成９年度は、本手法のプログラム化を行うとともに、荒川・信濃川・鶴見川の特定箇所をモデルとした便益（リスク）のケーススタディを実施した。

２．研究結果

２．１　便益の算定法のレビュー

図－２　モデル堤防

社会資本によって生み出される財・サービスは、その多くが市場で取り引きされないため、市場価格からその便益を推定することはできない。従って、このような財のもたらす便益を計測するには、何らかの間接的な方法による必要がある。代替法・ヘドニック法等、いくつかの方法のうち、耐震強化による便益の測定には、理想的には、住民に直接支払い意志額を問う仮想的市場評価法（以下 CVM）が最も適していると考えられる。代替法では間接被害（例：水防活動に要する労力）やオプション価値（例：安心感）を評価できな

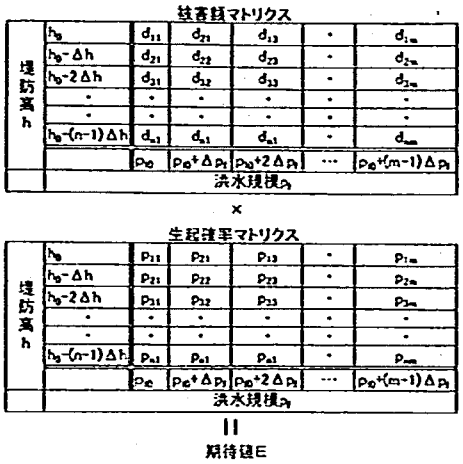
いこと、またヘドニック法では被害の生起確率が低いため土地の値段に耐震強化の影響が反映されないことといった致命的な問題点があるためである。しかし、CVM にもバイアスの問題があり、現状ですぐに適用するのは時期尚早である。様々なバイアスのうち、最も問題なのは、アンケートの回答者がリスクに対する正確な情報を持たないことに起因するバイアスである。そこで本課題では、将来 CVM を用いることを念頭に、とりあえず代替法によりリスクの正確な測定を行い、当面これを便益として代用することとする。

2．2　耐震強化に要する費用の検討

河川堤防の耐震強化の方策及び費用に関する調査結果をまとめると表－1のようになる。費用（延長 100m あたり）の計算は、図－2のモデルを対象に行った。

2．3　代表的な堤防モデルに関するケーススタディ

平成9～10年度に実施するケーススタディは、以下の手順で実施することを予定している。



図－3　期待値計算の概念

①区間分割（破堤した場合にほぼ同程度の浸水域を与える堤防区間の設定）

②便益の算定（任意の堤防区間について、耐震投資に対する支払い意志額の総額を算定）

③耐震性と費用の関係の整理（当該区間に対する耐震化対策の程度・費用と得られる耐震性の関係を整理）

④耐震強化水準の設定（上記②と③を比較することで、費用対効果の視点から妥当な耐震強化水準を設定）

平成9年度は、上記②の検討を先行して実施した。まず、代替法による便益の定量化プログラム（直接的な被害額の期待値をもって便益とする）を作成した。被害額の期待値計算は、図－3に示す概念に基づいて行っている。すなわち、このプログラムはある箇所の堤防高がhに沈下し、かつ確率規模 p の流量が発生する場合の被害額とその事象の生起確率とを別々に計算して被害額マトリクス及び生起確率マトリクスを作成し、両者の対応する成分の積の総和をとるものである。

本プログラムを用いて、荒川及び鶴見川については感潮区間を、また信濃川については中流の一地点をモデル河川として被害額の期待値を計算した。ただし、3河川とも現在の整備計画が達成された場合の断面を想定して氾濫計算及び堤防の沈下量計算を行っている。計算条件と被害期待値を併せて示すと表－2の通りである。これによれば、流域資産や標高等の違いによって期待値は大きく異なる。超過確率 150 年の流量に対する被害額を信濃川と鶴見川で比較すると、信濃川の方が被害額が大きいのに対して、地震の生起確率を考慮した期待値は鶴見川の方が大きい。このことから中流域に比較して感潮区間では、地震に対して特に注意を要することがわかる。

表－2　計算条件と被害期待値

河川名	荒川	鶴見川	信濃川
距離標(km)	4.5 (感潮区間)	2.0 (感潮区間)	27.5
計画高水規模(年)	200	150	150
最大流量規模p_f(年)	200	150	150
最低流量規模p_f(年)	10	5	5
流量規模分割数	190	145	145
最大地震規模(マグニチュード)	8.0	8.0	8.0
最小地震規模(マグニチュード)	4.0	4.0	4.0
地震規模分割数	40	40	40
最大震央距離(km)	100	100	100
震央距離分割数	100	100	100
計画堤防高(m)	4.32	3.65	35.92
沈下後堤防高hの最低値(m)	1.32	0.65	33.92
堤防高分割数	30	30	30
被害額の最大値(百万円)	9,174,170	272,503	2,506,324
(条件)	h=1.32, p_f=200	h=3.65, pf=150	h=33.92, p_f=150
被害額の最小値(百万円)	0	0	0
(条件)	h=4.12, p_f=10	h=0.65, pf=150	h=36.92, pf=5
期待値(百万円/年)	965,105	18,668	976

平成10年度は、上記3河川を対象に①区間分割及び③耐震性と費用の関係を整理する。さらに、本年度検討した便益と比較することにより、妥当な耐震強化水準性を検討する。なお、CVM によるオプション価値を含んだ便益の算定法についても別途検討が必要である。CVM の適用に際しては、本課題による期待値は被験者の重要な判断根拠となる。

3．主な成果物：1)濱田禎、杉田秀樹：河川堤防の地震被害による影響の評価手法、土木技術資料 39-9(1997)、pp32、2)地震と越水の同時生起による被害額の算定プログラム

8. 地震時早期被害予測・情報伝達システムに関する調査

地震時早期被害予測・情報伝達システムに関する調査

研究期間：平７～平１１

担当：防災技術課　課長：杉田秀樹、　研究員：濱田禎

【要旨】

兵庫県南部地震以後、各種公共・公益施設の施設の耐震性の向上が図られる一方で、大規模地震により施設被害が生じた場合にこの影響を最小限に抑えるためのソフト的危機管理技術の開発・導入が求められている。本課題では、災害情報を適切に管理・活用することで震災直後の道路管理者の初動活動を支援する道路施設の震害予測システム及び情報伝送システムの開発を実施するものである。平成８年度までに、道路橋被害と路線沿いの液状化危険度の予測手法と、情報伝送システムの検討を行っている。平成９年度は、①地中構造物及び法面の震害予測の可能性、②占用・沿道施設被害の影響予測手法、③情報伝送システムの高度化に関する検討を実施した。なお、本研究は道路技術５箇年計画の「地震時早期被害予測・情報伝達システム」及び「人に優しい道路空間の地震防災技術」の一環として実施するものである。

１．研究方法

１．１　地中構造物及び法面の震害予測の可能性

既往の震害事例ついて調査を行い、即時震害予測を行う場合に対象とすべき被災モードと予測手法について検討を行った。

１．２　占用・沿道施設被害の影響予測手法の検討

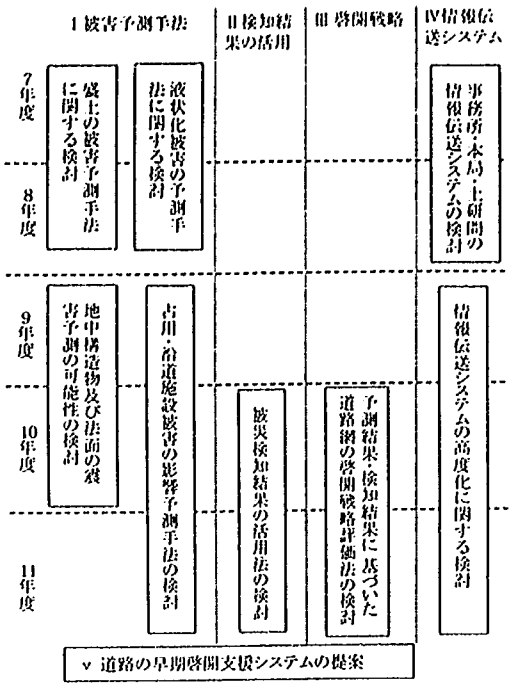
震災時には、道路本体以外の占用・沿道施設の被災によっても道路機能が低下する可能性がある。本課題では、この影響を震後即時に予測する手法を検討す平成９年度は、道路機能の低下の程度を道路区間の閉塞確率を指標として評価する手法を検討した。

１．３　情報伝送システムの高度化

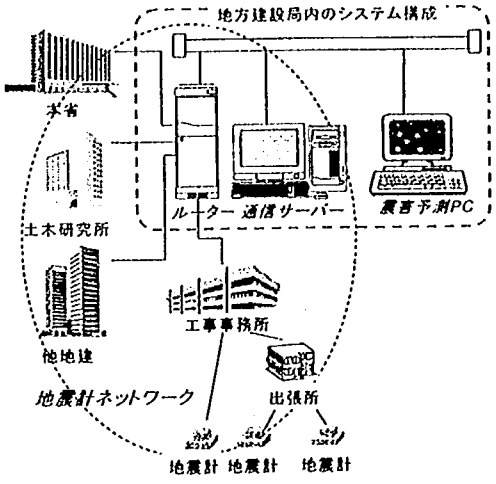
平成７年度から３箇年計画で整備が進められる地震計ネットワークでは、観測点、事務所、本局、本省、土研を結ぶ情報伝送システムは図－２のようになっている。９年度から関東地建のシステムを用いて試験運用を行っている。地震発生から震害予測システムが予測を行うまでの情報の流れを整理すると図－３の通りである。関東地建における地震計ネットワークの試験運用を通じて、①複数地建間にまたがる地震が発生した場合の対処策、②予測した情報の配信方法、③現場における点検結果の伝送・集約方法等の改良点が指摘されており、これらの解決方法について検討を行った。

２．研究結果

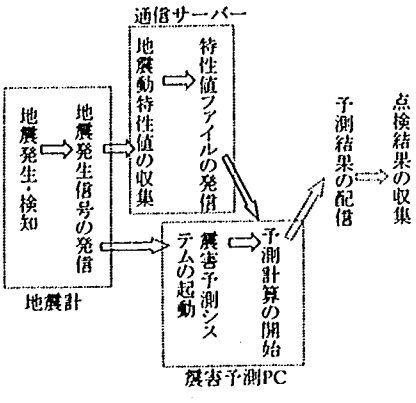
２．１　地中構造物及び法面の震害予測の可能性の検討及び占



図－１　研究の全体計画



図－２　情報伝送システムの構成



図－３　情報の流れ

用・沿道施設被害の影響予測手法の検討

兵庫県南部地震においては、地中構造物の被災による道路機能低下の事例は4件報告されている[1]。このうち2件は地下鉄駅舎の被害が直上の道路に影響を及ぼしたものである。地下鉄の耐震設計は、道路橋のように標準化された示方書によるのとは異なり事業者ごとに行われているため、一律の指標で耐震性を評価することが難しい[1]。これらを鑑みると、道路管理者として道路と地下鉄駅舎の位置関係、及び道路の液状化危険度を把握しておくのが当面適当と考えられる。ここに、道路の液状化危険度を加えたのは、釧路沖地震等で地中構造物の浮き上がりが多数報告されていることによる。

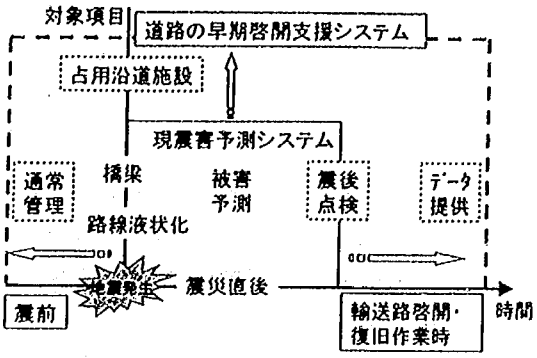
一方、法面（崩土）及び占用沿道施設については、それぞれ12件及び39件（建物22、落下桁14、電柱3）が報告されている[1]。これらについては、次の(1)式により道路の閉塞確率 $P(R^{ij} \mid \alpha)$を求めることを提案する。

$$P(R^{ij} \mid \alpha) = 1 - \Pi_e (1 - P_e(R^{ij} \mid \alpha)) \cdots\cdots\cdots (1)$$

ここで、$P_e(R^{ij} \mid \alpha)$は要因 e が大きさαの地震動によって ij 区間を閉塞する確率である。すなわち(1)式は各要因のうちのいずれかが ij 区間を閉塞する確率を表現するものである。閉塞要因 e としては、道路本体構造物の被害、道路付帯設備の損傷、地中占用物の被害、道路沿道施設の被害が考えられる。本研究では、道路沿道施設の崩土（法面）及び沿道建物について、既往の被災事例から$P_e(R^{ij} \mid \alpha)$を設定した。

表1 情報伝送システムの改良案

	Ⅰ.各地建本局に震害予測・結果配信サーバを設置	Ⅱ.事務所・出張所ごとに予測PCを設置
	＊事務所・出張所のブラウザで本局のホームページを見に行くイメージ。	＊各予測PCに同一の予測ソフトをインストール、それぞれのPCで予測計算を行い、結果を見る。
①複数地建間にまたがる地震が発生した場合の対処策	当該他地建の予測・配信サーバーに接続してブラウズする。	各予測PCに隣接地建の予測ソフトをインストール。地震発生時に当該他地建の地震動特性値のみを配信・各PCで予測計算を実行。
②予測した情報の配信方法	自地建の予測・配信サーバーに接続してブラウズする。	各PCに地震動特性値のみを配信・各PCで予測計算を実行。
③現場における点検結果の伝送・集約方法	予測・配信サーバーに点検結果ファイルを転送。	各PCから予測・配信サーバーにファイルを転送。同サーバーから各PCへファイルを再配信。
備考	長所：①管理者が使いやすい②一般PCからもアクセス可能③ソフトのバージョンアップ等維持管理が容易。 短所：震災時に各PCが一斉に接続してくると混乱する可能性があ	長所：特性値のみの配信なので情報伝送量が少なくてすむ。 短所：ソフトのメンテナンスが煩雑化する。



図－4 早期啓開支援のためのシステム拡張

2．2 情報伝送システムの高度化

試験運用の過程で指摘された①～③の課題を解決する方策として、Ⅰ.各地建本局に震害予測・結果配信サーバーを設置する、及び、Ⅱ.事務所・出張所ごとに予測 PC を設置する、の2案を提案する。2案に対する具体的な解決策と長所・短所を整理すると表－1の通りである。

図－1に示したように、震害予測システムは道路の早期啓開支援システムへの拡張を念頭に改良を加える予定である。具体的には、①対象とする時間を現在の震災直後から震前の通常管理時、震後の点検時、輸送路啓開時及び復旧作業時に拡張すること、及び、②対象とする項目として現在の橋梁及び路線液状化単体に占用・沿道施設等を加えるとともに、それらを総合して道路区間としての閉塞可能性の予測及び閉塞状況の把握を行うことを目指している。図－2は今後の拡張内容のイメージ図である。

早期啓開支援システムにおいては、組織内の情報共有化が不可欠である。表－1の②と③は情報共有化の具体的ニーズであり、これを満足するためにはⅠ.各地建本局に震害予測・結果配信サーバーを設置する案が現実的と考えられる。これは、①一般のブラウザを活用することによるユーザーの利便性、②専用ソフトを持たない PC からも情報入手が可能、③維持管理を本局のサーバーに集約できる等の理由による。

3．主な研究成果物：1)濱田禎、杉田秀樹、飛田忠一、震後早期啓開を支援する即時被害予測システムの開発、第22回日本道路会議一般論文集(B)、pp1018、2)濱田禎、杉田秀樹、金子正洋、地震動特性値分布の即時予測手法に関する研究、第24回地震工学研究発表会、講演論文集、pp193、3)震害予測システム WS 版、PC 版、4))杉田秀樹、濱田禎、占用施設・沿道施設の耐震性評価に関する調査、土木研究所資料第3557号、平成10年3月

9. 道路構造の都市防災機能の向上に関する調査

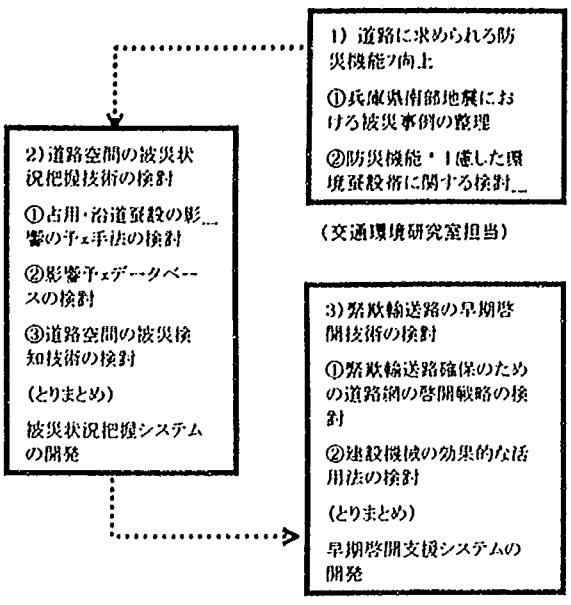
道路構造の都市防災機能の向上に関する調査

研究期間：平８～平 11

担当：防災技術課　　課長：杉田秀樹，　研究員：濱田禎

【要旨】

兵庫県南部地震の教訓に、人口・産業が集中した都市圏では、道路の防災機能の良否が震災時の緊急活動や地域社会への影響を大きく左右することが挙げられる。道路の防災機能を向上するために道路管理者には、占用・沿道施設及び環境施設帯を含めた道路空間としての耐震性・防災性をあらかじめ把握し、適切な震前・震後対策を講じることが求められている。本課題はこれを具体化する技術的方策の調査を行うものであり、平成９年度は道路空間の被災状況把握技術のうち、①占用・沿道施設の影響の予測手法、及び、②被害予測に用いるデータベースの検討を実施した。なお本研究は、道路技術５箇年計画の「人に優しい道路空間の地震防災技術」の一環として実施するものである。



図－１　研究の全体計画

１．研究方法

１．１　占用・沿道施設の影響の予測手法

兵庫県南部地震以降、道路ネットワークの耐震性評価や早期被害予測へのニーズが高まっている。その意義は、①地震リスクの大きい要因を震前に把握・最小化すること、②被害が生じた場合の影響をあらかじめ想定して防災計画に反映すること、③震災直後の防災体制を効率的に組織して被害の影響を最小化することにある。道路ネットワークの耐震性を評価するためには個別道路区間の耐震性評価が必要であり、このためには路面、橋梁、占用・沿道施設等について被害の発生確率と影響の大きさを定量的に評価する必要がある。ここに定量的評価技術は、ネットワーク評価だけでなく早期被害予測手法にも不可欠なプロセスである。本課題では、道路区間の耐震性評価や早期被害予測への反映を目標に、占用・沿道施設の道路への影響の予測手法を検討する。平成９年度は、まず道路区間の閉塞確率と震度の関係式を設定し、次に占用・沿道施設の被害と道路の閉塞確率の関係を検討した。

１．２　被害予測に用いるデータベース

平成８年度までに、道路区間の耐震性評価や早期被害予測を念頭においた占用・沿道施設の耐震点検法を検討し、道路管理者による耐震点検要領（案）を作成している。平成９年度は、点検要領（案）をモデル道路区間に適用して試験的な点検を実施した。試験点検の目的は、①別途検討を進める早期被害予測システムのためのデータ収集と、②点検要領（案）の実行上の課題整理と改良である。試験点検は、関東地方建設局（道路管理課、東京国道工事事務所）と共同で、国道４号（5.7～6.3km）、国道 15 号（2.3～3.2km）、国道 246 号（9.2～10.1km）に対して実施した。また試験点検で収集された情報を用いて、道路区間の耐震性評価や早期被害予測を行うためのデータベースを試作した。

表－１　路面被害による閉塞確率

国道2号＋43号			
震度	延長 [km]	被害件数 [件]	閉塞確率 $P_R(R^{ij} \mid \alpha)$ [件／km]
4	22.220	1	0.045
5	8.126	1	0.123
6	18.004	6	0.333
7	13.590	6	0.441
超7	4.377	1	0.228
計	44.097	14	0.317

２．　研究結果

２．１　占用・沿道施設の影響の予測手法

道路の ij 区間に大きさ α の地震動が作用した場合の閉塞確率

$P(R^{ij} \mid \alpha)$は式(1)で表すことを提案する。

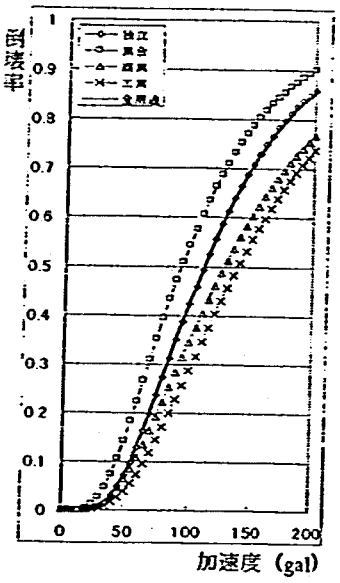
$$P(R^{ij} \mid \alpha) = 1 - \Pi_e (1 - P(R^{ij}_e \mid \alpha)) \cdots\cdots\cdots (1)$$

ここで、$P_e(R^{ij} \mid \alpha)$は、要因 e が大きさαの地震動によって ij 区間を閉塞する確率である。したがって、式(1)は様々な要因のうちいづれかが ij 区間を閉塞する確率を表現している。平成８年度に実施した兵庫県南部地震における調査結果[1]によれば、閉塞要因 e としては①路面の損傷、②沿道建物の倒壊、③跨道橋被害、④橋梁被害、⑤崩土被害等が挙げられる。本研究では、このうち①路面及び②沿道建物の$P_e(R^{ij} \mid \alpha)$を検討した。

表－２ 建物が倒壊した場合に区間 ij を閉塞する確率

	倒 壊（件）	道路内倒壊(件)	道路内倒壊率
木造建物	500	241	0.482
堅ろう建物	181	26	0.143

①路面：路面損傷には、路面単体が地震動で被災する場合と、地中占用物が被災したことによる場合の２種類がある。本研究ではこれらを一括して扱い、兵庫県南部地震における国道２号と４３号の被災事例をもとに$P_e(R^{ij} \mid \alpha)$を設定した。すなわち、検討対象路線を震度ごとに分類するとともに、震度ごとの区間延長で道路閉塞の発生件数を集計し、発生件数を区間延長で除して閉塞確率$P_R(R^{ij} \mid \alpha)$を算出した（表－１）。道路閉塞の箇所数は、通行止め箇所を 1 箇所、部分規制箇所を 0.5 箇所としてカウントしている。さらに精度を向上するためには、①母集団の量・質の拡充（兵庫県南部地震以外の地震の追加、対象道路に県道・市道・街路を追加、幅員情報の高精度化）、②震度分布に関する詳細情報の入手が必要である。

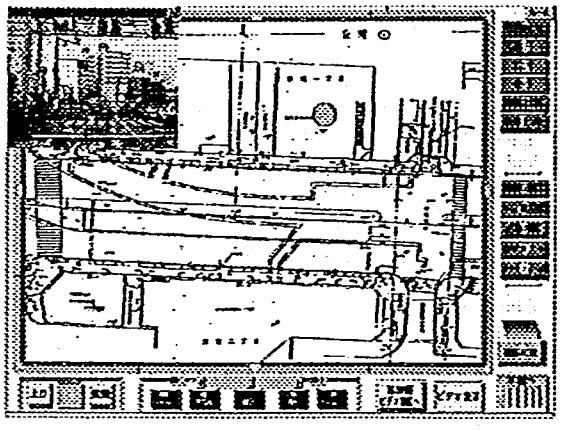


図－２ 加速度αで建物が倒壊する確率（フラジリティ曲線）

②沿道建物：沿道建物の閉塞確率 $P_s(R^{ij} \mid \alpha)$は、加速度αで建物 s が倒壊する確率 $P(Fs|\alpha)$に、建物 s が倒壊した場合に区間 ij を閉塞する確率 $P_s(Rij|Fs)$を乗じて評価する。$P(Fs|\alpha)$については、林らが建築研究所の兵庫県南部地震被害調査データを用いて設定したフラジリティ曲線[2]を用いることにした。また $P_s(Rij|Fs)$については、土木研究所道路研究室の調査結果に基づいて設定した表－２の閉塞確率を用いた。ただし、沿道建物については、建物構造の詳細情報を入手することが難しいことから$(Fs|\alpha)$と $P_s(Rij|Fs)$の精度が低い。地震動の大きさと幅員で分類された適当な小区間を設定して、各小区間の沿道建物の詳細構造について情報収集を実施してデータ不足を補う必要がある。

２．２　早期被害予測のためのデータベースの検討

平成９年度に実施した点検データは約 100m 間隔の小区間毎に集計されている。これを早期被害予測に利用しやすい形で蓄積できるデータベースを開発した。早期被害予測は、指標化された区間耐震性と地震動指標を比較することで行うため、点検データのうち指標化に必要な項目はすべて数値化している。またデータベースには、道路管理者の平常時の沿道管理にも利用できるように、点検結果を管理図及びビデオ映像に重ねて表示する機能を付加した（図－２）。データベースの開発に際しては、①道路管理用データベースとの形式を合わせる、②GUI の多用など、ユーザー負担の軽減を図るための工夫をしている。



図－３ データベースの表示画面

3.　主な研究成果物：

1)杉田秀樹、濱田禎、土木研究所資料第 3557 号、占用施設・沿道施設の耐震性評価に関する調査、平成 10 年３月 2)占用・沿道点検データベース

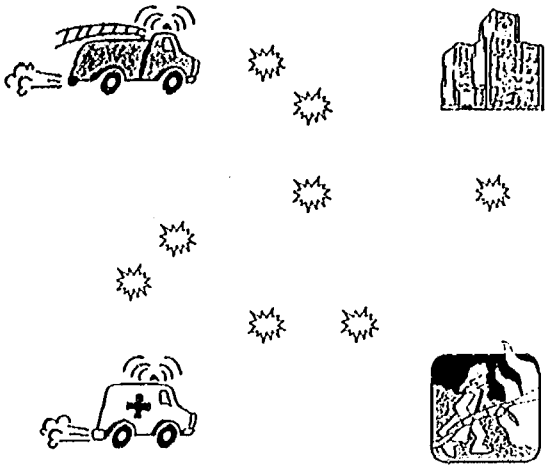
10. 道路ネットワークの耐震性・防災機能の向上技術に関する試験調査

道路ネットワークの耐震性・防災機能の向上技術に関する試験調査

研究機関：平８～平 11
担当：防災技術課　　課長：杉田秀樹，　主任研究員：野崎智文
共同研究室：道路

【要旨】

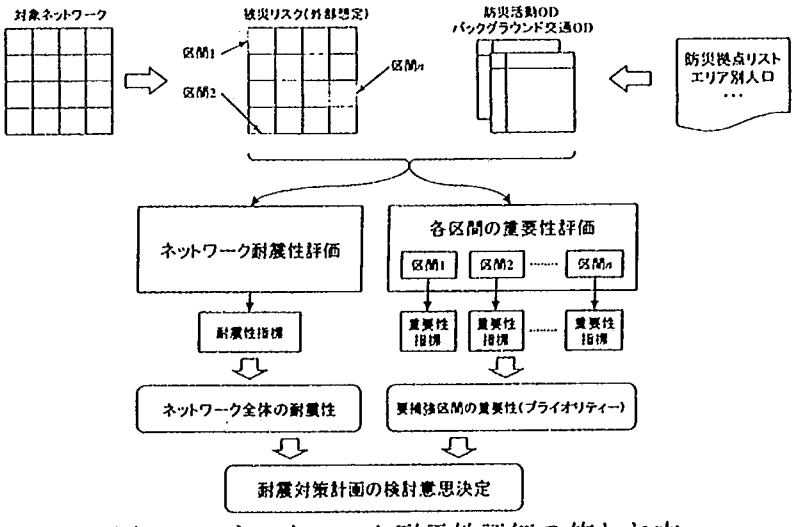
大規模地震が発生した場合、地震発生直後の救急・救援活動、緊急輸送活動を支える道路ネットワークの機能は非常に重要であり、ネットワーク全体としての耐震性を確保する必要がある。本研究においては、道路ネットワークの各区間の被災リスクを考慮し、ネットワーク全体としての耐震性、各道路区間の耐震性に関する重要度を定量的に評価する手法を検討する。平成９年度は、防災技術課においては昨年度に検討された道路ネットワークおよび区間の耐震性評価手法を整理し、テストプログラムによってその妥当性を検証した。また、防災活動 OD 表あるいは区間の耐震性を評価するために収集が必要な情報について検討した。一方道路研究室においては、道路区間の耐震性すなわちリスクを確率的に表現するフラジリティーを定式化し、GIS ベースのテストプログラムによってその有効性を検討した。



道路ネットワーク全体の耐震性は？
各区間の耐震上

１．研究方法

ある地域の道路ネットワークにおいて、緊急活動の観点から複数箇所の耐震対策を計画する場合、①地震後の緊急活動に対してネットワークとしてどの程度のサービスを提供できるか、②ネットワーク中の複数箇所における重要度・優先順位はどのようになっているか、という二点を把握する必要がある。本研究においては、①についてはネットワーク耐震性指標を、②については区間の重要性指標を計算する手法を開発した。これらの手法は与えられた OD 分布および道路ネットワークデータに基づいて計算されるが、平成９年度は、手法自体の算法に加えて、既存の情報を活用して評価に必要な OD データを算出する方法についても検討した。またこの手法を用いたテストプログラムを開発し、モデルネットワークによって手法の妥当性を検証した。

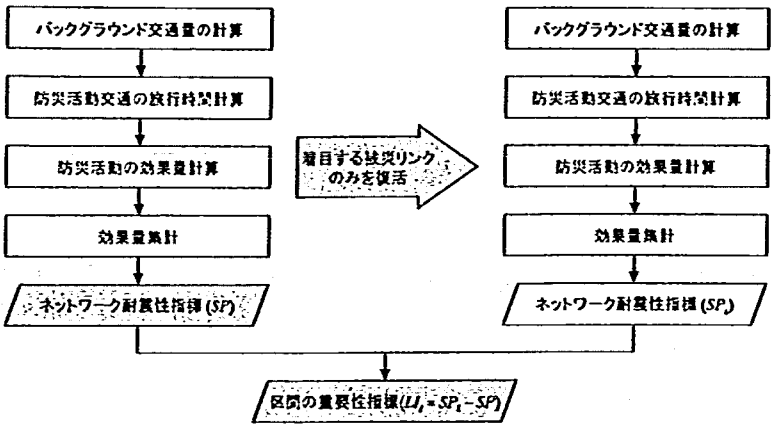


図－１　ネットワーク耐震性評価の使われ方

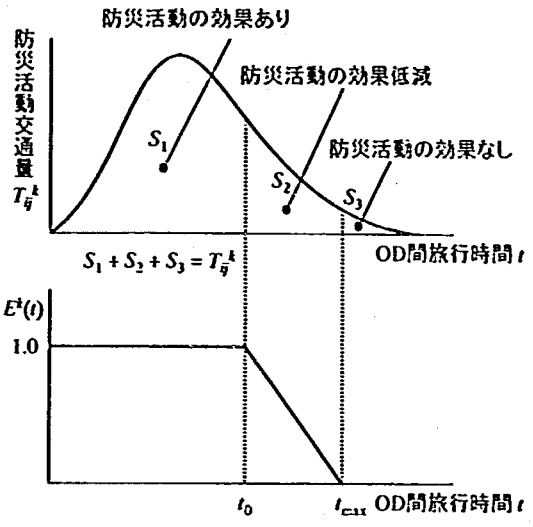
２．研究成果

２．１　指標計算の流れ

ネットワーク耐震性、区間の重要性を算出する流れを図－２に示す。ネットワーク耐震性(Seismic Performance: SP)は、防災活動交通に関する効果量（防災活動効果量：$E^k(t)$）の総量である。$E^k(t)$は目的 k の



図－2　ネットワーク耐震性評価の流れ



図－3　防災活動効果量

防災活動の旅行時間の関数で、制限時間 t_0 以内ならその防災活動が満足され($E^k(t) = 1.0$)、その時間を超えて最大許容時間 t_{max} までの間では効果量が低減し、t_{max} 以上では防災活動の効果がないと定義した。この関数は、防災活動の目的（救急、消防など）に応じて設定される。ネットワーク耐震性は、防災活動目的ごとの効果量の総和と考え、目的 k、ノード i から j へ向かうルート r 上の防災活動交通量を T_{ijr}^k とし、そのルート上の旅行時間を t_r として、ネットワーク耐震性 SP^k を次式で定義した。

$$SP^k = \frac{\sum_i \sum_j \sum_r E^k(t_r) T_{ijr}^k}{\sum_i \sum_j \sum_r T_{ijr}^k} \qquad \text{（式－1）}$$

ここで OD ペア(i, j)、ルート r 上の旅行時間 t_r および目的 k の交通量 T_{ijr}^k は、被災時（および場合によっては平常時）のネットワークデータ等に基づいて得られているものとする。一方、区間 l の重要性(Link Importance: LI_l^k)は、被災時のネットワークで計算された SP^k に対して、着目する被災リンク l を復活させた場合のネットワーク耐震性 SP_l^k を計算し、その差をとったものとする。

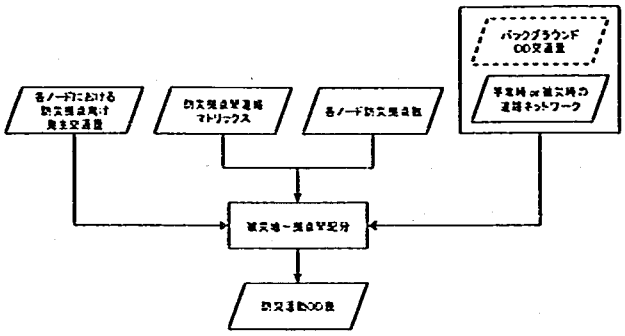
$$LI_l^k = SP_l^k - SP^k \qquad \text{（式－2）}$$

防災活動目的間の重要性がすべて等しいとするならば、すべての目的を包含したネットワーク耐震性、区間重要性は式－3のようになる。

$$SP = \sum_k SP^k \quad , \quad LI_l = \sum_k LI_l^k = SP_l - SP \qquad \text{（式－3）}$$

2．2　防災活動交通

ネットワーク耐震性評価のためには防災活動に関する旅行時間が必要であるが、このためには、ネットワーク中の防災活動 OD 交通量およびそのネットワーク上への配分が必要である。その流れを図－4に示す。まず防災活動の OD マトリックスが必要であるが、そのために表－1のような防災拠点間連絡表を準備する。これは被災地および各防災拠点の間で、地震発生後に防災活動に関する交通需要が発生すると考えられる組み合わせを選んだものである。たとえば表中、都道府県庁と市町村役場、総合病院と被災地の間などに、特に防災活動に関する交通が発生するとして●印を入れている。ネットワーク上はこれらの拠点は各ゾーンを代表するノードに複数存在しており、この表と各ゾーンの人口や拠点に関するデータを利用して、ゾーン間の防災活動 OD 表を作成する。たとえば防災活動として救急救援活動を考えると、発生量としては被災地の人口に発生率を乗じる方法が考えられる。一方集中量としては、病院の病床数などに基づいた集中量を設定



図－4

表－1

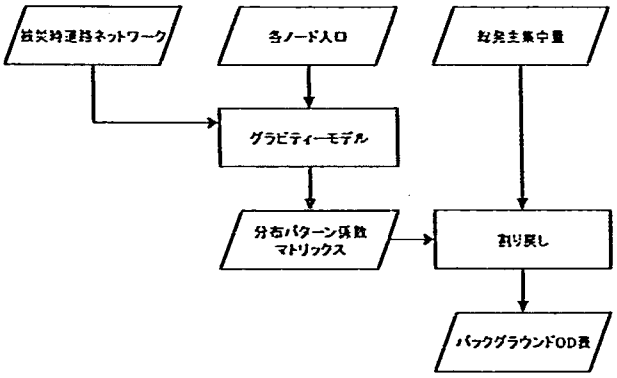
		域外	行政（一般）					行政（設）	
		1.域外	2.都道府県庁	3.市役所（政令指定市）	4.東京都区市	5.地区行政センター	6.市町村役場	7.上下水道局	8.交通局
域外	1.域外		●	●	●				
行政（一般）	2.都道府県庁			●	●	●	●		
	3.市役所（政令指定市）					●	●		
	4.東京都区市								
	5.地区行政センター								
	6.市町村役場								
行政（設）	7.上下水道局								
	8.交通局								

することが可能である。今回のケーススタディーでは、被災地ゾーンを発ゾーン i とし、人口に対して兵庫県南部地震の際の死者・負傷者・行方不明者の人口比率 0.76%を乗じて防災活動の発生量とし、それが当該ゾーンから最も近い二つまでの防災拠点ゾーンに集中すると設定した。この際、発ゾーンから二つの着ゾーンへの配分は、各着ゾーンにおける拠点数と発ノードから着ノード間の旅行時間に基づき、グラビティーモデルの考えによって算出された配分率を用いて行った。

また、行き先ゾーンの選択にあたっては、平常時の旅行時間に基づいた選択（行き先固定パターン）と、被災後にネットワーク状況が変化した状態での旅行時間に基づいた選択（行き先変動パターン）が考えられる。平成9年度は、モデルケースに対して双方の考え方を適用し、その結果を比較した。

2．3　バックグラウンド交通の計算

防災活動に関するOD配分を計算するために、各ゾーン間の旅行時間が必要となる。旅行時間の計算に用いられるリンク走行速度として平常時のセンサス速度などの固定的な値を用いることはよく試みられるが、これは被災後のネットワーク状況および交通状況の変化を必ずしも反映したものとならない。ここでは、道路ネットワークの被災状況を反映するために、防災活動と直接関係がない各被災地ゾーン間のOD分布交通量（バックグラウンド OD、T^{BK}_{ij}）を推計し、これに基づいてリンク走行時間を計算した。バックグラウンドODの計算の流れを図－5に示す。バックグラウンド交通は被災地～被災地間を想定し、コントロールトータルとしての発生量、集中量として、東京都を除く関東地域のトリップ数とエリア面積から導かれた原単位を用いることとした。この値に対して、対象エリア各ゾーンの人口(P_i, P_j)およびに基づきグラビティーモデルによって計算した配分パターン係数を乗じて、OD配分交通量とした。



図－5　バックグラウンド交通の計算

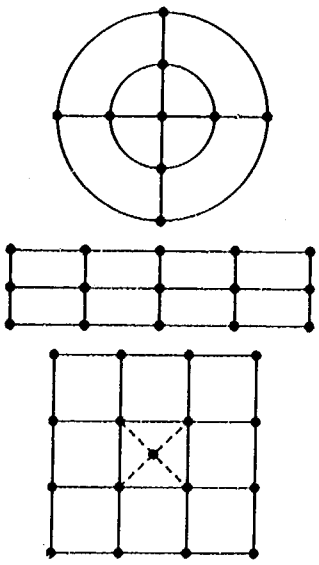
2．4　モデルネットワークを用いたケーススタディー

提案したネットワーク耐震性手法が妥当な結果を示すことを、モデルネットワークによって検証した。モデルネットワークとして、図－6のように放射環状型、ラダー型、格子型のネットワークを設定し、全リンク数の 25%のリンクが被災して通行不能となるとし、テストプログラムによってネットワーク耐震性の評価を行った。ケース設定としては、三種類のネットワーク形態について次のようなバリエーションを設定した。

各ネットワークタイプに特有のリンクカットパターン：たとえば放射環状型のネットワークにおいて、放射路線をカットするか環状路線をカットするか

防災拠点分布パターン：拠点が中心部に集中しているか一様に分布しているか

防災拠点 OD の選択パターン：平常時のルート距離で固定するか、被災時のルート距離によって変動するか



図－6
モデルネットワーク

各ネットワークのリンク長、ノードが代表するエリアの面積、人口、防災拠点数等については、平均的な地方生活圏の面積、道路延長や、いくつかの都市の地域防災計画に基づいて設定した。また今回のケーススタディーについては、防災活動目的を一つとし、防災効果量の関数設定として、図－3において $t_0 = 30$ 分、$t_{max} = 90$ 分とした。試算結果の例として、放射環状型のネットで行き先固定の場合の OD 間所用時間を集計したものを図－7に示す。横軸はネットワーク中の防災活動の旅行時間（所用時間）で、縦軸には所要時間の階級ごとの防災活動交通量を総交通量で割った値を示している。ただし孤立ノードが発生した場合には、全ノードに対する孤立ノードの割合を示している。図より、平常状態、環状カット、混在、放射カットの順に分布が右にシフトし、全体的な所用時間が長くなっていることがわかる。この分布に対して効果関数（図－3の下）を乗じて足しあわせたものがネットワーク耐震性指標となるが、各ケースについてそれを示したものが表－2である。放射環状型では放射路線の重要性が環状路線に対して高いことが示されている。ラダー型では東西幹線より南北幹線をカットした方が悪い結果となっており、直感的な結果と逆転しているが、そもそも東西線および南北線のリンク数は各々 12 本と 10 本であり、ラダー型において 25%に対応するで 6 本をカットした場合には数が少ない南北線の方が重要度が高いためにこのような結果となった。

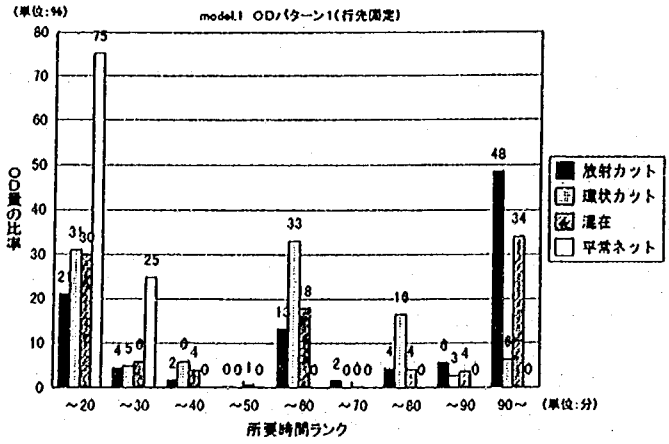
なお区間の重要性についても、放射環状型のネットワークにおいて、カットした 25%（4 本）のリンクのうち 1 本を復活させて（すなわち補強したとして）区間の重要性を算出した。

2．5　今後の方針

防災活動目的・拠点の種類に応じた防災効果量関数の設定法等について検討を進めるとともに、GIS ベースのアプリケーション・ソフトウェアとして整備し、任意の地震想定に対して実際の地域の道路ネットワーク耐震性の評価を試みる。

3．主な研究成果物

・野崎智文、杉田秀樹，道路ネットワークの耐震性評価技術，土木技術資料，平成 10 年 8 月（予定）



図－7　所用時間分布の例

表－2　ケーススタディー結果

		行き先固定		行き先変動	
		拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散
放射環状型	平常状態	1.00	1.00	1.00	1.00
	環状カット	0.61	0.66	0.84	0.95
	混　在	0.50	0.49	0.69	0.89
	放射カット	0.36	0.31	0.61	0.90
ラダー型	平常状態	1.00	1.00	1.00	1.00
	東西幹線カット	0.57	0.81	0.67	0.96
	混　在	0.52	0.74	0.67	0.91
	南北幹線カット	0.44	0.46	0.60	0.89
格子型	平常状態	1.00	1.00	1.00	1.00
	外縁部カット	0.82	0.78	0.82	0.82
	混　在	0.75	0.81	0.81	0.92
	中心部カット	0.23	0.67	0.65	0.92

11. 河川施設の強震計の点検調査

河川施設の強震計の点検調査

研究期間　：平成１０年度

担当　　：防災技術課　　課長：　杉田　秀樹　　管理係長：　田島　　明

【要　旨】

建設省が所管する公共土木施設の一般強震観測は、昭和３２年に近畿地方建設局管内の猿谷ダムにＳＭＡＣ型強震計を設置して開始された。平成１０年３月現在、建設省・公団・自治体が所管する３５６箇所の施設で観測が実施されており、観測された地震記録は各種構造物の耐震設計基準や地震動特性の研究に活用されている。本課題は、一般強震観測のうち建設省が河川施設に設置した観測施設を対象として、強震計の維持点検、地震記録の回収、数値化等の一次解析を行うことを目的とする。平成９年度は、ＳＭＡＣ型強震計１４箇所２８台、普及型強震計１２箇所３３台の点検補正、平成８年度に取得されたアナログ記録の数値化、及び、平成８年度に作成した「河川堤防における強震計配置計画（第３期）」の一部見直しを実施した。

１．研究方法

１．１　強震計の点検補正

平成９年９月現在、建設省・公団・自治体が管理する５０箇所の河川施設で強震観測が実施されている。設置機関別・強震計型式別に設置個所数（台数又は成分数）を整理すると表１の通りである。強震計型式は観測点の整備時期や施設管理者により異なっているが、初期のＳＭＡＣ型などアナログ記録方式の強震計は普及型強震計などデジタル記録方式の強震計に随時更新される予定である。平成９年３月までに河川施設で得られた地震記録は７８２記録であり、地表面上で 30gal または施設上で 100gal（閾値）を上回る１４２記録がデジタル化されている。強震計の点検補正は、建設省が所管するＳＭＡＣ型強震計２８台と普及型強震計３３台について実施した。

表1　河川施設における強震計設置状況(平成9年9月現在)

設置機関	箇所数	強震計型式		
		SMAC型 箇所数(台数)	電磁式 箇所数(成分数)	普及型 箇所数(台数)
建設省	26	14(28)	0(0)	12(33)
北海道開発局	12	4(8)	7(45)	1(3)
水資源開発公団	5	0(0)	0(0)	5(13)
都道府県	7	6(12)	1(9)	0(0)
合計	50	24(48)	8(54)	18(49)

１．２　アナログ記録の数値化

アナログ記録方式による観測記録のデジタル化を行う。平成９年度は、平成８年度の点検補正時に回収された４８記録のうち３記録のデジタル化を実施した。ＳＭＡＣ型強震計の設置箇所では閾値を上回る記録が得られず、これら３記録はすべて普及型強震計によるものである。

１．３　「河川堤防における強震計配置計画（第３期）」の一部見直し

第３期配置計画は、第１期～第２期計画（昭和５３～）で整備された観測施設の更新・増強と多様な条件下での観測記録の収集を目的とするものである。平成８～１０年度の３箇年で合計９０箇所の強震計の設置が予定されている。平成９年度は、地中感振器と間隙水圧計の設置方法に係わる整備上の課題を解決するため、３期計画

における強震計配置法の再検討を行った。

2．研究結果

2．1　強震計の点検補正

点検補正結果を示すと表２の通りである。ＳＭＡＣ型強震計では２８台中４台（１４％）に時刻基盤不良、線間絶縁不良及び本体電源故障が認められた。また、普及型強震計では３３台中４台（１２％）に感振器動作不良、記録部不良及びケーブルの破損が認められた。軽微な不具合や消耗は点検時の調整により、大きな不具合については管理担当事務所等に修理要請を行うことにより、良好な観測環境を維持している。

表2　強震計点検補正結果

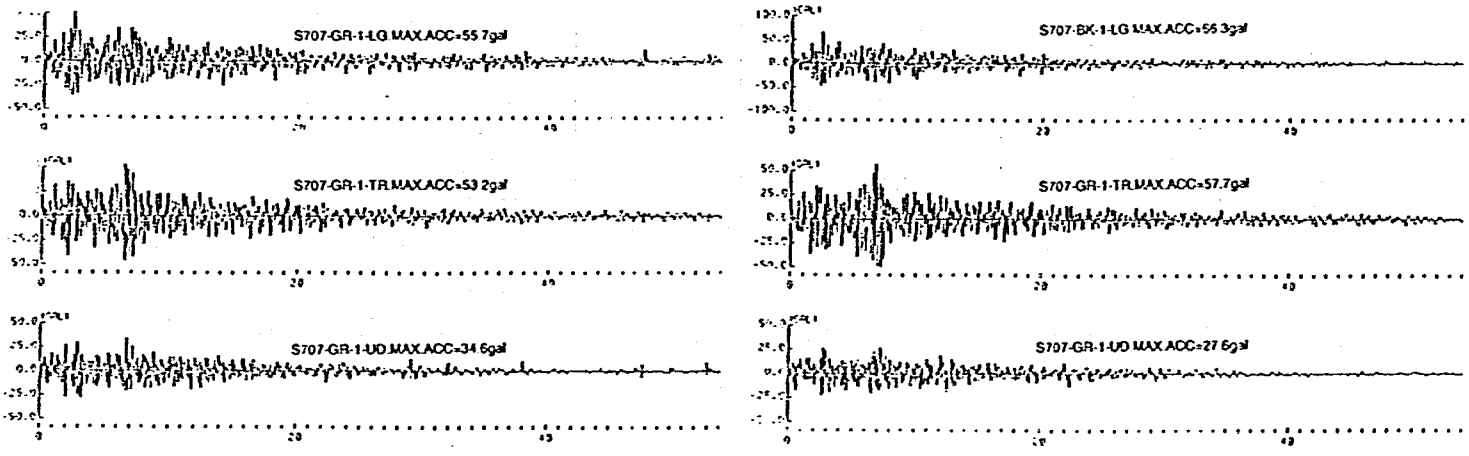
観測所名	強震計型式	故障内容	必要な対策
安能川堤防	SMAC 型	時刻基盤不良	修理不可、要更新
紀ノ川堤防	SMAC 型	線間絶縁不良	要詳細調査
岩木川堤防	SMAC 型	地中・堤体：暴体電源故障	要修理(修理中)
久慈川堤防	普及型	地表Ｅ地中：感振器動作不安定	要再埋設
姫川堤防	普及型	感振器ケーブル切断	要再埋設
六角川河口堰	普及型	記録部不良	要修理

2．2　アナログ記録の数値化

平成８年２月１７日０時２７分福島県沖を震源とする地震（Ｍ６．６）による久慈川堤防（SM-10B）の観測記録を図１に示す。堤防天端及び堤防周辺地盤上での記録を併せて示している。

2．3　「河川堤防における強震計配置計画（第３期）」の一部見直し

地中感振器及び間隙水圧計の設置に用いるケーシングを設置後も残置する場合には、１）川表側に設置した場合、ケーシング下端が透水性の土層であると、浸透距離を短くすることになる、２）川裏に設置する場合でもケーシングが水道となる可能性がある、３）間隙水圧計を直近に設置している場合には正しい値が計測できない、等の問題点がある。これを解決するために、ボーリング内が空胴になっている場合にはケーシングをセメントミルクで埋め戻すこととし、事務連絡を通じて各強震計管理担当事務所等に周知した。



(a)堤体上　　(b)堤体周辺地盤上

図１　久慈川堤防の観測記録（平成８年２月１７日福島県沖を震源とする地震）

3．主な研究成果物

1)杉田、山中、野崎ほか：土木構造物における加速度強震記録(No. 22)、土木研究所彙報、Vol. 65、1998. 2、2)杉田：公共土木施設の地震観測、日本地震学会ニュースレター、Vol. 10-5、1998. 5、3)河川局治水課、土研防災技術課：河川堤防における強震計の配置法について（事務連絡）、1997. 9

12. 道路施設の震害予測システムに関する調査

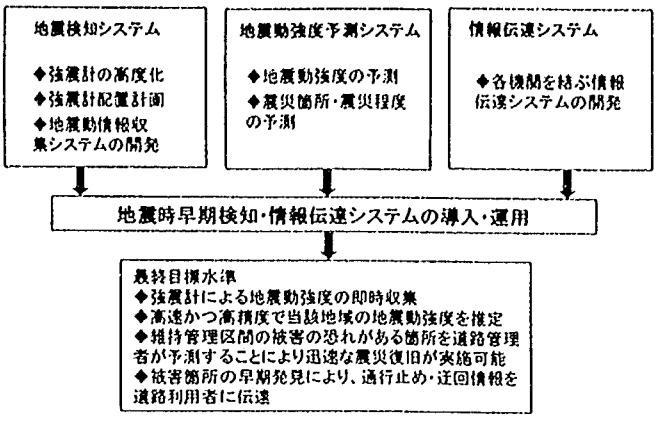
道路施設の震害予測システムに関する調査

研究期間：平５～平９

担当：防災技術課　課長：杉田秀樹、　研究員：濱田禎

【要旨】

関東地方建設局では地震計ネットワークの構築を進めており、これにより管内約 100 個所の震度、最大加速度、SI 値等の地震動特性値を震後即時に収集することが可能となった。本課題は、これらの情報を利用して管理路線の液状化及び橋梁の被害等を震後即時に概略予測するシステム（震害予測システム）を開発することを目的とする。平成８年度までにプロトタイプの開発を終了し、平成９年度はシステムの総合評価及び事例検証を実施した。なお本研究は、道路技術５箇年計画「地震時早期被害予測・情報伝達システム」の一環として実施するものである。



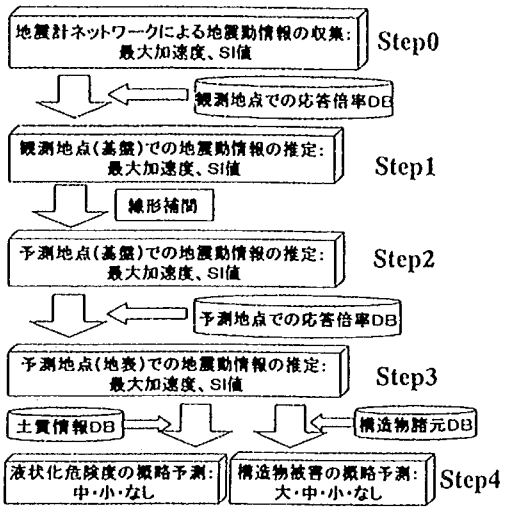
図－１　研究の全体計画

（道路技術５計における当初計画）

１．研究方法

１．１　予測手法の精度確認

震害予測システムの予測フローを図－２に示す。まず、各地震計が観測した地震動特性値を観測地点の応答倍率で除して基盤面における地震動特性値を予測する（step1）。次に、被害予測地点下の基盤面における地震動特性値を step1 による値の補間計算を行い予測する（step2）。さらに、step2 による値に被害予測地点の応答倍率を乗じて被害予測地点位置（地表）における地震動特性値を予測する（step3）。Step1～3 で予測された地震動特性値と路線液状化危険度・橋梁被害の予測用閾値の大小比較を行い、被害の程度を概略予測する（step4、図－３参照）。ここに、閾値とは各予測対象について、大・中・小・なしの被害を起こしうる地震動の大きさで、事前計算により別途定めておく。



図－２　予測のフロー

表－１　試験運用中の主要な地震

発生年	月日	時刻	最大震度
1997	0709	1836	3.3(新晩翠橋)
1997	0716	1008	3.2(烏山)
1997	0722	2011	3.8(烏山)
1997	0809	0535	3.3(足尾)
1997	0908	0839	3.0(野田)
1997	1206	1540	3.3(小室)
1998	0308	1346	3.4(足利)

step1～4 において予測精度を左右するファクターを整理すると、①観測地点及び被害予測地点における地震動の応答倍率、②基盤面における補間法、③路線液状化予測用閾値、④橋梁被害予測用閾値の４点となる。平成９年度は、平成９年７月～平成１０年３月の試験運用中に記録された観測データ（表－１参照）を用いることにより上記①及び②の精度検証を実施した。なお、液状化や橋梁被害をもたらす地震が発生していないため③及び④については、小規模な地震において現実よりも大きな被害を予測結果として与えないことが確認されたにとどまった。

表－２　基盤観測波形の回収済み箇所

基盤観測点を有する事務所	7月9日		8月9日		9月8日	
	基盤	地表	基盤	地表	基盤	地表
横浜国道	○		○		○	
甲府	○		○		○	○
常陸			○	○	○	
関東技術	○	○	○		○	○
千葉国道	○	○	○		○	
船橋出張所						
総武国道	○		○	○	○	
大宮国道	○	○	○	○	○	
東京国道	○		○	○	○	○

１．２　機能上の問題点の抽出

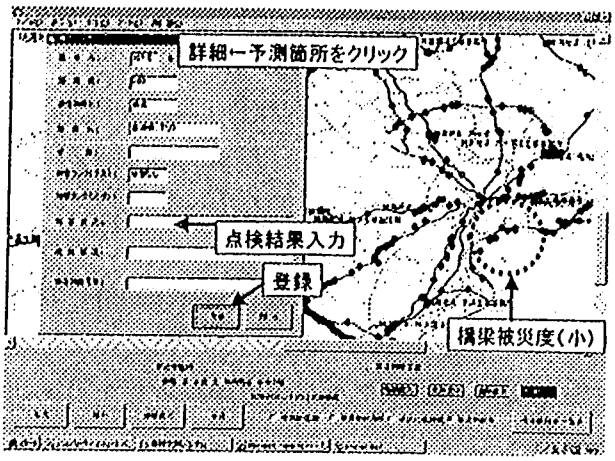
試験運用を通して、予測手法上の問題点以外に、ユー

ザーサイドの要望等から①予測計算の高速化、②デモ機能の追加といった問題点が抽出された。これらについて個別に解決を図った。

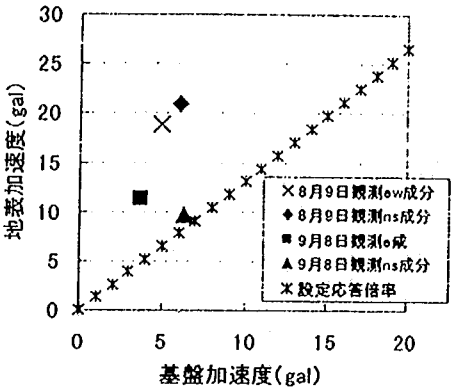
2．研究結果

2．1　予測手法の精度確認

表－2に示す観測地点では、基盤と地表の両方で波形が観測されている。応答倍率の精度確認のため、地表の観測値／基盤の観測値で表される実際の応答倍率と、8年度に設定したその個所における応答倍率との比較を行った。図－4に比較例を示す。8年度に設定した応答倍率は、最大加速度、SI 値とも実測の応答倍率よりも小さくなっていた。ただ、同一地震における各地点の設定した応答倍率と実測の応答倍率の比には大きなばらつきはなく、最終的な予測値の精度は確保されていると思われる。これは観測値を実際よりも小さな応答倍率で基盤面に割り戻し、同じ程度の小ささの倍率を再びかけて地表面の値を予測しているためである。



図－3　橋梁被害予測結果の表示画面(9月8日)



図－4　設定応答倍率と観測値の比較
(東京国道工事事務所)

また、基盤面における補間法の妥当性を検証するため、ある観測地点の基盤面における地震動特性値をその地点以外の全ての観測地点における特性値から予測する機能をシステムに付加した。これによって、9月8日に発生した地震における東京国道及び甲府の両工事事務所における地震動特性値を推定し、表－2に示した個所の実測値と比較した結果を表－3に示す。表－3によれば東京国道における最大加速度を除いては、予測値と観測値が概ね一致している。東京国道における最大加速度の乖離は、先述したように、応答倍率が低めに設定されていることによると考えられる。基盤の予測値に応答倍率を乗じたものと地表における観測値との乖離度は30%程度にまで縮まっていることから、補間方法自体の精度は確保されていると考えられる。

表－3　基盤面における観測値と予測結果の比較

	東京国道工事事務所		甲府工事事務所	
	最大加速度	SI値	最大加速度	SI値
19970908観測値(基盤)	7.33	0.57	6.48	0.45
19970908予測値(基盤)	18.05	0.78	6.94	0.29
19970908観測値(地表)	17.00	1.00	16.00	1.00
19970908予測値(地表)	22.52	1.33	10.00	0.52

2．2　システムの改良

①予測計算の高速化：計算プロセスの細分化・計算順序の最適化により、計算時間の短縮を図った。プロトタイプシステムでは、地震動特性値の観測情報が伝送された時点で地震動特性値の予測から閾値との大小比較までを一括して行い、計算終了後にすべての情報が表示される。観測された地震動特性値は、地震発生後3分後（1回目）と全ての個所の情報が収集された時点（2回目）の2度伝送されるが、本改良により3分後には特性値情報だけは表示が可能になった。

②デモ機能の追加：震源位置及び規模を与えると被害を予測し、表示する機能を追加した。この機能は、予測システムに震源情報から地震動特性値の分布を推定する機能を新たに持たせ、従前の予測手順に対してこの推定値を観測値の代わりに使うことで実現している。

3．主な研究成果物：1)濱田禎、杉田秀樹、飛田忠一、震後早期啓開を支援する即時被害予測システムの開発、第22回日本道路会議一般論文集(B)、pp1018、2)濱田禎、杉田秀樹、金子正洋、地震動特性値分布の即時予測手法に関する研究、第24回地震工学研究発表会、講演論文集、pp193、3)震害予測システム WS 版、PC 版

13. 震害予測システム構築に関する調査

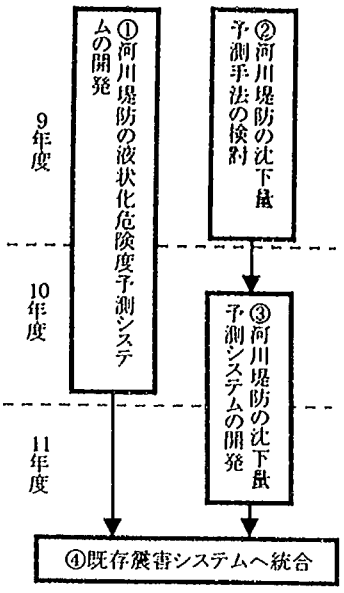
震害予測システム構築に関する試験調査

研究期間：平9～平11

担当：防災技術課　課長：杉田秀樹、　研究員：濱田　禎

【要旨】

関東地方建設局では、平成7～9年度の3箇年で、管理施設近傍の地震動情報を震後即時に収集する地震計ネットワークの整備が進められている。土木研究所では関東地建との共同により、本局に収集された地震動情報を活用して震後即時に施設被害の可能性を概略推計する震害予測システムの開発を実施しており、道路沿いの液状化危険度と橋梁被害を予測できるプロトタイプシステムの開発を終了している。本課題は、既存のプロトタイプシステムに河川堤防の被害状況を概略予測する機能を付加するものであり、平成9年度は①河川堤防の液状化危険度予測システムの開発、及び②河川堤防の沈下量予測手法の検討を実施した（図1）。



図－1　全体計画

1．研究方法

1．1　河川堤防の液状化危険度予測システムの開発

震後即時に河川施設管理者に必要とされる情報は、水位の高い堤防区間における堤体の沈下である。堤体の沈下により越水が生じると、堤内地は地震被害に加えて浸水による被害を受け、二次災害の拡大が懸念される。一方、既往地震における堤防被害の事例分析によれば、堤体沈下の主な要因として地盤の液状化が挙げられる。このため本課題では、堤体沈下の可能性を表す指標として液状化危険度に着目し、震後即時に堤防沿いの液状化危険度を概略推計するシステムを検討した。

液状化危険度の評価指標としては、液状化に対する抵抗率 F_L[1]値に基づいて算出される液状化指数 P_L を用いることとした。これは、①土木施設の耐震設計分野での汎用性、②指標算出の簡便性、③道路施設を対象に開発されたプロトタイプシステムとの整合を考慮したためである。液状化危険度の表現は、道路施設と同様に、危険度なし（$P_L \leqq 5$）、危険度小（$5 < P_L \leqq 15$>、危険度中（$15 < P_L$）の3段階とした。

1．2　河川堤防の沈下量予測手法の検討

液状化危険度は施設被害の可能性の有無を判断するためには有効であるが、沈下量を直接的に推計できれば施設管理者の震後点検により有効と考えられるため、プロトタイプシステムに沈下量予測機能を導入することとした。土構造物の耐震設計に用いられる沈下量予測手法としては、表－1に示すように、被害事例に基づく変形予測法、円弧滑りによる安定計算法、FEM による残留変形解析などがある[2]。いずれの手法も、精度（前二者）あるいは簡易性（後者）の点で即時被害予測に適しているとは言い難いが、本研究では最も適用性が高いと判断される円弧滑りによる安定計算法を採用しることとした。

表－1　沈下量予測手法

手法	手法の概要	入力データ	評価項目	精度	簡易性	即時予測への適用性
被害事例に基づく変形予測法	実事例について安定計算を行い、結果と被害程度との関連づける。	堤体形状 地層構成 地盤常数 地震力 地下水位	被害形態（パター 被害程度 （沈下量）	△	○	△
円弧滑りによる安定計算法	円弧滑り計算。過剰間隙水圧の上昇を考慮し、慣性力を作用させる。	堤体形状 地層構成 地盤常数 地震力 地下水位	安全率	△	○	○
FEMによる残留変形解析	別途設定したせん断剛性率Gを用いて静的自重変形解析により地震後の永久変形量を算出。	堤体形状 地層構成 地盤常数 動的変形特性 地震動 地下水位	変形量	◎	×	×

2．研究結果

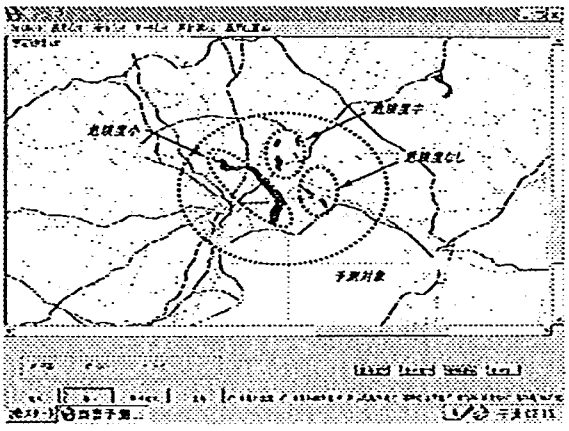
2．1　河川堤防の液状化危険度予測システムの開発

予測対象は、小貝川・江戸川・中川・綾瀬川・荒川の5河川のうち、平成7年度に耐震点検が実施された堤防区間（堤内地地盤高さが朔防平均満潮位+1.0m よりも低い区間、表－2参照）とした。これら堤防区間を、既存の堤防沿いの土質縦断図及びボーリングデータを用いて

地質構成が同一と見なせる区間に細分割した結果、256 の小区間に分割された。これらの小区間を予測の最小単位とし、各区間の液状化判定用の閾値及び地盤の応答倍率を先のボーリングデータをもとに計算した。ここで、液状化判定用の閾値とは、対象区間に対して P_L=5 及び 15 を与える最大加速度で、これと対象区間に作用したと思われる最大加速度とを比較することによって予測結果を得る。また、地盤の応答倍率は、対象区間の基盤から地表に地震動が伝播する際の増幅倍率で、対象区間の最大加速度を推定する際に用いる。東京湾を震源とするM7.0 の想定地震に対する液状化危険度の予測結果を示すと図－2 の通りである。

表－2 液状化危険度の予測対象区間

工事事務所名	河川名		自 (‰)	至 (‰)	自 (‰)	至 (‰)	自 (‰)	至 (‰)	自 (‰)	至 (‰)
利根川下流	小貝川	左岸	1.50	7.00	－	－	－	－	－	－
		右岸	1.50	7.00	－	－	－	－	－	－
江戸川	江戸川	左岸	1.30	2.90	9.70	11.70	15.40	15.70	22.50	23.30
		右岸	0.30	0.60	1.50	3.20	9.50	9.90	10.40	12.60
			15.50	16.00	21.30	23.10	－	－	－	－
	中川	左岸	12.40	12.60	13.10	18.00	18.10	18.70	19.90	20.30
		右岸	12.50	18.30	18.90	20.10	－	－	－	－
	綾瀬川	左岸	9.50	10.50	13.50	13.60	17.20	17.30	－	－
		右岸	3.40	3.90	－	－	－	－	－	－
荒川下流	荒川	左岸	7.40	18.40	21.90	22.30	23.10	23.60	－	－
		右岸	0.00	17.00	17.60	19.60	22.95	23.05	23.70	25.00
	中川	左岸	0.60	7.00	－	－	－	－	－	－



図－2 堤防の液状化予測結果

2．2 河川堤防の沈下量予測手法の検討

円弧滑り法とは、式(1)で計算される安全率 Fs に基づき、表－3に示す評価基準から沈下量を算出する方法である[3]。

$$F_{SD}=\frac{\sum\left(c'l+\left(W-u_a b-\Delta u b\right)\cos\alpha\cdot\tan\phi'\right)}{\sum W\sin\alpha}\cdots(1)$$

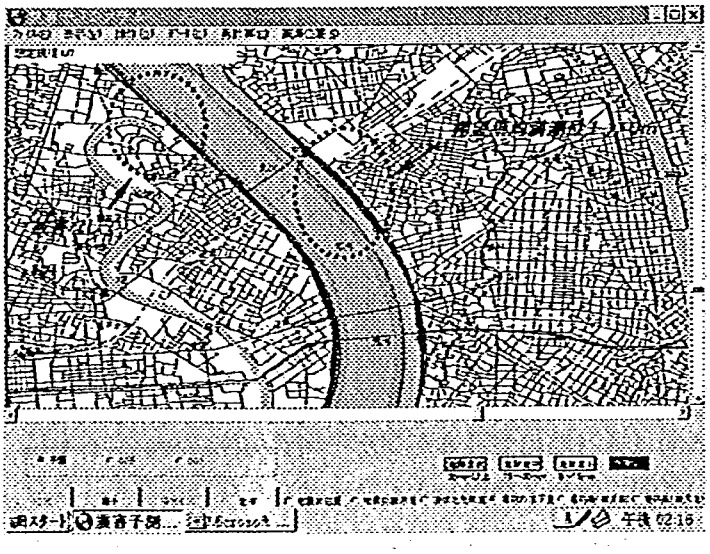
ここに、c'、φ'、W、l、b、u_a、Δu、αは、それぞれ土の粘着力、せん断抵抗角、土塊の全重量、円弧の長さ、円弧の分割片の長さ、分割片の幅、常時の間隙水圧、地震時の間隙水圧の増分、分割片と水平面のなす角である。地震動の大きさは、液状化の程度（F_L 値の大小）とΔU を介して F_{SD} に反映される。荒川の距離程 5 ‰～6 ‰の区間（両岸）を対象に、沈下量予測用閾値を計算した結果を表－4に示す。閾値の設定では、平均朔望満潮位+1m、0m、-1m の三種類の状態を予測することにした。沈下量の推定を行った結果を図－3に示す。

表－3 安全率と沈下量の関係

安全率	沈下量
$1.0<F_{ds}$	堤防高の0%
$0.8<F_{ds}\leqq 1$	堤防高の25%
$0.6<F_{ds}\leqq 0.8$	堤防高の50%
$F_{ds}\leqq 0.6$	堤防高の75%

表－4 沈下量予測用閾値(荒川)

距離程	高さ	右岸		左岸	
		堤内・外	閾値(gal)	堤内・外	閾値(gal)
5.0K ～	+1.0m	内	150	外	111
	朔望満潮位	内	153	外	113
	-1.0m	－	－	－	－
5.25K ～	+1.0m	内	121	外	130
	朔望満潮位	内	124	外	134
	-1.0m	－	－	－	－
5.75K ～ 6.0K	+1.0m	内	156	－	－
	朔望満潮位	内	158	－	－
	-1.0m	－	－	－	－



図－3 堤防の沈下量予測結果

3．主な研究成果：

1)河川堤防の震害予測システム、2)Sugita, Hamada: Real-time Damage Estimation System for Road Facilities, UJNR 7th Lifeline WS, 1997.10、参考文献：1)道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、pp91、（社）日本道路協会、平成 8 年 12 月、2)河川構造物地震対策技術検討委員会報告書、平成 8 年 3 月、3)河川堤防耐震点検マニュアル・解説、建設省河川局治水課、平成 7 年 3 月

1998年度春季防災技術課発表論文集

1998年4月1日
防災技術課

土木学会　平成10年度全国大会　第53回年次学術講演会

1998年10月4日（日）～6日（火）
神戸大学

交通施設の地震被害による経済的影響評価システム　p1
杉田秀樹・野﨑智文・遠藤和重

震災対策体制のパフォーマンス評価手法の提案　p3
野﨑智文・杉田秀樹・濱田禎

地震計ネットワークを使った公共土木施設の即時震害予測手法　p5
濱田禎、杉田秀樹・金子正洋

付属資料

土木学会第53回年次学術講演会（H10年10月4日～6日・兵庫県神戸市）

交通施設の地震被害による経済的影響評価システム

交通施設の地震被害による経済的影響評価システム

建設省土木研究所　正会員　杉田　秀樹
建設省土木研究所　正会員　野崎　智文
建設省土木研究所　　遠藤　和重

1．はじめに

当システム(EASSE: Earthquake Assessment System for Socio-economic Effect)は、都道府県レベルのエリアで道路のネットワーク計画、耐震補強計画を検討・立案する計画者が、意思決定に必要な判断材料を得るために活用するものであり、平成７年度から３箇年にわたり、土木研究所においてプロトタイプシステムの開発が行われた。EASSE 実行時には、想定された地震災害や補強計画に応じて交通ネットワークの被災箇所を入力することにより、その被災パターンに応じた経済損失額を得る。ユーザーは、複数の耐震補強計画に対応した被災パターンとそれに伴う経済損失額のセットを比較検討しながら、長期的な点から見た補強計画の判断を行う。同様の実行は、地震発生後に、実際の被害に基づいた復旧計画の策定にも応用することができる。EASSE の利用イメージを図１に示す。

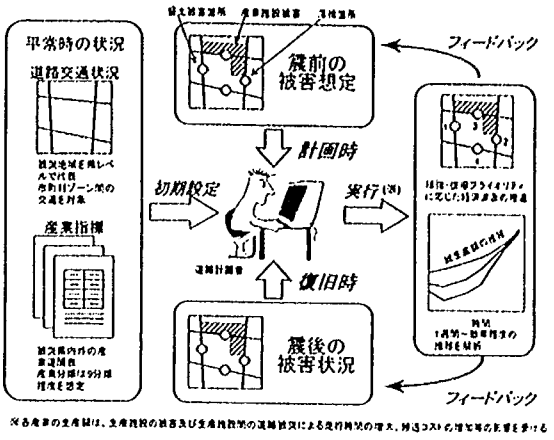


図１　EASSE の利用イメージ

2．システムの特徴

本システムの特徴は次のとおりである。

① システムに用いられる推計手法は、図２に示すように、独立した機能別にモジュールとして組み立てられ、必要に応じて推計内容を容易に高度化することが可能である。

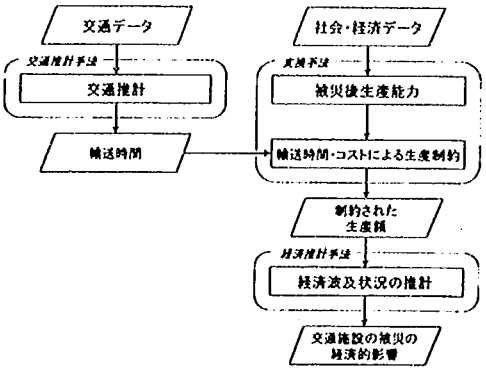


図２　EASSE の推計手法

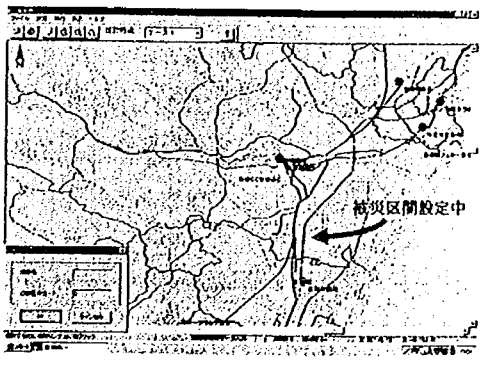


図３　被災箇所設定画面

② GUI を用い、図３のような画面に表示された地図上で、地域、道路・鉄道区間を指定することによって被災程度等の条件を設定することができる。

3．各推計モジュールの改変点

研究着手時に手法モジュールを検討した際、経済推計モジュールについては、基本的な Reontief モデルに基づくシンプルな方法で行っていた。今回は、この部分を図４に示す考え方にそって改変した。

・ 震災による直接被害および交通施設被害の間接的影響によ

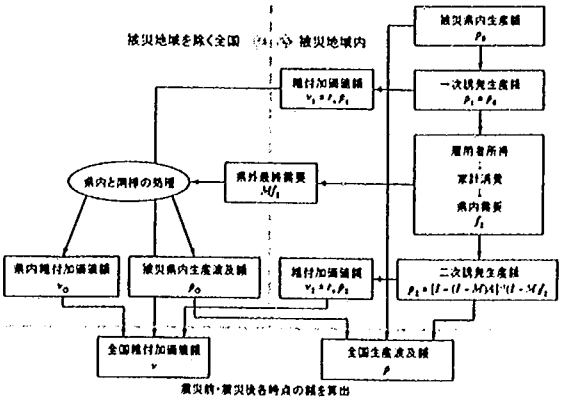


図４　経済推計手法の流れ

キーワード：地震災害、交通基盤施設、震前対策、震災復旧、交通推計、経済推計
連　絡　先：〒305-0804　茨城県つくば市旭１番地　(TEL)0298-64-2211 (FAX)0298-64-0598

って、被災県各部門の生産額が低減するが、これが雇用者所得の減少、家計消費の変化を通じて被災県内の最終需要額を減少させる。

この最終需要額の変化が被災県の生産額の変化に波及するとともに、移入依存係数を通して被災県を除く全国の生産額に波及。

4．宮城県に関するケーススタディー

平成8年仙台市の震災想定結果に基づいて、仙台市内の国道4橋梁、鉄道3箇所を対象とし、それらが被災し、あるいは事前の補強のために被害を免れたとして、以下のようなケース設定のもとに試算を行った。

ケースA：道路の①～④の箇所が4週間通行不能

ケースB：鉄道の①～③の箇所が4週間不通

ケースC：道路の①～④、鉄道の①～③の箇所がすべて4週間通行不能または不通

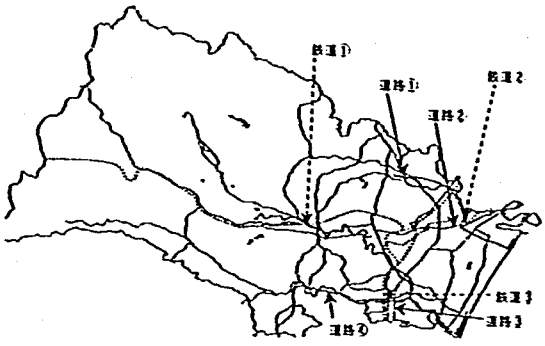


図5　被災設定箇所

また、ケースCにおいて道路（あるいは鉄道）の被災箇所のうち1箇所が補強されていたとしてリンクカットしないケースをケースをD1～D4（あるいはE1～E3）として推計した。

実行結果をまとめたものを、表1に示す。表にはカットパターンと全国の総走行時間、被災県内および被災県を除く全国の生産波及額、そして被災区間に最も近い地点の平成6年度道路交通センサス12時間交通量を示したものである。この波及額は、年間ベースの取り引き基本表に基づいて計算し、これを4週間分の値として示している。ケースA～Cについては、平常時との差を、ケースD1～E3については、すべてが被災したケースCを基準としてそれからの差を示している。これより鉄道の被害は道路の被害より長期的な経済損失に与える影響が比較的小さいことがわかる。これに対して道路の影響額は大きいが、必ずしも交通量の大小とこの場合の重要性が対応していないことに注意を要する。特に値が大きいケースD4は、東北自動車道仙台南ICに接続する国道286号が通行不能となるため、経済的波及額が大きく出たものである。

表1　試算結果

ケース	被災パターン	総走行時間			波及生産額（県内）			波及生産額（全国）			交通量
		（台時）	対平常時（台時）	対ケースC（台時）	（百万円）	変化額（百万円）	対ケースC（百万円）	（百万円）	変化額（百万円）	対ケースC（百万円）	（台/12h）
平常時		13,139,778	0	－	1,305,765	0	－	1,501,117	0	－	
A	道路のみカット	14,280,280	1,140,502	－	695,581	-611,185	－	791,047	-710,071	－	
B	鉄道のみカット	13,181,285	41,508	－	705,425	-600,340	－	803,323	-697,794	－	
C	道路・鉄道カット	14,322,662	1,182,884	0	695,430	-611,285	0	790,944	-710,173	0	
D1	①国道4号（七北田川－泉大橋）復活	14,300,824	－	-21,838	695,584	－	104	791,090	－	146	44,917
D2	②国道45号（七北田川－落田大橋）復活	13,795,206	－	-527,456	695,300	－	820	791,863	－	918	34,043
D3	③国道4号（名取川－名取大橋）復活	13,839,796	－	-482,866	695,768	－	289	791,322	－	378	33,984
D4	④国道286号（名取川－名取1号橋、名取2号橋）復活	14,193,362	－	-129,300	702,303	－	6,823	798,630	－	7,686	33,763
E1	①仙山線（広瀬川）復活	14,322,662	－	0	695,620	－	140	791,092	－	148	
E2	②仙石線（七北田川）復活	14,280,280	－	-42,382	695,566	－	86	791,031	－	87	
E3	③東北本線（名取川）復活	14,322,662	－	0	695,620	－	140	791,092	－	148	

5．おわりに

交通施設の被災による経済的な損失を評価する方法を、アプリケーション・ソフトウェアとして開発し、宮城県を例としてケーススタディーを行った。今後システムのインターフェイスについて向上させるとともに、各モジュールおよび新たなモジュールに関して検討を進める。

6．参考文献

(1) 杉田秀樹・野崎智文・遠藤和重、「震災による交通ネットワーク被害の生産活動への影響評価について」、地震工学研究発表会講演論文集、1997.7

(2) 仙台市、「仙台市防災都市づくり基本計画策定調査」、1997

(3) たとえば川島和彦・杉田秀樹・加納尚史、「地震による間接的な経済被害に関する研究」、土木研究所報告第186号、pp.1-58、1991.12

土木学会第53回年次学術講演会（H10年10月4日～6日・兵庫県神戸市）

震災対策体制のパフォーマンス評価手法の提案

震災対策体制のパフォーマンス評価手法の提案

建設省土木研究所　正会員　野崎　智文
建設省土木研究所　正会員　杉田　秀樹
建設省土木研究所　　遠藤　和重

1．はじめに

広域にわたる社会基盤施設に関して地震直後に被害状況を点検する場合には、迅速な初動体制および情報収集活動が必要である。このような震災対策体制は、人・機器等の要素の集合体と考えることができるが、体制による情報収集の迅速性・的確さは、個々の要素の能率・速度を個別に向上させただけでは必ずしも向上されない。本研究では、震災対策体制を構成する人・機器等の要素を情報を処理する「ゲート」として表現し、多数のゲートを接続したネットワークによって体制の情報処理のパフォーマンスを評価する手法を提案するものである。

2．手法の概要

地震発生後の地震計・同報装置の動作といった機器の処理時間、要員の参集等の人の移動、点検・報告といった作業は、すべて前段の処理に応じて対象要素の処理が開始され、一定の時間を経た後加工された情報が出力されるものと捉えることができる。たとえばある指示に対して前段の二つの担当がそれぞれの所要時間で処理を行い、後段はその二つの処理が終わった時点で処理を開始し、一定時間後に終了するという組織をモデル化すると図－１のように表せる。今回の手法は、このようなネットワークを複雑にし、かつそこで処理される情報についてより具体的な表現を用いたものと考えてよい。

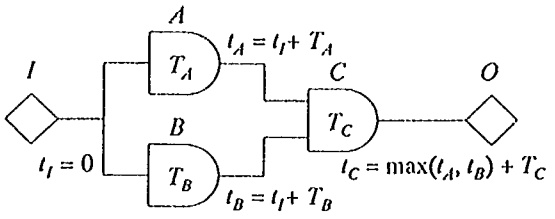


図１　簡単なネットワークの例

3．情報の定義

施設の被害点検では、各点検対象箇所に被災が生じており、それを点検することによって被災状況が判明する。たとえばヘリコプターによる上空からの点検の場合には、大被害については確実に判断できるが、被害が小さい場合と被害がない場合の区別がつかないこともある。たとえばヘリコプターによる点検で得られる情報量は、真の被災度（大、小、なし）に対して判断された被災度の確実性との関係から、表－１のように定義した。このような情報の確実さを情報量(I)とし、その情報量と時刻tのセットを情報$S=(t,I)$として定義する。

表１　ﾍﾘｺﾌﾟﾀｰによる点検の情報量

		実際の被害		
		大	小	なし
	必要な処置	大規模	小規模	不要
観　測 情報量	被害大	1.0	0.0	0.0
	被害小	0.0	0.5	0.5
	被害なし	0.0	0.5	0.5
正答		1.0	0.5	0.5

4．震災対策体制要素のゲートの種類

今回の研究では、道路を管理する仮想の工事事務所をによってケーススタディーを行ったが、そこで主に必要となるゲートは①最早動作ゲート、②最遅動作ゲート、③情報集約ゲートなどである。たとえば最早動作ゲートは、前段の複数の入力のうち最初に得られた情報に基づいて処理が開始され、出力を確定

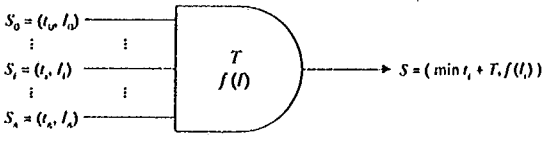


図２　最早動作ゲート

キーワード：震災対策、システム、評価手法
連　絡　先：〒305-0804　茨城県つくば市旭１番地　(TEL)0298-64-2211 (FAX)0298-64-0598

するもので、内部処理関数 $f(I)$ を変更することで様々な種類のゲートを構築することができる。図－2に最早動作ゲートの考え方を示す。このようにして構築された多数のゲートを要素間の前後関係に留意しながら接続し、ネットワークとして表現する。

5．体制のパフォーマンス

各点検班から各箇所の被災度情報が集約ゲートに伝達されてゆく状況の例を示したのが図－3である。このような図をもとに、情報収集が開始されるまでの時間、全箇所の情報が得られるまでの時間、初期情報収集の立ち上がりといった体制全体のパフォーマンスを定量的に把握できるとともに、体制のパターンを変えることでパフォーマンスの向上を図ることができる。また、各ゲートにおける処理の開始･終了時刻などを詳しく見ることで、体制のパフォーマンスに与える要素の処理の影響を知ることも可能である。

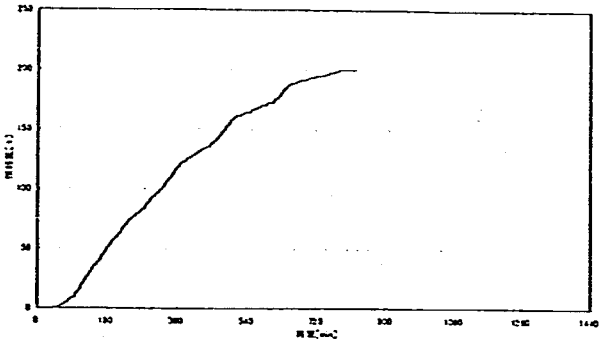


図3　情報量蓄積の様子(DAY-1)

6．ケーススタディー

ケーススタディーにおいては、4路線の道路を3つの出張所で管理する工事事務所を想定した。この事務所に対して、昼間の勤務時間内に地震が発生した場合には職員の参集が不要でヘリコプターの飛行が可能、といったような条件に応じてネットワーク構成を変更して試算を行った。このほかに路線ごとの被災度の分布を変えたり、路線内の被災度の現われ方を変更することによって、全部で12種類のパターンを準備し、試算を行った（表－2）。このケーススタディーから、以下のような一般的結論が得られた。

表2 ケース設定

	ヘリコプター点検	職員参集	1ルートあたり箇所数	ルート間被害分布	ルート内被害分布
DAY-1	可能	不要	50	一様	ランダム
DAY-2	可能	不要	50	傾斜	ランダム
DAY-3	可能	不要	50	一様	大→小
DAY-4	可能	不要	10	一様	ランダム
DAY-5	可能	不要	10	傾斜	ランダム
DAY-6	可能	不要	10	一様	大→小
NIGHT-1	不可能	必要	50	一様	ランダム
NIGHT-2	不可能	必要	50	傾斜	ランダム
NIGHT-3	不可能	必要	50	一様	大→小
NIGHT-4	不可能	必要	10	一様	ランダム
NIGHT-5	不可能	必要	10	傾斜	ランダム
NIGHT-6	不可能	必要	10	一様	大→小

① 全路線で被災度の分布が一様な場合と路線間で被災度の分布に違い（傾斜）がある場合を比べると、傾斜の場合の方が一様の場合より点検時間が長くなる。このような場合、被害の程度が大きい路線に点検要員を多く振り向けることによって、点検時間を短縮する必要がある。このことは即時震害予測システムの有効性を支持している。

② 路線内で被災度がランダムに分布している場合と被災度が大きいものから点検してゆく場合では、後者の方が初期に長い点検時間を必要とするため累積情報量の立ち上がりが遅い。今回は被災度に関わらず被災状況が判明した時点で情報量を1.0としているが、今後情報量に被災度の概念を含める必要がある。

7．おわりに

震災対策体制をネットワーク表現することにより、情報収集の迅速性・的確さといった観点で体制のパフォーマンスを定量的に把握できることがわかった。今後、情報量の定義方法、各ゲートにおける処理時間の同定方法、そしてよりフレキシブルな組織システムの表現が可能な手法の拡張に関して検討を進め、実際の体制への活用方策を提言する必要がある。

参考文献

(1) 片田敏孝、青島縮次郎、及川康、「災害情報システム評価のためのシミュレーションモデルの開発」、土木計画学研究・講演集 No.19(1)、pp.21～24、1996

(2) 木俣昇、鷲見育男、「消防防災システムの阻害要因のペトリネットシミュレーションに関する基礎的研究」、土木計画学研究・講演集 No.19(2)、pp.43～46、1996

(3) 野崎智文、杉田秀樹、「地震被害の初動検知体制パフォーマンスの評価に関する研究」、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集 1-B、pp.826～827、1997

土木学会第53回年次学術講演会（H10年10月4日～6日・兵庫県神戸市）

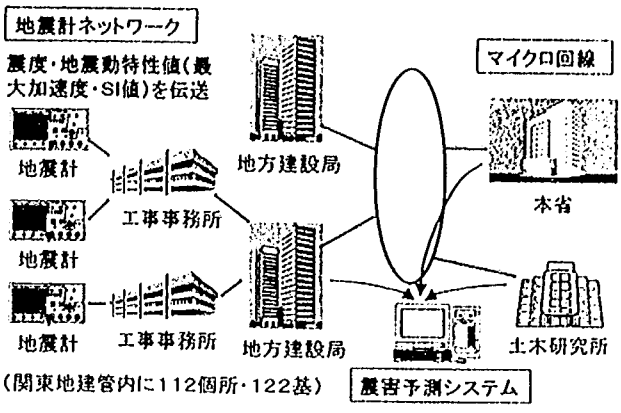
地震計ネットワークを使った公共土木施設の即時震害予測手法

地震計ネットワークを使った公共土木施設の即時震害予測手法

建設省土木研究所　正会員　濱田　禎
建設省土木研究所　正会員　杉田秀樹
建設省土木研究所　正会員　金子正洋

1．はじめに

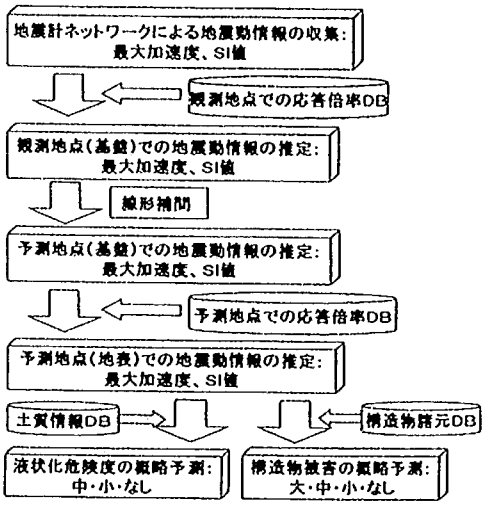
兵庫県南部地震以降、危機管理策の充実を図ることで被害の軽減を図る、ソフト的地震防災へのニーズが高まっている。建設省土木研究所及び関東地方建設局でも、情報の有効活用による被害軽減を目標とする即時震害予測システムの開発を実施し、平成９年より試験運用を行っている。これは、管内に配置された地震計によって得られる地震の観測情報をもとに、各管理施設の被災状況を大まかに予測し、震災直後の情報の少ない段階において公共土木施設管理者の意志決定をサポートするものである。昨年度はシステムの概要について報告した。今年度は、液状化及び橋梁被害の予測手法について報告する。



図－１　システム構成

２．震害予測システムの概要

本システムの構成を図－１に示す。本システムは、地震計ネットワークにより関東地方建設局管内 112 箇所（全 122 基）分の最大加速度及び SI 値等（以下、地震動特性値という）を通信サーバーに収集し、これより管理道路及び堤防沿いの地震動特性値の分布を推定[1]、さらにこれを用いて道路及び堤防沿いの液状化と構造物（橋梁）の被害を概略予測する。観測地点数及び予測地点数を表－1にまとめる。また、予測のフローを示すと図－２のようになる。地震発生から全ての予測計算終了までの目標時間は、地震発生から道路管理者が参集し点検の体制を整えるまでに要する時間として 15 分としている。



図－２　予測のフロー

３．被害予測の方針

道路沿いの液状化及び橋梁被害予測の結果は大・中・小・なしの４段階で表す。これらはそれぞれ道路が以下のような状態にあることを想定している。

大：長期間車両の通行が不可となる可能性あり。

中：応急対策を施すことにより、ある程度の期間で車両の通行が可能。

小：応急対策を施すことにより、比較的短期間で車両の通行が可能。

なし：車両の通行のために対策を施す必要なし。

表－１　観測地点数及び予測地点数

	地点数	備考
観測地点	112 (全122基)	・予測地点の特性値の推定に使用しているのはうち79
路線液状化予測地点	6,028	・管理道路全線を対象
堤防液状化予測地点	256	・平成7年に実施した耐震点検(概略)の対象となった区間
橋梁被害予測地点	1,424	・予測用閾値設定済み橋梁は103

表－２　P_L～液状化危険度マトリクス

液状化危険度	大	中	小	なし
P_Lの範囲	－	$P_L>15$	$15\geqq P_L>5$	$5\geqq P_L$

液状化危険度を評価するための指標としては液状化に対する抵抗率 F_L[2]に基づいて算出される液状化指数 P_L を用いる。P_L 値により上記の４段階の評価を行うためには、P_L 値がいくらであれば液状化危険度がどの

キーワード：地震防災、被害予測、危機管理、公共土木施設
連　絡　先：茨城県つくば市旭１番地　(TEL)0298-64-3245 (FAX)0298-64-0598

段階に相当するのかの判断基準が必要となる。本システムにおいては、土木研究所による既往の事例分析 [3]に基づき、判断基準として表－２のように P_L～液状化危険度マトリクスを設定した。河川堤防沿いの液状化予測についても、道路との整合を考慮して表－２のマトリクスを共通して用いる。また橋梁について、上記の４段階にその被災形態を分類すると、表－３に示す部材被災度～橋梁被災度マトリクスのようになる。本システムではこれに従って各部材ごとに発生した地震による被災度を判定し、そのうち最も被災度が高いものをその橋梁の被災度とする。各部材の被災度は観測値をもとに予測される橋梁位置での SI 値を、表－４の SI 値～部材被災度マトリクスに対応させて判断する。なお、表－４のマトリクスは解析結果及び被災事例に基づいて設定したものである。

表－３　部材被災度～橋梁被災度マトリクス

部材	被災度大	被災度中	被災度小	なし
RC橋脚（曲げ破壊）	終局	終局～降伏		降伏未満
RC橋脚（せん断破壊）	破壊	破壊～軽微な損傷		軽微な損傷
鋼製橋脚	座屈	座屈～軽微な変形		軽微な変形
支承	破壊	損傷（高さの高い支承）	損傷（高さの低い支承）	軽微な損傷
基礎（流動化）	－	大規模移動	大規模移動～軽微な移	軽微な移動

表－４　SI 値～部材被災度マトリクス

				被災度大	被災度中	被災度小	被災度なし
RC橋脚（曲げ破壊）	適用示方書	段落とし	降伏震度				
	昭和55年以前	有り	0.2＞khy	SI＞30	30≧SI＞10	10≧SI＞5	5≧SI
			0.4＞khy≧0.2	SI＞50	50≧SI＞30	30≧SI＞10	10≧SI
			khy≧0.4	SI＞50	－	50≧SI＞30	30≧SI
		無し	0.5＞khy	SI＞100	100≧SI＞50	50≧SI＞30	30≧SI
	昭和55年	－	khy≧0.5	SI＞50	50≧SI＞30	30≧SI＞10	10≧SI
	平成2年	－	khy≧0.5	SI＞50	50≧SI＞30	30≧SI＞10	10≧SI
	復旧仕様以降	－	0.6＞khy	SI＞50	－	－	50≧SI
			khy≧0.6	SI＞100	100≧SI＞50	－	50≧SI
RC橋脚（せん断破壊）	適用示方書	せん断支間比					
	昭和55年及びそれ以前	h/d＜3		SI＞50	50≧SI＞30	30≧SI	10≧SI
鋼製橋脚	適用示方書						
	昭和55年以前			SI＞50	50≧SI＞30	－	30≧SI
	昭和55年			SI＞50	50≧SI＞30	－	30≧SI
	平成2年			SI＞50	50≧SI＞40	40≧SI＞30	30≧SI
	復旧仕様以降			SI＞100	－	100≧SI＞50	50≧SI
支承		型式					
		免震支承		－	－	140≧SI＞50	50≧SI
		金属支承		SI＞140	140≧SI＞50	50≧SI＞20	20≧SI
		金属支承		SI＞50	－	50≧SI＞20	20≧SI
		桁かかり長が不足		SI＞50	－	50≧SI＞20	20≧SI
基礎		設置条件					
		水際線から100m以内		－	PL＞20	－	20≧SI

４．閾（しきい）値の設定

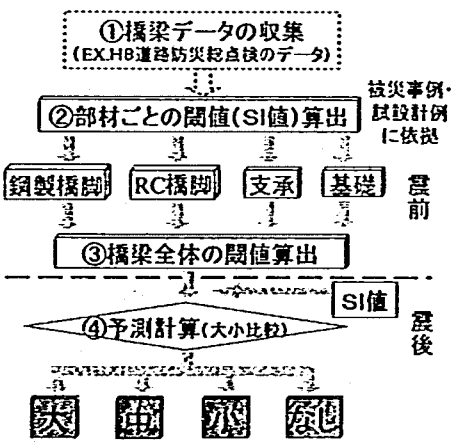
予測にあたっては計算時間の短縮を図るため、３．の大・中・小・なしの各段階に判定されるのはどの大きさの地震動が作用した場合か（液状化は最大加速度、橋梁は SI 値）を予め計算しておき、これを閾値としてデータベースに持たせている。地震が発生した際には、観測値をもとに予測される当該個所の地震動特性値と閾値との大小比較を行うことにより被害程度が判定される。図－３及び以下の①～④に例として橋梁被害予測の一連の流れを示す。

①橋梁諸元データの収集…各橋梁の諸元に関するデータを既往の耐震点検の結果等から収集する。

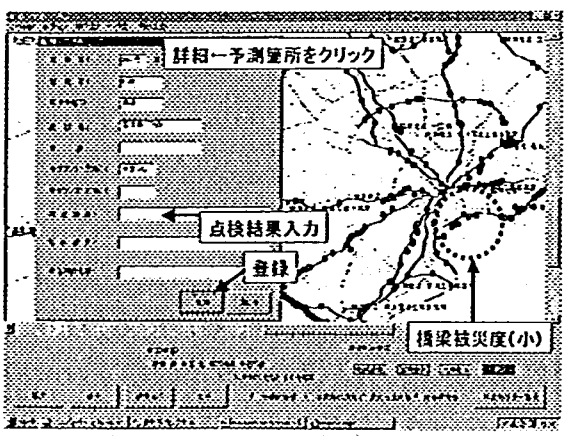
②部材ごとの閾値算出…①で収集した諸元データを加工し、表－４に従い部材ごとに閾値を算出する。

③橋梁としての閾値の設定…部材ごとに算出された閾値を比較し、最も弱い部材の閾値をその橋梁の閾値とする。これをデータベースとして震前に保有しておく。

④予測計算…地震後、4.の手法によって推定される予測地点の SI 値と閾値とを大小比較し、被災度（大・中・小・なし）の判定を行う。図－４に予測結果の表示画面を示す。



図－３　橋梁被害予測の流れ



図－４　橋梁被害予測結果の表示画面

５．今後の課題

今後は観測データの蓄積を図り、実事象と予測結果の整合を図るべく、液状化及び橋梁予測の閾値に補正を行う必要がある。

参考文献：1)濱田禎他、地震動特性値分布の即時予測手法に関する研究、第 24 回地震工学研究発表会、pp193、1997、2)道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、pp91、（社）日本道路協会、平成 8 年 12 月、3)常田賢一他、地震時における差室地盤の液状化判定法と耐震設計への適用に関する研究、土木研究所資料第 1729 号、pp98、昭和 56 年 9 月

1998年度春季防災技術課発表論文集

1998年4月1日
防災技術課

第10回日本地震工学シンポジウム

1998年11月25日（水）～27日（金）
新横浜プリンスホテル

交通施設の地震被害による経済的影響評価システム　p7
杉田秀樹・野﨑智文

震災対策体制のパフォーマンス評価手法の提案　p11
野﨑智文・杉田秀樹

公共土木施設における即時震害予測システム　p17
濱田禎、杉田秀樹

第10回日本地震工学シンポジウム（H10年11月25日～27日・神奈川県横浜市）

交通施設の地震被害による経済的影響評価システム

交通施設の地震被害による経済的影響評価システム
EASSE: Earthquake Assessment System for Socioeconomic Effects

杉田　秀樹[1)]、野崎　智文[2)]
Hideki SUGITA[1)], Tomofumi NOZAKI[2)]

1) 建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課長
Head, Earthquake Disaster Prevention Technology Division, Earthquake Disaster Prevention Research Center, Public Works Research Institute, Ministry of Construction
2) 建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課主任研究員
Senior Research Engineer, Earthquake Disaster Prevention Technology Division, Earthquake Disaster Prevention Research Center, Public Works Research Institute, Ministry of Construction

要約

本稿では、地震によって交通施設に被害が生じた場合に生じる経済的な損失を推計するシステム(EASSE: Earthquake Assessment System for Socioeconomic Effects)の開発状況について紹介する。大規模地震が発生した場合、生産施設が被災することによって被災地域における生産額が低減する。一方、交通施設に被害が生じた場合には、物流が阻害されることにより生産活動が低下するため、その影響による被災地域の生産額低減も無視できない。さらに被災地域内における生産活動の低下は全国の生産活動にも影響する。ここでは、都道府県単位の計算対象地域において道路ネットワーク被害を入力することによって、経済的損失額を推計するシステムを紹介する。このようなシステムは、交通計画担当者が地震に強い交通システムを計画し、耐震補強計画を策定する場合の事業の効果の把握等に有効であるとともに、地震発生後の復旧計画を検討する際にも有用である。

SUMMARY

This paper introduces the state of the art of the development of Earthquake Assessment System for Socioeconomic Effects (EASSE). EASSE estimates the economic loss in the area and its effect on the nationwide economic activities that is caused by the damage on transportation network. Such system is used by transportation planners who examine seismic performance improvement plans of a transportation network and their portions. The system also can be used in post-earthquake situations for examining restoration strategy.

1．はじめに

公共事業に関するプロジェクトを計画する際に、事業実施の影響・効果を測定し、複数事業間のプライオリティーを把握する必要がある。たとえば交通ネットワークの耐震対策を計画する場合、ネットワーク中の複数の区間・施設における補強事業や、新たな路線の追加によってネットワークとしての耐震性向上を図るが、個々の事業の組み合わせにより、その効果は異なる。本研究開発では、地震により地域の交通施設が被災した場合の長期的な経済損失を推計するものである。筆者らはこれまで、地震による交通ネットワーク被害が及ぼす経済損失を計算する手法について検討を進めてきたが[1)]、今回、その手法を一つのアプリケーションプログラム(EASSE: Earthquake Assessment System for Socioeconomic Effects)として開発した。EASSE のプロトタイプ・システムはスタンド・アローンの PC 上で稼動し、ウィンドウ上での操作を行う。開発にあたっては、推計手法をモジュール化しできるだけ独立させることによって、要素手法単位での変更を容易となるように留意した。

通常、地震による経済的な被害・影響については、特定の地震に関して個別の研究機関等が独自の方法によって試算を行うことが多いが[2)]、計画者の立場から見ると、特定の地震の特定の被害パターンに基づく被害額のみではなく、想定される複数の地震に対して補強計画、道路計画の様々なパターンを設定し、その影響額を比較することによって計画の最適化を目指す必要がある。このことから、推計手法のモデルをモジュール化し、パッケージソフトウェアとして組み立て、比較的短時間で推計計算を繰り返し行えるようにすることには意義がある。また、推計における個別の手法がさらに高度化された場合

には、そのモジュールを入れ替えることによって、システムとしての精度・速度を向上させることができる。

2．システムの概要

EASSE は、被災地域の道路ネットワーク上の区間の被害を入力とし、計算対象地域の経済損失額および全国への波及額を出力する。ここで計算対象地域は、被災地域を含む都道府県単位とする。道路区間の被害入力は、別途被害想定、補強計画等に基づいて任意に与えられるとし、これを入力条件として、計算対象地域における生産額およびその減少の全国への波及効果額を計算する。ユーザーは被災地域の道路ネットワークに関する耐震補強計画を策定する際に、計画の代替案に応じて入力を変更し、代替案と損失額のセットを得る。計画の意思決定者は他の条件とこのデータを組み合わせ、代替案の中から最適案を決定する（Fig. 2.1）。本手法においては、代替案の最適化については考慮していない。すなわち、経済上の影響を最も少なくするための判断基準はユーザーないし意思決定者が持っており、計算結果をフィードバックすることによって入力条件（道路ネットワークの被災箇所、被災条件等）を再設定し、計算を繰り返すことによって、判断基準に適合する最適な事業・補強パターンを検討することになる。

EASSE はこのように震前対策としての事業選択に関する意思決定を支援するものであるが、同様の流れによって震災後の復旧事業に関しても利用可能である。この場合、複数の被災箇所の復旧事業の実施順位を変更した代替案に対する損失額を推計することになる。

EASSE の主要部分は、推計を実行する三つのモジュールと推計に必要なデータベースからなる。ここで各モジュールは、①交通推計モジュール、②交通推計結果を経済推計への入力に変換するモジュール（変換モジュール）、③経済推計モジュールである。これらのモジュールは各々の計算に必要なデータをデータベースから読み込み、計

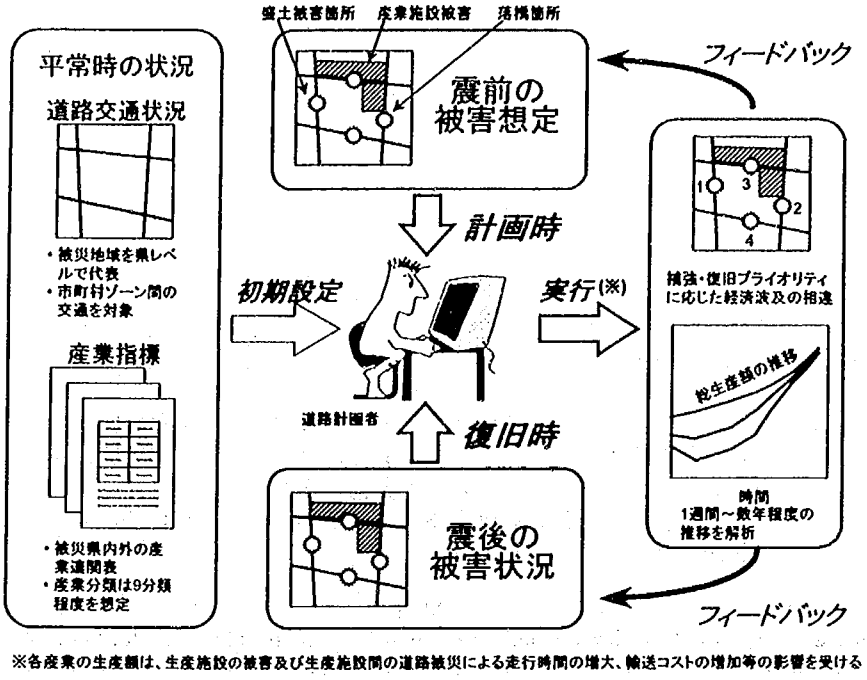


Fig. 2.2 Module Structure

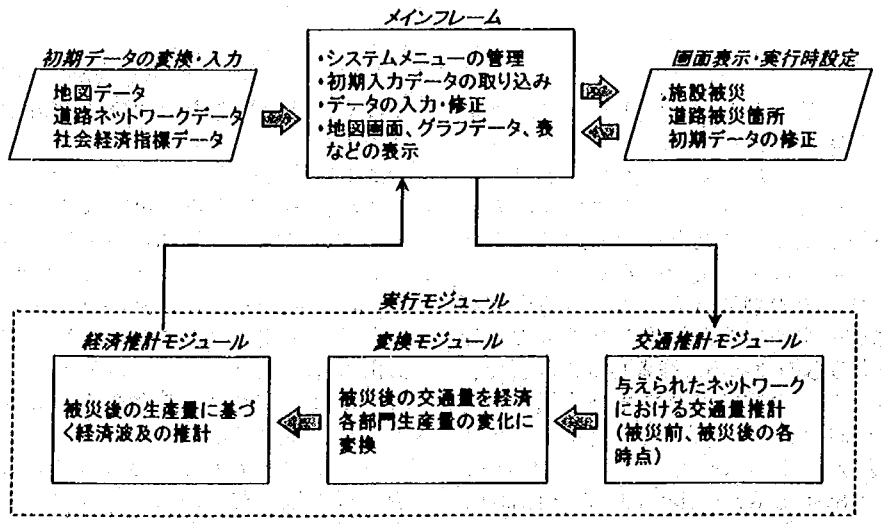


Fig. 2.2 Module Structure

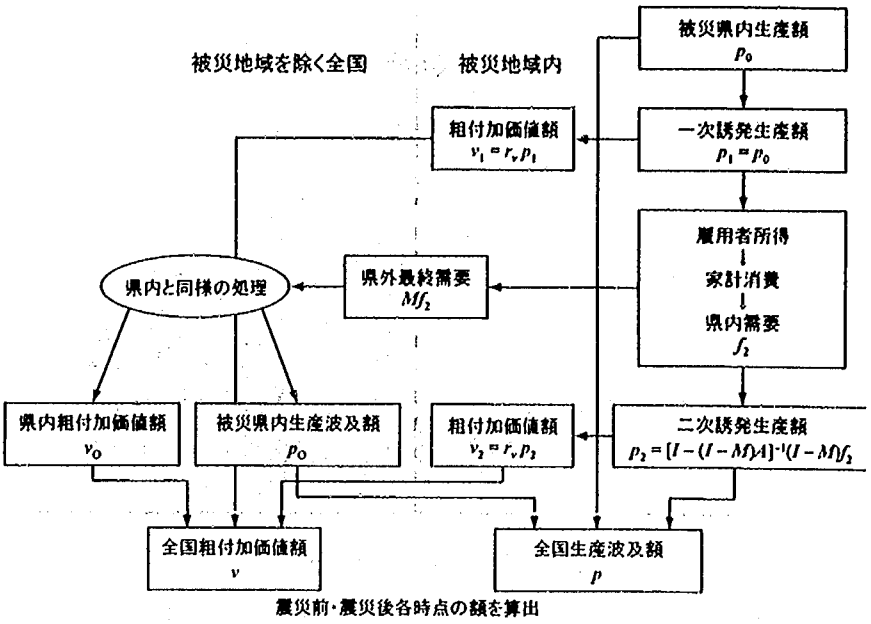


Fig. 3.4 Economic Estimation Module

算を行った後に、結果をデータベースに書き込む（Fig. 2.2)。各モジュールはデータベースを介して独立しており、各々の部分に変更が生じたときに、全体を意識することなく改変することができる。

3．推計手法

(1) 手法の構成

本システムにおける推計手法の流れを Fig. 3.1 に示す。交通推計モジュールは、道路ネットワーク等の交通データ、発生集中量を決定するための社会データを入力とし、被災地域内各ゾーンおよび他の都道府県相互の旅行時間を出力する。この旅行時間は生産活動に必要な貨物輸送の輸送時間として、変換モジュールに入力される。変換モジュールは、貨物輸送に要する時間が平常時から増加した場合の生産額低減を計算する部分で、この出力は次の経済推計モジュールへの入力となる。経済推計モジュールは、交通施設被害の影響によって低減した被災地域の生産額の、被災地域および全国への波及額を計算する。

(2) 交通推計モジュール

交通推計モジュールは、社会経済データ、道路交通センサスデータおよび道路ネットワークデータに基づいて、被災地域内各ゾーン間および被災県内各ゾーンと他都道府県との旅行時間を算出する（Fig. 3.2)。手法は四段階推定法を基本とするが、機関分担を考える際に、鉄道のトリップを別に扱い、鉄道リンクが被災した場合に道路ネットワークにかかる負荷も考慮できるようにした。道路ネットワークデータは、被災県内は主要地方道以上、被災県外は一般国道以上のデータを用いたが、被災県内についてはさらに範囲を広げることも可能である。

(3) 変換モジュール

変換モジュールは交通推計モジュールの結果得られたゾーン間旅行時間すなわち輸送時間から、被災県内の生産額の低減率を計算する。当初、輸送時間が生産に与える影響として、回転率の低下による生産額の減少と、輸送費用の増加による生産の取り止めという二つの影響を検討したが、後者の影響は前者に比べて小さいことから、最終的には輸送時間が回転率に与える影響のみを考慮することとした（Fig. 3.3)。推計を行う震災後の時点τにおける生産可能額 $x_p(\tau)$が受けるこの影響の率を$\varepsilon(\tau)$とすると、実現生産額 $x_R(\tau)$は $x_R(\tau) = \varepsilon(\tau)\ x_p(\tau)$となる。また、生産可能額 $x_p(\tau)$は、平常時の生産額 x_0 に時点τにおける復旧の度合いを表した復旧可能率 $K_p(\tau)$を乗じて $x_p(\tau) = K_p(\tau)x_0$ として算出する。

ここで復旧可能率 $K_p(\tau)$の関数形は、兵庫県南部地震の際の復旧状況をいくつかの企業に対して調査した結果[3]に基づいて、大破（生産額低減率 100%)、中破（同 50%）について与えた。また影響率$\varepsilon(\tau)$については、時点τにおける輸送時間 $t(\tau)$の平常時輸送時間 $t(0)$に対する比の関数とし、$\varepsilon(\tau) = [t(\tau)/t(0)]^{-1}$ と設定した。

(4) 経済推計モジュール

経済推計モジュールは、Reontief モデルを基本とし、被災県内および被災県を除く全国の、震災による波及生産額の影響を算定する。被災県内については、変換モジュールの出力である震災後の実現生産額を一次波及分とし、生産額が平常時より減少することによる所得の変化→消費の変化→最終需要の変化を通して、生産額の二次波及を計算する。一方全国への波及については、県内の最終需要に対して移入依存率を乗じて、その変化が全国に波及するとして生産額を計算する。このようにして計算された被災県内外の生産額をもって、震災後の全国ベースの経済損失額を得る（Fig. 3.4)。図中、生産額 p、最終需要額 f、粗付加価値額 v は複数部門に関するベクトルとして表示している。また、I、A、M は各々単位行列、投入産出係数行列、移入係数行列を表す。r_vは生産額から粗付加価値額を導くための粗付加価値率である。

4．ケーススタディー

(1) ケーススタディーの対象地域

ケーススタディーの被災県は、生産施設が集積した政令指定都市が存在すること、鉄道網を有するがあまりに複雑でないこと、大きな港湾を持つ市町村が存在することなどの視点より、宮城県を選定した。生産施設の集積は、生産施設被害が全国的な影響を及ぼす結果を得るために必要であり、鉄道網については、鉄道被害による道

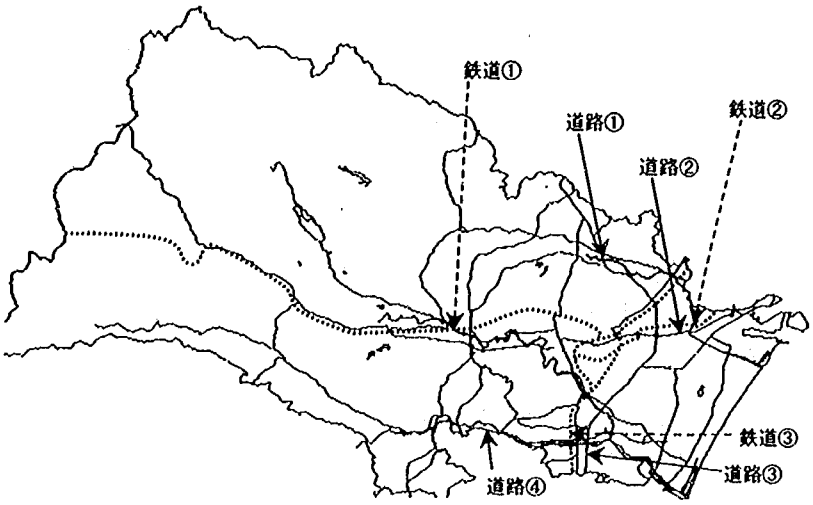


Fig. 3.5 Demonstration Settings

路交通への転換が道路交通状況を悪化させる状況を再現するために導入する。ただし、ネットワークデータとして EASSE ではディジタル道路地図を用いており、同データでは鉄道はネットワークトポロジーとしての属性を与えられていないため、手作業で鉄道ネットワークを修正・入力する必要がある。このため、鉄道ネットワークがあまりに複雑でない必要がある。港湾については、今回は直接的には海運の影響を算定していないが、貨物自動車の起終点データが間接的に海運貨物に起因する交通需要を表しているため、港湾に接続する道路の被害の影響も計算結果に含められると考えた。

(2) 被災箇所設定

仙台市は平成 8 年度に地震被害の想定を行っており[4]、今回はそのうちの道路・鉄道の被害想定を参考に被災箇所を設定し、経済損失額を推計した。同想定においては、長町－利府断層、金華山沖、福島県沖の三つの震源を想定し、震源、伝達経路、表層地盤の応答の三つの特性から地表地震動の最大加速度、震度を 250m メッシュで算定している。このデータに基づき、道路・鉄道の被害想定がなされている。

同想定中、道路については、個別の橋梁、盛土、切土・斜面の被害確率および道路幅員に対応した通行支障率を計算し、これらに基づいて仙台市内の道路導通性確率の分布を表示している。導通確率は交差点間を車両が通過できる確率として定義され、90%、50%で区分されて表示されており、幹線の導通確率は概ね 90%～50%あるいは 90%以上である。一方、プロトタイプシステムの持っている道路ネットワークデータは主要地方道以上であって導通確率が高いため、導通確率に基づいた設定は困難である。そこでケーススタディーにあたってはネットワーク上で橋梁の被災確率が 30%以上の箇所を選定し、システムのデータよりピックアップ可能な 13 橋梁のうちおよそ 30%にあたる 4 橋梁が通行不能になるとして設定した（Fig. 3.5)。この 4 橋梁は平日 12 時間交通量が 3 万～4 万台程度になる箇所を選んでおり、同程度の交通量の区間に関する感度分析を行う。

一方鉄道については、同想定では新幹線を除いた東北本線等 4 線について(a)長期の運休を要する A ランク、(b)短期の運休を要する B ランク、(c)運転規制しながら復旧可能な C ランクの区間を示している。三つのランクのうち①の A ランクの区間は概ね橋梁箇所である。ここではこれに東北新幹線を加え、東北本線・新幹線、仙山線、仙石線の橋梁を有するリンクが不通になるとした。Fig. 3.5 中点線が鉄道線を表している。

(3) 被災パターン

被災パターンとしては、道路のみ被災、鉄道のみ被災、道路・鉄道の双方が被災という三つのパターンを考え、三つのケースを設定した。

ケース A：道路の①～④の箇所が 4 週間通行不能
ケース B：鉄道の①～③の箇所が 4 週間不通
ケース C：道路の①～④、鉄道の①～③の箇所がすべて 4 週間通行不能または不通

また、ケース C において道路の箇所①（あるいは②、③、④）が補強されていたとしてリンクカットしないケースをケースを D1（あるいは D2、D3、D4）とし、同じくケース C について鉄道の箇所①（あるいは②、③）が補強されていたとしてリンクカットしないケースを E1（あるいは E2、E3）として推計した。

(4) 試算の実行および試算結果

リンクカット箇所を指定し、そのパターンが続く期間を入力した後は、あらかじめ記憶されている社会経済データに基づいて試算を実行させるだけである。画面上でのネットワーク操作の画面を Fig. 3.6 に示す。

実行結果をまとめたものを、TABLE 3.1、3.2 に示す。

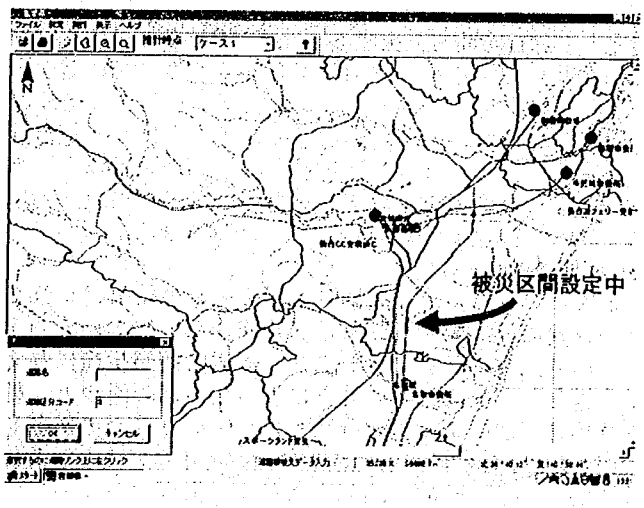


Fig. 3.6 Operation Scene

TABLE 3.1 RESULTS OF DEMONSTRATION (1)

ケース	被災パターン	総走行時間	時間増加が最も大きい区間				直近交通量
			宮城県内		仙台市～他都道府県		
		(台時)	区間	増加分(分)	区間	増加分(分)	(台/12h)
平常時		17,918,062					
A	道路のみカット	19,372,466	名取市～中新田町	53	仙台市～静岡県	13	
B	鉄道のみカット	18,186,886	名取市～大郷町	15	仙台市～岩手県	1	
C	道路・鉄道カット	19,722,342	名取市～中新田町	60	仙台市～青森県	14	
D1	①国道4号（七北田川－泉大橋）復活	19,303,646	名取市～利府町	54	仙台市～青森県	12	44,917
D2	②国道45号（七北田川－福田大橋）復活	19,021,090	名取市～中新田町	42	仙台市～山形県	13	34,043
D3	③国道4号（名取川－名取大橋）復活	19,192,450	名取市～中新田町	50	仙台市～山形県	12	33,984
D4	④国道286号（名取川－名取1号橋、名取2号橋）復活	19,458,454	名取市～利府町	43	仙台市～岩手県	10	33,763
E1	①仙山線（広瀬川）復活	19,722,342	名取市～中新田町	60	仙台市～青森県	14	
E2	②仙石線（七北田川）復活	19,628,238	名取市～中新田町	60	仙台市～岩手県	14	
E3	③東北本線・新幹線（名取川）復活	19,428,254	名取市～中新田町	50	仙台市～青森県	13	

TABLE 3.2 RESULTS OF DEMONSTRATION (2)

ケース	総走行時間			波及生産額（県内）			波及生産額（全国）		
	(台時)	対平常時(台時)	対ケースC(台時)	(百万円)	変化額(百万円)	対ケースC(百万円)	(百万円)	変化額(百万円)	対ケースC(百万円)
平常時	17,918,062	0	—	1,382,935	0	—	1,389,497	0	—
A	19,372,466	1,454,404	—	714,507	-668,429	—	717,784	-671,713	—
B	18,186,886	268,824	—	725,223	-657,713	—	728,549	-660,949	—
C	19,722,342	1,804,280	0	714,517	-668,419	0	717,794	-671,703	0
D1	19,303,646	—	-418,696	717,349	—	2,833	720,641	—	2,847
D2	19,021,090	—	-701,252	716,522	—	2,005	719,811	—	2,017
D3	19,192,450	—	-529,892	715,248	—	731	718,527	—	733
D4	19,458,454	—	-263,888	718,934	—	4,417	722,232	—	4,438
E1	19,722,342	—	0	714,517	—	0	717,794	—	0
E2	19,628,238	—	-94,104	714,462	—	-55	717,739	—	-55
E3	19,428,254	—	-294,088	715,626	—	1,109	718,912	—	1,118

TABLE 3.1 はカットパターンと全国の総走行時間、宮城県内および仙台～他県間の旅行時間の増大が最も大きかった区間、そして道路の被災区間に最も近い地点の平成 6 年度道路交通センサス 12 時間交通量を示したものである。旅行時間の増加を見る限り、鉄道の被災は、道路の被災に比べて影響が小さいことが示されている。TABLE 3.2 には、総走行時間、県内の生産波及額、県内の生産減少の全国への波及額を示した。この波及額は、年間ベースの取り引き基本表に基づいて計算し、これを 4 週間分の値として示している。

各々、ケース A～C については、平常時との差を示しているが、鉄道被災の影響は、道路に比べて小さいという結果が示された。ケース D1～E3 については、すべてが被災したケース C を基準としてそれからの差を示している。これらの額は、与えられた被災パターンにおける、長期的経済損失の点から見た、各箇所の重要性を表す値と考えられる。ケース E2 で鉄道区間を復活させたときに影響額の変化が負となっているが、これは交通量配分に先立って鉄道トリップを分担率から計算しているため、鉄道被災時の直結ルートのほうが平常時の駅へのアクセスルートよりも他の交通に影響を与えないためである。

現時点では、鉄道被災の影響は、不通による人流トリップの道路交通への転換という形でのみ表現されているため、影響額が小さい。鉄道被害が通勤障害という形で生産活動に与える影響を定量化すればこの影響量は現在よりも大きくなると予想される。このことより、間接的にではあるが、現在のモデル設定で算入している影響の現れかたが妥当であることを示している。

これに対して道路の影響額は大きいが、必ずしも交通量の大小とこの場合の重要性が対応していないことに注意を要する。特に値が大きいケース D4 は、東北自動車道仙台南 IC に接続する国道 286 号が通行不能となるため、経済的波及額が大きく出たものである。このケースでは、交通量が非常に大きくはない場合でも、全国的な交通網との連絡にかかるリンクが被災した場合に影響が大きく出ることが示されており、本システムに用いられた手法の妥当性を支持しているといえる。

5．結論および今後の方針

ケーススタディーの結果、EASSE の計算結果は妥当な回答を与えることが分かった。今後、システムのインターフェイスについて向上させるとともに、各モジュールおよび新たなモジュールに関して検討を進める。なお、EASSE の開発にあたっては、各エリアにおいて導入する際のデータのインポート、入力に関するユーザーの負担を軽減することも目的としていたが、道路ネットワークデータの接続条件の修正、鉄道ネットワークの入力、社会経済データの入力に関して多くの作業を必要とする。GIS 等の技術に基づいた、包括的かつ正確なデータベースの普及が望まれる。

参考文献

(1)杉田秀樹・野崎智文・遠藤和重、「震災による交通ネットワーク被害の生産活動への影響評価について」、地震工学研究発表会講演論文集、1997.7

(2)たとえば川島和彦・杉田秀樹・加納尚史、「地震による間接的な経済被害に関する研究」、土木研究所報告第186号、pp.1-58、1991.12

(3)神戸商工会議所、「阪神大震災による経営への影響および神戸の復興に関する調査結果」、1996.3

(4)仙台市、「仙台市防災都市づくり基本計画策定調査」、1997

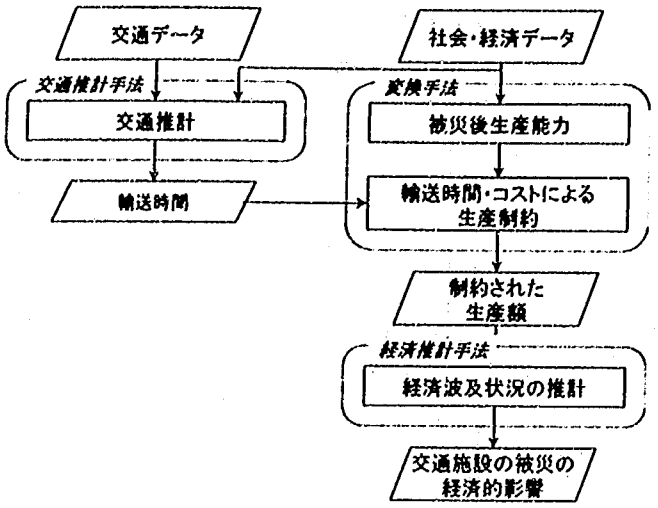


Fig. 3.1 Flow of Estimation

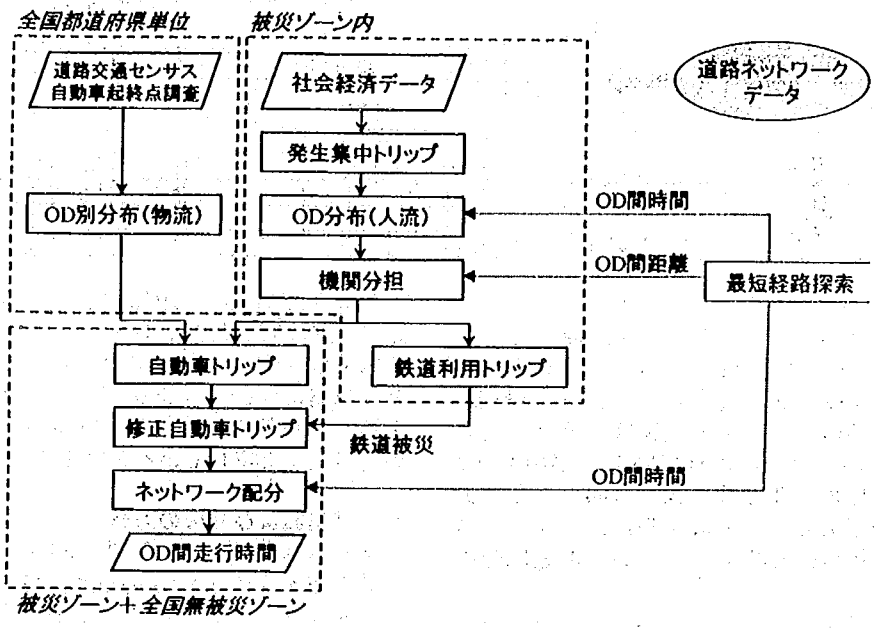


Fig. 3.2 Traffic Estimation Module

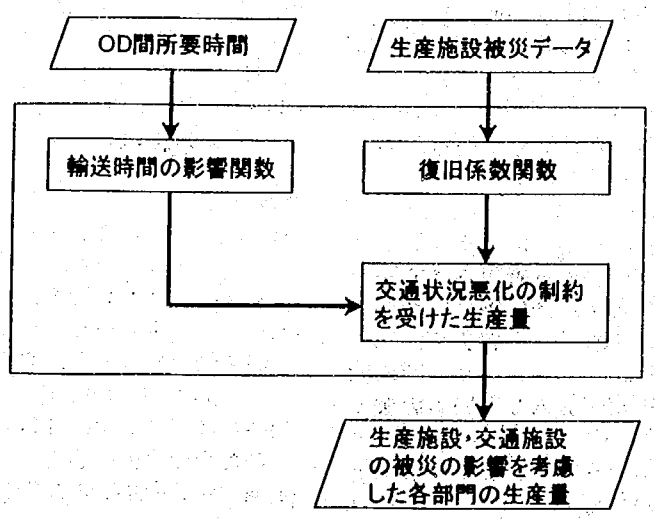


Fig. 3.3 Transformation Method

第10回日本地震工学シンポジウム（H10年11月25日～27日・神奈川県横浜市）

震災対策体制のパフォーマンス評価手法の提案

震災対策体制のパフォーマンス評価手法の提案

Assessment Method for Performance of Earthquake Response System

野崎　智文[1)]、杉田　秀樹[2)]

Tomofumi NOZAKI[1)], Hideki SUGITA[2)]

1) 建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課主任研究員
Senior Research Engineer, Earthquake Disaster Prevention Technology Division, Earthquake Disaster Prevention Research Center, Public Works Research Institute, Ministry of Construction

2) 建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課長
Head, Earthquake Disaster Prevention Technology Division, Earthquake Disaster Prevention Research Center, Public Works Research Institute, Ministry of Construction

要約

本稿では、地震発生直後の緊急対応時における組織の活動のパフォーマンスを評価する手法について紹介する。ここでは震災対策体制のパフォーマンスを、被害に関する情報をどの程度の時間と確からしさで把握できるかという観点で定義し、人・機器等を同一のレベルで扱うことによって体制システムを抽象化したネットワークモデルに対して地震イベントを作用させ、体制システムのパフォーマンスを評価する。手法の開発にあたってはオブジェクト指向の考え方を導入し、様々な機能を有する人・機器を個々のオブジェクトとして表すことによって、シミュレーション・アルゴリズムの設計の容易性、シミュレーション実行の簡易性に配慮した。これによって、地震発生の時間帯、被害点検のルートなどのバリエーションに対して、比較的容易にモデル構築、評価を行うことが可能である。

SUMMARY

This paper describes a method to assess the performance of the emergency activities of an organization immediately after an earthquake. The performance here is defined how rapidly and accurately the damage information is obtained, and it is assessed by applying earthquakes on idealized network model in which personnel and equipment are dealt as the same level of "gates." The object-oriented approach was introduced for the simplicity of the development and the execution. With the approach introduced here, variations such as the earthquake occurrence time and the damage inspection route can be easily expressed.

1．はじめに

世界有数の地震多発国である日本では、これまで多くの大規模地震を経験してきた。そしてそのたびに新しい知見を得て、地震に強い国づくりを進めてきた。生活基盤を形成する建築物・公共土木施設の耐震性を高めることは、いうまでもなく地震に対する地域の安全性を確保するのに必須の条件である。しかし、都市の発達とともに人の動きやこれを支えるシステムはより複雑になり、災害に対する脆弱性、波及の影響は増大している。したがって、実際に地震が発生し被害が生じた場合にその影響を軽減するために、被害情報の収集・伝達技術、緊急活動のための有効な体制のあり方を充分検討しておく必要がある。

本研究では、震災対策における人、機器などが有機的につながったネットワークシステムとして捉え、この体制モデルについて情報管理のパフォーマンス（すなわち活動の速さ、情報管理の正確さ）を評価する手法について検討する。本研究における手法により、平常時において、緊急事態を想定した体制管理を定量的な評価に基づいて行うことが可能となり、地震が発生した際の活動をより効率的なものとすることができる。

2．手法の概要

本研究において検討する手法の概要は次のとおりである。

①震災対策体制における一定の役割あるいは機能を持った人・グループの移動や作業あるいは機器等の動作を、それぞれの所持時間を持った「ゲート」として表現する。

②ゲートは入力と出力を持ち、そこを情報が伝わると考える。

③地震発生をトリガーとして、各ゲートが順次作動し、箇所の点検等によって情報量が蓄積されて行く。

④最終的ゲート（たとえば情報集約班など）において

得られる、時間と情報の蓄積量の組み合わせによってパフォーマンスを評価する。

たとえばあるセクションがあって、前段の二つの作業が終わってから後段の作業が始まり、所定の作業時間を経た後次のセクションの作業が可能になるような場合、Figure 2.1 のようなゲート／ネットワークとなる。

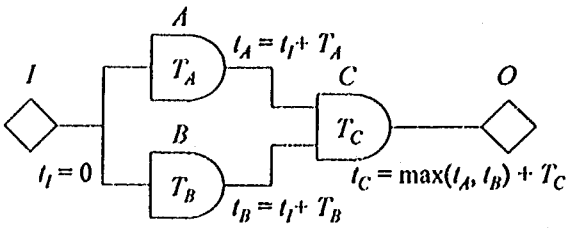


Figure 2.1　Example of Simple Network

この場合、ゲート A、B では作業時間 T_A、T_B を必要とし、ゲート C では A、B の遅くかかった方を待って、それ後作業時間 T_C を経た後、全体の処理が終了することを表している。ここでは情報の量に対しては定義せず、「情報あり／なし」のトリガーによって各ゲートが作動することとしているが、具体的な情報量の考え方については後述する。

3．震災対策のフェーズ

複雑な震災対策システムをネットワーク表現するために、地震発生から被害点検結果が集約されるまでの組織の活動をいくつかのフェーズに分解する。たとえば河川・道路といった広範にわたる施設を管理している事務所における地震発生後のフェーズは概ね Figure 3.1 のように表せる。図中、複数ルートの点検は、河川・道路等の複数の点検ルートに対して所要の人員が点検活動を行うことを意味し、点検の途上で点検箇所ごとに報告が行われる場合には点検フェーズと情報集約フェーズが時間的に重なり合う。すなわちここでいう「フェーズ」とは、時間の流れに沿った区分ではなく、活動の質の観点からある程度一括して扱うことができる区分といった意味である。

各フェーズの項目は「地震計」、「複数ルートの点検」と表示されているが、これらはさらに細かい経路、作業に分けられる。たとえば複数ルートの点検は、点検すべき路線に応じた経路に別れ、その中に点検すべき箇所数に応じて「移動」、「点検」、「報告」といったゲートが含まれている。

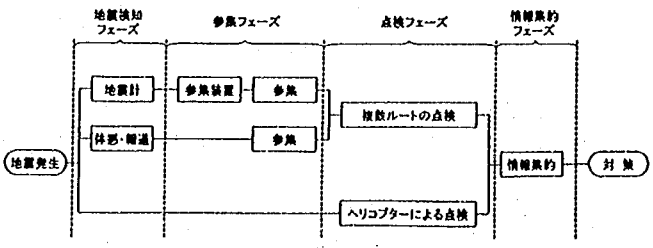


Figure 3.1　Phase of Earthquake Response System

4．対策活動のゲートによる表現

(1) ゲートの概念

本研究の手法においては、人の移動・判断・作業、情報機器の実行時間や情報の伝送時間といったイベントを、入力と出力を持った「ゲート」で表す。ゲートは入力と出力を持ち、入力に対してある時間をかけて処理を施した後、結果を出力へと送る。

(2) 情報の定義

ゲートの入力に入り、ゲートにおいて処理され、出力から出て行く情報 S についてここで定義する。S はそれが得られる時刻 t とその時得られた情報量 I によって構成されると考える。

$$S = (t, I)$$

たとえば施設被害の点検結果の場合、I は「実際の被害を正確に表している程度」を数値化したものとなる。

ここである施設の被害をヘリコプターによって上空から点検する場合を考える。施設の被害の属性を「大」、「小」、「なし」とした場合、遠方から確認するために実際の被害とはことなる判断をする可能性がある。このことを表したのが TABLE 4.1 である。

TABLE 4.1 Information of Investigation by Helicopter

		実際の被害		
		大	小	なし
	必要な処置	大規模	小規模	不要
観測情報量	被害大	1.0	0.0	0.0
	被害小	0.0	0.5	0.5
	被害なし	0.0	0.5	0.5
正答		1.0	0.5	0.5
誤答		0.0	0.5	0.5
過大		0.0	0.0	0.5
過小		0.0	0.5	0.0

たとえば実際の被害が大規模な処置を要する大被害（たとえば落橋など）であった場合、これを「被害大」と観測することは確かであり情報量は 1.0 とされている。一方この被害を「被害小」、「被害なし」と見積もることはまずないことから、各々 0.0 を与えている。一方、被害が小であった場合、上空からこれを「被害大」と観測することはないので 0.0 としているが、これを「被害小」と見積もる場合と「被害なし」と見積もる場合が半分ずつの程度で起こりうると考え、各々に情報量 0.5 を与えている。被害なしの場合についても同様の考えである。ここで実際の被害「大」、「小」、「なし」である場合の情報量をいくらとするかであるが、(a)被害を正しく見積もる可能性をもって情報量とする場合（表中の正答）、(b)誤って見積もる場合（誤答）、(c)被害を過大あるいは過小に見積もる場合（過大あるいは過小）などいくつか考えられる。ここでは「正答」の場合を情報量として考えることにする。

地上における点検の場合について同様の表を示したのが TABLE 4.2 である。

TABLE 4.2　Information of Surface Investigation

		実際の被害		
		大	小	なし
	必要な処置	大規模	小規模	不要
観測情報量	被害大	1.0	0.0	0.0
	被害小	0.0	1.0	0.0
	被害なし	0.0	0.0	1.0
正答		1.0	1.0	1.0
誤答		0.0	0.0	0.0
過大		0.0	0.0	0.0
過小		0.0	0.0	0.0

地上点検の場合、実際の被害を正確に点検すると考えられることから、すべての被害について情報量は 1.0 となっている。

(3) 各種のゲート

前項で定義した情報を処理するゲートは、人の活動や機器の動作に対応して定義される。ここでは、具体的な処理とそれに対するゲートの例を示す。

①最早動作ゲート

このゲートは、複数の入力情報のうち時刻 t が最も小さいものの情報 $S=(t, I)$を出力するものである。

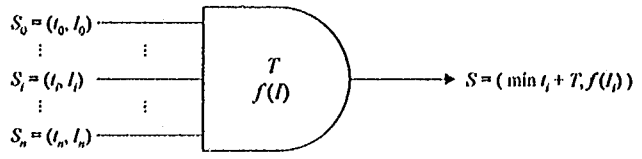


Figure 4.2　WaitEariest Gate

②最遅動作ゲート

このゲートは、複数入力情報のうち、時刻 t がもっとも大きいもの（最後の情報）を待って情報 S を出力する。このとき情報量 I としては、最後の情報の情報量、それまでの情報量の和などいくつかが考えられる。このようなバリエーションは、ゲートの処理内容によって実現できる。また、一定の情報量を出力するゲート（情報生成ゲート）を定義することもできる。

③情報集約ゲート

このゲートは出力を持たず、内部のリストに複数の入力の信号（時刻、情報量）を記録する。結果の一覧を保存する機能を持つゲートである。

④地震発生ゲート

入力なしのゲートで、一定の信号（時刻ゼロ、情報量は任意）を出力する。

このほかにも、外から別の信号（トリガー）が入ったときにそこまでの時点で決定される信号を出力するゲート、入力信号の状況に応じて出力先を変更するゲート、入力に待ち行列を持つゲートなども考えられる。

(4) ネットワーク全体のパフォーマンスの定義

ネットワーク全体のパフォーマンスは、箇所点検等によって得られた情報量を情報集約ゲートにおいて累積した情報量の総和として定義する。これによって、地震が発生してからの時刻に応じて集約された情報の量を把握することができる（Figure 4.3）。

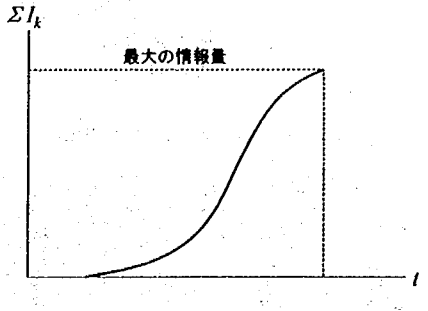


Figure 4.3　Image of Cumulated Information

震災対策体制において、効率的な参集システムを導入したり、点検ルートあたりの点検人員の構成を変更するなどの操作によってこのパフォーマンスは変化するが、その結果を見ながら体制計画を立てることができる。

5．オブジェクト指向によるアルゴリズムの設計

(1) クラスの概念

手法の構成要素は異なる種類のゲートで、ネットワーク中には多数のゲートが接続された状態で存在する。しかしながら、これらのゲートの動作は、出力先の要求に対して入力条件によって出力情報を返すという点で共通しているとともに、各ゲートの動作はゲート自身で規定されており、外からはこれに対して「動作せよ」との指示を与えるだけでよい。このようなモデルを記述するには、従来の手続き型よりもオブジェクト指向のアプローチによる方が、開発の効率(productivity)、アルゴリズムの明解さ(readability)の点で優れている。

オブジェクト指向においては「クラス」の概念が導入されるが、これまで説明したゲートをクラスとして定義する。クラスの特徴として、クラスの属性（変数）、クラスに固有の機能（関数）が一体として定義されていること、またそれらは基本的なクラスからより複雑な属性・機能を持ったクラスへと派生させて行くことが可能なことが挙げられる。

(2) ゲートクラス

ゲートの種類に関わらず共通な性質は、(a)任意の数の入力を持ち、(b)一つ以下の出力を持ち、(c)入力の条件に応じたフラグ設定や出力といった処理を行う、というものである。このような基本的な性質を有する基本クラスを CGate として、Figure 5.1 のように構築する。

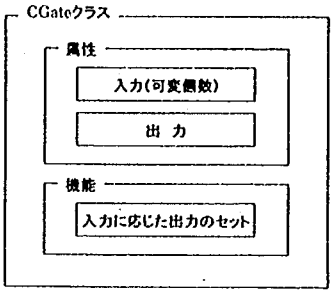


Figure 5.1　Base Class of Gate

ここではまだゲートの種類を確定していないので、出力をセットする機能の内容は定義されていないが、少なくともどの種類のゲートでもこの機能を有することをここで宣言し、具体的な処理の内容は、この基本クラスから派生させた各ゲートのクラスで定義する。またその時、各ゲートに固有の属性や機能も追加される。たとえば最早動作ゲートを CWaitMinGate クラスとして基本クラスから派生させると Figure 5.2 のようになる。

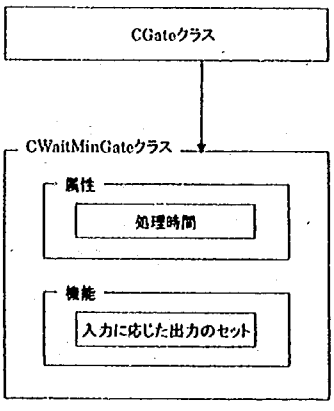


Figure 5.2　Inherited Class of Gate

ここでこのクラスは親であるCGateの属性も持っており、さらに具体的な出力セットの内容ー入力のうち最も時刻が早いものの情報量を返すーが定義されることになる。

(3) ネットワークの動作

各ゲートは、出力先のゲートから要求があったときに入力の状態を自分自身で調べ、必要に応じて処理を行って出力先に信号を返すという動作を行うとする。このような複数のゲートを接続するために、ネットワーク中の各ゲートに、状態(OPEN/CLOSE)を表すフラグを設ける。このフラグは、ゲートの処理に必要な入力条件がそろうまで CLOSE となっており、入力条件がそろったときに OPEN となる。このとき同時に出力先の信号も決定され、後続のゲートが処理可能となる。

たとえばFigure 2.1 のネットワークの例で示すと、最初の状態ではスタート・ゲート以外すべて CLOSE となっている (Figure 5.3)。

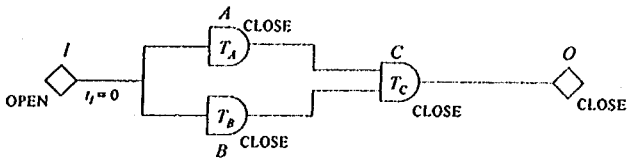


Figure 5.3 Gate Control by Flags (1)

ここで一回のサーチにおいて、入力の条件がそろっているものについて出力を計算し、フラグを OPEN とする。ここでゲートをサーチする順番が C、B、A の場合、C はその時点で A、B の出力が確定していないので CLOSE のままとなり、次に A、B がスタートゲートの出力を用いて出力 t_A、t_B を確定してフラグを OPEN とする(Figure 5.4)。

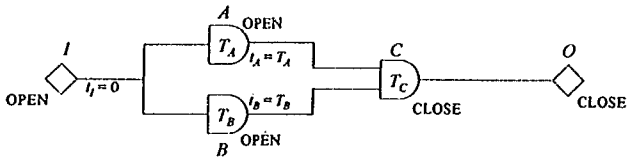


Figure 5.4 Gate Control by Flags (2)

このようにしてすべてのゲートが OPEN となるまでサーチを繰り返すことでネットワーク全体の動作を計算できる。ここではゲートのサーチ順を *C*、*B*、*A* としたが、これが *A*、*B*、*C* であれば一回ですべてのゲートが OPEN となる。

6. 仮想工事事務所に基づいた試算

(1) モデルの設定

これまでの手法を用いて、施設を管理する仮想の工事事務所をモデル化し、そのパフォーマンスを試算した。まず工事事務所の体制活動を次のように想定する。事務所は 4 つの路線を管理する事務所とし、路線を調査するのは 3 つの出張所の職員（1 出張所あたり 5 人）とした。

①地震検知フェーズ

職員は(a)オンライン地震計とこれに接続された同報装置、(b)体感、(c)報道のうちもっとも早いものによって地震の発生を知るとする。

②参集フェーズ

勤務時間外の場合、地震検知に続いて職員が参集する出張所職員が事務所へ参集し、点検準備を終えた後、次の点検フェーズへ移る。

③点検フェーズ

参集した職員は、(a)現場への移動、(b)点検、(c)報告を要点検箇所の数だけ繰り返す。点検ゲートでは施設の被災度に応じた情報量が生成され、これが報告ゲートによって情報集約フェーズへと渡される (Figure 6.1)。なお、昼間の場合には地震検知後すぐにヘリコプターが飛行を開始し、上空から情報を収集する (Figure 6.2)。

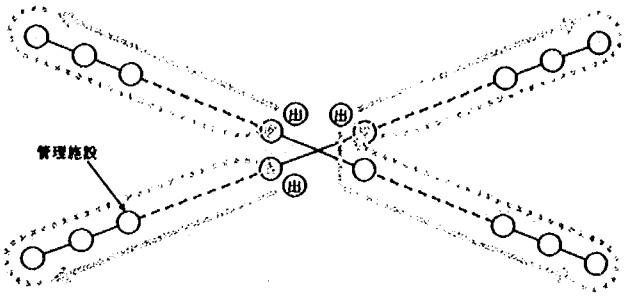


Figure 6.1 Model System (Surface Investigation Route)

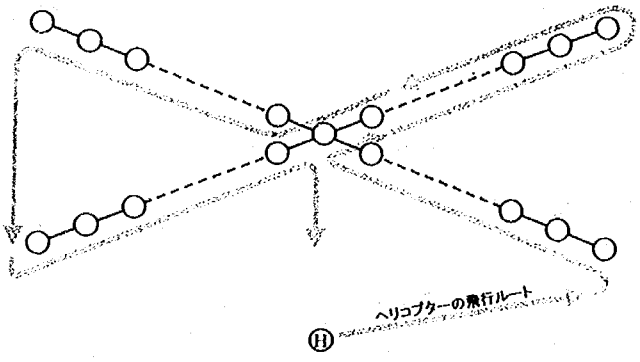


Figure 6.2 Model System (Helicopter Investigation Route)

④情報集約フェーズ

ここでは各報告ゲートから出力された情報が集約され、リストに登録される。この時刻、累積情報量を図示し、体制のパフォーマンスを評価する。

このような体制をネットワーク表現したものの例を示す。これは勤務時間内でヘリコプターが飛行できる時間帯の場合を Figure 6.3 に示す。また、時間帯による体制システムのバリエーション、被災箇所設定などを変えて設定した試算パターンの一覧を TABLE 6.1 に示す。

TABLE 6.1 Case Study Settings

	ヘリコプター点検	職員参集	1ルートあたり箇所数	ルート間被害分布	ルート内被害分布
DAY-1	可能	不要	50	一様	ランダム
DAY-2	可能	不要	50	傾斜	ランダム
DAY-3	可能	不要	50	一様	大→小
DAY-4	可能	不要	10	一様	ランダム
DAY-5	可能	不要	10	傾斜	ランダム
DAY-6	可能	不要	10	一様	大→小
NIGHT-1	不可能	必要	50	一様	ランダム
NIGHT-2	不可能	必要	50	傾斜	ランダム
NIGHT-3	不可能	必要	50	一様	大→小
NIGHT-4	不可能	必要	10	一様	ランダム
NIGHT-5	不可能	必要	10	傾斜	ランダム
NIGHT-6	不可能	必要	10	一様	大→小

ここでルート間被害分布について、「一様」と「傾斜」の 2 種類を設定した。一様とは、各ルートにおける「被害大」、

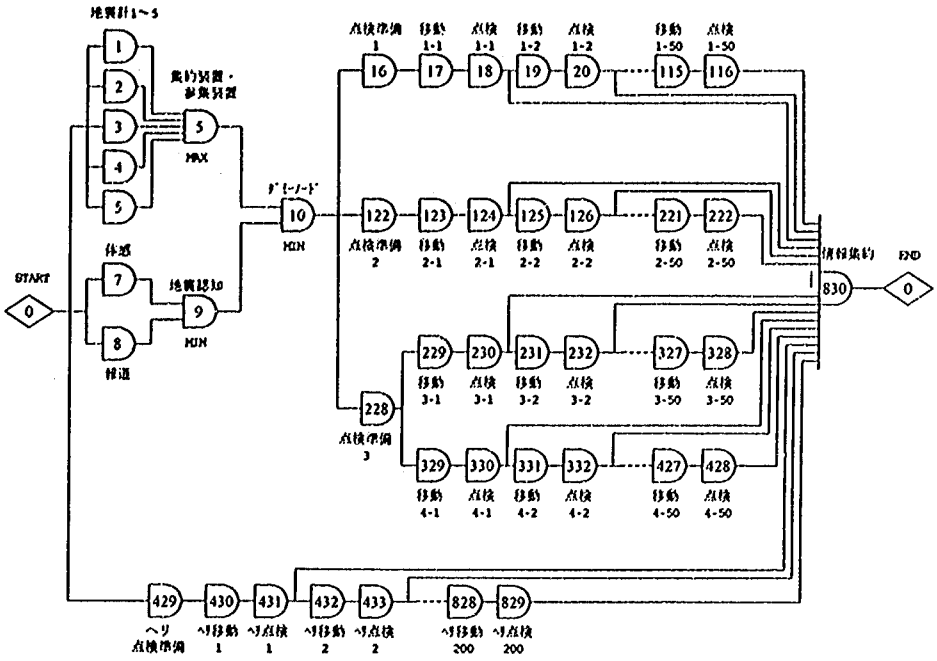


Figure 6.3　Network Expression of Model System (DAY-1)

「被害小」、「被害なし」の箇所数を 4 ルートで同一としたもので、傾斜とはルートごとに被害の分布を変化させるものである。すなわち「傾斜」のケースでは、路線間で比較的被害が多いものと被害が少ないものの違いがある（TABLE 6.2)。

TABLE 6.2　Damage Settings of Model System

		被害大	被害小	被害なし	合　計
一　様		20%	30%	50%	100%
傾　斜	ルート1	50%	50%	0%	100%
	ルート2	20%	40%	40%	100%
	ルート3	10%	20%	70%	100%
	ルート4	0%	10%	90%	100%
	全　体	20%	30%	50%	100%

また各路線内での被害箇所の順番は、「ランダム」の場合路線内での被害程度の出現順位に規則性はないが、「大→小」のケースではルート上の箇所が被害大、被害小、被害なしの順番で並んでいる。これは、あらかじめ被害が大きい箇所が分かっていてそちらを優先的に点検することを擬似的に表現したものである。

(2) 試算結果

設定された組織システムのパフォーマンスを評価するために、次のような視点で検討する。

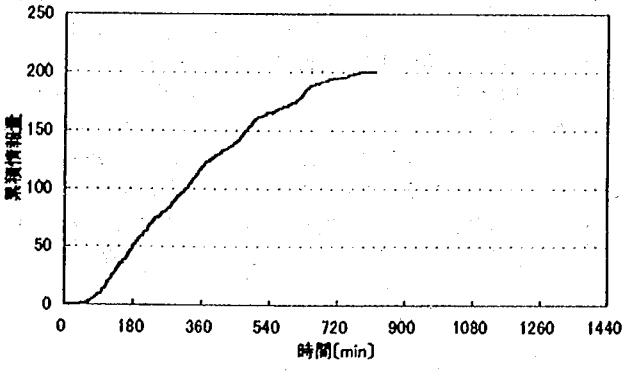


Figure 6.4　Cumulated Information (DAY-1)

①情報収集所要時間

すべての箇所に関する情報が明らかになるのは、情報量の累積値が［箇所数］×1.0 となったときである。箇所数が 50 の場合の 1 例として DAY-1 の情報が蓄積されてゆく様子を Figure 6.4 に示す。

この場合は情報収集の所要時間は 732 分である。一方、地震発生から点検開始までの時間は情報量累積値のグラフが立ち上がる時刻であり、この時間の長短は点検までの活動に関する組織システムの迅速さを表す。このケースの場合は 26.9 分となる。各ケースについてこの結果をまとめたのが TABLE 6.3 である。

TABLE 6.3 Results of Case Studies

	点検開始時刻	点検終了時刻	点検所用時間
DAY-1	26.9	759.2	732.3
DAY-2	29.5	874.7	845.2
DAY-3	32.0	786.9	754.9
DAY-4	29.1	210.2	181.1
DAY-5	27.1	230.4	203.3
DAY-6	24.9	195.7	170.8
NIGHT-1	106.4	1141.0	1034.6
NIGHT-2	108.2	1184.2	1076.0
NIGHT-3	89.2	1177.5	1088.3
NIGHT-4	97.1	344.9	247.8
NIGHT-5	106.3	399.8	293.5
NIGHT-6	99.2	319.3	220.1

DAY-1 と DAY-2 を比べると、被害が一様に分布する DAY-1 よりもルート間で被害程度に傾斜がある DAY-2 の方が長い点検時間を要しているが、これは被害程度が大きい場合に特定のルートで点検に長い時間を要するためである。このことを各ルート別の点検活動時間をグラフ化したものが Figure 6.5、Figure 6.6 である。被害が一様な場合にはどのルートも同程度の点検所要時間であるが、ルート間で傾斜がある場合には被害程度が大きいルートの点検時間に長時間を要していることがわかる。したがって、あらかじめルート上の被害程度がわかっている場合にはそのルートに点検要員を振り向けることで点検時間を短縮

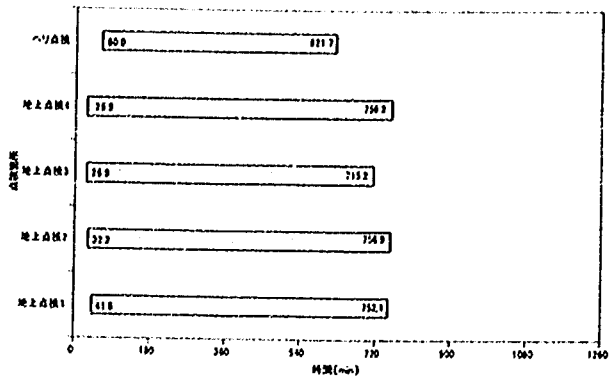


Figure 6.5　Time for Investigation by Routes (DAY-1)

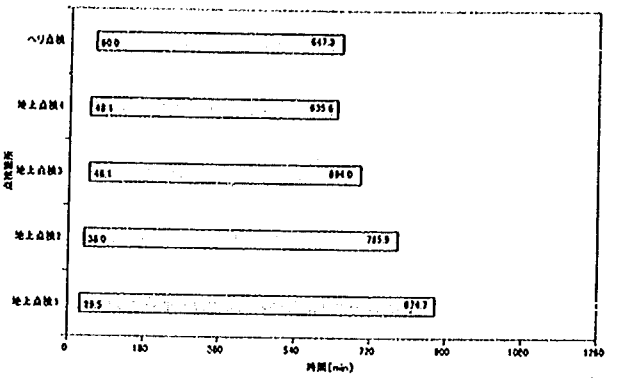


Figure 6.6　Time for Investigation by Routes (DAY-2)

できる。このことから、広域に分布する施設の被災状況を短時間で推定する即時被害予測システムの有効性が示される。

②情報収集効率

Figure 6.7 は、ルート上で被害大の箇所から順番に点検できる場合(DAY-3)の情報蓄積状況を示したものである。

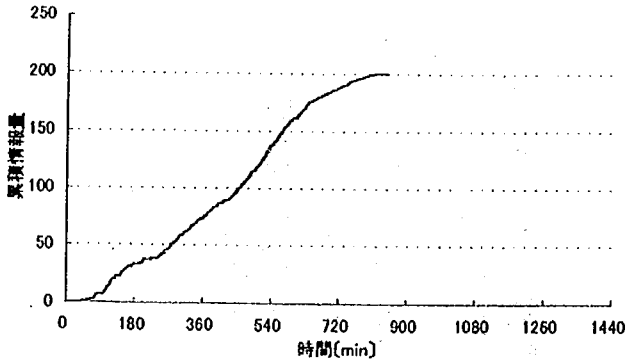


Figure 6.7　Cumulated Information (DAY-3)

一見すると、このケースの情報蓄積の速さは DAY-1 の場合よりも遅いが、実際は初期の段階で被害が大きい箇所の情報が集まってしまうので、優先的に対処すべき箇所の情報を把握する時間はこちらの方が早い。今回は被災度に関係なく被害状況を把握した時点で情報量を 1.0 としたが、被災度によって情報量に重みをつけたり、あるいは被災度別に情報量の蓄積状況を調べることにより、よりきめこまかな検討が可能となる。

③その他の観点

各ゲートが起動した時刻、処理を終了し出力が確定した時刻はファイルとして保存可能なため、組織システム中の処理が遅いルートのネックを特定することも可能である。

7．結論および今後の方針

(1) 結　論

震災対策体制の人・機器等の処理要素を「ゲート」とし、体制をそれらゲートを接続したネットワーク表現することによって、体制のパフォーマンスを定量的に検討する手法を提案した。実際の工事事務所等の体制はこのモデルよりも複雑であり、ネットワーク表現には手間がかかるが、有効な震災対策計画を検討する際には、個々のシステム整備や担当任命のみならず、計画者がその内容を把握していることが必要である。

(2) 今後の方針

①情報量の定義

今回情報量の定義にあたっては、被害の大小にかかわらず、その被害程度を特定することを目的（情報量 = 1.0）と定義したが、被害が大きい箇所や迅速な処置が必要な箇所の情報量を大きく設定したり、被害程度ごとの情報量累積状況を検討することも考えられる。

②各ゲートの処理時間の計測

今回のケースでは、各ゲートの処理時間（移動、点検、報告等）に机上で妥当と判断した値を与え、確率変動させている。実際のこれらの処理時間を、測定やアンケートなどによって特定する方法を開発する必要がある。

③フレキシブルな組織システムの表現

たとえば被害が大きいルートに対して要員を集中させたり、点検要員が少ない場合に点検体制を変更するなど、前段の条件によって後段のネットワーク接続状況を変更することで、より現実的な組織システムの表現が可能となる。このような変更は、ゲートクラスへの処理関数の追加などの変更によって実現される。

④リスクの表現

確率的に、あるいは条件によって、各ゲートが動作しなくなる状況も、クラス定義を工夫することで可能である。このようなゲートを含むネットワークのパフォーマンス評価では、時間遅延のみならず情報伝達、緊急活動の停止に関しても表現可能である。

⑤実際の震災対策体制における検証

今回のケーススタディーでは仮想の工事事務所をモデル化したが、上記①～④の課題を解決したのち、実在の工事事務所等における体制パフォーマンスを評価し、手法の応用における課題を抽出する必要がある。

参考文献

(1)片田敏孝、青島縮次郎、及川康、「災害情報システム評価のためのシミュレーションモデルの開発」、土木計画学研究・講演集 No.19(1)、pp.21～24、1996

(2)木俣昇、鷲見育男、「消防防災システムの阻害要因のペトリネットシミュレーションに関する基礎的研究」、土木計画学研究・講演集 No.19(2)、pp.43～46、1996

(3)野﨑智文、杉田秀樹、「地震被害の初動検知体制パフォーマンスの評価に関する研究」、土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集 1-B、pp.826～827、1997

第10回日本地震工学シンポジウム（H10年11月25日～27日・神奈川県横浜市）

公共土木施設における即時震害予測システム

公共土木施設における即時震害予測システム

Real-time Earthquake Damage Estimation System for Civil Infrastructures

濱田　禎[1)]、杉田　秀樹[2)]、金子　正洋[3)]

Hideki SUGITA[1)], Tadashi HAMADA[2)], Masahiro KANEKO[3)]

1) 建設省道路局道路交通管理課（元建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課研究員）
Chief Official, Roadway Traffic Control Division, Roadway Bureau, Ministry of Construction

2) 建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課長　工博
Head, Earthquake Disaster Prevention Technology Division, Earthquake Disaster Prevention Research Center, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Dr. Eng.

3) 建設省土木研究所耐震技術研究センター振動研究室主任研究員　併）防災技術課主任研究員
Senior Research Engineer, Ground Vibration Division, Earthquake Disaster Prevention Research Center, Public Works Research Institute, Ministry of Construction

要約

兵庫県南部地震においては、迅速かつ適切な初動体制の確立が、公共土木施設の管理の上で重要な役割を果たすことが再認識された。これを受けて、建設省土木研究所及び建設省関東地方建設局では、震災直後の情報の少ない段階において管理施設の被災状況を大まかに予測し、公共土木施設管理者の意志決定をサポートする即時震害予測システムの開発を実施するとともに、9年度より試験運用を開始している。本文では、本システムの役割・機能を紹介するとともに、地震動及び施設被害の予測手法について報告する。

SUMMARY

Weather administrator of civil infrastructures can set up proper restoration system immediately after an earthquake disaster or not influences a social total damage. That is one of lessons at the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake disaster. After it, Public Works Research Institute and Kanto Regional Construction Bureau, Ministry of Construction developed Real-time Earthquake Damage Estimation System for Civil Infrastructures. Its aim is to support the administrator's decision making for an urgent restoration action by providing estimated damage information. This paper describes rolls and functions of this system and an estimation method of damage on civil infrastructures.

1．はじめに

兵庫県南部地震以降、公共・公益事業者の地震防災に対する取り組みは大きく変化している。各管理施設の個別の耐震性の向上が図られる一方で、予算制約等によるそのようなハード的対処の限界も認識されはじめ、今ある手段を如何に効率的に使うかを考えるソフト的対処による被害の軽減手法へのニーズが高まっている[1)]。このような背景の中、建設省土木研究所及び建設省関東地方建設局では、情報という手段の活用による被害の軽減を目標とする、震害予測システムの開発を実施するとともに、その試験運用を行っている。これは、管内に配置された地震計によって得られる地震の観測情報をもとに、各管理施設の被災状況を大まかに予測し、震災直後の情報の少ない段階において公共土木施設管理者の意志決定をサポートするものである。Figure-1 はそのイメージ図である。本稿では、本システムの役割・機能を紹介するとともに、地震動及び施設被害の予測手法について報告する。

2．ソフト的地震防災の全容

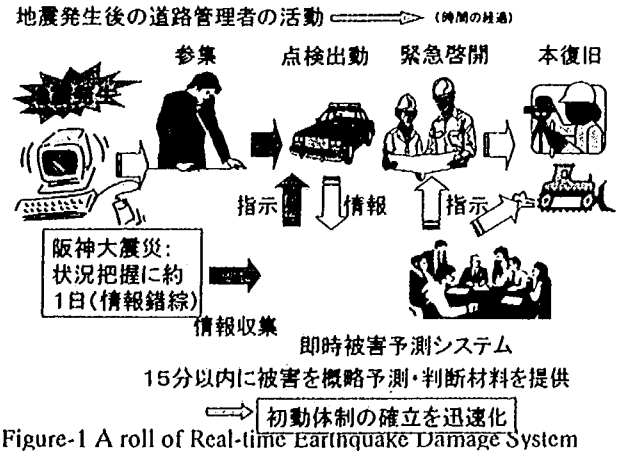


Figure-1 A roll of Real-time Earthquake Damage System

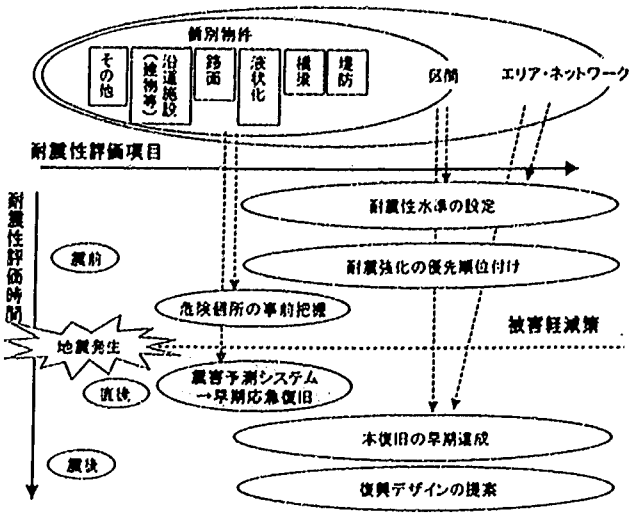


Figure-2 Relations between a damage evaluation and damage reducing measures

ハードウェアの耐震性能の向上以外によって被害の軽減を行う手法をソフト的被害軽減策と定義する。ソフト的被害軽減策によってカバーされる領域は多岐に渡り、まだまだ多くの研究の余地が残っているが、全てのソフト的軽減策の基本になるのは、個別の施設または、これらが構成する系の耐震性の正当な評価である。Figure-2 に耐震性の評価が様々な被害軽減策とどのように関連しているかのイメージ図を示す。図が示すように、耐震性水準の設定や耐震強化の優先順位付け、復興デザインの提案等の総合的・政策的な被害軽減策も、現状の耐震性評価からスタートする。震害予測システムの開発の過程で生まれる耐震性評価手法は、このような総合的な地震防災施策への発展性を有している。

3．即時震害予測システムの基本方針

即時震害予測システムのシステム構成を Figure-3 に示す。今回開発したシステムは、関東地方建設局管内（1都8県）を対象としたプロトタイプシステムである。

本システムに地震動情報を伝送する地震計ネットワーク[2]は、全国に管理施設に沿って 20～40km 間隔で離散的に配置された約 700 箇所の強震計をマイクロ回線でネットワーク化するものであり、平成7年度より整備が進められている。プロトタイプシステムにおいては、関東地方建設局管内の 112 箇所（全 122 基）分の最大加速度及び SI 値等の地震動情報を通信サーバーに収集している。

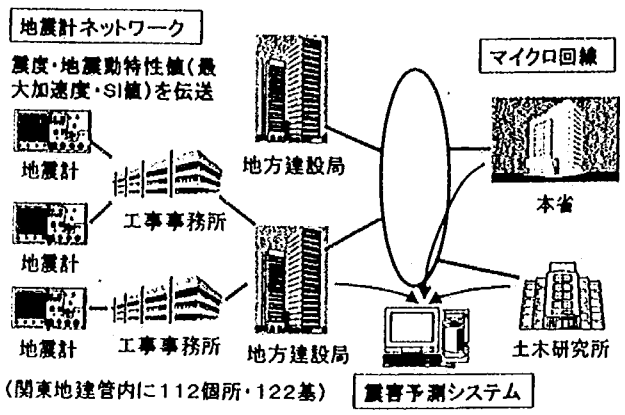


Figure-3 System Configuration of Real-time Damage Estimation System

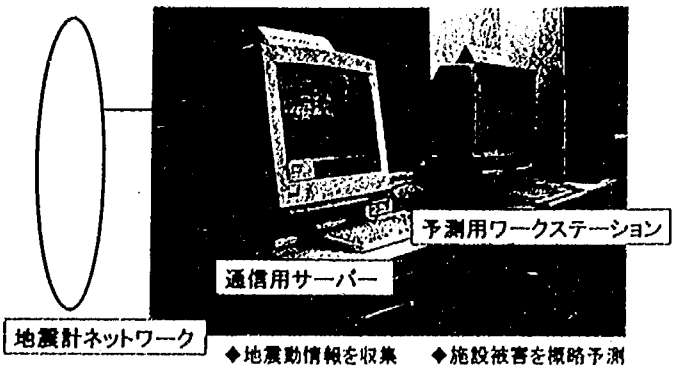


Photo-1 Hardware configuration of prototype system

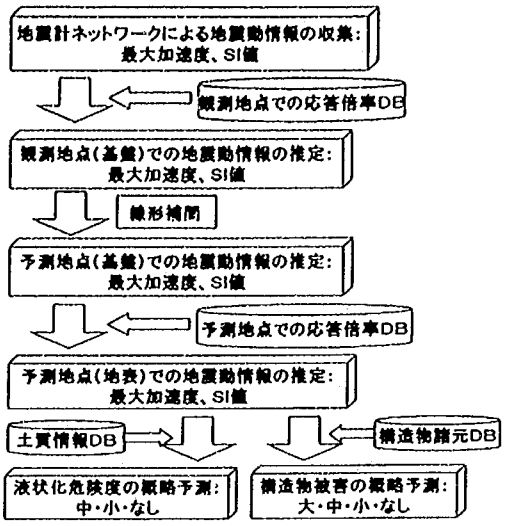


Figure-4 Flowchart of Damage Estimation

本システムでは、収集した最大加速度及び SI 値（以下、地震動特性値と呼ぶ）に基づき、管理路線及び堤防沿いの地震動特性値の分布を推定し、これを用いて路線及び堤防沿いの液状化と構造物（橋梁）の被害を概略予測する。観測地点数及び予測地点数を TABLE-1.1 にまとめる。

また、予測のフローを示すと Figure-4 のようになる。

地震発生から全ての予測計算終了までの目標時間は、

TABLE-1.1 NUMBER OF OBSERVATION POINTS AND ESTIMATION POINTS

	地点数	備考
観測地点	112(全122基)	・応答倍率設定済み地点数は79
路線液状予測地点	6,028	・管理道路全線を対象
堤防液状化予測地点	256	・平成7年に実施した耐震点検（概略）の対象となった区間 ・応答倍率及び予測用閾値を計算
橋梁被害予測地点	1,424	・応答倍率は路線液状化予測地点のものを流用 ・予測用閾値設定済み橋梁は103

地震発生から道路管理者が参集し、点検の体制を整えるまでに要する時間として、15 分とすることにした。

4．地震動特性値の予測

4．1　地震動特性値予測の基本方針

本システムにおいては、地震計ネットワークの各観測点が観測した地震動特性値を基に、液状化及び橋梁被害の予測位置における地震動特性値を推定する。この際予測に用いる地震動特性値とその選定理由は以下の通りである。

①液状化予測は液状化に対する抵抗率 F_L[1]に基づいて算出される液状化指数 P_L によることとした。これは、橋梁等土木施設の多くは、液状化に関して F_L 法に基づいて耐震設計がなされており、地盤データの収集が他の方法と比較して容易であるためである。F_L 値及び P_L 値の算定式を示すとそれぞれ式（4.1）及び式（4.2）のようになる。

$$F_L = R/L \cdots\cdots\cdots (4.1)$$

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x)dx \cdots\cdots\cdots (4.2)$$

ここで、R は動的せん断強度比、L は地震時せん断応力比、x は地表面からの深さである。簡略的に言うと、F_L 値はある土層の液状化に対する抵抗の大きさを地震力の大きさで割って表す安全率で、P_L 値はそれを深さ方向に足し合わせてその地点の液状化危険度を表す指標である。F_L 法を用いるため、最大加速度で地震動の強度を評価する。

②橋梁被害予測には SI 値を用いる。これは構造物に及ぼす地震動の繰り返し特性の影響を考慮するためである。なお、本文における SI 値は、式(4.3)により定義したものである。

$$SI = \frac{1}{2.5}\sum_{i=0.1}^{2.5} S_{vi} \cdots\cdots\cdots (4.3)$$

ここに、S_{vi} は最大速度応答スペクトルの i 秒成分である。

地震動特性値の予測には、迅速性と精度が要求される。精度を追求するならば、予測の対象となる地盤及び構造物をモデル化し、各地震毎に動的解析を行うのが最善であるが、この方法では目標とする 15 分以内の予測が難しい。本システムでは、15 分という制約条件のなかで最も高い精度を確保する方法として以下の①～③の手順による方法を採用した。また、手順のイメージを Figure-5 に示す。

①各観測値から、その地点の地盤の応答特性を考慮して、観測地点下の工学的基盤位置における地震動特性値を推定する。

②①で得られた観測地点下の特性値をもとに、予測地点下の特性値を補間により推定する。

③②で得られた予測地点下の特性値から、各予測地点の地盤の応答特性を考慮して、予測地点における特性値を推定する。

プロトタイプシステムにおける地震動特性値の推定箇所数は、路線液状化予測の区間数である 6,028 に堤防液状化予測の区間数 256 を加えた 6,284 である。また、橋梁被害の予測には、その橋梁を含む区間に対して路線液状化予測用に推定された地震動特性値を用いる。

4．2　地震動特性値の応答倍率

観測地点及び予測地点における地震動特性値の応答倍率は SHAKE による計算結果をもとに設定する。地震動特性値の応答倍率は入力地震動の繰り返し特性や地盤の

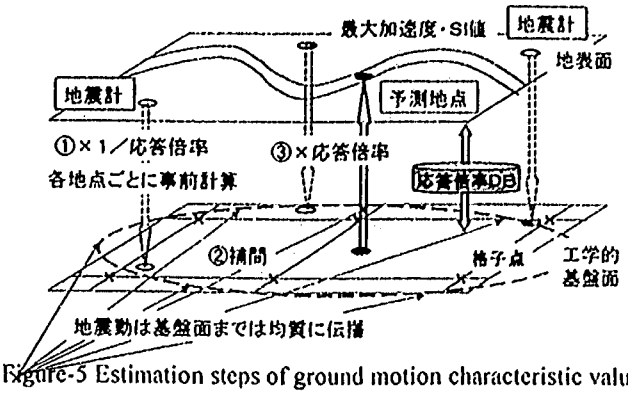


Figure-5 Estimation steps of ground motion characteristic values

非線形性によって変化するため、先述のように、観測された波形を用いて各地震、各地点ごとに計算するのが望ましい。しかし本システムでは、震後即時に波形の収集を行うことが困難なため、地点ごとの標準的な応答倍率をあらかじめ計算しておき、これを観測された特性値に乗除することで、被害の予測地点における特性値を推定する。

この際、地震動の繰り返し特性及び地盤の非線形性は次の①、②のように取り扱っている。

①地震動の繰り返し特性…本システムでは地震動波形が即時には得られないため、繰り返し特性を地震ごとに評価することができない。よって、平均的と考えられる波形を入力とした場合の地震動特性値の応答倍率をあらかじめ計算しておき、これをその地盤の応答倍率とすることとした。

②地盤の非線形性…これについては、式(4.4)により応答倍率を与える関数によって考慮する。

$$\alpha = a \times b^{-x} \cdots\cdots\cdots (4.4)$$

ここに、α は応答倍率、x は基盤（入力）最大加速度または SI 値、a 及び b は地盤による非線形性の違いを表す係数である。a 及び b は、開北橋記録の最大加速度をそれぞれ 50、100、300、500gal に調整して得られる 4 波形を入力とした場合の特性値の応答倍率から、回帰分析を行うことによって、観測地点及び予測地点ごとに定めた。実際の設定例を Figure-6 に示す。

なお、開北橋記録を選んだのは、既往の地震時に硬質な地盤において観測された代表的な 5 波形を用いた試計算において、最も平均的な応答特性を示したことによる。

4．3　基盤面における地震動特性値の推定

工学的基盤面における地震動特性値の推定は以下に記

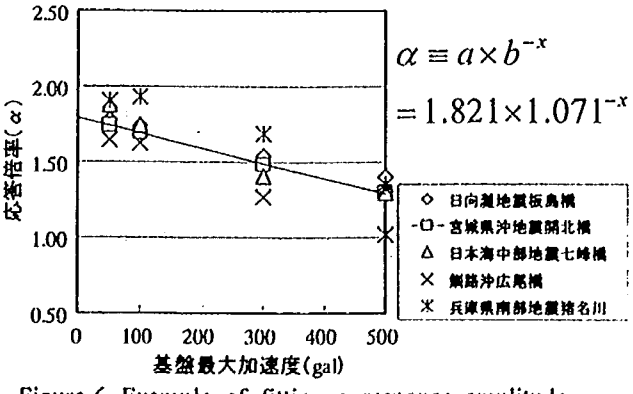


Figure-6 Example of fitting a response amplitude factor between bed rock and surface ground

す①～③の手順によった。

①対象地域を 10km 四方の格子に分割する。

②(x,y)座標を観測点の位置、z 座標を地震動特性値と空間に、Figure-7 に示すような、観測点における特性値を含むなめらかな曲面を設定し、この曲面より格子点の値を補間により推定する[4]。

③Figure-8 に示すように、予測点の近隣の 4 格子点の値から予測地点の地震動特性値を距離を重みとして推定する。

③において 4 格子点の推定値から予測地点 E（座標：x_E, y_E）の値 z_E を推定する方法は式(4.5)による。

$$z=\frac{z_{i,j}(x_{i+1}-x_E)(y_{j+1}-y_E)-z_{i+1,j}(x_i-x_E)(y_{j+1}-y_E)-z_{i,j+1}(x_i-x_E)(y_j-y_E)+z_{i+1,j+1}(x_i-x_E)(y_j-y_E)}{(x_i-x_{i+1})(y_j-y_{j+1})} \quad \cdots\cdots (4.5)$$

ここでは、4 格子点の座標をそれぞれ(x_i,y_j)、(x_{i+1},y_j)、(x_i,y_{j+1})、(x_{i+1},y_{j+1})、また、4 格子点の推定値をそれぞれ $z_{i,j}$、$z_{i+1,j}$、$z_{i,j+1}$、$z_{i+1,j+1}$ としている。

②における補間とは、(4.6)式によって与えられる関数を(4.7)式の制約条件のもとで最小にする z(zij, i=1…N_x, j=1…N_y)を求めることである。

$$J(z)=\sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y-1}(z_{i+1,j}-z_{i,j})^2+\sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y-1}(z_{i,j+1}-z_{i,j})^2$$
$$+\sum_{i=2}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y-1}(z_{i+1,j}-2z_{i,j}+z_{i-1,j})^2+\sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=2}^{N_y-1}(z_{i,j+1}-2z_{i,j}+z_{i,j-1})^2$$
$$+2\sum_{i=1}^{N_x-1}\sum_{j=1}^{N_y-1}(z_{i+1,j+1}-z_{i+1,j}-z_{i,j+1}+z_{i,j})^2 \cdots\cdots (4.6)$$

$$z_k=\frac{z_{i,j}(x_{i+1}-x_k)(y_{j+1}-y_k)-z_{i+1,j}(x_i-x_k)(y_{j+1}-y_k)-z_{i,j+1}(x_i-x_k)(y_j-y_k)+z_{i,j+1}(x_{i+1}-x_k)(y_j-y_k)}{(x_i-x_{i+1})(y_j-y_{j+1})}$$

$$k=1,\cdots,N \quad \cdots\cdots (4.7)$$

ここで(4.7)式は制約条件で、観測点 k（座標：x_k、y_k）における観測値 z_k とそれを含む格子の 4 点｛座標：それぞれ(x_i,y_j)、(x_{i+1},y_j)、(x_i,y_{j+1})、(x_{i+1},y_{j+1})｝における推定値は(4.5)式の関係を満たさなければならないことを意味している。(4.6)式の最初の 2 項は隣り合う格子点の差の総和を、また残りの項は隣り合う格子点の差の差の総和である。これを最小にすることは、(x,y)を位置座標、z を特性値とする空間に、観測値を満たすできるだけなめらかな曲面を設定することを意味する。

本手法の最大の利点は、観測値の伝送に失敗した箇所が発生しても、(4.6) 式の制約条件が減るだけで、推定式を立て直すことなく計算が続行できることにある。

前項において提案された応答倍率関数によって基盤に引き戻された地震動特性値にに対して、式 (4.5) ～ (4.7) を用いて補間計算を行うことで、これら 6,363 箇所の基盤面における特性値を推定している。

5．液状化予測

5．1　P_L～液状化危険度マトリックスの設定

本システムにおいては、道路関連施設について管理道路沿いの液状化及び橋梁被害を、また河川関連施設について堤防の液状化を予測し、結果を管理者に提供する。このうち道路関連施設についての危険度は大・中・小・なしの 4 段階で表すこととした。これらはそれぞれ道路が以下のような状態にあることを想定している。

大：長期間車両の通行が不可となる可能性がある。

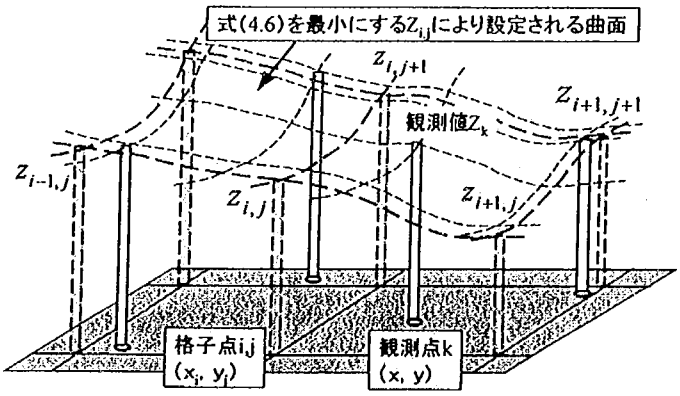


Figure-7 Interpolation at engineering bed
(Estimation of values at square points)

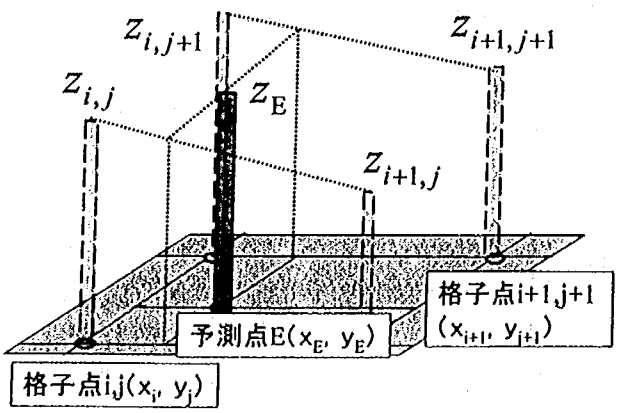


Figure-8 Interpolation at engineering bed
(Estimation of the value from 4 square point values)

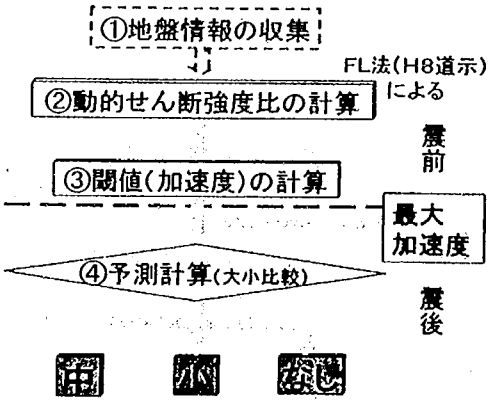


Figure-9 Estimation steps of ground liquefaction states

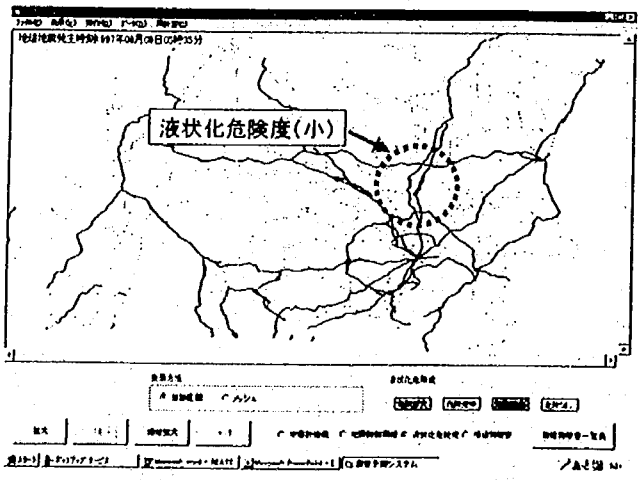


Figure-10 Display of the estimated damage(Liquefaction)

中：応急対策を施すことにより、ある程度の期間で車両の通行が可能。
小：応急対策を施すことにより、比較的短期間で車両の通行が可能。
なし：車両の通行のために対策を施す必要なし。

液状化危険度を評価するための指標として、先述のように本システムでは P_L 値を使うが、これにより上記の4段階の評価を行うためには、P_L 値がいくらであれば液状化危険度がどの段階に相当するのかの判断基準をあらかじめ設定する必要がある。本システムにおいては、土木研究所による既往の事例分析[5]に基づき、判断基準としてTABLE-5.1 のように P_L～液状化危険度マトリックスを設定した。なお、TABLE-5.1 において危険度大と判定するための P_L 値が未設定なのは、既往の地震において道路区間が液状化によって長期間通行不可となった事例が存在しないことによる。

TABLE-5.1 P_L～GROUND LIQUEFACTION STATE MATRIX

液状化危険度	大	中	小	なし
P_L の範囲	－	$P_L>15$	$15\geqq P_L>5$	$5\geqq P_L$

河川堤防沿いの液状化予測についても、道路との整合を考慮してTABLE-5.1 のマトリックスを共通して用いる。

5．2　予測手順

TABLE-5.1 のマトリックスを用いて液状化危険度の判定を行うまでの手順を Figure-9 に示すとともに、その概要を以下の①～④に説明する。ここでは計算時間の短縮を図るため、震後の予測計算を大小比較のみにし、比較の基準となるしきい値あらかじめ計算している。

①地盤情報の収集・区間分割…予測の対象とする路線・堤防の地盤情報を収集して路線・堤防沿いの土質縦断図を作成し、さらに土質構成がほぼ均一と思われる区間に分割する。

②各区間の各層の動的せん断強度比の算定…収集された資料を基に、各区間の各層の動的せん断強度比 R（式（4.1）の分母）を算定する。

③各区間のしきい値の事前計算…式（4.2）に③で得られた R を代入し、①で設定した判断基準を与えるような加速度をあらかじめ計算しておく。

④予測計算…④で計算された加速度をしきい値として用い、これと地震後 4.の手法によって推定される予測地点の SI 値としきい値とを大小比較し、液状化危険度（大・中・小・なし）を判定する。

6．橋梁被災度の予測

6．1　部材被災度～橋梁被災度マトリックス

地震により橋梁が被害を受けて機能に支障を来す場合、5.1 で述べた考え方に即して4段階にその被災形態を分類すると、TABLE-6.1 に示す部材被災度～橋梁被災度マトリックスのようになる。本システムにおいては、TABLE-6.1 の分類に従い、各部材ごとに発生した地震による被災度を判定し、そのうち最も被災度が高いものをその橋梁の被災度とすることとした。

TABLE-6.1 BRIDGE COMPONENT DAMAGE STATES～BRIDGE DAMAGE STATES MATRIX

部材	被災度大	被災度中	被災度小	なし
RC 橋脚（曲げ破壊）	終局	終局～降伏		降伏未満
RC 橋脚（せん断破壊）	破壊	破壊～軽微な損傷		軽微な損傷
鋼製橋脚	座屈	座屈～軽微な変形		軽微な変形
支承	破壊	損傷（高さの高い支承）	損傷（高さの低い支承）	軽微な損傷
基礎（流動化）	－	大規模移動	大規模移動～軽微な移動	軽微な移動

6．2　SI 値～部材被災度マトリックス

各部材の被災度の判定にあたっては、TABLE-6.2 に示す SI 値～部材被災度マトリックスを用いる。これは、既往の解析結果及び被災事例における作用地震動の SI 値及び橋梁の構造・型式と被災度の関係を参考にして、SI 値の大小比較による被災度の判定を目的として設定したものである。各部材のしきい値の設定根拠を簡単に説明すると以下のようになる。

①RC 橋脚（曲げ破壊）…RC 橋脚は橋梁部材のうちで最も体系的に耐震設計がなされている部材で、その耐震性を最も計量化しやすい。本システムは過去の設計例（249 基）に対して動的解析を行い、地震動強さ（SI 値）と構造諸元（寸法・重量）と被害程度の関係を算出し、結果に従ってしきい値を設定した。

②RC 橋脚（せん断破壊）…せん断破壊が曲げ破壊よりも先行するかどうかをせん断支間比と設計年次をもとに判断する。せん断支間比が3以下で昭和 55 年より前の示方書を適用している橋梁についてはせん断破壊の可能性ありとして、SI 値が 50 を越えた場合には被災度大と判断する。

TABLE-6.2 SI VALUE～BRIDGE COMPONENT DAMAGE STATES MATRIX

				被災度大	被災度中	被災度小	被災度なし
RC橋脚(曲げ破壊)	適用示方書	段落とし	降伏震度				
	昭和55年以前	有り	0.2＞khy	SI＞30	30≧SI＞10	10≧SI＞5	5≧SI
			0.4＞khy≧0.2	SI＞50	50≧SI＞30	30≧SI＞10	10≧SI
			khy≧0.4	SI＞50	－	50≧SI＞30	30≧SI
		無し	0.5＞khy	SI＞100	100≧SI＞50	50≧SI＞30	30≧SI
	昭和55年	－	khy≧0.5	SI＞50	50≧SI＞30	30≧SI＞10	10≧SI
	平成2年	－	khy≧0.5	SI＞50	50≧SI＞30	30≧SI＞10	10≧SI
	復旧仕様以降	－	0.6＞khy	SI＞50	－	－	50≧SI
			khy≧0.6	SI＞100	100≧SI＞50	－	50≧SI
RC橋脚(せん断破壊)	適用示方書	せん断支間比					
	昭和55年及びそれ以前	h/d＜3		SI＞50	50≧SI＞30	30≧SI	10≧SI
鋼製橋脚	適用示方書						
	昭和55年以前			SI＞50	50≧SI＞30	－	30≧SI
	昭和55年			SI＞50	50≧SI＞30	－	30≧SI
	平成2年			SI＞50	50≧SI＞40	40≧SI＞30	30≧SI
	復旧仕様以降			SI＞100	－	100≧SI＞50	50≧SI
支承		型式					
		免震支承		－	－	140≧SI＞50	50≧SI
		金属支承		SI＞140	140≧SI＞50	50≧SI＞20	20≧SI
		金属支承		SI＞50	－	50≧SI＞20	20≧SI
		桁かかり長が不足		SI＞50	－	50≧SI＞20	20≧SI
基礎		設置条件					
		水際線から100m以内		－	PL＞20	－	20≧SI

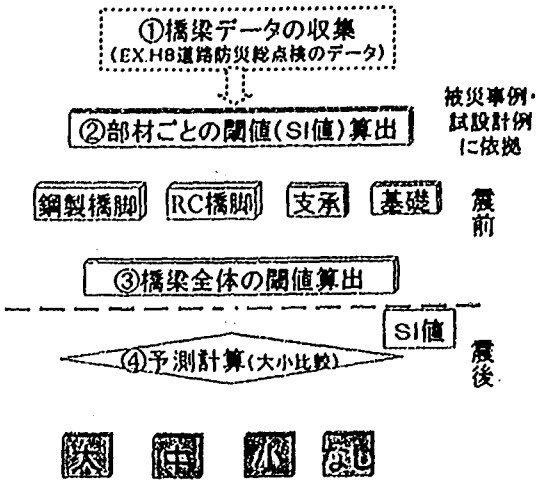


Figure-11 Estimation steps of bridge damage states

③鋼製橋脚…橋脚の有する耐力を簡便に把握することが難しいため、兵庫県南部地震における被害事例に基づき、1971 年より前の設計基準によるものについては SI 値 30 以上で、また 1971 年以後の設計基準によるものについては SI 値 50 以上でそれぞれ被災度大と判断する。

④支承…支承に作用する地震力を推定することが困難で、解析的に被災度を推定することが難しいため、支承のしきい値は既往の被災事例に基づき設定した。SI 値が 50 を越えた箇所で支承の破壊が生じていた事例を鑑み、これを被災度大のしきい値とした。また、被災度中と被災度小は支承の高さによる影響の大きさを反映するために 30cm 以上か以下かで分類した。

⑤基礎（流動化）…基礎が地震力によって被災し、橋梁としての機能を阻害した事例はこれまでのところ報告されていない。しかし、兵庫県南部地震において、液状化に伴う地盤流動の発生によって、橋梁全体として中程度の被害を被った事例が多数報告されている。これを鑑み、水際線に近接し(100m 以内)、かつ作用した地震動に基づいて計算された P_L 値が 20 を越える地点に存在する基礎については、被災土中と判断する。

6．3　予測手順

橋梁被災度の予測においては、液状化危険度の予測と同様に、計算時間の短縮を図るため、部材のしきい値の算定及びクリティカルになる部材がどれになるかの判断を事前に行っている。Figure-11 に TABLE-6.1 及び 6.2 のマトリックスを用いて橋梁被災度を判定する手順を示す。また、次の①～④に各段階の概略を示す。

①橋梁諸元データの収集…各橋梁の諸元に関するデータを耐震点検の結果等から収集する。

②部材ごとのしきい値算出…①で収集した諸元データを加工し、TABLE-6.2 に従い部材ごとにしきい値を算出する。

③橋梁としてのしきい値の設定…部材ごとに算出されたしきい値を比較し、最も弱い部材のしきい値をその橋梁のしきい値とする。これをデータベースとして震前に保有しておく。これによって、液状化危険度予測と同様に計算時間の短縮を図っている。

④予測計算…地震後、4.の手法によって推定される予測地点の SI 値としきい値とを大小比較し、被災度（大・中・小・なし）の判定を行う。

①～④に従って予測計算を行った結果の表示画面が

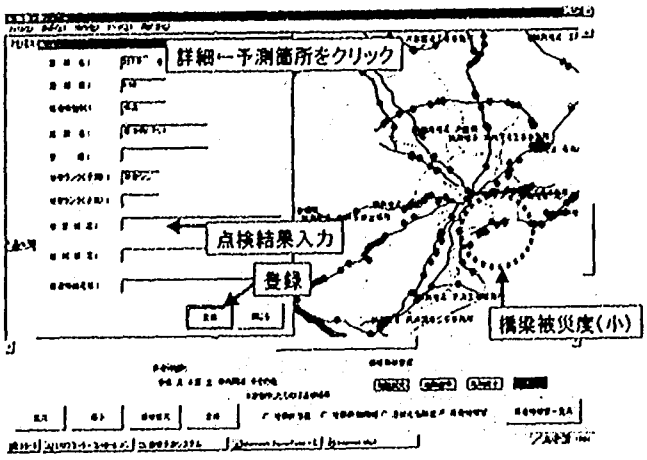


Figure-10 Display of the estimated damage (Bridge)

Figure-12 である。

この表示画面において、各橋梁を示すアイコンをクリックするとその橋梁の基本データ等を示すウインドウが表示される。このウインドウには点検結果を入力する欄が用意されており、将来的に、現場の点検結果をネットワークに接続している全ての機関が即時に情報を共有することを意図している。

7．まとめ

上記３．～６．では、現状のシステムの役割・機能と個別の予測手法について紹介した。

システムの今後の発展の方向を考えた場合、以下のような項目が挙げられる。

①データベースの整備…予測の材料となる各施設の構造・諸元に関するデータの充実を図る。

②予測手法の妥当性の検証…観測データの蓄積を進め、現在の予測手法（具体的には応答倍率、基盤面における補間、液状化及び橋梁予測の閾値）に補正を加えることで精度の向上を図る。

③ユーティリティの向上…現場のユーザーの声を反映し、システムのユーティリティーの向上を図る。

④対象施設の拡張…現状の路線液状化及び橋梁に、占用・沿道施設、盛土・斜面等を予測の対象として加える。

⑤対象時間の拡張…対象時間を震後即時に限定せず、震前対策から震後復旧までを視野に入れる。

⑥平常時の活用…通常の管理用のシステムとの連携を図り、通常時にも有用なシステムとなるよう機能を拡張する。

⑦情報の双方向化…予測結果を現場に配信するだけでなく、現場の情報を集約し、組織内の情報の共有化を目指す。

参考文献：1)山崎文雄，「リアルタイム地震防災システムの現状と展望」，土木学会論文集 No.577／I-41，1-16，1997 年 10 月；2)杉田秀樹、リアルタイム地震対応を目指した地震計ネットワークの整備、地震工学振興会ニュース No.157、pp42、1997；3)道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、pp91、(社) 日本道路協会、平成 8 年 12 月；4)塩野清治他：BASIC によるコンターマップⅡ応用編、共立出版、1988；5)常田賢一他、地震時における砂質地盤の液状化判定法と耐震設計への適用に関する研究、土木研究所資料第 1729 号、pp98、昭和 56 年 9 月

天然資源の開発利用に関する日米会議(1998.5.12～15、Gaithersburg,Maryland,U.S.A.)

SESMIC INFORMATION SYSTEM FOR CIVIL INFRASTRUCTURES

公共土木施設における地震情報システム

杉田秀樹[1)]、野崎智文[2)]

1．概　要

現在、地震動、地震による被害など地震に関する情報を扱う様々な情報システムが開発され、導入されているが、それらは各システムが独自のデータを収集・保存し、独立して稼動しているものがほとんどである。本論文では、地震情報システムが利用するデータおよび機能を共有することによって、システムの統一性・組織性を維持しながら、柔軟に発展可能な形でシステムを整備する方法について述べる。また、地震動情報の収集、地震被害の推定といった地震情報システムの機能のうち、現在土木研究所において研究が進められている事項について紹介する。

2．日本における地震情報システムの現況

日本においては、国、地方公共団体、公益企業者等によって数々の地震情報に関するシステムが構築されている。それらの機能のほとんどは、地震動の情報をいち早く収集し緊急対応の判断の用に供するものか、地震による一般被害、施設被害の推定を行うものである。これらのシステムは、たいていの場合個別に構築されており、処理に必要なデータはそれぞれのシステムで保有している。したがってこれらのシステムは、その構築のたびに何度もデータを集めなければならず、非効率的である。また、システム保有者以外のものがこれらのシステムを使用可能であるとしても、各々の機能、操作法にばらつきがあるため、得られた結果を総合的に用いることが難しい。

3．システム構築における従来のアプローチと新しい手法

地震情報システムを含め、従来のシステム整備に適用されてきた二つのアプローチ（トップ・ダウン型、ボトムアップ型）を考察する。トップ・ダウン型は、大型のホストシステムのもとですべての機能、データ形式が決定されなければ開発が進められず、開発速度、柔軟性に問題がある。一方ボトム・アップ型はネットワーク上に任意にデータベース、アプリケーションなどのサーバーを接続して不特定多数のクライアントがこれらを利用するものである。個別機能の自由度が高く発展性に優れているが、データの重複およびデータ共有の困難性、機能・操作のばらつきなどにより、組織的な活動が要請される地震対策への適用には難がある。これに対して、高い発展性、自由度を持ち、かつ組織的な統一にも配慮した新しいアプローチを提案する。このアプローチによれば、必要なデータを共有し、相互利用することによって、効率的なシステム整備が可能であるとともに、個別機能の発展性も併せ持っている。

4．地震情報システムに必要な機能

地震情報システムの個別の機能としては、地震動、施設情報などを利用した地震動情報の収集、施設被害の即時予測などが考えられるが、ここでは土木研究所において研究開発中の地震計ネットワーク、即時震害推定システム、震災による社会経済の影響評価システム、道路ネットワークの耐震性評価手法を紹介するほか、施設被害を直接検知する技術、震災対策体制のパフォーマンスを評価する手法についても提案している。

---

1) 建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課長（茨城県つくば市旭１番）
2) 同　防災技術課主任研究員

SEISMIC INFORMATION SYSTEM FOR CIVIL INFRASTRUCTURES

by

SUGITA Hideki [1], NOZAKI Tomofumi [2]

ABSTRACT

This paper describes comprehensive image of the seismic information system (SIS). Two points are included in the paper: i.g., a new system architecture to realize SIS with systematic control, possibility of extension and the independence of the subsystems, and several element technologies applicable to the subsystems of SIS. The proposed concept does not only concentrate on the technologies of the supply-side, but also the philosophy and the technologies that is "objective oriented." As the counter-earthquake activity system is responsible many complex jobs at a time, and as the information technologies is becoming highly technical, the concept introduced here is very much help for the personnel of the counter-earthquake activity system.

Key Words: Counter-earthquake activity system, Information system, New technology and philosophy

1. INTRODUCTION

Since the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, which revealed the necessity for quickly monitoring damage, communicating information, and making decisions, many organizations have constructed various systems to deal with earthquake information, which are listed in Table 1-1. Their principal functions are to:

1) monitor, collect, and adequately display accelerograph measurements and data from other organizations and systems (*observation and collection*),
2) estimate the damage to facilities and injury to people by the earthquake and consequent fires, from the data collected (*damage estimation*),
3) take emergency measures based on the data collected, and the estimated damage, such as immediate suspension of facility functions and warnings to users (*emergency response support*), and
4) support the decision making processes by presenting instructions given in emergency manuals and proposing optimum strategies (*counter-earthquake system support*).

So far, most of these systems are developed for use within the organization. Although each system remotely accelerographs, collects and communicates information through the network, and exchanges data between its submodules constructed for each function, it has its own independent database. When users encounter the occasion to exchange data between systems, they must conduct a series of complicated operations and must know the

1) Head, Earthquake Disaster Prevention Technology Division, Earthquake Disaster Prevention Research Center, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Tsukuba, Ibaraki, 305-0804 Japan
2) Senior Research Engineer, ditto

methods for operating the systems, which may differ by system. As such information systems usually use common earthquake motion measurements, ground condition and facility data, we should investigate methods for sharing such data without losing the possibilities for extension and independence of each system.

2. CONVENTIONAL APPROACHES FOR CONSTRUCTING SEISMIC INFORMATION SYSTEMS AND BREAKTHROUGH

2.1 Top-Down Approach

Most seismic information systems have been constructed with a top-down approach. For example, a system that 1) collects ground motion data, 2) estimates human casualties and fire occurrence from the data, and c) suggests the actions necessary for preventing damage is designed to include all these functions in one host machine as shown in Figure 2.1. Although it is possible to supplement functions to the system later, the top-down approach fundamentally creates the image of an entire system first. Hence, the top-down approach has disadvantages such as

1) a system does not operate until the whole system is completed,
2) it is difficult to renew the system, since a slight change may largely affect the entire system (thus such systems easily become obsolete), and
3) all users within an organization must fully know the provided operation method.

2.2 Bottom-up Approach

A new movement is occurring in the

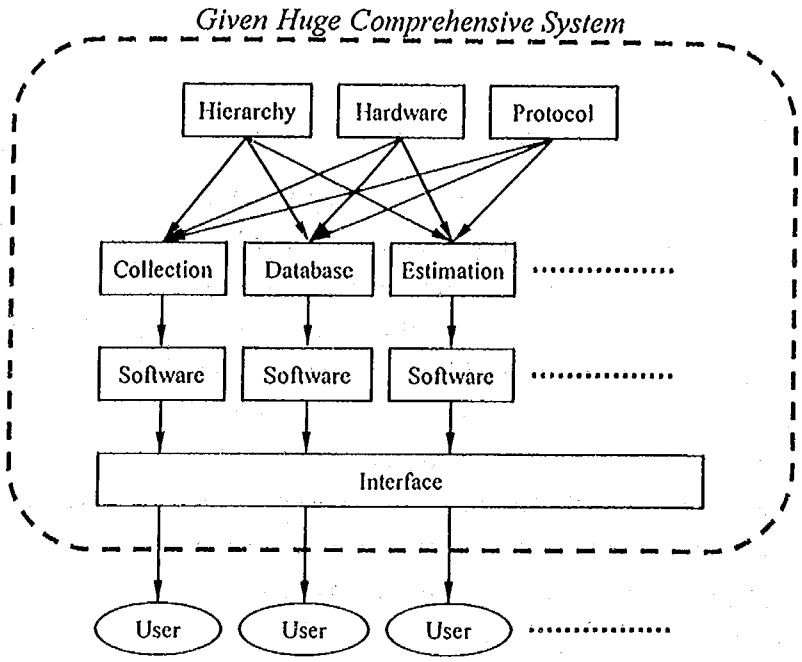


Figure 2.1 Top-down Approach

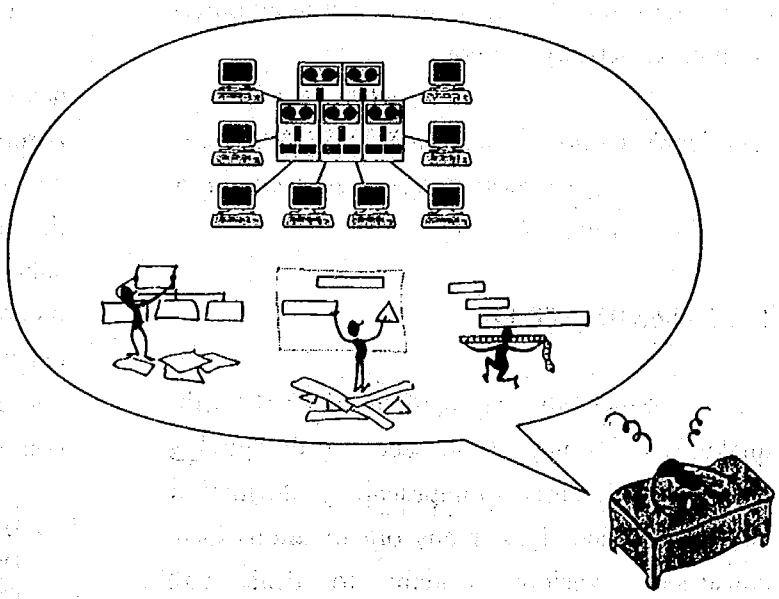


Figure 2.2 Disadvantage of Top-down

construction of information systems along with the recent development and diffusion of information network technologies, such as the internet. In the WWW, for example, each terminal freely constructs a server according to a minimum set of integrated rules including the TCP/IP protocol, and communicates information to many and unspecified clients. Such a state forms a contrast to the above top-down approach in terms of flexibility and possibilities of extension of each function of servers. This construction method is called the bottom-up approach.

With the bottom-up approach, it is possible to construct a database and run an application on one server as its administrator hopes. Other persons can use the same system by using a browser or other similar software. When the administrator needs a new function, he/she only either adds the desired function to the server or supplements a new server. In this situation, there is no need for considering other users. However, systems constructed with the bottom-up approach are inappropriate for systematic activities since servers usually use different functions and data independently.

2.3 Breakthrough

The top-down approach constructs systems that share data and functions but are not flexible or free. On the other hand, the bottom-up approach constructs systems that are easy to add new functions and to access but may not be using common data.

These two approaches are both extremes of system construction (or system formation). By integrating the advantages and characteristics of both, a new and more efficient method for constructing seismic information systems (SIS) may be developed. The ideas are summarized as follows:

1) It clarifies the minimum set of information

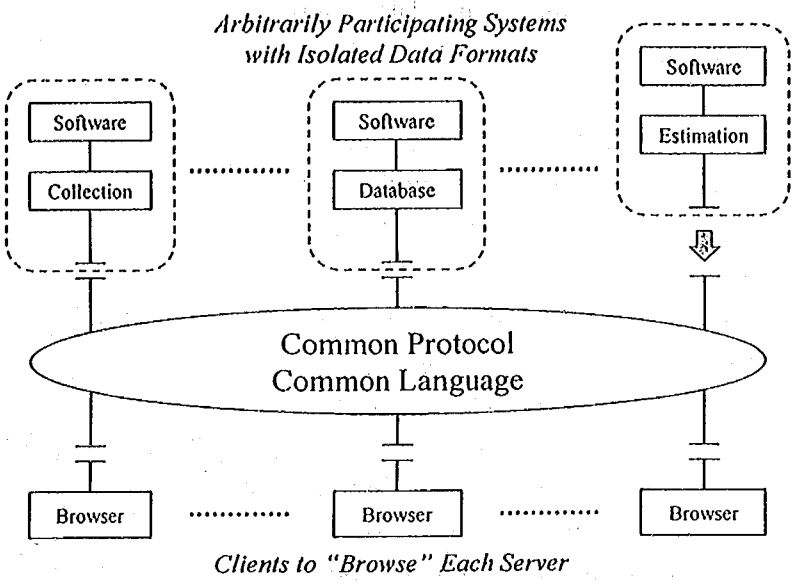


Figure 2.3 Bottom-up Approach

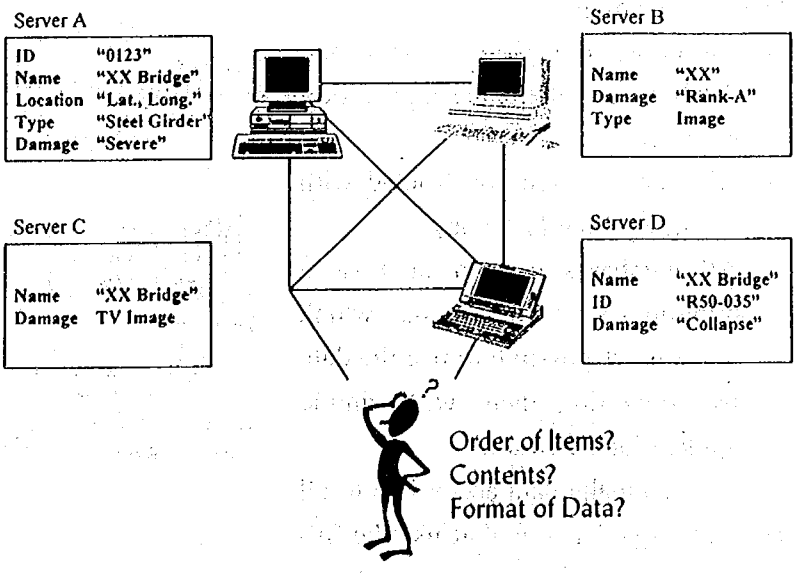


Figure 2.4 Disadvantage of Bottom-up

that is needed for each level of an organization. The information that is open to a level is also open to lower levels (*data sharing*).

2) All divisions that have acquired permission can operate or refer to outputs of SIS with shared data (*function sharing*).
3) A certain level of an organization can supplement its own data and function to the SIS (*system flexibility*).

To actualize these ideas, integrated methods should be developed and organized for sharing data and functions in different levels of an organization. The recent diffusion of network technologies has spread common protocols and software such as http and java applets. However, more precise data items and format definitions must be defined for using a large amount of data and functions needed for systematic counter-earthquake activities. The following alternatives may be adopted for sharing data and functions:

1) An entire organization uses one database and the same application software.
2) All databases are constructed with a single format (schema).
3) All databases contain at least a minimum set of data items, which make users possible to use the data by converting them with simple application software.

To make data accessible to all users, all organizations that use the SIS must clearly understand their duties concerning counter-earthquake measures and make lists of necessary information. Although such operations are labor consuming for the organizations, the initial cost in terms of money, time, and labor is sure to be well spent in constructing a more comprehensive, flexible, and organized system. Incidentally, Geographical Information Systems (GIS), which display collected data and

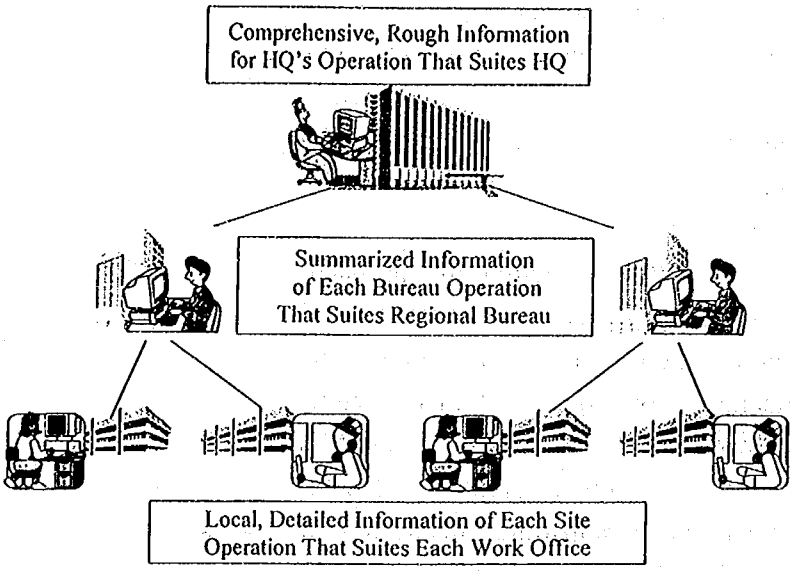


Figure 2.5 Data/Function Sharing

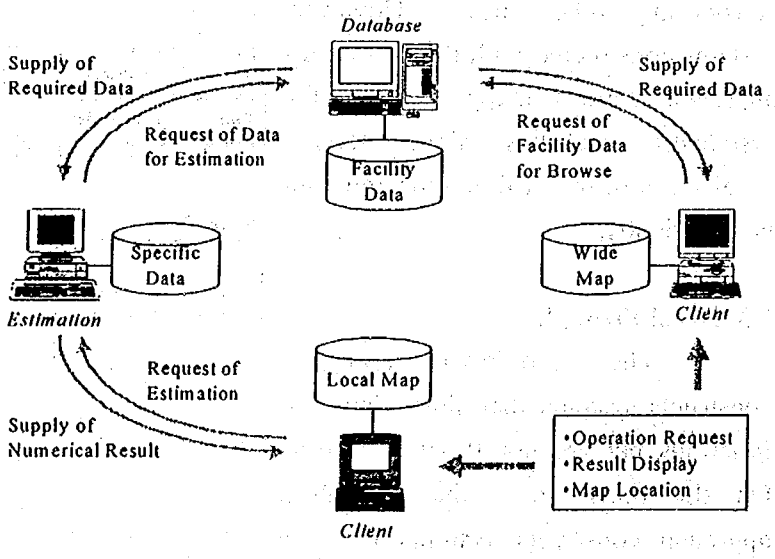


Figure 2.6 Breakthrough Technology

Table 2.1 A&D of Respective Approach

	Top-down	Bottom-up	Breakthrough
Development/Improvement Speed	slow	rapid	comparatively rapid
Possibility of Extension	small	large	comparatively large
Independence of Subsystems	Almost none	Almost independent	Independent under some control
Physical Cost in Development	Quite much	Small	Not much
Labor Cost	Large when studying manipulation	Responsibility of each server administrator	Initial coordination is required
Uniformity of Data	Secured	Difficult to establish	Secured when necessary
Systematic Development and use	Strict	Chaotic	Practical

estimations on maps, will be independent from the collecting and estimating procedures. In the approach introduced here, data interfaces can be jointly used even when GIS applications/data are different.

The advantages and the disadvantages are summarized on Table 2.1. According to this, strict coherence of the top-down approach, the incoherence of the bottom-up approach and the advantages of the proposed approach against others are clearly depicted.

3. FUNCTIONS, TECHNOLOGIES, AND APPLICATIONS OF SEISMIC INFORMATION SYSTEMS

3.1 Functions to be Included in Seismic Information Systems

This section summarizes functions to be included in SIS of organizations that administer civil infrastructures, such as the Ministry of Construction. The following functions are proposed to be included in SIS.

(a) Evaluation of counter-earthquake projects

SIS should help determine the priority of reinforcing projects, based on their influence over emergency activities and economic damage.

(b) Evaluation of counter-earthquake activity systems

SIS should help evaluate the speed and accuracy for collecting and communicating information of counter-earthquake activity systems.

(c) Monitoring, collection and estimation of earthquake data

SIS should collect characteristic values and wave data that are monitored and calculated by accelerographs and should estimate epicenters, etc.

(d) Support of anti-seismic activities

SIS should spontaneously inform of earthquakes, display manuals for emergency activities.

(e) Detection of facility damage

SIS should directly detect and communicate damage to public facilities by censors and so on.

(f) Real-time estimation of damage

SIS should quickly estimate the damage to facilities based on earthquake information and ground and structure data.

(g) Collection of inspection data

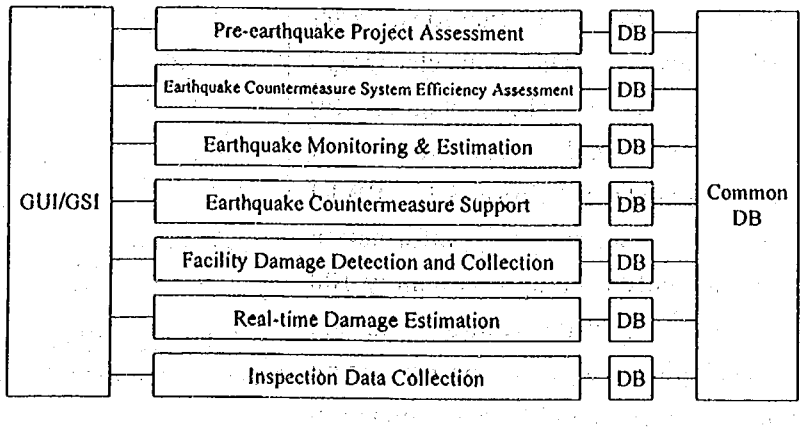


Figure 3.1 Functions of SIS

SIS should record and communicate actual inspection data collected at the sites.

(h) Display of maps, images, and animated pictures

SIS should have the interfaces to refer and input information appropriately.

(i) Communication of information (sound, images, animated pictures, and data)

SIS should transmit data through public and private telephone lines, facsimiles, internets, intranets, extranets, etc.

The following sections outline several technologies and systems that the Public Works Research Institute (PWRI) is developing. These functions, which are now independently studied, may be integrated into subsystems by coordinating data and by refining each function.

3.2 Accelerograph Network and Urgent Damage Estimation System

The Ministry of Construction has installed approximately 800 online accelerographs throughout Japan (accelerograph network) to help urgent inspection of its facilities, such as highways and river facilities, after earthquakes. This accelerograph network falls in the category (c) 'monitoring and collection of earthquake data' of Section 3.1. PWRI collects seismic information experimentally from approximately 100 accelerographs in the Kanto Area, and is developing a system for estimating liquefaction risks and bridge damage in this area. This system corresponds to the category (f) 'real-time estimation of damage.' Example displays of the system for maximum acceleration, estimated liquefaction risk, and estimated damage to facilities are shown in Figures 3.2 to 3.4. The system is also installed with a multiple-address device, which

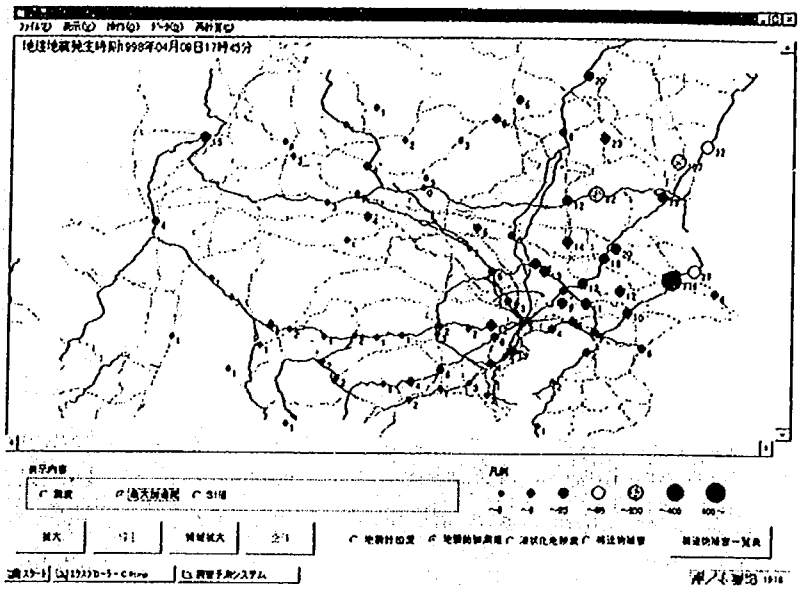


Figure 3.2 Estimation of Max. Acc.

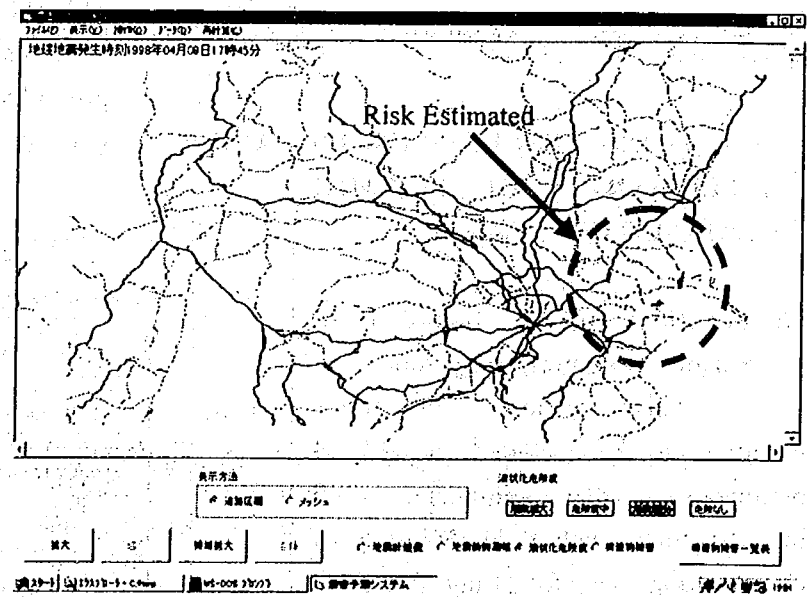


Figure 3.3 Estimation of Liquefaction Risk

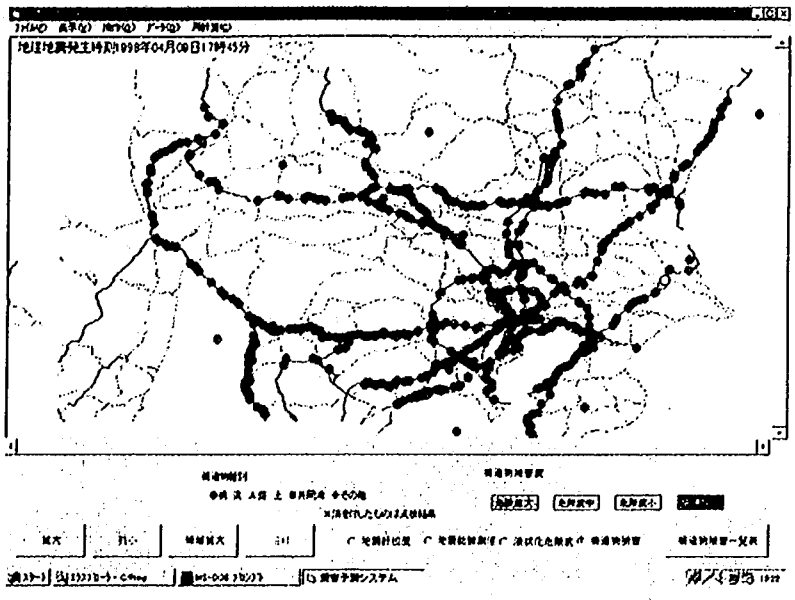


Figure 3.4 Estimation of Facility Damage

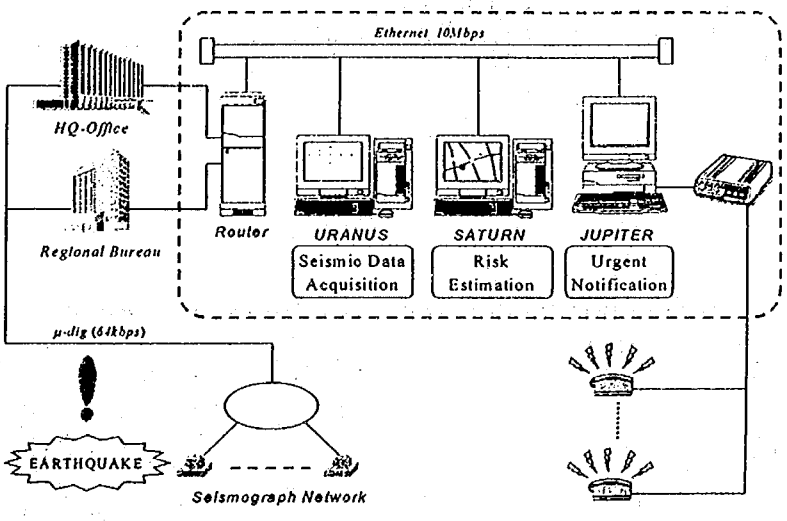


Figure 3.5 System Architecture

immediately and automatically dials all numbers registered when an earthquake occurs. This device corresponds to the category (d) 'support of anti-seismic activities.' A connection and operation diagram of the system is shown in Figure 3.5.

The characteristic values of earthquake motion (e.x., maximum acceleration and SI values) are transmitted from accelerographs immediately after the earthquake occurs and are recorded in files within a communication server. The urgent damage estimation system calculates liquefaction risks and facility damage levels based on these numerical files as well as ground

and facility information collected in advance. The system also contains map data and can display the collected seismic data and the results of calculation on maps.

3.3 Earthquake Assessment System for Socioeconomic Effect (EASSE)

The earthquake assessment system for socioeconomic effect (EASSE) calculates quantitatively the mid-term and long-term economic losses by damage to transportation facilities, such as highways and railways. The

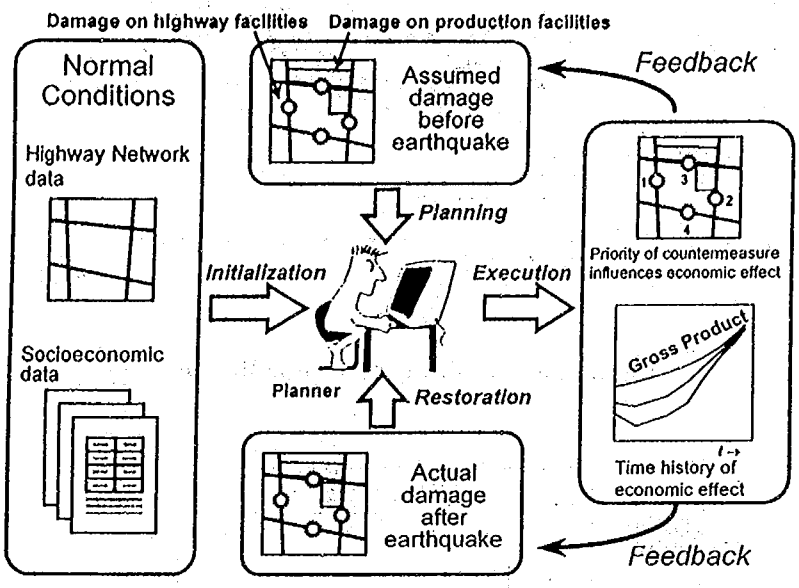


Figure 3.6 Idea of EASSE

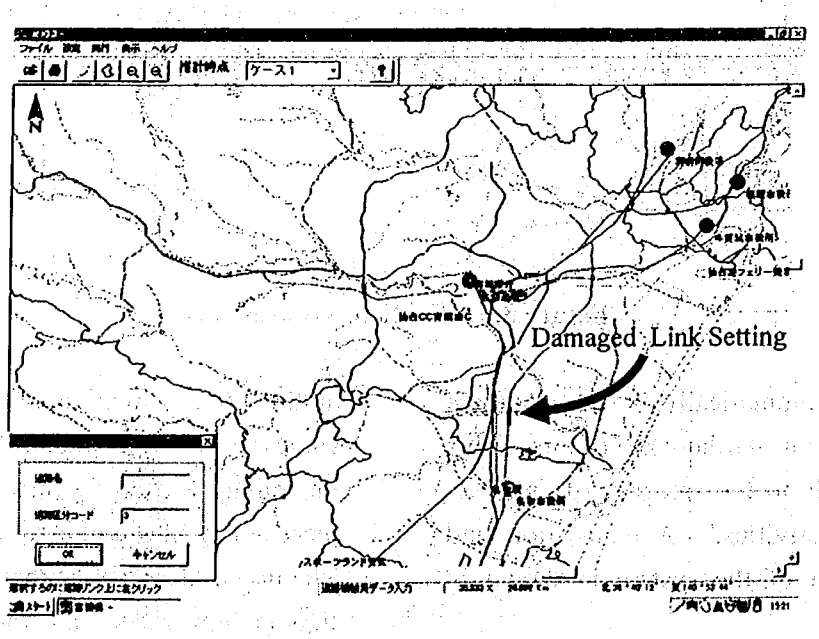


Figure 3.7 EASSE Display

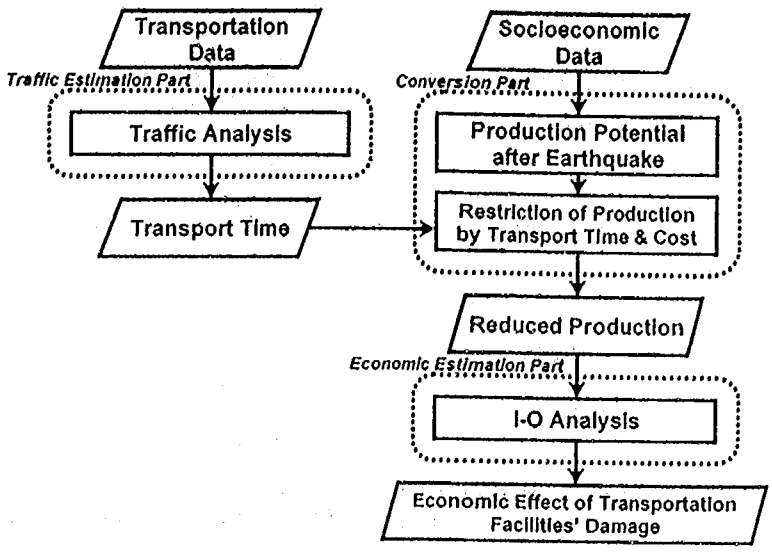


Figure 3.8 Module Structure of EASSE

PWRI has been developing a prototype for 3 years, from 1995 to 1997. As shown in Figure 3.6, this prototype system, which runs on a standalone PC, computes the drop in production due to damage to highway or railway sections input on a map display. Data for investigating reinforcement projects of transportation facilities in an area, such as the economic loss for each reinforcement pattern, are obtained simply by inputting damaged sections based on a hypothesized earthquake and reinforcement pattern. An example display for inputting damaged road sections and an output image are shown in Figure 3.7. EASSE, which falls in the category (a) 'evaluation of counter-earthquake projects,' may also be used for creating post-earthquake restoration projects. Since this system is now operating independently, it contains map data and also falls in the category (h) 'display of maps.'

For developing EASSE, the procedures necessary for estimation were converted into independent modules as shown Figure 3.8. The traffic estimation module calculates the increase in trip time by the earthquake based on highway-network data and socioeconomic data that are necessary for computing traffic demand. The conversion module calculates the drop in productivity in a target district from the results of the traffic estimation. The economic estimation module computes the effect of the drop in productivity in and out of the damaged district.

3.4 Seismic Performance of Highway Network

We should investigate if transportation facilities are able to serve satisfactorily even immediately after an earthquake. The seismic performance of the entire highway network should be studied to assure that no district is isolated by damage to highway sections and that disaster prevention activities are taken within a required period of time. PWRI is developing a system which calculates the degree of performance with which satisfactory prevention activities can be taken. The institute is also investigating a method for expressing the

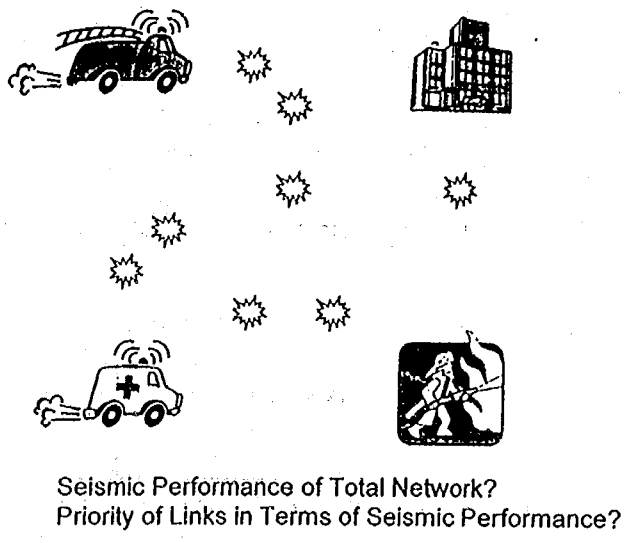


Figure 3.9 Network Seismic Performance

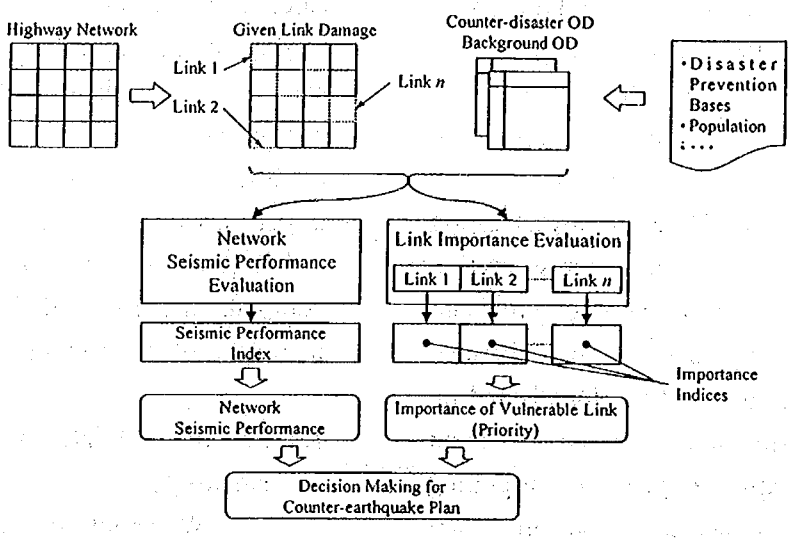


Figure 3.10 Flow of Calculation

importance of a damaged section quantitatively. Like EASSE, this system corresponds to the category (a) 'evaluation of anti-seismic projects.'

This system evaluates the seismic performance of the entire network and the importance of damaged sections when an earthquake disconnects the link of the network. The seismic performance of the network is calculated by computing the sum of disaster prevention activities' effects, which are determined based on the trip times of traffics in the network after the earthquake. A method is also investigated for calculating importance indices of network sections using the network seismic performance indices above.

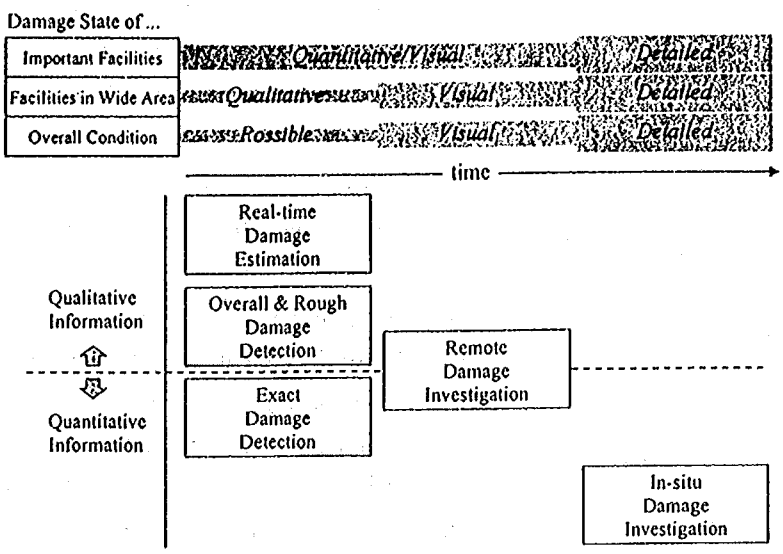


Figure 3.11 Combination of Damage Detecting Method

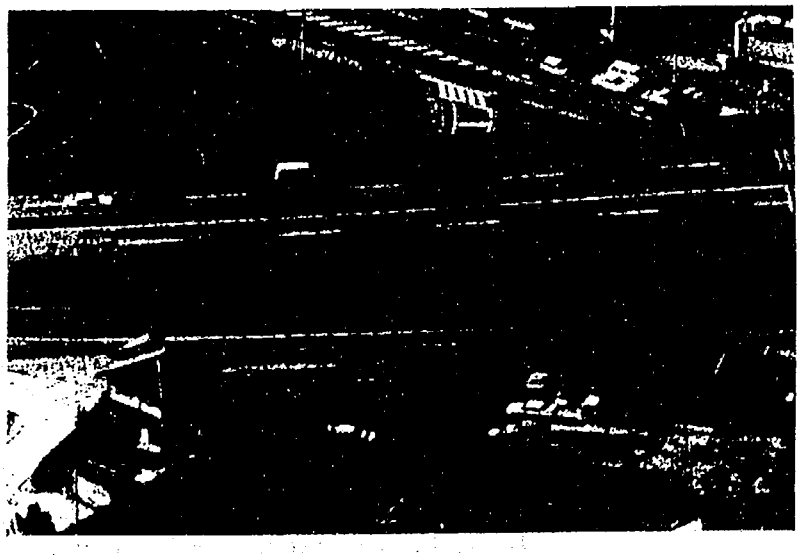


Figure 3.12 Example Image From Helicopter

3.5 Other Subsystems for SIS

Besides the subsystems' technologies and methods above, several other issues are studied which can be parts of SIS. Those include (1) earthquake damage detection technologies and (2) counter-earthquake activity system performance evaluation method.

The first one includes various technologies to detect the damage to infrastructures by utilizing sensors attached to them and remote sensing technologies. Some sensors such as laser distance meter can detect phenomena precisely, but they are expensive, while other sensors as wire cutting sensor are inexpensive and give only rough information of possible damage. Important facilities such as large bridges need to be watched carefully by sophisticated sensors. On the other hand, most of the facilities that stretch over wide area are enough to be observed roughly to detect possible damage. As for the remote sensing technologies, animated images taken from a helicopter and pictures sent from the investigation team directly are useful and important information to examine the restoration/rehabilitation strategies. Images from satellites are useful if they can be obtained immediately after the earthquake. Taking the these ideas into account, a menu for utilizing the damage detection sensors from the point of view of the cost, exactness and speed is studied as a guideline by PWRI.

Another useful method is that to evaluate the performance of a counter-earthquake activity system in terms of the rapidity and the preciseness to cumulate the damage information. In this method, all the personnel and equipment are expressed as abstract "gates" which transform the data from input and send to output. In the method, the information is defined as a combination of the

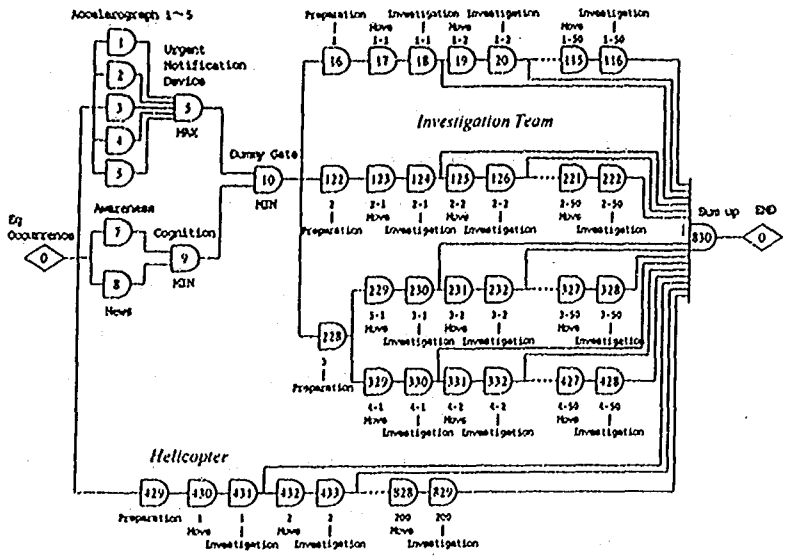


Figure 3.13 Network Expression of Counter-earthquake Activity System

time and the information quantity: i.e., (t, I). By defining the gates for all the entities in the system, and by connecting them with each other, the counter-earthquake activity system is expressed as an abstract network system. Analyzer can obtain the cumulating pattern of the information quantity and examine the performance of the system quantitatively. This also helps him/her to determine the bottle neck and the weak point part in the system.

4. CONCLUSION

The conventional SISs of the Ministry of Construction and most of other seismic systems under development are independent and do not share databases or map data. As described in Section 3.3, data should be shared and functions should be separated according to a minimum set of defined rules to create efficient and flexible systems. The methods for operating SIS must be familiar to the system staff since they must quickly treat an enormous amount of information after an earthquake. Using SIS in the normal conditions can improve the familiarity of the stuff. Rules concerning seismic information systems, common databases, and the development of independent functions are also helpful for the systems and functions used in the normal condition. By applying these concepts, we can construct a comprehensive system that is easy to use during both normal and earthquake times and to enlarge when necessary.

Because the idea introduced here includes comprehensive systematic regulation, it cannot be applied only by parts of organization, say, two or three work offices or regional bureaus. To realize the concepts here some adequate promotion system to coordinate all the organization must be established.

REFERNCES

1) Kazuhiko KAWASHIMA, Kenichi TOKIDA Hideki SUGITA, Tomofu NAKAJIMA, Hideo MATSUMOTO, "*Guidelines for Disaster Information Systems for Important Infra-structures*", Proceedings of the 25th Joint Meeting of U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, May 1993
2) SUGITA Hideki, HAMADA Tadashi, "*Development of Real-time Earthquake Damage Estimation System for Road Facilities*", Seventh U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, Nov. 1997
3) NOZAKI Tomofumi, SUGITA Hideki, "*System to Assess Socio-economic Effect of Earthquake Disaster*", Seventh U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, Nov. 1997
4) "*Real-time Earthquake Damage Estimation System for Road Facilities*", PWRI Newsletter No. 71, Jan. 1998
5) "*Earthquake Assessment System for Socioeconomic Effects (EASSE)*", PWRI Newsletter No. 67, Jan. 1997
6) Shun-etsu ODAGIRI, Hideki SUGITA et al, "*Development of Real-time Seismic Information System for MOC*", Proceedings of the 29th Joint Meeting of U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, May 1997

Table 1.1 Example of SISs developed in Japan

Sytem Name	Organization	Monitoring	Damage Estimation	Emergency Response	Activity Support	Inputs	Notes
Disaster Information System	National Land Agency		O		O	JMA Seismographs	DIS
Rial-time Earthquake Damage Estimation System	Ministry of Construction	O	O			Seismograph	SATURN
Strong Motion Observation Network	Natl. Research Inst. for Earth Science and Disaster Prevention, Science and Technology Agency	O				Seismograph	K-net (Kyoshin-net)
Strong Motion Observation Network	Japan Meteorology Agency	O				Seismograph	
Seismic Intensity Observation Network	Fire-Defense Agency	O				Seismograph for Seismic Intensity	
Simple Earthquake Disaster Estimation System	Fire-Defense Agency		O			Seismic Conditions	
Seismograph Information System	Hokkaido Dev. Bureau	O				Seismograph	WISE
Earthquake Disaster Estimation System	Tokyo Fire Department	O	O			Seismograph	
Earthquake Disaster Countermeasure Support System	Kawasaki City	O	O		O	Seismograph	
Dense Array Strong Motion Monitoring Network	Yokohama City	O				Seismograph	
Seismograph Network	Tokyo Metro. Government	O				Seismograph	
Phonics Disaster Prevention System	Hyogo Prefecture	O	O		O	Seismograph	
Yokohama-city Disaster Prevention Information System	Yokohama City	O				Other Systems	
Disaster Image Transmitting System	Yokohama City	O				TV Camera	
UrEDAS/HERAS	Japan Railway	O	O	O		Seismograph	
Seismograph Network	Japan Highway Public Corporation	O				Seismograph	
Seismic Information Gathering and Network Alert System	Tokyo Gas	O	O	O		Seismograph, SI sensor, Liquefaction sensor	SIGNAL

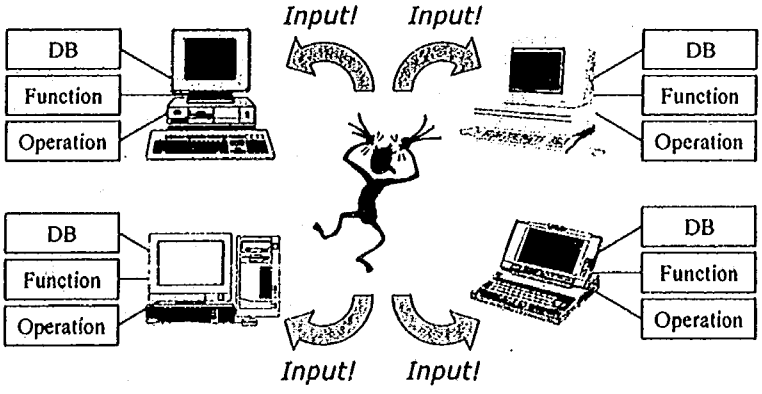


Figure 1.1 Isolated SISs

第7回ライフライン施設の災害防止に関するワークショップ（1997.11.4～7、Seattle,Washington,U.S.A.）

DEVELOPMENT OF REAL-TIME EARTHQUAKE DAMAGE ESTIMATION SYSTEM FOR ROAD FACILITIES

DEVELOPMENT OF REAL-TIME EARTHQUAKE DAMAGE ESTIMATION SYSTEM FOR ROAD FACILITIES

by

Hideki SUGITA[1] and Tadashi HAMADA[2]

1) Head, Earthquake Disaster Prevention Technology Div., Earthquake Disaster Prevention Research Center, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Tsukuba, Japan
2) Research Engineer, ditto

ABSTRACT

Earthquake damage of road facilities does not only reduce their functions but affects the socio-economic activities in and around the damaged area. Therefore, besides improving the seismic performance of road facilities, post-earthquake emergency activities to reduce the damage effects must be jointly promoted.

This paper presents a Real-time Earthquake Damage Estimation System for Road Facilities, which is developed at Public Works Research Institute, Ministry of Construction. By providing rough estimation on damage states and damage distributions in a short time, the system will support decision-makers to facilitate emergency actions immediately after earthquakes.

Key Words: Real-time Information System, Emergency Activity, Damage Estimation, Ground Liquefaction, and Highway Bridge

INTRODUCTION

Emergency activities at sections that are in charge of road facilities can be classified into four stages[1]; i.e. assuming magnitude of the earthquake, grasping a damage outline in a whole affected area, conducting temporary repair works to secure transportation functions and conducting permanent restorations. To establish a scope of works for a series of emergency activities, it is quite important to conduct the second stage of grasping a damage outline as fast as possible.

1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake was a first destructive earthquake attacked a highly integrated urban area in Japan[2]. Based on that disaster experience, following difficulties were pointed out for grasping a damage outline;

1) Much time was required for setting-up damage inspection teams,
2) Much time was required for investigations of widely spread severe damages, and
3) Adequate amount of damage information was not assembled at the headquarter due to disruptions/ congestion of telecommunication lines.

Table 1 shows the required time for grasping damage outline at the headquarter. The table also describes the time required in 1994 Sanriku Haruka-oki Earthquake, in which severe damage was not developed on road facilities. For promoting a series of emergency activities against a destructive

event, quick decision-making is indispensable in spite of the difficulty of assembling damage information. Applications of information systems to support the decision-making of sectors are therefore considered to be essential.

Table 1 Required Time for Grasping Damage Outline at Headquarter

	Hyogo-ken Nanbu EQ (1995)*	Sanriku Haruka-oki EQ (1994)**
EQ Occurrence	05:46 1/17	21:19 12/28
Damage Inspection	08:00 – 8:00 1/18	21:50 – 23:22
Time Period for Grasping	Approx. 24 hours	Approx. 30 minutes

* : Kinki Regional Construction Bureau
** : Hokuriku Regional Construction Bureau

REAL-TIME DAMAGE ESTIMATION SYSTEM

1.Scope of Work

Based on the past disaster experiences, development of information systems to support emergency activities has been conducted in PWRI[3),4)]. The Real-time Damage Estimation System is developed as a major system component for grasping damage outline automatically immediately after an earthquake by providing rough estimations on damage states and damage distributions of road facilities.

Fundamental policies for developing the system are as follows;
1) Ground liquefaction state and bridge damage state are to be estimated in the system,
2) Damage estimation is to be conducted by a combination of pre-stored ground/ structural condition database and real-timely observed earthquake ground motion data,
3) Damage estimation is to be completed within 15 min., by that time emergency investigation team can be set-up, and
4) Estimated information is to be visually displayed on the CRT using digital maps.

Implementation of the system is considered to be effective in the following aspects;
1) Severely damaged area can be assumed in a short time. Damage inspections can be effectively engaged by a restricted amount of inspectors,
2) Damage outline can be understood smoothly based on damage inspections, and
3) Decision-making on the buck-up organization and stuffs/ devices management can be initiated from the early period of emergency responses.

2. System Configuration

Fig.1 show a system configuration of the Real-time Damage Estimation System. The system works by fabricating three major components; i.e. 1) Seismograph Network, 2) Microwave Communication Network, and 3) Engineering Workstation.

1) Seismograph Network

The Ministry of Construction initiated construction of Seismograph Network in 1995. Approximately 700 strong motion seismographs are to be installed along highways and rivers with an interval of 20-40 km. Ground motion data can be transmitted real-timely to the headquarter and

sectors in charge of emergency activities.

2) Microwave Communication Network

The Microwave Communication Network connects headquarter and sectors in Ministry of Construction. Maximum acceleration values, seismic intensity values and equivalent JMA (Japan Meteorological Agency) SI values observed by each seismograph can be transmitted to these offices simultaneously.

3) Engineering Workstation

Damage estimation is performed by an Engineering Workstation implemented at headquarter and sectors. Ground/ structural condition database has to be installed prior to earthquakes. Transmitted ground motion data can be assembled by the WS. Estimated damage can be displayed using GIS software.

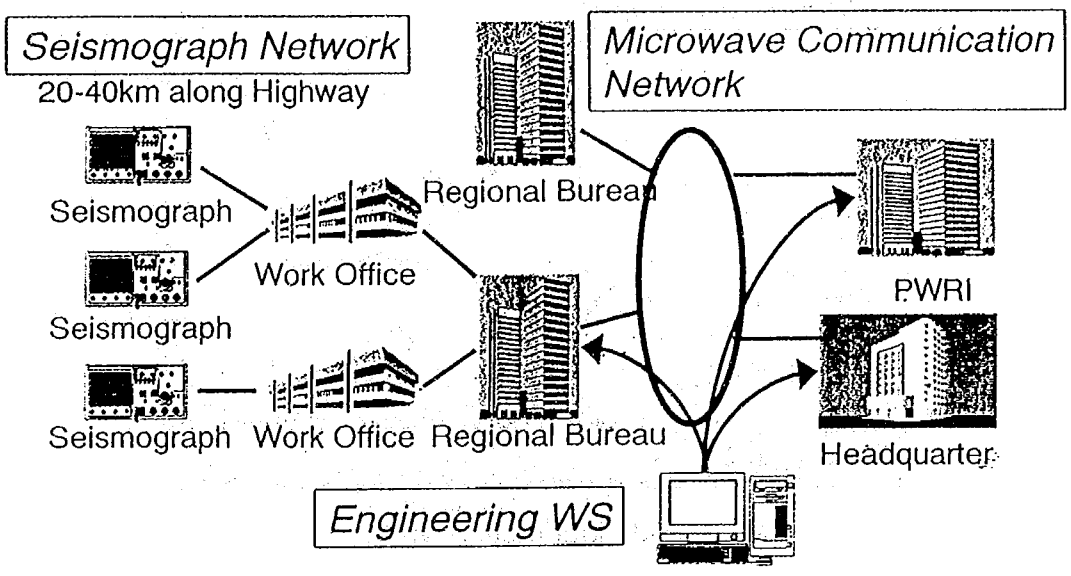
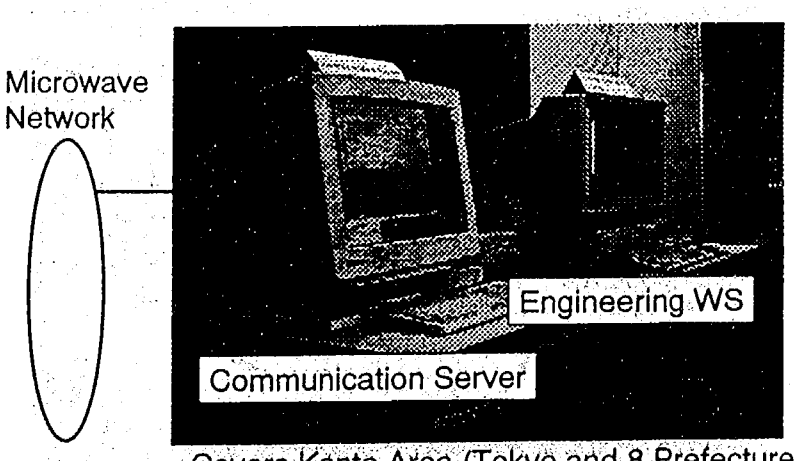


Fig.1 System Configuration of Real-time Damage Estimation System



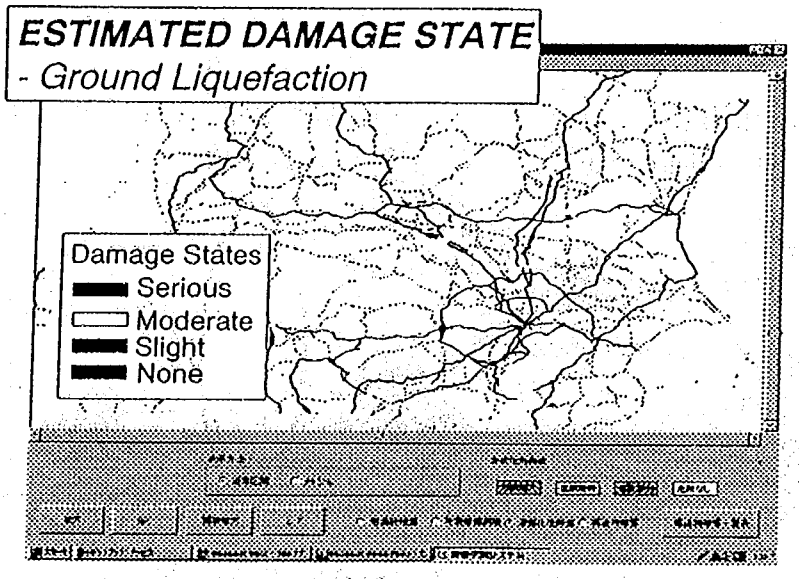
- Covers Kanto Area (Tokyo and 8 Prefectures)
- Liquefaction (6,028 Highway Sites)
- Bridge Damage (368 Bridges)

Photo 1 Hardware Configuration of Prototype System

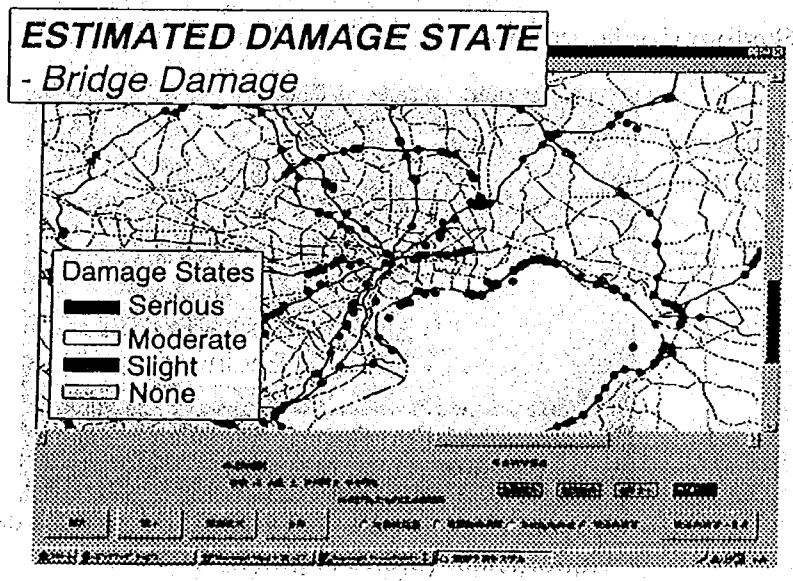
3. Prototype System

Photo 1 shows the hardware configuration of a prototype system. The system, which does not cover whole Japan but Kanto region (Tokyo and other 8 prefectures), is scheduled to be set-up at the Kanto Regional Construction Bureau of MOC in 1997.

Fig.2 Shows the estimated ground liquefaction states and bridge damage states by the prototype system. Rough estimation of ground liquefaction states (at 6,028 highway sites) and bridge damage states (368 highway bridges) is available at this time. Maximum acceleration values and SI values



(a)Ground Liquefaction States



(b)Bridge Damage States

Fig.2 Estimated Damage States by Prototype System

(designated hereinafter as ground motion characteristic values) observed by 100 seismographs installed in the Kanto region is adopted for the estimation.

ESTIMATION OF DAMAGE STATES

1. Flowchart of Estimation

Damage estimation is performed through three steps as shown in Fig.3. Fundamental policies of each estimation steps are as follows;

1) Estimation of Ground Motion Characteristic Values
For the judgement of ground liquefaction states and bridge damage states, ground motion characteristic values at the very site where the judgement is to be performed (designated hereinafter as a judgement site) are required. Because the locations of observation sites are different from judgement sites, ground motion characteristic values have to be estimated analytically.

2) Estimation of Ground Liquefaction States along Highways
Ground liquefaction states are judged in each divided highway section. Division of highway sections is carried out so that the ground condition is assumed to be uniform in each section. Judgement of ground liquefaction states can be performed based on a P_L value evaluated in each highway section. The P_L value can be evaluated by eq.(1), where a liquefaction resistant ratio F_L[5] can be evaluated by a ground condition and an estimated maximum acceleration value in each highway section.

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x)dx \cdots\cdots\cdots (1)$$

$$F_L = R / L$$

where,

x	: Depth from the surface (m)
FL	: Liquefaction resistant ratio
PL	: Potential of liquefaction
R	: Dynamic shear strength ratio
L	: Shear stress ratio during an earthquake

3) Estimation of Bridge Damage States
Judgement of bridge damage states is performed individually based on the structural database. As the structural database, bridge maintenance data accumulated at sectors are adopted in this estimation. Damage states of whole bridge can be judged by comparing damage states of major bridge components. Damage states of major bridge components can be judged by the SI value estimated at the judgement site. By using the SI value, it is possible to consider the cyclic effect of ground motion to bridges. The SI value can be evaluated by eq.(2), where S_{vi} means the i (sec) component of velocity response spectrum.

$$SI = \frac{1}{2.5} \sum_{i=0.1}^{2.5} S_{vi} \cdots\cdots\cdots (2)$$

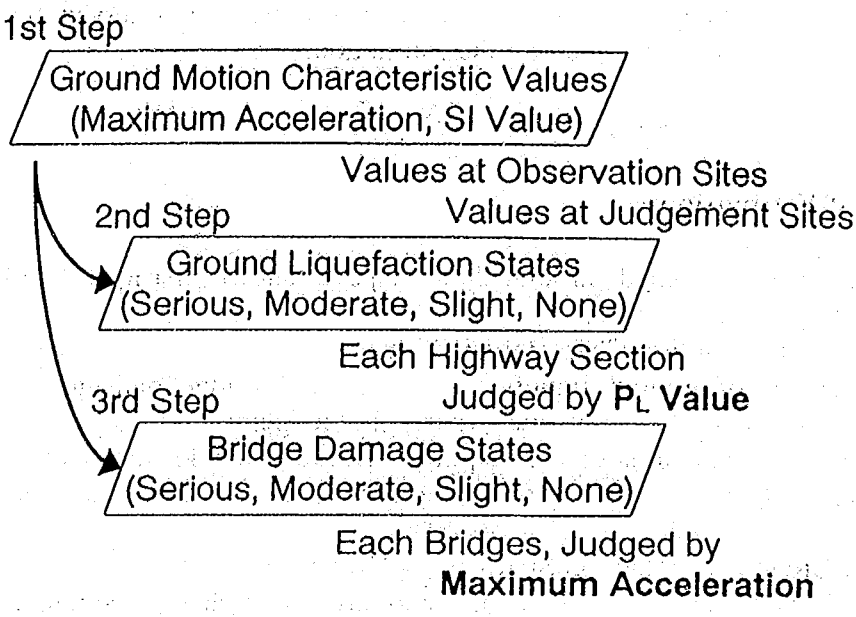


Fig.3 Flowchart of Damage Estimation

2. Classification of Damage States

Estimated ground liquefaction states and bridge damage states are displayed in four categories of "Serious", "Moderate", "Slight" and "None". Although there are other quantitative ways to display the estimated states using probabilities (%), qualitative four categories are adopted in the system. This is because; 1) qualitative expression is more understandable for decision-makers, 2) estimation accuracy is not enough for the quantitative expression, and 3) time period for the estimation can be reduced by the qualitative expression.

Table 2 shows the definitions of each category. Categories were defined as a combination of an assumed loss of transportation functions and a necessity of emergency repair works.

Table 2 Categories of Damage States

Damage States	Function Loss of Transportation	Required Activities
Serious	Interruption for **Weeks**	**Restoration**
Moderate	Interruption/ Restriction for **Days**	**Temporary Repair**
Slight	Restriction for **Hours**	**Temporary Repair**
None	No Restriction	None

3. Estimation of ground motion Characteristic Values

3.1 procedures

Fig.4 shows the estimation steps of ground motion characteristic values at judgement sites. Although a 3-D dynamic response analysis of ground model with a real-timely observed input ground motion is desirable, following simplified procedure was adopted in this system for minimizing the estimation time period with enough accuracy.

1) Ground motion characteristic values at the engineering bedrock: A characteristic value right under a observation site can be estimated by assuming a ground response amplification ratio.
2) Interpolation at the engineering bedrock: A characteristic value right under a judgement site can be estimated by an interpolation.
3) Ground motion characteristic values at judgement sites: a characteristic value can be estimated by assuming a ground response amplification ratio.

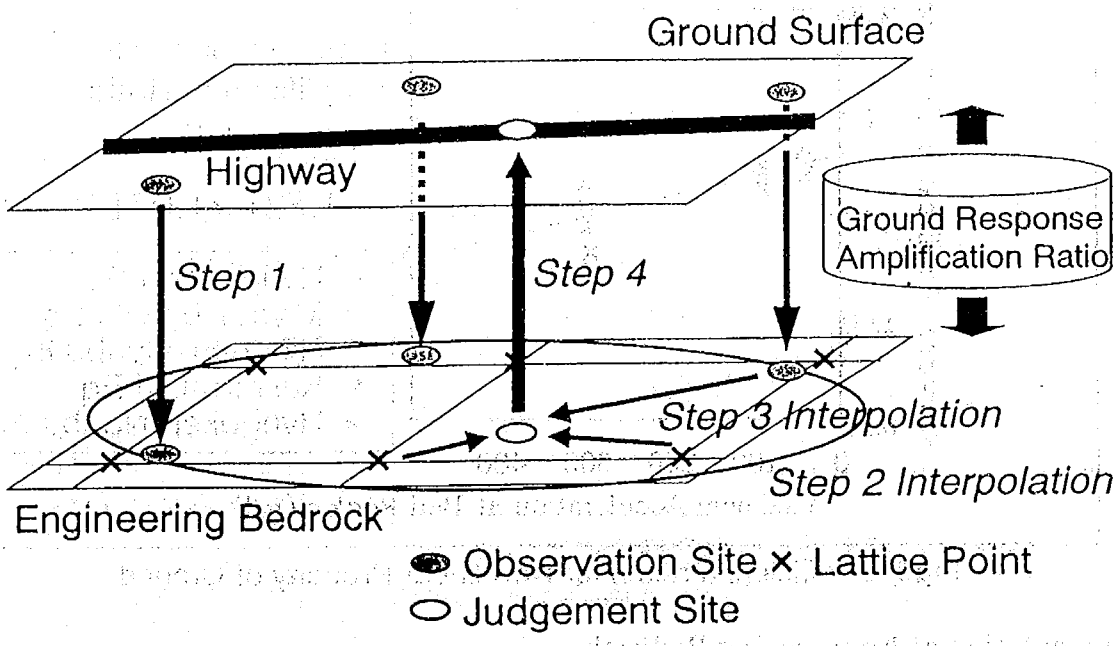


Fig.4 Estimation Steps of Ground Motion Characteristic Values

3.2 Ground Response Amplification Ratio

The ground response amplification ratio varies according to the cyclic characteristics of ground motions and non-linear property of ground. The amplification ratio is, therefore, desirable to be assumed for each observed ground motion. But because the seismograph network does not transmit a time history of ground motion, a standard amplification ratio was calculated in advance by a standard time history observed in the past earthquake. Calculation of the standard amplification ratio was carried out by the "SHAKE" for each observation/ judgement site.

The Kaihoku Bridge record detected in 1978 Miyagiken-oki Earthquake was adopted as a standard time history because it provided the most average amplification ratio in trial calculations using five

other typical records observed during past earthquakes. The non-linear property of ground can also be considered by eq.(3).

$$\alpha = a \times b^{-x} \cdots\cdots\cdots (3)$$

where, α :Ground response amplification ratio for each observation/ judgement site
x :Maximum acceleration value (SI value) at engineering bedrock
a, b :Coefficients which represent the non-linear property of ground

Fig.5 shows an example of fixing the coefficients a and b. These coefficients were determined by a regression analysis of amplification ratios. Four input ground motions obtained by adjusting the maximum acceleration value of the Kaihoku Bridge record to 50, 100, 300 and 500 gals were adapted to the analysis.

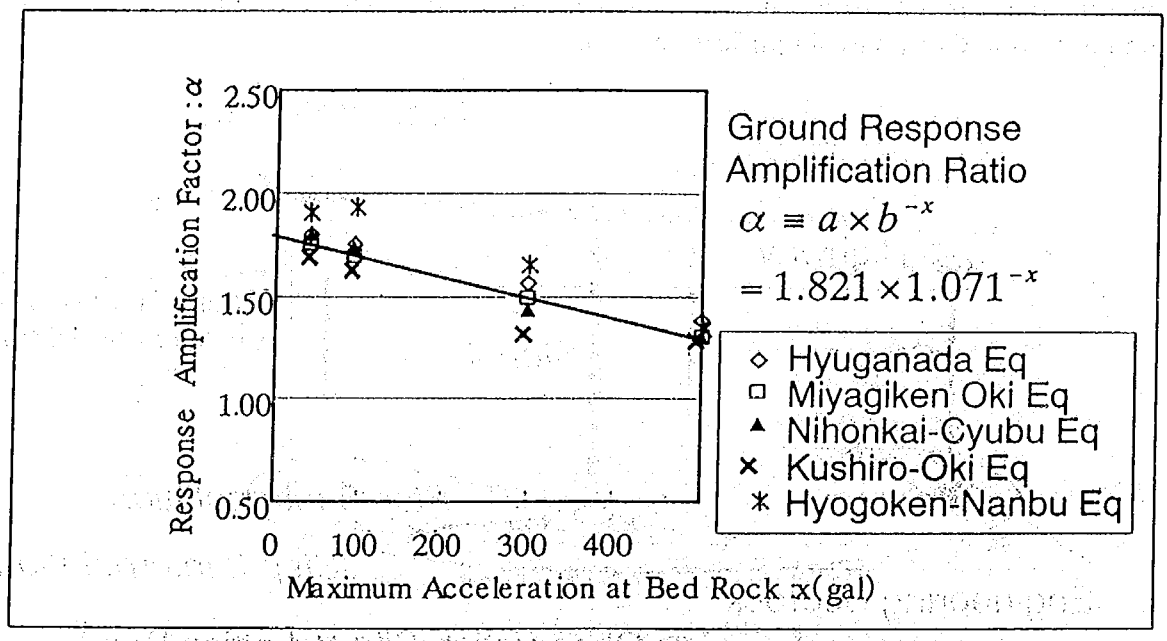


Fig.5 Coefficient a and b for Non-linear Property of Ground

3.3 Interpolation at Engineering Bedrock

Fig.6 shows an image of the interpolation at the engineering bedrock. Ground Motion Characteristic values right under judgement sites can be estimated by the following steps;

1) Dividing a whole region into 10m*10m square sections,
2) Definition of a co-ordinate system, in which system (x, y) represents the horizontal location of each observation site, and z-axis represents the ground motion characteristic value,
3) Definition of a curve surface which includes characteristic values of all observation sites,
4) Estimating characteristic values at each lattice point using the curve surface,
5) Estimating characteristic values at each judgement site by weighting the distance from closest four lattice points.

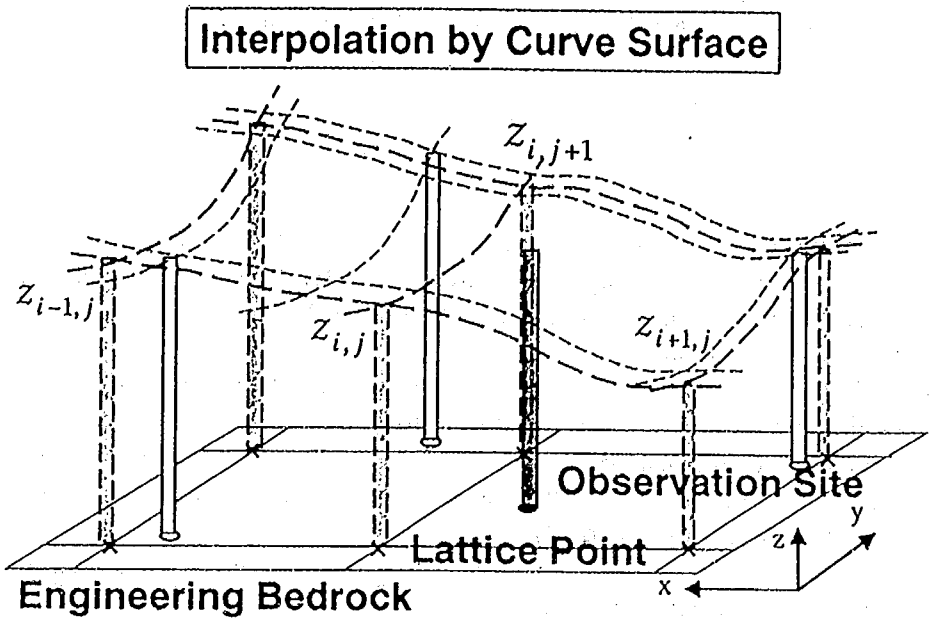


Fig.6 Interpolation at Engineering Bedrock

The highlight of this procedure is a definition of a curve surface. Because a curve surface is defined for the whole region, the characteristic value at each lattice point can be surely estimated. The characteristic value at each judgement point can be surely estimated if characteristic values at some observation sites could not be obtained by accidents.

4. Estimation of Ground Liquefaction States along Highways

4.1 P_L~Ground Liquefaction States Matrix

Table 3 shows a P_L~Ground Liquefaction States Matrix. Ground liquefaction states can be judged with the Matrix by P_L value that is estimated for each highway sections. The Matrix was developed based on a series of experimental studies of past earthquake disasters in PWRI. By modifying the Matrix in accordance with the future research development, judgement accuracy of ground liquefaction states can be easily upgraded.

Table 3 PL~Ground Liquefaction States Matrix

Ground Liquefaction States	Serious	Moderate	Slight	None
P_L Value	------	$P_L>15$	$15\geqq P_L>5$	$5\geqq P_L$

The P_L value for the Damage State "Serious" was not set-up in the Matrix. This is because ground liquefaction is hardly considered to induce serious damages to road facilities that would interrupt the transportation for a long time period.

4.2 Procedures

Fig.7 shows the estimation steps of a ground liquefaction state at each highway section. The highlight of this procedure is a setting-up of maximum acceleration levels for each damage state as judgement indices. By setting-up the judgement indices prior to an earthquake, time period required for the judgement can be much reduced.

1) Calculation of a dynamic shear strength ratio R: R ratios, which is defined in eq.(1), for each soil layer can be calculated with pre-stored ground condition database.
2) Setting-up of judgement indices: P_L values for each Damage State "Serious", "Moderate" and "Slight" can be determined by **Table 3**. Maximum acceleration levels for each P_L value can be set-up at each highway section by eq.(2).
3) Judgement of damage states: By comparing the estimated maximum acceleration value with the maximum acceleration levels, judgement of damage state can be performed.

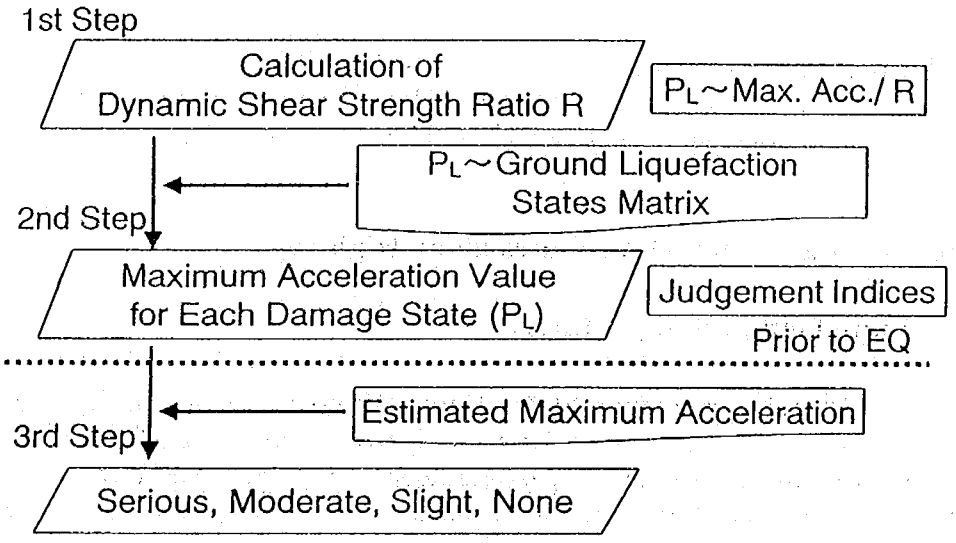


Fig.7 Estimation Steps of Ground Liquefaction States

5. Estimation of Bridge Damage States

5.1 SI Value~Bridge Component Damage States Matrix

Table 4 shows the SI Value~Bridge Component Damage Matrix. Damage States of the major bridge components can be judged with the Matrix by SI value that is estimated for each highway section including a bridge site. As the Damage States of major bridge components, following five states were selected due to their large effects on a whole bridge system, i.e. 1) Bending failure of RC column, 2) Shear failure of RC column, 3) Buckling of ST column, 4) Failure of bearing and 5)

Movement of foundation due to the liquefaction-induced ground flow.

Table 4 SI Value~Bridge Component Damage States Matrix

Damage States of Component	Damage States of Bridge			
	Serious	Moderate	Slight	None
Bending Failure of RC Column	Ultimate	Before Ultimate	Yielding	Before Yielding
Shear Failure of RC Column	Failure	Before Failure	Shear Cracking	Before Cracking
Buckling of ST Column	Buckling	Before Buckling	Slight Deformation	Before Deformation
Failure of Bearing	Failure	Damage (tall one)	Damage (short one)	Slight Damage
Movement of Foundation	--------	Large Displacement	Small Displacement	Slight Displacement

The Matrix was developed based on both a series of experimental studies and dynamic response analyses in PWRI. Basic concepts for the judgement of damage states are as follows;

1) Bending failure of RC column:
   Relationships between SI value and damage states were set-up for several column types. Relationships were determined by the dynamic response analyses on approximately 400 columns. Column types were classified by structural specifications such as section size and weight. Damage states for each column type can be judged by the SI value.
2) Shear failure of RC column:
   By a combination of h/D value and design year, a possibility of shear failure to be developed prior to the bending failure is estimated. h/D value is a ratio of a column height against a section size. Damage states can be judged by the SI value based on a series of experimental studies of past earthquake disasters.
3) Buckling of ST column:
   A possibility of buckling is estimated by design year. Damage states can be judged experimentally by the SI value.
4) Failure of bearing:
   A possibility of failure is estimated experimentally by the SI value. Because a failure of bearing induces a gap of road surface, the damage states are to be judged by the bearing height.
5) Movement of foundation due to lateral ground spread:
   Verifying the distance between foundation sites and water lines, a possibility of the liquefaction-induced ground flow is estimated. Damage states can be judged by a combination of the distance and a ground liquefaction state.

5.2 Bridge Component Damage States~Bridge Damage States Matrix

Table 5 shows a Bridge Component Damage States~Bridge Damage States Matrix. The Damage State of a whole bridge system can be judged by comparing the damage states of major bridge components, i.e. the maximum damage state among those of major bridge components represents the

damage state of a whole bridge system.

Table 5 Bridge Component Damage States Matrix~Bridge Damage States Matrix

Bending Failure of RC Column

Design Code	Yield Seismic Coefficient	Damage States of Component			
		Ultimate	Before Ultimate	Yielding	Before Yielding
1979	----------	SI>50	SI>30	SI>10	10≧SI
1990	----------	SI>50	SI>30	SI>10	10≧SI
1995	$0.6>k_{hy}$	SI>50	----------	----------	50≧SI
	$k_{hy}\geqq 0.6$	SI>100	SI>50	----------	50≧SI

5.3 Procedures

Fig.8 shows the estimation steps of the damage states for each bridge. The highlights of this procedure are; 1) setting-up of SI value levels for each damage state as judgement indices, 2) verifying a bridge component that represents the damage state of a whole bridge system. By these pre-earthquake works, time period required for the judgement can be much reduced.

1) Setting-up of judgement indices for each major bridge component: SI value levels for each Damage State "Serious", "Moderate" and "Slight" can be determined by **Table 5**.
2) Setting-up of judgement indices for a whole bridge system: SI value levels for each Damage State can be determined by verifying a minimum SI value level among those of major components.

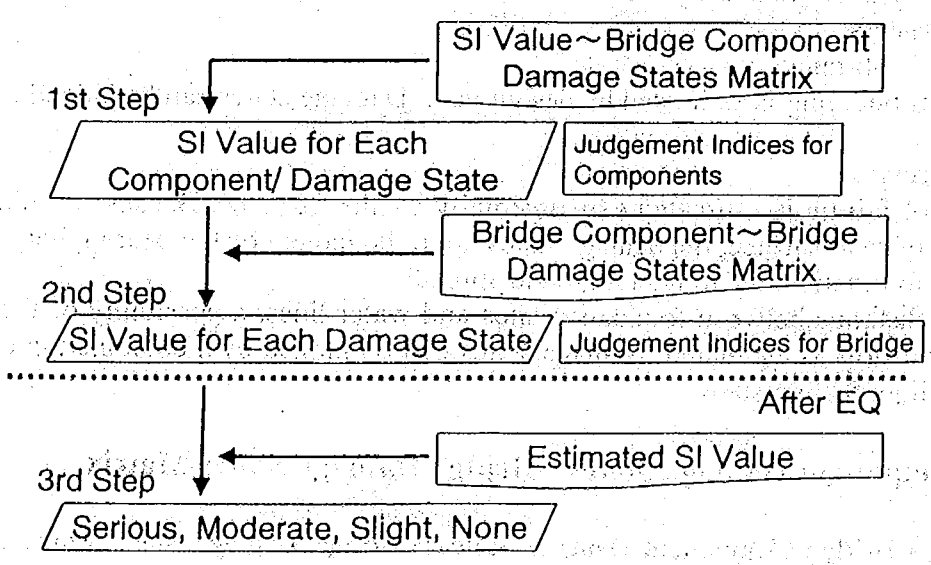


Fig.8 Estimation Steps of Bridge Damage States

3) Judgement of damage state: By comparing the estimated SI value with the SI value levels, judgement of damage state can be performed.

CONCLUSIONS

The Real-time Earthquake Damage Estimation System for Road Facilities was introduced. By providing rough estimations on damage states and damage distributions of road facilities immediately after an earthquake, the System will support quick decision-making on emergency activities, i.e. efficient damage inspections with restricted amount of inspectors, management of buck-up organization management and construction stuffs/ devices control.

For the implementation to the emergency practice, further research is required on the following points;
1) Accumulation of ground/ structural condition data, and construction of databases
2) Upgrade of damage estimation accuracy based on disaster experiences
3) Development of damage estimation procedures for the other road facilities
4) System cooperation with the other individual systems for the road management activities

REFFERENCES

1) Public Works Research Institute: Manual for Repair Methods of Civil Engineering Structures Damaged by Earthquakes, Technical Note of PWRI, Vol. 45, 1986.12
2) Public Works Research Institute: Report on the Disaster caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Report of PWRI, Vol. 196, 1996.3
3) Public Works Research Institute: Guidelines for Disaster Information Systems for Important Infrastructures (draft), Technical Note of PWRI, Vol. 58, 1992.4
4) H. Sugita, S. Odagiri and M. Kaneko: Development of Real-time Seismic Information System for MOC, 29th UJNR Joint Panel on Wind and Seismic Effects, 1997.5
5) Japan Road Association: Design Specification of Highway Bridges; Part V Seismic Design, 1996.12

第7回ライフライン施設の災害防止に関するワークショップ(1997.11.4~7、Seattle,Washington,U.S.A.)

SYSTEM TO ASSESS SOCIO-ECONOMIC EFFECT OF EARTHQUAKE DESASTER

SYSTEM TO ASSESS SOCIO-ECONOMIC EFFECT OF EARTHQUAKE DISASTER

NOZAKI Tomofumi[1], SUGITA Hideki[2]

(1) Senior Research Engineer, Earthquake Disaster Prevention Technology Division, PWRI
(2) Head, Earthquake Disaster Prevention Technology Division, PWRI

ABSTRUCT

This article describes the structure and the method to assess the socio-economic effect of earthquake disaster in urban area. The methods are developed to be implemented on the application system which is used for practical planning uses. The system with the databases of socio-economic data and transportation network data is given with the damage data of production facilities and that of the transportation networks in a damaged area. The system utilizes the several methods to estimate the transportation state, to transform it to the change of production and to evaluate the economic effects in and out of the damaged area. Such system are useful for the personnel in charge of regional earthquake disaster prevention plans at public bodies to establish, revise and improve the designing/retrofit plans of transportation networks.

1. INTRODUCTION

Besides the direct damage on people's life, houses and civil infrastructures, 1995 Hanshin-Awaji earthquake disaster showed us various indirect effects such as traffic congestion and health problem. Among them the economical effect is one of the most important points to be considered carefully because the effect may spread over in and out of the damaged area and affect people's life lasting long time. Especially, the damage of highway networks have to do with such effect through the hindrance of production/ material transportation. Thus, those who plan the earthquake tolerating highway system and facilities must determine the portions of the network critical in terms of the influences on the economic effects. Also, such information is quite important when one considers the strategies of seismic retrofit or restoration of highway

facilities.

Estimations of such direct/ indirect economical effects were announced by several organizations[1]. However, their amounts have large variation, and their definitions of indirect effects may differ one by one (Table 1-1). Also the effect due to the damage on highway network is not separated from the total amount of damage.

Table 1-1

Direc Damage	Indirect Damage
$54 bil.	—
$42 bil.	—
$50 bil.	—
$83 bil.	—
—	$20 bil.
$25-33 bil.	$8 bil. on the local industry
$21 bil. as stock damage	$22 bil. as flow damage
—	$8-21 bil. on business activities in damaged area
$82 bil. in Hyogo	$58 bil. of GDP decrease caused by delay of freight in damaged area
—	$0.2 bil. by transport facility damage and $5 bil. as repercussive economic effect
$9 bil. on port facilities	$5 bil. from decreased freight operation caused by damage on port facilities

In this article, first the mechanism of the economical effects of an earthquake is analyzed and clarified explicitly. The economical effect caused by the direct damage on production facilities and that induced by the damage of transportation facilities are taken into consideration. Each operation necessary for the estimation is divided and reorganized into "sub module." Second, algorithm of each module is investigated, modeled and prepared ready for the system construction. Finally, a case study is tried in the particular area, namely the Kobe area suffered from Hanshin-Awaji earthquake disaster. The total amount and the portion due to the transportation network damage of the indirect effect is examined.

The system based on the methods introduced here is planned to be used for the practical use in public bodies such as construction bureaus and work offices in charge of highway networks. While many assumptions are used, it is concentrated that system has flexibility for revisions by dividing them into elemental modules. In the following sections, the fundamental issues from the point of the use of the system applying the methods. Then, the framework of the

estimation is shown. Explanations of three important parts of the methods follow; namely, transportation state estimation, its transformation to the economical analysis and estimation of its repercussion effect. Finally, results of the case study for the area damaged by Hanshin-Awaji earthquake disaster are discussed.

2. FUNDAMENTAL ISSUES

The final objective of the project is to construct an application system which estimates the economic effect of the damage on transportation facilities caused by an earthquake. Thus, the individual methods examined here are to be used in principal modules of the system. Several fundamental policies of the system design follow (See also Figure 2-1).

a) Users of the system are supposed to be the ones in charge of planning and management of the highway network in an prefecture or a block which consists of several prefectures.

b) The user inputs damaged portions of the highway network. The damage state is assumed when the system is used under normal condition before an earthquake, or it is investigated after an earthquake.

c) Time period of the estimation is from one week to several years after the earthquake.

d) In the development of the methods, it was considered that the problems and the possibilities of the modules must be clarified so that the system can be revised easily.

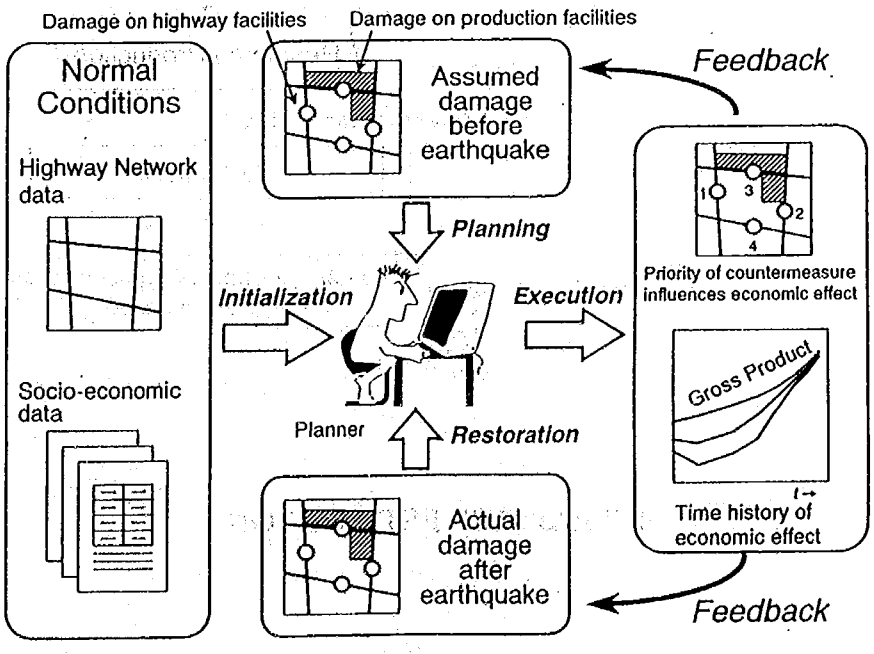


Figure 2-1

3. FRAMEWORK OF ESTIMATION

The estimation consists of following three methods (Figure 3-1).

a) Transportation state estimation after earthquake: Transport times between all zones in the damaged area are calculated. Transportation analysis method is used (*Traffic estimation part*).

b) Transformation of transport times to change of production: It determines the change of production affected by the direct damage on the production facilities themselves and by the indirect damage of transportation network (*Transformation part*).

c) Economical effect estimation: The repercussion of the change of the production spread over in and out of the damaged area. This part deal with the calculation of indirect effect of the economy originated from the change of the production (*Economic estimation part*).

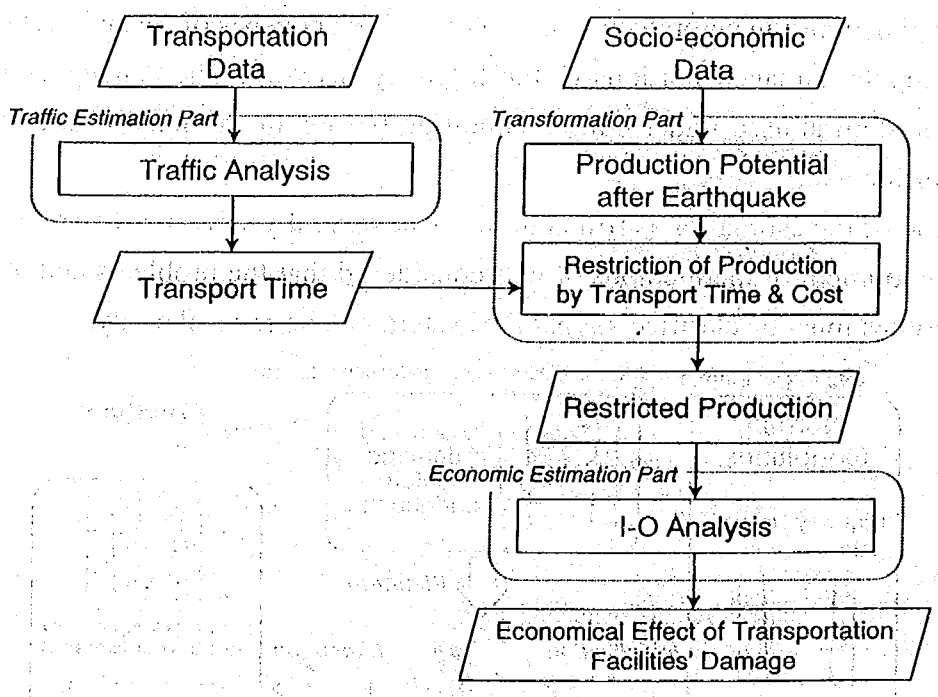


Figure 3-1

4. TRAFFICE ESTIMATION

(2) Outline

Transportation estimation part utilizes the four-step method to analyze the traffic state after an earthquake (Figure 4-1). In this part, the transport time between each zone is calculated based on the transportation network data and socio-economic data in each zone. The output result of this part is travel times from zones to another zones. They are provided to the transformation part to calculate the change of the production.

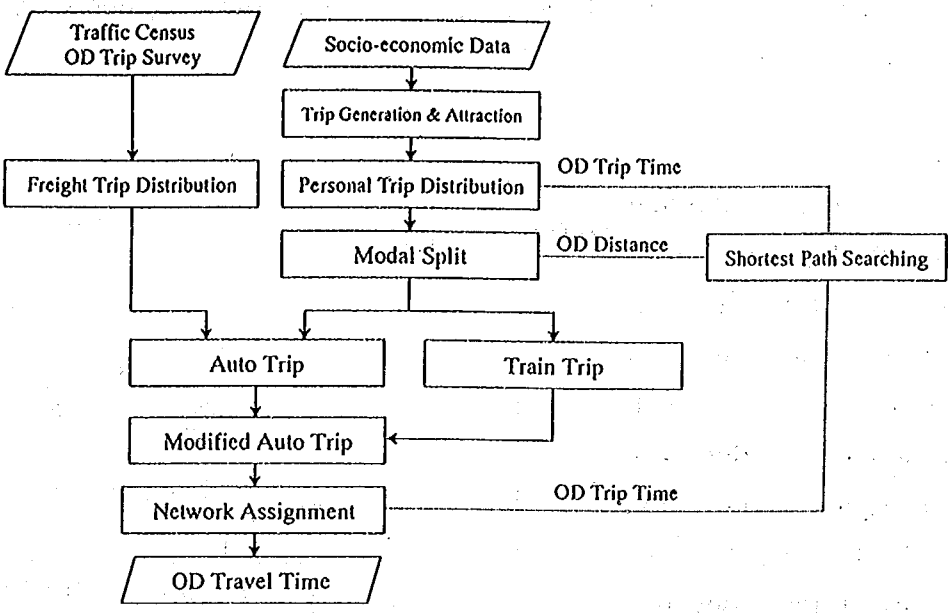


Figure 4-1

(2) Estimation of OD Trip Generation and Attraction

In the first step, the trip generation and attraction at each zone in the damaged area is estimated. The trip represents the source of traffic concerning the personal travel. Although these trips do not carry productions and materials, their traffic volume affect the transport time of freight trips. Personal trip generations and attractions are calculated from socio-economic data by using regression equations obtained from the person trip survey (PT survey).

$$G_i = \mathrm{func}(x_{i1}, x_{i2}, \ldots)$$
$$A_i = \mathrm{func}(y_{i1}, y_{i2}, \ldots) \tag{4.1}$$

Where, G_i, A_i means the trip generation and attraction at zone i, respectively, and x_{ik} and y_{ik} correspond to the explanatory variables for generation and attraction at zone i.

(3) Trip Distribution

After the trip generations and attractions are calculated, they are assigned to the trip

from origin zones to destination zones. The method proposed here is the gravity model.

$$T_{ij} = \kappa \frac{G_i^{\alpha} A_j^{\beta}}{t_{ij}^{\gamma}} \tag{4.2}$$

In the above equation, T_{ij} is the trip from zone i to zone j, and G_i and A_j means trip generation at zone i and trip attraction at zone j. t_{ij} is the inter-zone resistance between zone i and j. To determine the equation completely, the coefficient κ and power numbers α, β and γ are determined by regressing the data from the PT survey.

(4) Modal Split

The trips derived through the step (1) and (2) does not include only those by automobiles, but also those by other modes such as walking and train. However, they do not include freight trips. In this stage, the personal trips are divided into several traffic modes, and then, the freight trips by trucks obtained directly from the traffic census data are added into the personal automobile trip (Figure 4-2). As a result, the automobile trips to be assigned on the highway network are obtained.

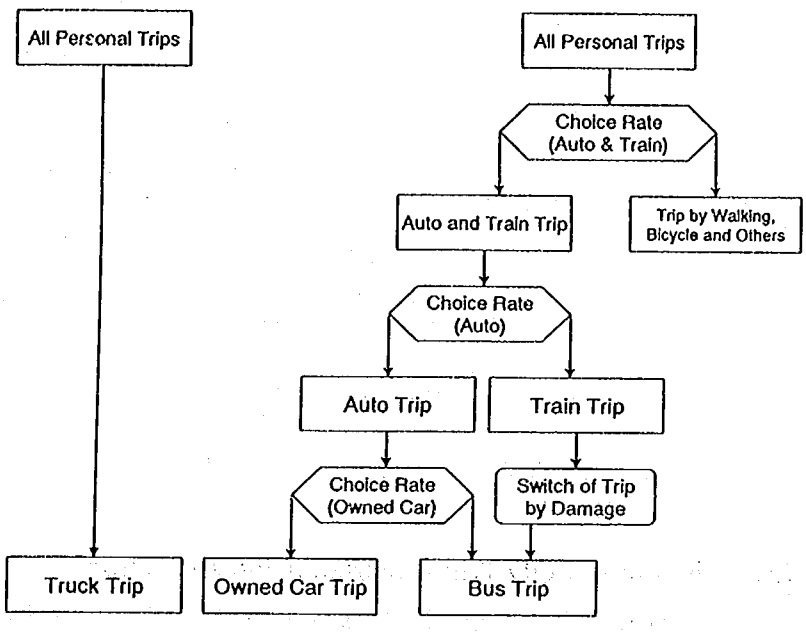


Figure 4-2

(5) Network Assignment

The trip from each zone to another zone is assigned on the given highway network here. For the pre-earthquake state, the network data without damage are used, and for the post-earthquake state, the network data with damage on the links corresponding to the designated time period are used. Assignment procedure is executed based on the user equilibrium (UE) theory. The trips are assigned in heuristic way; say, step-by-step assignment. Based on the traffic volume on each link in the network, the travel time on route from each zone to other zones is obtained. In other words, the travel time matrices of the normal conditions and each time period after the

earthquake are prepared for the input to the following transformation part.

5. TRANSFORMING THE RESULT OF TRANSPORTATION STATE INTO INFLUENCE ON PRODUCTION

(1) Outline

Given the travel time matrices, the change of travel times for a time period after the earthquake against the normal condition are obtained. In this part, the data are transformed into the change of production in the damaged area (Figure 5-1).

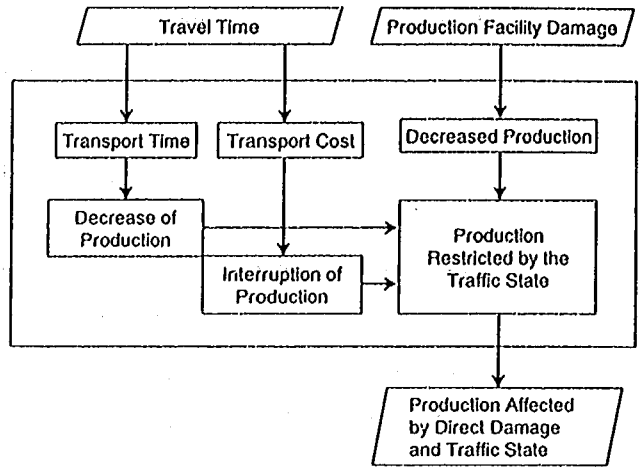


Figure 5-1

The part mainly consists of two steps. First, the production after the earthquake is calculated based on the input facility damage data. Although these data include the damage of the production facilities such as factories and stores, the effect of the damage on the highway network is not included. Thus, the result of this step means the possible production affected by the earthquake.

Next, the effect of the transportation network damage is taken into account. Two kinds of effects are examined: namely, the decrease of production caused by the increase of the transport time and the interruption of production caused by the increase of the transport cost. These effects are added on the possible production, and the decreased productions data are obtained. This set of data is used as the input data for the following economic estimation part.

(2) Possible Productions after the Earthquake

Possible Productions are determined for the production categories such as mining and manufacturing. For the initial data immediately after the earthquake, facility damage indices which mean the decreasing rate of each production category are input by the user. Then

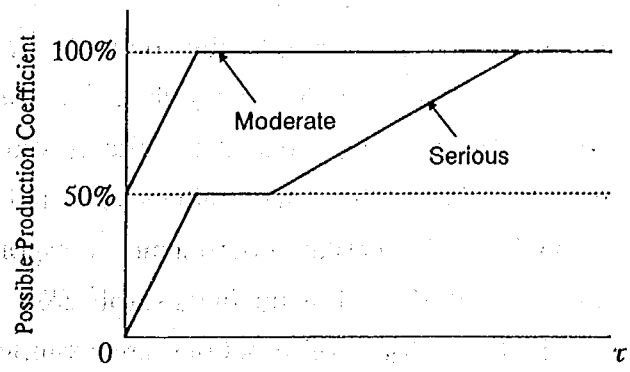


Figure 5-2

the decreasing rates recover as time goes. This situation is represented by two types of the production potential curves assumed as Figure 5-2 corresponding to the damage criteria: "serious" and "moderate". These curves were derived by examining the results of the inquiries to the enterprises damaged in Hanshin-Awaji earthquake[2].

(3) Effect of Transport Time

The possible production is affected by the transport time because its increase restricts the flow of products and materials. By comparing the travel time immediately after the earthquake and that of an arbitrary time period, the effect rate of the freight is determined.

$$\varepsilon_T(\tau) = \text{func}\left[\frac{t_c(\tau)}{t_c(0)}\right] \tag{5.1}$$

Here, the $\varepsilon_T(\tau)$ is the effect rate of the freight at time period τ based on the transport time, and $t_c(\tau)$ is the average travel time from the damaged zone to other zones at time period τ. Also, $\tau = 0$ means immediately after the earthquake. In this research, the function is assumed as the inverse proportion function. Thus, we obtain

$$\varepsilon_T(\tau) = \frac{t_c(0)}{t_c(\tau)} \tag{5.2}$$

The shape of the function is shown on the Figure 5-3.

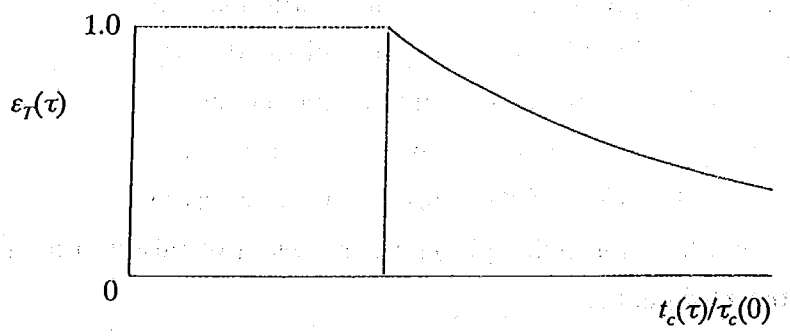


Figure 5-3

(4) Effect of Transport Cost

The productions are also affected by the transport cost when it becomes large against the total production cost. A producer may suspend his/her production activities while the transport cost is dominant and too much for him/her. The function curves of the transport cost effect rate is shown on Figure 5-4. Here, the effect rate is assumed to be explained by the certain coefficient: transport cost increase (ΔCs) divided by business surplus(Sr). In this research, three types of functions are assumed and

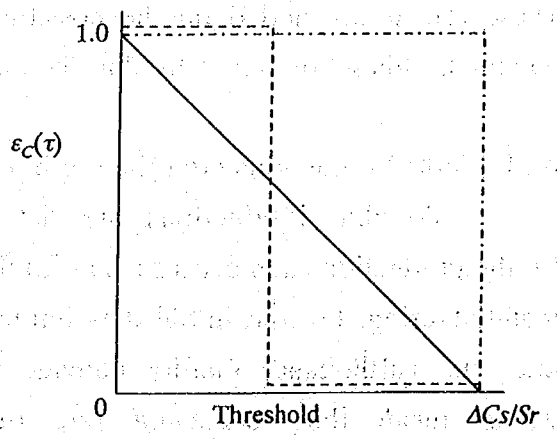


Figure 5-4

their effects are determined in the case study.

While the execution, the restricted production data are calculated for arbitrary time period based on the direct damage of production input to this module and the effect rates of production calculated here. The output data of this module is the production amount for each production category in the damaged area. They are submitted to the next economic estimation part and their repercussion effect is calculated.

6. ESTIMATION OF REPERCUSSION EFFECT OF ECONOMY IN AND OUT OF THE DAMAGED AREA

(1) Outline

After the calculation in the preceding two parts, the production vector for the instance immediately after the earthquake and that for arbitrary time period is derived.

$$\begin{aligned} p(0) &= (P_1(0), P_2(0), \ldots, P_C(0)) \\ p(\tau) &= (P_1(\tau), P_2(\tau), \ldots, P_C(\tau)) \end{aligned} \tag{6.1}$$

Here, C means the number of production categories, and $P_c(t)$ represents the production amount of category c at time period τ. Note that these vectors are column vectors. To approach the problem here, three conditions are set to solve the problem: namely, (a) the model must be the dynamic model to keep track of the phenomena after the earthquake, (b) the input data are the production amount restricted by the earthquake damage, (c) repercussion effect of a production category to other categories must be expressed.

Among the theories to deal with the economic effect, the input-output model (IO-model, Reontieff model) is generally used[3]. However, it usually has the production vector as the output value instead of the restricted input value.

$$p = (I - A)^{-1} f \tag{6.2}$$

In the equation above, f is the final demand vector, and I and A are the unit matrix and the input-output matrix (I-O matrix), respectively. Although there is a method which dynamically deal with the problem, the production vector is still used as a objective value.

(2) Alternatives

Here, we set the problem to input the restricted production vectors.

$$f_D(\tau) = f_D(\tau - 1) + \mathrm{func}[p_D(\tau), p_D(\tau - 1), \mathrm{parameters}] \tag{6.3}$$

τ means the discrete time period number, and the index D means that the variables are those of

the damaged area. In this research, three approaches examined, those include

(a) *basic approach* that applies the fundamental balance equation of IO-model,

(b) *primitive approach* in which the concept of supply and stock is introduced,

(c) *possible-required balance approach* in which iterative calculations with IO-matrix and required IO-matrix.

(3) The method used for the case study

After some examinations, the simplest method (a) turned out to show better results. With the equation for the nationwide effect, it is written as below.

$$\begin{aligned} \Delta f_D(\tau) &= (I_D - A_D)\Delta p_D(\tau) \\ \Delta p_N(\tau) &= (I_N - A_N)^{-1}\Delta f_N(\tau) \\ \Delta f_D(\tau) &= \Delta f_N(\tau) \end{aligned} \tag{6.4}$$

Where, the index N represents the variables that are of whole nation. Although it is not really a dynamic approach, it gives better results than (b) or (c) without unclear parameters.

After this part is executed, the nationwide production effect caused by that in the damaged area is calculated for arbitrarily designated time period with input data.

7. CASE STUDY

(1) Outline

To examine the adequacy of the method, a case study was tried for the area damaged by Hanshin-Awaji earthquake disaster. The case study is divided into three parts: that is, (a) traffic estimation, (b) transformation, (c) economic estimation.

The target zone is Hyogo prefecture which includes cities and wards damaged in the earthquake. The highway routes for the

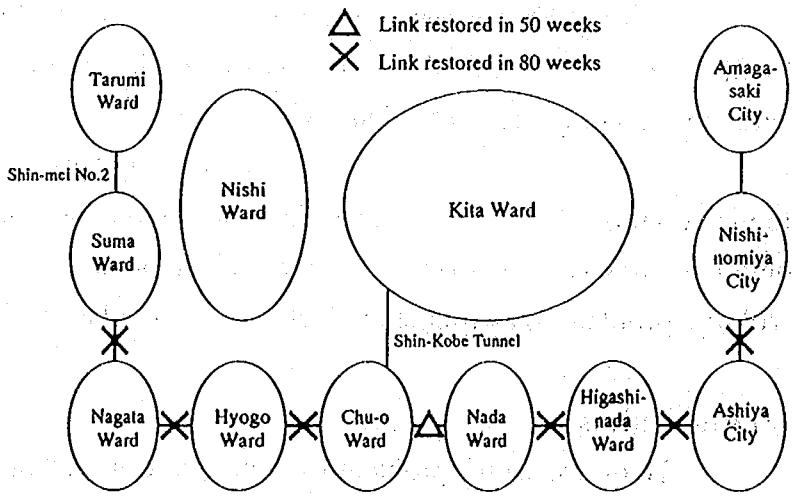


Figure 7-1

estimation is shown on Figure 7-1. The cities and wards are connected by several trunk routes such as national expressway/highways and Hanshin Expressway. Besides the routes in the figure, highway network with the level above the main prefecture load is included. To simulate the situation of the earthquake disaster, several highway links were cut off, and they were assumed to be restored in the certain time periods. Also, the damage on production facilities was assumed based on the acceleration distribution of the earthquake.

Starting from the settings above, the simulation calculations were conducted, and their results are shown for the three steps as stated above.

(2) Traffic Estimation Results

The damage on Hashin Expressway induces the increases of travel time between the cities and wards. Table 7-1 states the travel time and the traveling speed between Amagaski and Suma. The table indicates that the travel time immediately after the earthquake increases by one hour and six minutes (2.6 times) than that in the normal condition. Thus, the traffic along in the east-west direction is affected seriously, which is thought to coincide the state of the earthquake disaster. However, the calculated travel speeds are larger than that investigated after Hanshin-Awaji earthquake disaster[4]. To obtain more accurate results, the traffics unique for the situation immediately after an earthquake such as emergency relief and fire defense need to be included.

Table 7-1

		Normal	After Earthquake	After 50 weeks	After 80 weeks
Damage State	Nishinomiya - Nada	○	×	×	○
	Nada - Chu-o	○	×	○	○
	Chu-o - Suma	○	×	×	○
Estimates for Amagasaki-Suma	Travel Time (h)	0:41	1:47	0:59	0:41
	Travel Speed (km/h)	48.9	17.2	29.6	48.9
	Shortest Distance (km)	33.4	30.7	29.1	33.4

(3) Transformation Results

The estimated damages on the production facilities in Hyogo prefecture area are shown on Table 7-2. On the table, (a) the rate of direct damage without effect of the highway damage, (2) the rate of indirect damage caused by the increase of travel time and (3) the rate of indirect damage caused by the increase of travel cost are shown by the time period corresponding to the restoration. It can be said that the indirect effect induced by the increase of travel time dominates the direct damage. On the other hand, the indirect damage caused by the increase of travel cost does not indicates significant magnitude. Therefore, this method regarding the travel cost needs

to be modified if it is thought to show greater effect, or the final system may neglect it.

Table 7-2

	Normal	After Earthquake	After 50 weeks	After 80 weeks
Only direct damage on facility	100%	91%	97%	98%
Direct damage and the effect of travel time	100%	73%	93%	98%
Direct damage and the effect of travel cost	100%	91%	97%	98%

(3) Economic Estimation Results

As stated in the preceding chapter regarding the economic effect, only the basic approach showed the appropriate result (Table 7-3). The table shows that the repercussion effect of the damage on production facilities to the final demand in the damaged area (Hyogo) and that to the nationwide production. Corresponding to the damage level of the transformation result part, the final demand in Hyogo and the nationwide product decreases $10-30 billion and $20-70 billion, respectively. These results do not have excess differences compared to the results of past investigations. Thus the combination of the methods proposed here can be said to give appropriate results.

Table 7-3

		Normal	-5%	-10%	-20%
Hyogo	Product	0.00	-18.58	-37.15	-74.31
	Final demand	0.00	-9.23	-18.45	-36.91
Whole National	Product	0.00	-9.23	-18.45	-36.91
	Final demand	0.00	-18.85	-37.70	-75.40

(billion dollars)

CONCLUSIONS

The conclusions led from the research are stated as follows.

(a) A method to estimate the socio-economic effect of the earthquake damage on transportation facilities was proposed by combining the three methods: traffic estimation, transformation of the result of traffic estimation to economic damage and economic estimation.

(b) By examining the result of the case study of Hyogo, it was recognized

- that the post-earthquake specific traffic such as emergency relief and fire defense needs to be considered.
- that the indirect damage caused by the increase of transport time has larger effect than the direct damage. However, the indirect damage caused by the increase of transport cost may not have significant effect.
- that the basic approach showed the appropriate result among the economic estimation methods proposed in this research.

The method introduced here includes the modeled functions in which many assumptions and idealizations are applied. Although there are few well-organized socio-economic/ transportation data of the post-earthquake situation, the models in the method are needed to be improved from the theoretical and measurement points of view.

ACKNOWLEDGEMENT

We acknowledge that we are given quite many important suggestions by the "Committee on comprehensive earthquake preparedness measures to ensure the safety of residents' life and to promote earthquake-resistant city planning" chaired by Dr. Tsuneo Katayama, head of National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

REFERENCES

(1) Industrial Rehabilitation Plan, Industrial Rehabilitation Committee, Jun. 1996.

(2) Effects on business activities caused by Hanshin-Awaji earthquake disaster, Kobe Chamber of Commerce & Industry, Mar. 1996.

(3) "Evaluation of Economical Indirect Damage Caused by Earthquakes" , Kazuhiko KAWASHIMA, Hideki SUGITA, Tadashi KANOH, Report of Public Works Research Institute, Vol. 186, pp.1-58, Jan. 1991.

(4) "Analysis of Relief Goods Transportation to Shelters in the Great Hanshin-Awasji Earthquake", Kouji NAKASHITA, Michiyasu ODANI, Kazuaki NAGAOKA, Proceedings of Infrastructures Planning Vol. 19 (2), Japan Society of Civil Engineering, Nov. 1996.

日米地震防災研究ワークショップ（H10年6月22日～23日、東京）

COUNTER-EARTHQUAKE TECHNOLOGIES FOR TRANSPORTATION SYSTEMS

COUNTER-EARTHQUAKE TECHNOLOGIES FOR TRANSPORTATION SYSTEMS
- STATE-OF-THE-ART OF RESEARCHES AT PWRI -

SUGITA Hideki
Head,
Earthquake Disaster Prevention Technology Division,
Public Works Research Institute,
Ministry of Construction

NOZAKI Tomofumi
Senior Research Engineer,
ditto.

ABSTRUCT

1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake revealed the vulnerability of highly developed urban area due to the damage on civil infrastructures. Especially, the importance of the transportation systems including the highway network has been emphasized. Based on the lessons learned from the earthquake, Ministry of Construction (MOC) has established its new strategies to construct cities and highway systems tolerant to the earthquake. Based on the strategies, Public Works Research Institute (PWRI) has been promoting the researches both from the point of view of the hardware approach and the software approach for pre-/post-earthquake measures. This paper describes such research topics at PWRI.

BACKGROUND

In Hyogo-ken Nanbu Earthquake in 1995, highly developed urban area suffered severe damage. There were many civil infrastructures damaged in the earthquake as well as casualties and injuries (Table-1.1). While many people lost their lives in the destroyed houses/buildings and in fires, the damage on civil infrastructures including lifelines were also significant. As they support the activities not only the usual activities but also emergency responses such as fire fighting, their damage caused the serious effects on the post-earthquake activities as well as their primary disaster.

Among them, the catastrophic damage on many highway structures revealed their vulnerability to the unprecedented strong motion and their importance to the activities after earthquakes. Due to the excess strong motion, some columns of bridges and viaducts were destroyed fatally, and the beams fell down on the top of columns or on the ground (Photo-1.1~1.4).

Table-1.1 Damage Cased by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake[1]

Outline	Date	January 17, 1995, 5:46
	Epicenter	Awajishima Island
	Depth	16km
	Seismic intensity(JMA)	7 (estimated): Part of Kobe, Ashiya, Nishinomiya, Takarazuka, Awajishima 6: Kobe, Sumoto 5: Kyoto, Hikone
General damages	Casualties	Death: 6,308 Missing: 2 Injuries: 43,177
	Buildings	Housing: 436,416 (Totally Collapsed: 100,302) Public Buildings: 750 General Buildings: 3,952
	Fires	Number of Fires: 294
Structural damages (related to MOC)	Road facilities	554 sites (on the road under the jurisdiction of nation) 449 sites (on the road under the jurisdiction of public corporations) 2,589 sites (on the road under the jurisdiction of prefectures and municipalities)
	River facilities	32 sites on 4 rivers in 3 water systems (under the jurisdiction of nation: bank subsidence, cracks and so on) 2,589 sites (under the jurisdiction of prefectures and municipalities)
	Dam facilities	1 site (under the jurisdiction of nation: deformation of the gate of Kakogawa dam)
	Shore protection facilities	4 sites on 1 coast (under the jurisdiction of nation: bank subsidence, cracks and so on) 9 sites (under the jurisdiction of prefectures)
	Sediment control facilities	10 sites (under the jurisdiction of nation, cracks ete.) 23 sites (under the jurisdiction of prefectures)
	Landslides	1 site (under the jurisdiction of a prefecture)
	Slope failure	7 sites (under the jurisdiction of a prefecture)
	Sewage facilities	1,050 sites
	Peblic spaces	428 sites (under the jurisdiction of prefectures and municipalities)
	Urban streets	46 sites (under the jurisdiction of prefectures and cities)
	Government offices	51 buildings
	Public housing and Corporation apartments	2,333 houses in 34 areas (in Kobe City and other 3 cities and towns)
Lifeline damages	General water supply systems	Suspension of water supply: 1.3 mil. houses (immediately after the earthquake)
	Industrial water supply systems	Suspension of water supply: 250 companies (immediately after the earthquake)
	Electric power	Cutting of the electric power: 2.6 mil. houses (immediately after the earthquake)
	Gas	Suspension of supply: 860 thousands houses (immediately after the earthquake)
	Telephone	More than 300 thousands lines influenced
	Railways	Interrupted section: 219km on bullet train, 123km on JR local line, 296km on private enterprise line (which were not restored on the day)
	Harbor facilities	Serious damage: Port Island area, Rokko Island area in Kobe Bay Subsidence and crack of wharf and road: Osaka Bay

Table-1 Damage Cased by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake[1]

Outline	Date	January 17, 1995, 5:46
	Epicenter	Awajishima Island
	Depth	16km
	Seismic intensity(JMA)	7 (estimated): Part of Kobe, Ashiya, Nishinomiya, Takarazuka, Awajishima 6: Kobe, Sumoto 5: Kyoto, Hikone
General damages	Casualties	Death: 6,308 Missing: 2 Injuries: 43,177
	Buildings	Housing: 436,416 (Totally Collapsed: 100,302) Public Buildings: 750 General Buildings: 3,952
	Fires	Number of Fires: 294
Structural damages (related to MOC)	Road facilities	554 sites (on the road under the jurisdiction of nation) 449 sites (on the road under the jurisdiction of public corporations) 2,589 sites (on the road under the jurisdiction of prefectures and municipalities)
	River facilities	32 sites on 4 rivers in 3 water systems (under the jurisdiction of nation: bank subsidence, cracks and so on) 2,589 sites (under the jurisdiction of prefectures and municipalities)
	Dam facilities	1 site (under the jurisdiction of nation: deformation of the gate of Kakogawa dam)
	Shore protection facilities	4 sites on 1 coast (under the jurisdiction of nation: bank subsidence, cracks and so on) 9 sites (under the jurisdiction of prefectures)
	Sediment control facilities	10 sites (under the jurisdiction of nation, cracks etc.) 23 sites (under the jurisdiction of prefectures)
	Landslides	1 site (under the jurisdiction of a prefecture)
	Slope failure	7 sites (under the jurisdiction of a prefecture)
	Sewage facilities	1,050 sites
	Peblic spaces	428 sites (under the jurisdiction of prefectures and municipalities)
	Urban streets	46 sites (under the jurisdiction of prefectures and cities)
	Government offices	51 buildings
	Public housing and Corporation apartments	2,333 houses in 34 areas (in Kobe City and other 3 cities and towns)
Lifeline damages	General water supply systems	Suspension of water supply: 1.3 mil. houses (immediately after the earthquake)
	Industrial water supply systems	Suspension of water supply: 250 companies (immediately after the earthquake)
	Electric power	Cutting of the electric power: 2.6 mil. houses (immediately after the earthquake)
	Gas	Suspension of supply: 860 thousands houses (immediately after the earthquake)
	Telephone	More than 300 thousands lines influenced
	Railways	Interrupted section: 219km on bullet train, 123km on JR local line, 296km on private enterprise line (which were not restored on the day)
	Harbor facilities	Serious damage: Port Island area, Rokko Island area in Kobe Bay Subsidence and crack of wharf and road: Osaka Bay

Photo-1.1 Damaged Viaduct (1)

Photo-1.2 Damaged Viaduct (2)

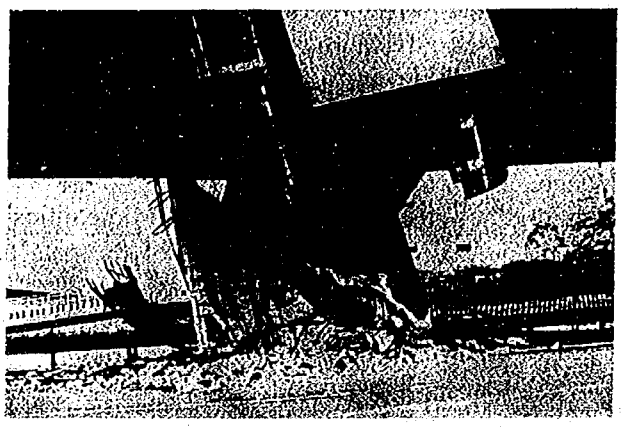


Photo-1.3 Damage of RC Column

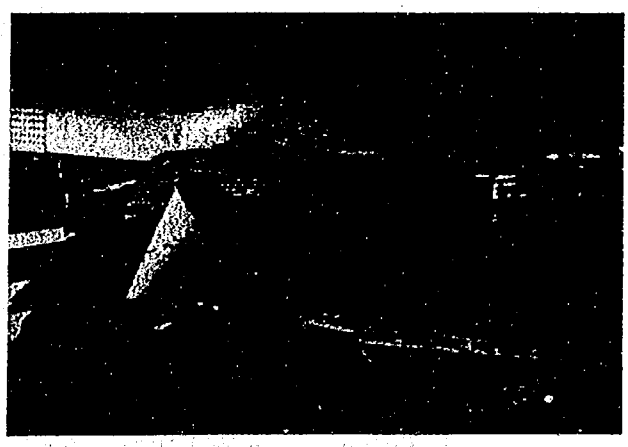


Photo-1.4 Damage of Steel Column

Due to such severe damage, many portions of the highway network in the area were obstructed (Figure-1.1, 1.2, 1.3), and the transportation was limited (Figure-1.4).

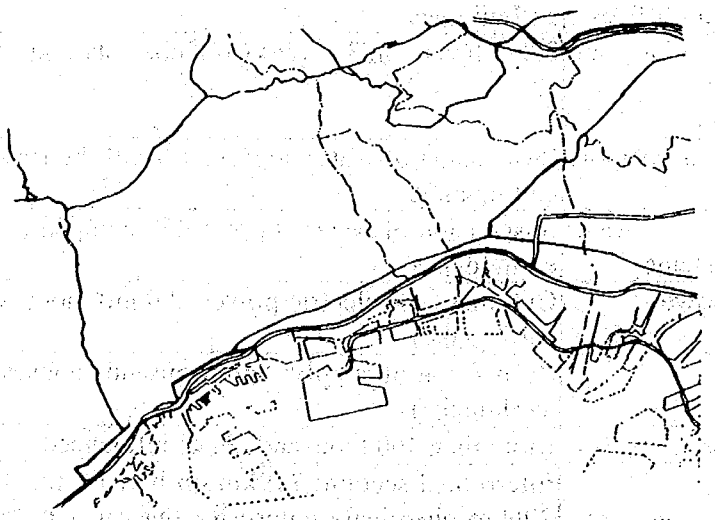


Figure-1.1 Severe Damage on Highway Bridges[2]

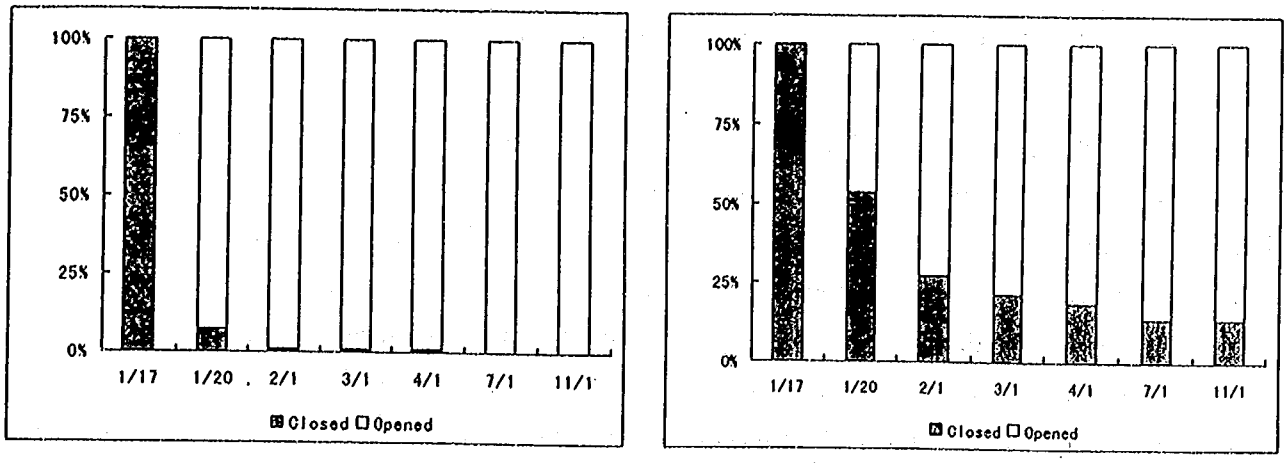


Figure-1.2 Closed Length (Left:National Exp. Way, Right:Hanshin Exp. Way)[3][4]
(Not all the sections are closed. The total length closed are displayed 100%)

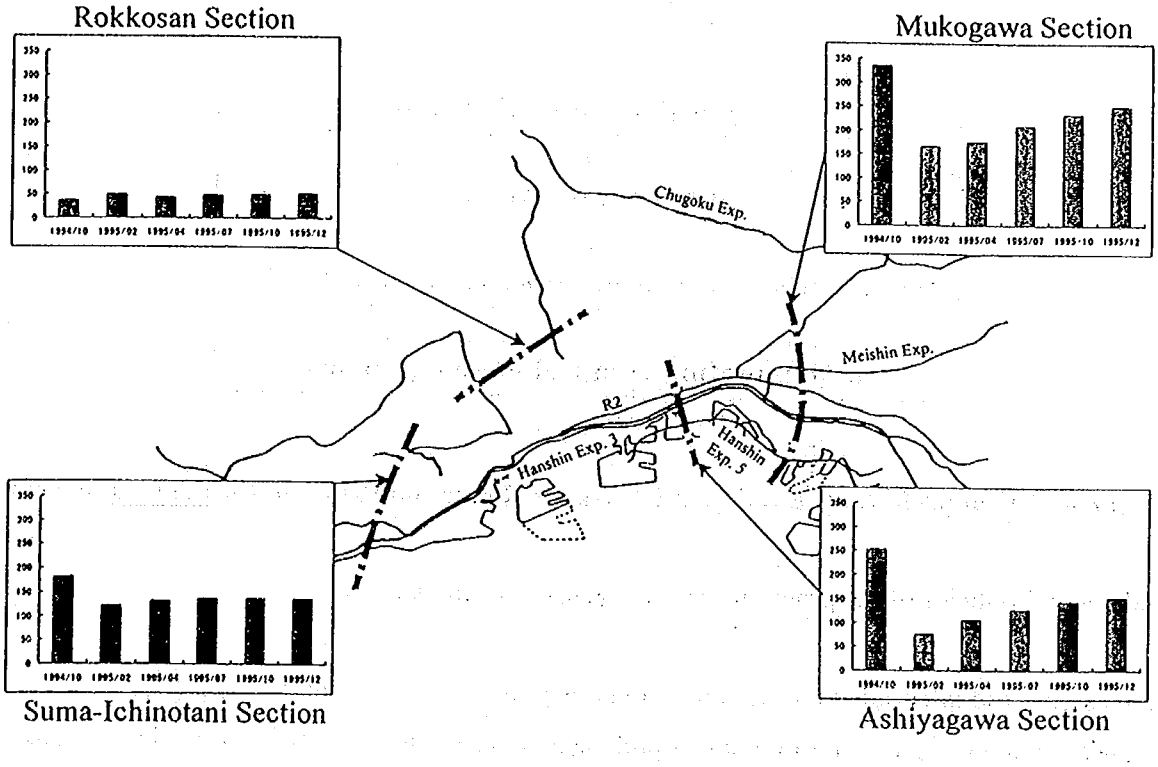


Figure-1.4 Limited Traffic Volume[3][4]

For the lessons learned from the disaster on highway facilities by the earthquake, some results of the researches have been applied already, and some are still ongoing. Those are,

- New seismic design systems and technologies applied for the restoration, retrofit and construction of highway bridges.
- Quantitative assessment method for the seismic performance, the damage effect and the project regarding highway network system.
- Technologies and systems to support emergency response activity immediately after the earthquake.

EARTHQUAKE HAZARD REDUCTION PROGRAM IN MOC

Immediately after the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, MOC organized seismic safety commissions for the civil infrastructures under the jurisdiction and buildings. Also, the Japan Society of Civil Engineering and Architectural Institute of Japan announced the proposals on the seismic design procedures for civil infrastructures and buildings. Based on the knowledge acquired from the activities above, MOC has revised the seismic design standards, and seismic assessment/strengthening guidelines

However, realizing the structures strong enough against possible larger scale earthquakes in the future is not adequate from the technical/economical point of view. Thus, the strategy to minimize socioeconomic effect of the earthquake supposing - or accepting - the damage on facilities is important. MOC has developed "Comprehensive Earthquake Hazards Reduction Program for the Urban Area".

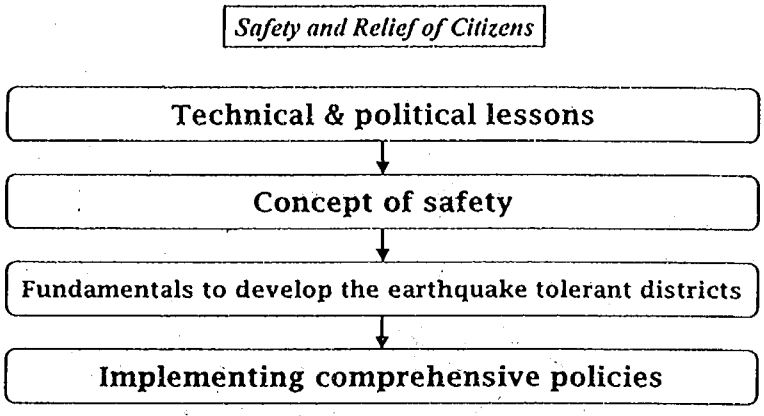


Figure-2.1 Comprehensive Earthquake Hazards Reduction Program for the Urban Area

The fundamental policies of the program are summarized as follows.

- Comprehensive and intentional promotion of urban planning/development
  Earthquake countermeasures promoted comprehensively and intentionally by reflecting the earthquake effects to the "Master Plan of urban planning/development"
- Construction of frame structures with high seismic safety
  Re-development of cities based on the "Master Plan" to form the frame structure that consists of core structures such as medical, welfare and administrative storage facilities, and the fire protection zone fabricated such facilities as road, river and fire-resistant building
- Construction of civil infrastructure for the regional hazard reduction
  Emergency transport highway networks, evacuation road networks and public spaces for the emergency activities; Common buildings for government offices as disaster prevention bases
- Securing seismic safety of lifelines

Common utility ducts and compact cable boxes that store the lifelines such as electric power cable and gas pipes; Facilities that utilizes the river water and purified sewage water for the fire fighting; Emergency communication networks between administrative agencies, highway users and residents

- Construction of wide-area highway networks

  Wide-area highway networks which can secure the redundancy of highway networks to reduces the nationwide socioeconomic effects

As for the highway, the "Recommendations to Earthquake Tolerant Highway Construction" has been announced and the planning measures and operational measures have been taken. The planning measures include establishing emergency transport highway networks, and the operational measures include "Urgent Bridge Retrofit Project for Earthquake Disaster Countermeasure" The former measure aims to set up the hierarchy of highway networks that secure the emergency response activities immediately after the earthquake. Importance is emphasized to improve the seismic performance from the point of view of the comprehensive network system. Also, strengthening the seismic performance of the portions of the emergency highway network is required. The later operational measure to retrofit the bridges which do not have enough performance against the earthquake required to practically retrofit 29,400 bridge columns of the national highways and the toll roads from 1995 to 1997.

RESEARCH ON HARDWARE ASPECT OF TRANSPORTATION SYSTEMS

Immediately after the earthquake, the guideline to restore the damaged highway bridge columns had been investigated by PWRI. Also, the new seismic specification for highway bridges was published in 1996. In these standards, the "levels of earthquake" for the input ground motion and the "ductility design method" was introduced. The former issue, the levels of earthquake takes the intensities of strong motions and their chance of occurrences into consideration. This idea clarifies the level of seismic performance of the highway bridges to be secured depending on their importance and functionality. The later issue, the ductility design method aims to construct "ductile" bridges against the quite large earthquakes. Such ductile bridges are expected stand without brittle destruction even though they are damaged by the earthquakes that exceed the expected intensity.

To construct or retrofit ductile bridge columns, various technologies have been introduced. Those include the reinforced concrete jacketing and the steel jacketing for the RC columns, and the corner strengthening, additional rib-welding and the infill-concrete casting for the steel columns.

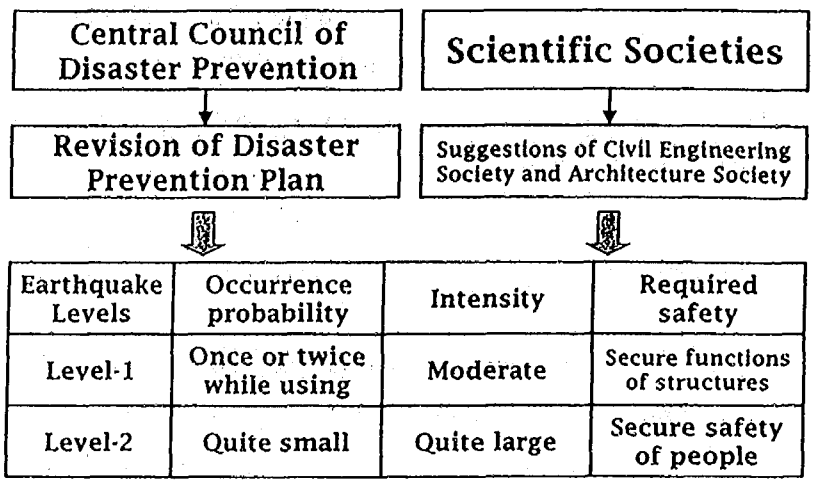


Figure-3.1 New Concept of Seismic Design

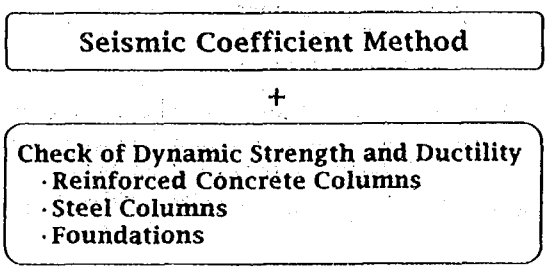


Figure-3.2 Philosophy of New Seismic Design Specifications for Highway Bridges

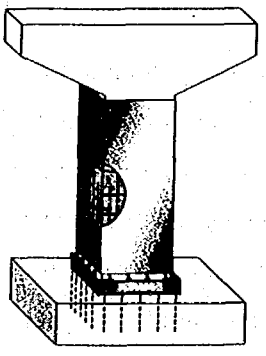


Figure-3.3 Example RC Column Retrofit

To acquire the data for the results above, PWRI has constructed large experiment facilities. One of them is the "Large-scale Three-dimensional Shaking Table". It has a table of 8m×8m and can generate 2G in the horizontal direction and 1G in the vertical direction at maximum. Its special feature is that it has ability of hybrid vibration experiment. By applying the shaking table and the fast computer, it can combine the shaking table experiment and the numerical experiment through which the behavior of abstract structure is simulated simultaneously to the movement of actual specimen on the table. Thus, the experiment for the complicated structure such as the super/substructures and foundation in the ground can be conducted easily and efficiently by dividing it into actual model and the numerical model.

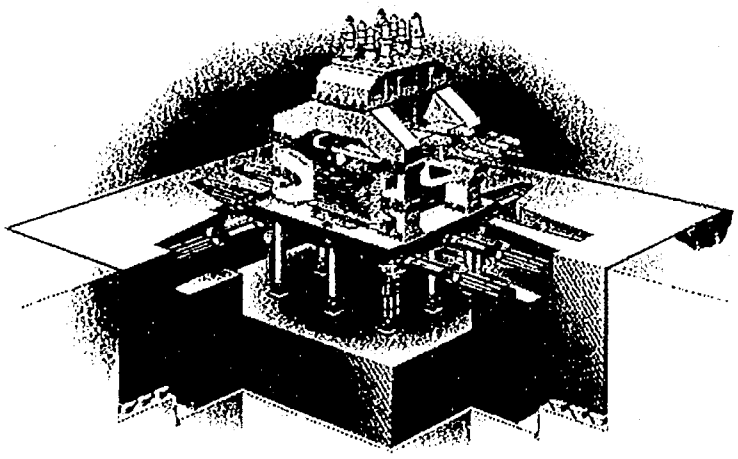


Figure-3.4 Large-scale Three-dimensional Shaking Table

Another experiment facility constructed after the earthquake is the "Geotechnical Centrifuge III". It aims to conduct the experiments for the large earth structures such as river bunks in which the scale effect cannot be neglected. Its 6.6m-long rotating arm generates 100G centrifugal acceleration for the dynamic test, and the shaking table's ability is 40G during the rotation. It corresponds to 2G for the 1/20-scaled model.

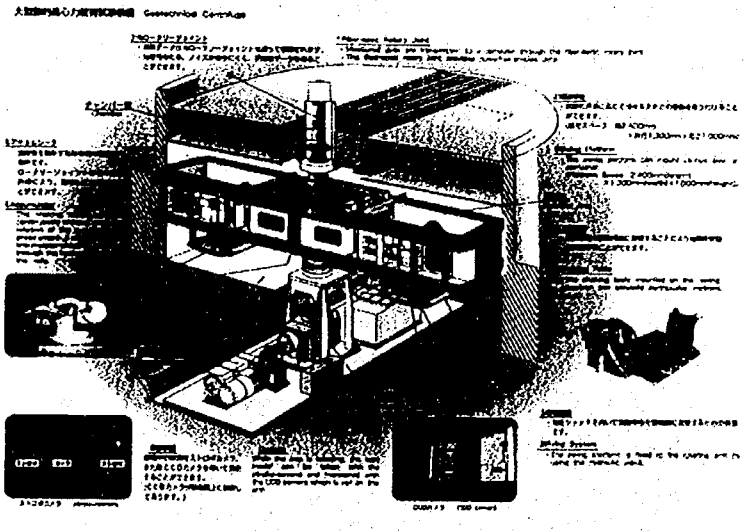


Figure-3.5 PWRI Geotechnical Centrifuge III

RESEARCH ON SOFTWARE ASPECT OF TRANSPORTATION SYSTEMS

Besides the approaches from the hardware aspect, the software approaches for the pre-/post-earthquake assessment/planning/response has been emphasized since Hyogo-ken Nanbu Earthquake. To

construct the earthquake tolerant cities, it is clear to secure the operation of the highway network after the earthquake. However, strengthening all the facilities against the earthquakes that exceed the expected level with constrained cost is not practical. Thus, it is vital to examine the alternatives of the network planning and the retrofit strategies by considering the possible damage on the portions of the highway network. Also, technologies to support post-earthquake response activities such as traffic control or immediate temporary opening of roads improve the performance of the response activity system.

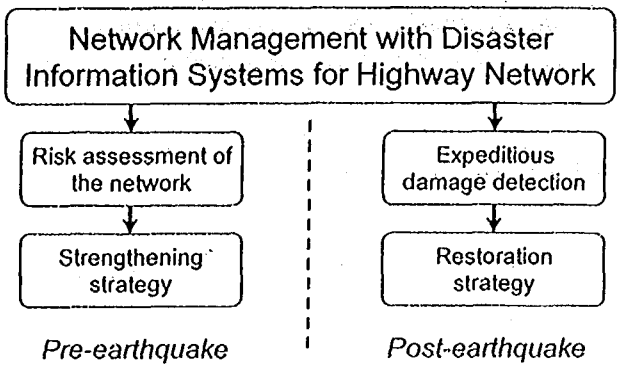


Figure-4.1 Phases of Earthquake

For the pre-earthquake project assessment and planning, we must understand the functionality of the highway network after the earthquake. Because some portions of the highway network may be destroyed, some traffic must use detour, or some traffics will be affected the excess traffic volume. Such effects hinder both the emergency activities such as emergency relief and fire fighting and the economic activities. To resolve the problem, PWRI is conducting two major subjects: i.g., (a) a method to assess the seismic performance of the highway network and (b) a system to assess the socioeconomic effect caused by the earthquake.

Photo-4.2 Traffic Congestion Immediately after the Earthquake

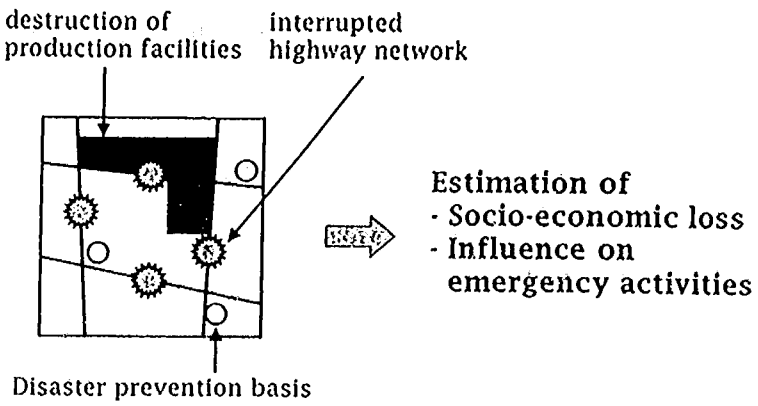


Figure-4.3 Effects of Damage on Highway Facilities

The Former subject deals with the assessment of short-term effect of highway network damage which affects the emergency activities immediately after the earthquake. In this method, the seismic performance index SP and the link importance indexes LI_i are calculated. Given SP, planners examine the performance of network after the earthquake by assuming the damage pattern of it, and they judge the priority of damaged portion with LI_i for the retrofit strategy.

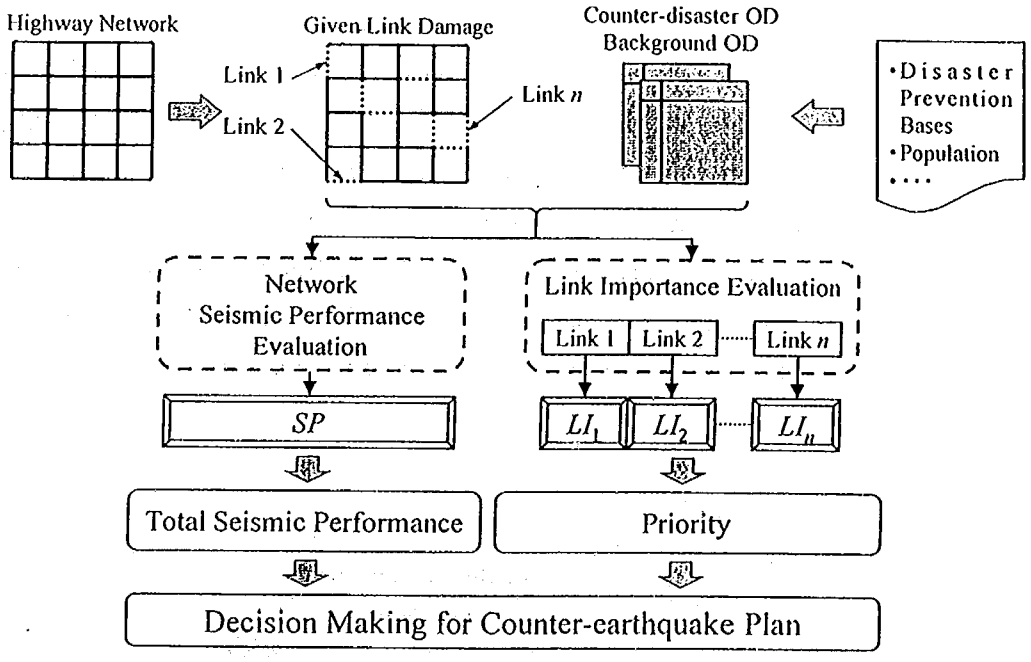


Figure-4.4 Application Image of the Network Seismic Performance Assessment

The later subject deals with the computer application which estimates the repercussion of indirect economic damage in an target area. The system with the code name EASSE (Earthquake Assessment System for Socioeconomic Effect) has map data, and the damage on production facilities and on the highway network is input by the user. Based on the database and the settings, EASSE estimates the long-term economic effect in money term by utilizing the traffic analysis and economic analysis. The user

can examine the bottleneck of the network and the strategy of retrofit program by changing the damage pattern.

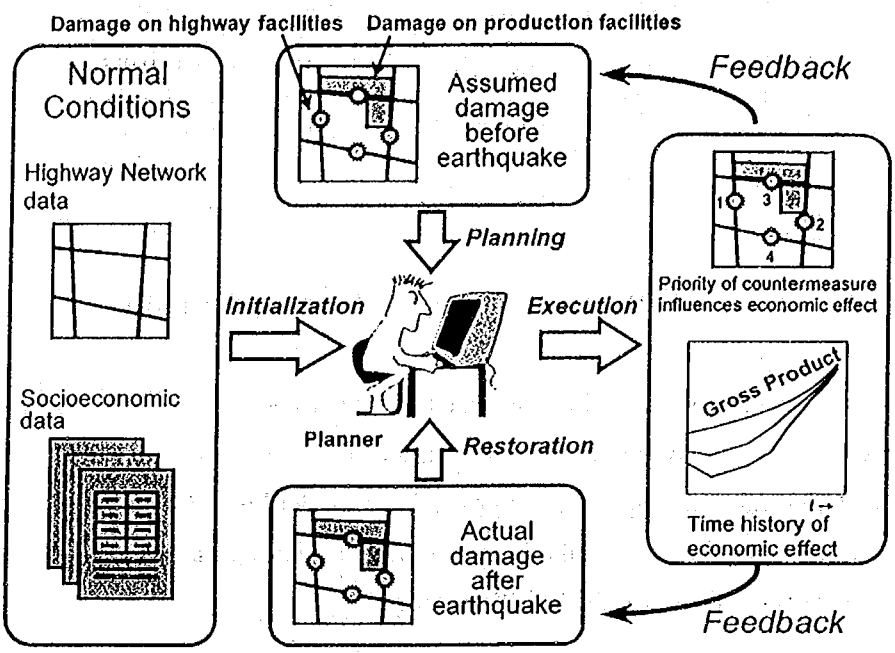


Figure-4.5 Application of EASSE

As for the R/D to support post-earthquake response activities, real-time damage estimation is one of the most important technologies. Knowing the rough estimation of damage on highway facilities, investigation teams can optimize the routes and sites to be dispatched. PWRI has developed such system, namely, SATURN (Seismic Assessment Tool for Urgent Response and Notification). SATURN uses the seismic characteristic values such as the maximum acceleration and the spectral intensity sent from over 800 online accelerographs placed over Japan. Based on the acquired data, it calculates the ground motion at each facility cite, estimates the liquefaction risk and the structure damage risk.

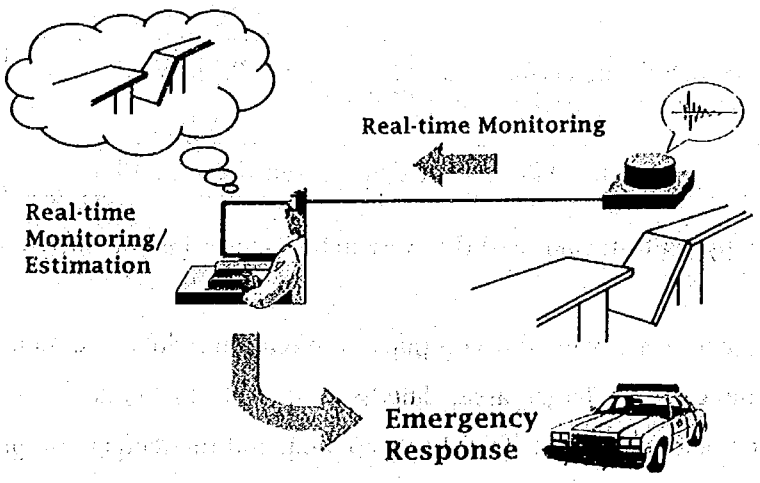


Figure-4.6 Real-time Damage Assessment

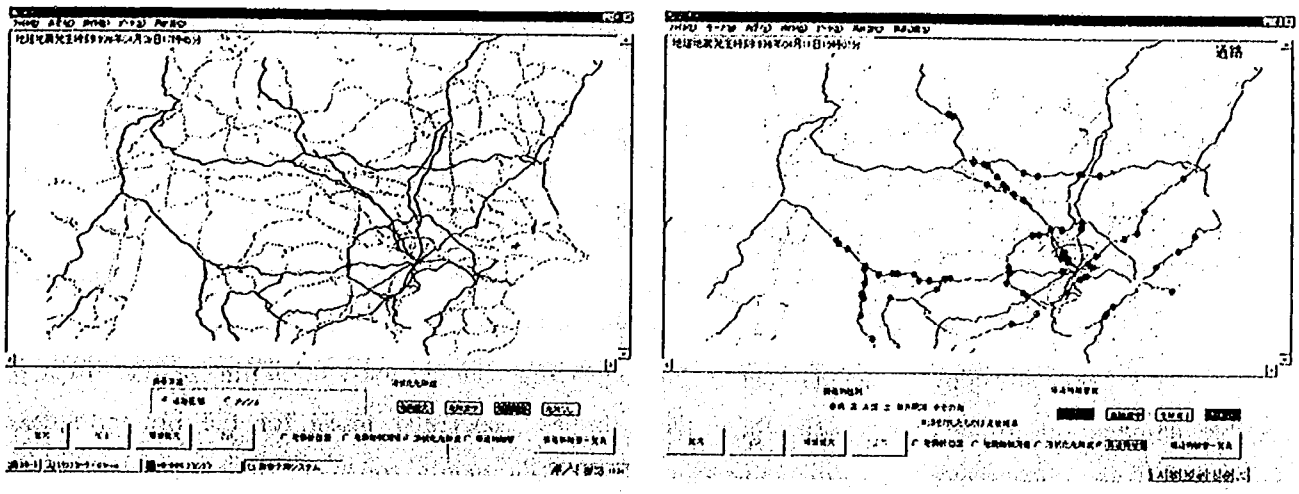


Figure-4.7 SATURN (Display of Liquefaction Risk and Structural Damage Risk)

Besides the technologies that directly support the decision making regarding the highway network, another approach from the different aspect than those stated above is being tried. The method deals with the assessment of earthquake response activity system's performance: PLUTO (Performance Level Upgrading Technology for Organizations). In this method, the earthquake response activity system is interpreted in the form of a network in which each activity is expressed as a "gate" with inputs and an output. The damage information from each site investigated is executed and gathered to the gate where the information is accumulated. A person who is in charge of planning the organization and the system can assess the speed (or performance) of the system to treat the information before the earthquake. By changing the system network, he/she can improve the system's performance.

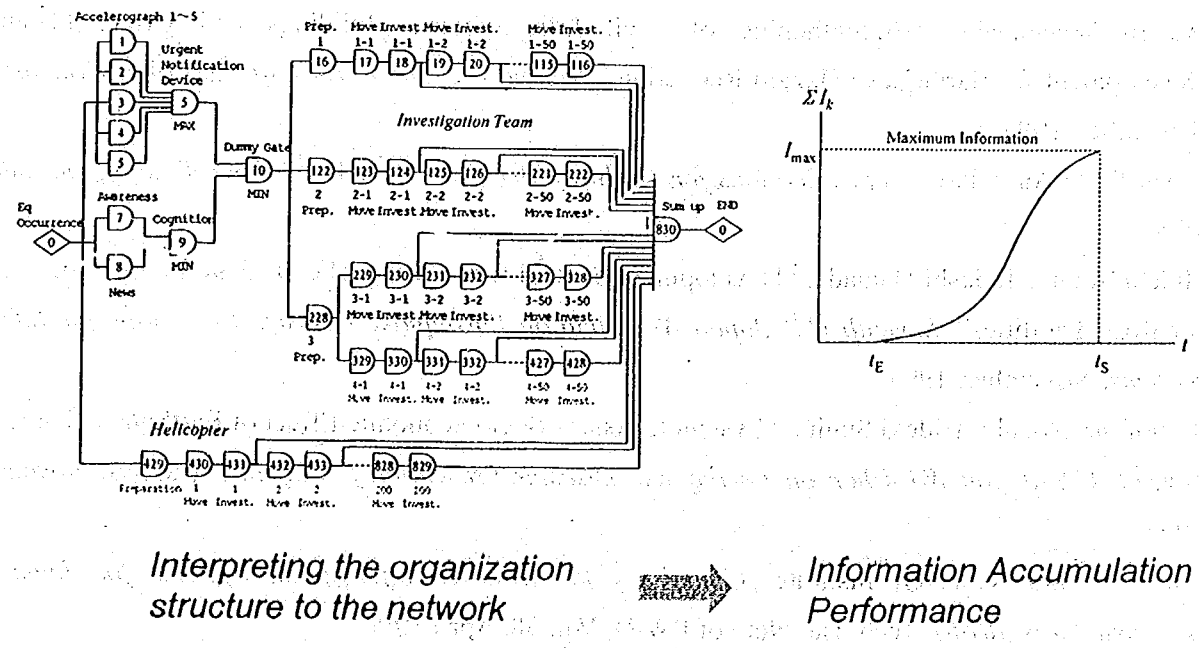


Figure-4.8 PLUTO: Network Expression and Performance Assessment for Seismic Disaster Prevention Activity System

CONCLUSION

Since Hyogo-ken Nanbu Earthquake, design methods for facilities such as highway bridges have been revised, and their seismic performance have been improved. On the contrary, constructing perfectly safe structures against all the future earthquakes has been understood inefficient. The software approaches including the pre-earthquake assessment/planning, post-earthquake risk management and information system have become a very important part in earthquake engineering field.

This paper introduced the element technologies that can be used to minimize the effect of possible damage on highway network. Such technologies, especially those for the pre-earthquake planning and assessment have been generally developed theoretically and most of them gives merely qualitative results. To apply them ro practical situation, they are required to be improved to give quantitative information. Also, those technologies can be located as the parts of the comprehensive seismic information system (SIS). Besides such elemental technologies, the architecture and the design method for the data, protocols and interfaces of SIS will be required.

REFERENCES

(1) Public Works Research Institute, "Report on the Disaster caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake", *Report of PWRI, Vol. 196*, March, 1996

(2) Ministry of Construction, *Earthquake Disaster Management for New Period - Recommendations to Earthquake Tolerant Highway Construction*, October, 1996

(3) Wataru Wwatanabe, "Strengthening of Civil Infrastructure/ Buildings and Urban Planning/ Development for Earthquake Hazard Reduction", *Second U.S./Japan Earthquake Policy Symposium*, September, 1997

(4) Japan Road Association, *Specifications for Highway Bridges - Part V : Seismic Design*, December, 1996

(5) Hideki Sugita, Tadashi Hamada, "Development of Real-time Earthquake Damage Estimation System for Road Facilities", *Seventh U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems*, November, 1997

(6) Tomofumi Nozaki, Hideki Sugita, "System to Assess Socio-economic Effect of Earthquake Disaster", *Seventh U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems*, November, 1997

(7) Public Works Research Institute, *Guidelines for Disaster Information Systems for Important Infrastructures (draft)*, Technical Note of PWRI, Vol. 58, April 1992

第2回日米地震政策シンポジウム（H9年9月17日～19日、神戸市）

STRENGTHENING OF CIVIL INFRASTRUCTURE /BUILDINGS AND URBAN PLANNING/ DEVEROPMENT FOR EARTHQUAKE HAZARD REDUCTION

STRENGTHENING OF CIVIL INFRASTRUCTURE/ BUILDINGS AND URBAN PLANNING/ DEVELOPMENT FOR EARTHQUAKE HAZARD REDUCTION

by
Wataru WATANABE
Director of Engineering Affairs Management Division,
Minister's Secretary, Ministry of Construction, Japan

ABSTRACT

To achieve an earthquake hazard reduction in the urban area, it is urgently required to conduct seismic strengthening of civil infrastructure and buildings, and to promote an appropriate urban planing and development. Based on recent major earthquake disasters, these subjects are commonly important both in Japan and U.S.. Cooperative activities on these subjects are, therefore, supposed to be essential. Highlights of this manuscript can be summarized as follows;

1) Recent research activities and policies on civil infrastructure and buildings in order to secure the seismic safety are introduced. Road facilities, river facilities, sewerage facilities, dam facilities, erosion and sediment control (sabo) facilities and shore protection facilities which are administrated by MOC are defined as civil infrastructure. And general buildings and governmental buildings are defined as buildings in this manuscript.
2) In addition to the structural countermeasures, recent political efforts on urban planing and development for the earthquake hazard reduction is introduced.
3) Technical information exchanges and cooperative research activities that are supposed to be effective between Japan and U.S. are proposed.

I. TOPIC DESCRIPTION AND POLICY ISSUES

In Japan and U.S., civil infrastructure and buildings have suffered severe damage by recent major earthquakes such as 1993 Kushiro-oki Earthquake, 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, 1989 Loma Prieta Earthquake and 1994 Northridge Earthquake. Continuous efforts for upgrading the seismic safety of infrastructure and buildings are commonly important in both countries.

Among recent major earthquakes, 1994 Northridge Earthquake and 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake have occurred right under the urban area. Socio-economic activities in and around the urban area have suffered significant damage due to the structural damage developed on civil infrastructures and buildings. In addition to the structural countermeasures for upgrading the seismic safety, therefore, urban planing and development policies to reduce the earthquake vulnerability of the regions are urgently required in both countries.

In Japan and U.S., technical and political efforts for upgrading the seismic safety of structures and regions have been continuously conducted. Cooperative activities on commonly important subjects in both countries are quite effective to promote these efforts

more expeditiously and economically.

Regarding the structural countermeasures on civil infrastructures and buildings, both countries have much technical knowledge based on the past disaster experiences and research activities. As the cooperative activities, therefore, technical information exchanges and cooperative research programs on the following subjects are desirable.

1) Earthquake countermeasures on civil infrastructures
   a) Evaluation of earthquake ground motion for seismic engineering
   b) Seismic design procedures for civil infrastructure
   c) Seismic assessment and strengthening methods for civil infrastructure
   d) Structural damage estimation and socio-economic loss estimation
2) Earthquake countermeasures on buildings
   a) Steel frame buildings
   b) Evaluation and rehabilitation of existing buildings
   c) Performance based design
3) Earthquake countermeasures of urban area (Controlling post-earthquake fire)

II. BACKGROUND

1. 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

The highly developed urban area in Japan have first suffered significant earthquake effect by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. The earthquake caused catastrophic damage on infrastructure and buildings which are administrated by MOC (refer Table-1), and pointed out the vulnerability of an urban area where human lives, industrial facilities and major socio-economic functions have been integrated. Based on the disaster, technical and political lessons have been derived as follows;

(1) Casualties were mainly developed by the destruction of houses and buildings in which enough seismic safety did not secured. Upgrading the seismic safety of existing houses and buildings is therefore essential.
(2) In the districts where wooden houses were densely placed, multiple fires were developed following an earthquake. Large area was burnt due to the spread of fires. Urban planing and development considering multiple fires is therefore essential.
(3) Severe damage was developed on civil infrastructure. Because the socio-economic activities of the urban area are highly supported by these structures, upgrading the seismic safety of civil infrastructure is essential. Especially the damage of road facilities induces the loss of emergency activities for rescue, restoration and transportation in the urban area. Construction of emergency transport highway network is therefore essential.
(4) Due to the lack of pre-earthquake countermeasures such as evacuation planning and disaster prevention base, isolated districts were developed. In these districts, evacuation of residents, emergency relief activities and restoration activities were in trouble. And the risk of secondary disaster such as sediment-related disasters were also developed in these districts. Pre-earthquake countermeasures regarding

evacuation and disaster prevention base are therefore essential.

(5) Interruption of highway networks due to the structural damage on road facilities such as bridges induced significant loss of socio-economic activities in and around the damaged area. When the structural damage is developed on civil infrastructure by an intense earthquake, minimizing the earthquake effects due to the structural damage is therefore essential.

(6) Severe damage was developed on lifeline facilities such as electricity, gas and water. Because the socio-economic activities and the livelihood of the urban area is highly supported by lifeline facilities, upgrading the seismic safety of lifeline facilities is essential.

Based on these technical and political issues, it is urgently required to conduct structural countermeasures on civil infrastructures and buildings for upgrading the seismic safety. And it is also required to promote urban planing and development policies for the earthquake hazard reduction.

2. Earthquake hazard reduction program in MOC

Immediately after the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, MOC established seismic safety commissions for each infrastructure (road, river, sewerage, dam, erosion and sediment control, and shore protection facilities) and buildings (general buildings and governmental buildings). Damage causes were studied based on damage investigations and analyses, and technical and political issues which should be studied hereinafter were pointed out by these commissions.

As an accomplishment of the academic activities following the earthquake, proposals on the seismic design procedures for civil infrastructure and buildings were summarized by Japan Society of Civil Engineers and Architectural Institute of Japan. Fundamental policies of technical and political activities for the earthquake hazard reduction were also pointed out in these proposals.

Based on the knowledge derived from above mentioned activities, MOC is intentionally promoting the revision of seismic design standards, seismic assessment and seismic strengthening for upgrading the seismic safety of civil infrastructure and buildings. Table-2 shows the revised seismic design standards after the earthquake. Revised seismic design standards and seismic assessment/ strengthening alternatively will secure seismic safety of newly constructed and existing facilities.

From the technical and economical points of view, on the other hand, securing seismic safety of facilities against incredible large-scale earthquake is difficult. Supposing the structural damage on facilities against such a large-scale earthquake, minimizing the sosio-economic loss in and around the urban area will be more important. MOC has developed a "Comprehensive Earthquake Hazards Reduction Program for the Urban Area" in 1995 and is promoting urban planning/ development based on the following fundamental policies.

(1) Comprehensive and intentional promotion of urban planning/ development

Considering the earthquake effects into the "Master Plan of urban planning/ development", earthquake countermeasures should be conducted comprehensively and intentionally.

(2) Construction of frame structures with high seismic safety

Districts with high seismic risks, i.e. wooden houses are densely placed, should be disappeared. And construction of frame structures that are required for emergency activities and earthquake hazard mitigation should be promoted. As the frame structures, intelligent districts where medical/ welfare/ administrative/ storage facilities are accumulated, and fire protection zone which is fabricated by road/ river/ park/ green belt/ fire-resistant building should be considered.

For the earthquake hazard reduction of regions where houses and buildings are densely placed, comprehensive re-development based on the "Master Plan" is important. Re-construction of fire protection buildings and construction of infrastructures such as roads and parks in combination with the fire protection buildings should be also promoted based on the newly established "Act for Densely Built-up Areas Improvement for Disaster Mitigation".

(3) Construction of civil infrastructure for the regional hazard reduction

For the emergency activities such as fire service/ evacuation/ transportation, emergency transport highway networks, evacuation road networks and public spaces should be constructed. Common buildings for government offices should be constructed as disaster prevention bases.

(4) Securing seismic safety of lifelines

Foe securing lifeline functions, construction of common utility ducts and compact cable boxes which receive electric cables/ gas pipes/ water pipes/ telephone cables should be promoted. Facilities that utilize the river water and purified sewage water to the fire fighting and evacuating activities should be constructed. Also, emergency communication networks among administrative agencies, highway users and residents should be constructed.

(5) Construction of wide-area highway networks

Interruption of the fundamental highways induces a nationwide socio-econmic loss. For minimizing this effect, construction of wide-area highway networks should be promoted. Redundancy of the highway networks should be secured by preparing substitution roots.

Ⅲ . PROPOSAL

Civil infrastructure and buildings have suffered severe damage by recent major earthquakes also in U.S.. Continuous efforts for upgrading the seismic safety of civil infrastructure and buidings are commonly important in Japan and U.S..

Among recent major earthquakes, 1989 Loma Prieta Earthquake and 1994 Northridge Earthquake induced significant loss of socio-economic activities in the urban area. In addition to the structural countermeasures for upgrading the seismic safety, therefore, urban planning/ development policies to reduce the vulnerability of urban area are urgently required in both countries.

Regarding the structural countermeasures on civil infrastructure and buildings, both countries have much technical knowledge based on the past earthquake disaster experiences and research activities. Technical information exchanges and cooperative research programs on the following subjects are quite effective to promote earthquake hazards reduction in both countries more expeditiously and economically.

1.Earthquake countermeasures on civil infrastructure

(1) Earthquake ground motion for seismic engineering

The seismic design force is one of the fundamental conditions for the seismic design of civil infrastructure. The seismic design force, which was for the first time implemented into several regulations based on the catastrophic disaster caused by 1923 Kanto Earthquake, has been revised many times based on research results of the seismic engineering and damage investigations caused by past earthquakes. Research activities on the appropriate seismic design force are now carrying on based on the newly detected acknowledges from the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, i.e. a) maximum acceleration is much bigger than that of past earthquakes, b) response spectra is much bigger through wide frequency band, c) number of waves is smaller than that of past earthquakes, d) due to the non-linearity of ground, ground motion amplification on the soft soil deposit is smaller than that of the past earthquakes.

As described above, the seismic design force for seismic design of civil infrastructure has been modified. It should be emphasized, however, that further improvement is required and that for that purpose research based on not only civil engineering but various fields including seismology, earth science and geology is essential, such as the estimation of the ground motion using the fault model, and the seismic hazard analysis based on the geological information of active faults.

(2) Seismic design procedures for civil infrastructure

1) Seismic design of highway bridges

Some highway bridges suffered serious damage by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Many reinforced concrete columns suffered damage in shear at the

terminated points of main reinforcement at the mid-height. Local buckling of web and flange plates progressed to result in rupture of welding at corners in rectangular steel columns.

The seismic safety commission established by MOC immediately after the earthquake analyzed the failure mechanisms and causes. The seismic design specifications for highway bridges were revised in November 1996. Although newly detected acknowledges based on these analyses were introduced in the revised specification, further improvement for upgrading the seismic design procedure is required. Research subjects to be studied are a) evaluation method of dynamic strength and ductility for structure members, b) application of dynamic analysis method, c) bearing systems required for securing dynamic strength and deformation abilities of whole bridge, d) design method of falling-off prevention devices considering impact forces, e) re-evaluation of seat length, f) evaluation of liquefaction and lateral spreading effects on whole bridge, g) evaluation of seismic safety of whole bridge.

To conduct these researches efficiency, collaborative research activities are supposed to be effective.

2) Seismic design of dam structures

On the dams, major damage which spoils the seismic safety of structures was not found in the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Considering the severe damage on the other civil infrastructure, however, the seismic safety commission established by MOC studied the seismic safety of existing dam structures. In the commission, it was pointed out that dam structures designed by the present procedure have enough seismic safety.

Although major damage has never been developed, seismic effects should be considered appropriately in the investigation, design and construction of dam structures because dams are large-scale and important structures in which huge volume of water is stored. Continuous efforts to upgrade the seismic design procedure are therefore essential.

To conduct these researches efficiency, collaborative research activities are supposed to be effective.

3) Application of innovative technologies

As innovative technologies for reducing the structural response during an earthquake, a seismic isolation system, an active control system and hybrid control system have been developed.

Further research activities on the intelligent seismic structures using innovative intelligent materials such as self-diagnosis-materials and self-repairable materials are

required. Development of these technologies enables the damage detection and damage restoration to be carried out easily and quickly immediately after an earthquake.

To conduct these researches efficiency, collaborative research activities are supposed to be effective.

(3) Seismic assessment and strengthening methods for civil infrastructure

1) Seismic assessment and strengthening of civil infrastructure

For enhancing the flexural strength and ductility of reinforced concrete columns, a reinforced concrete jacketing and a steel jacketing are effective. Research efforts have been conducted on evaluating the flexural strength and ductility of retrofitted columns through loading tests.

For steel columns, a corner strengthening, additional rib-welding and infill-concrete casting have been examined.

To conduct these researches efficiency, collaborative research activities are supposed to be effective.

2) Seismic assessment and strengthening of earth structures

As a secondary disaster caused by the structural damage on earth dams and riverbanks, flooding in wide area due to the overtopping of water could be developed. Overtopping of water would occur when the settlement is larger than the freeboard. For reducing the disaster risk, it is therefore required to develop a practical estimation method of structural settlement.

The seismic assessment and strengthening of riverbanks, which has been recently initiated in Japan, has already been promoted in U.S. for these twenty years. To conduct these works efficiency and economically, collaborative research activities are effective.

3) Seismic strengthening of underground pipelines against liquefaction

Disaster caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake lead public works related organization to increase the seismic performance level of most infrastructure. However damage mechanisms, assessment and strengthening techniques for underground pipelines have been studied supposing moderate earthquakes, much remains to be studied against more intense earthquakes.

Public sectors' commitment to improve seismic performance of underground pipelines strongly depends on the development of practical/ economical technologies required to implement. Government organizations should conduct

research efforts on identifying pipeline categories that require strengthening, providing assessment/ strengthening technologies against liquefaction, and providing cost-performance/ feasibility evaluation technology.

(4) Structural damage estimation and socio-economic loss estimation

1) Structural damage estimation of civil infrastructure

For conducting emergency activities immediately after an earthquake, disaster information systems using innovative information processing/ transmitting technologies. Especially for supporting the decision-making on the emergency damage detection and damage restoration, development of practical damage estimation system is required. Damage estimation system will enable to evaluate the outline of structural damage on highways and earth structures in a short time using structural database and ground motion data transmitted immediately after an earthquake.

To conduct these researches efficiency, collaborative research activities are supposed to be effective.

2) Socio-economic loss estimation

Structural damage on civil infrastructure induces the socio-economic loss in and around the damaged area. For conducting the comprehensive risk management of civil infrastructure, socio-economic loss estimation should be considered.

Especially for supporting the emergency activities, construction of emergency transport networks that connect government offices, hospitals, evacuation bases and transportation bases each other. Research efforts on the seismic assessment of emergency transport networks are therefore essential.

Interruption of emergency transport network induces the loss of industrial activities in a long term after the earthquake. For minimizing the effects, in addition to the strengthening of highway structures, research efforts on the loss estimation methodologies are required.

To conduct these researches efficiency, collaborative research activities are supposed to be effective.

2. Earthquake countermeasures on buildings

(1) Steel frame buildings

Japan-US Joint Workshops on Steel Fracture Issues were held in San Francisco in June 1996 and in February 1997. In those workshops, development of cooperative program for coordinating efforts related to following three items were confirmed. And some

parts of these plans are going to be given shapes.

1) Investigation on the effects of steel properties and welding on the plastic deformation
2) Investigation on theme structure designing
3) Investigation on fabrication methods, welding procedures, inspection technology, qualification systems and cost performance.

(2) Evaluation and rehabilitation of existing buildings

When increasing seismic ability for existing buildings, it is necessary to consider inhabitants and their mental and physical life because of huge amount of object buildings. And also, development of new material and construction method may be required, because seismic ability of building based on new code quite differ from old one.

Required technologies are classified as follows;
1) Increase strength and/or ductility by replacement and addition of seismic members
2) Isolation and vibration control with devices
3) Reinforcement of foundation and decrement of large interaction
4) Condominium construction

Collaborative research activities are effective on the following subjects.
1) Effect of improvement in case of leaving existing finishes
2) Development of construction method and performance evaluation
3) Evaluation of total seismic ability of building using both static and dynamic analysis
4) Making quality code and construction guidelines

(3) Performance based design

1) Concepts of performance based design

Common concepts on the performance based design should be studied between Japan and U.S.. Based on the concepts, communize of the fundamental framework of structural design systems should be studied.

2) Evaluation method of performance

Evaluation method of performance level on the structures that designed by the performance based design method should be studied. Structural response characteristics against supposed input ground motion should be studied by the seismic response analyses and loading tests. Information exchange and cooperative research activities are required on the evaluation method of performance.

3) Social systems supporting for performance based design

In addition to the development of performance based design systems, re-construction of

social systems for supporting design works are essential. Official evaluation of performance, upgrading the capability of designers, qualification provision to designers, and presentation of the performance to owners should be considered as social systems. Information exchange and discussion on these subjects are supposed to be effective for promoting social systems in both countries.

3. Earthquake countermeasures of urban area (Controlling post-earthquake fire)

Japan has significant losses form fires following earthquakes in Tokyo 1923 and Kobe 1995. U.S. suffered similar losses in San Francisco in 1906 and recently form urban fires occurred in dry climate areas such as San Francisco and Los Angeles. Recent experiences in Japan and U.S. have shown that earthquake induced damages and multiple fires over large areas can overwhelm fire safety and response systems. It is important for Japan and the U.S. to develop advanced practices and technologies for preventing multiple fires to become large urban fires.

This research will develop post-earthquake fire spread models for preventing multiple fires to become large urban fires, improved methods for estimating fires losses, advanced technology for urban land use and building control to mitigate losses from fires following earthquakes.

Collaborative research activities are effective on the following subjects.
1) Development of a post-earthquake fire spread model
2) Methodologies for estimating potential loss by post-earthquake fire
3) Building and urban planning for mitigation of post-earthquake fire losses

IV. COOPERATIVE MECHANISMS

1) Cooperative research activities on the disaster prevention technologies for civil infrastructure and buildings have been conducted under the auspices of the U.S.-Japan Joint Panel on Wind and Seismic Effects and U.S.-Japan Joint Panel on Fire Prevention respectively. And cooperative research activities on the related subjects proposed in this manuscript have been initiated under the auspices of the U.S.-Japan Earthquake Disaster Mitigation Partnership. Research activities proposed in this manuscript can be addressed by collaborative efforts of existing mechanisms.

2) Enhanced implementation of cooperative research projects and personnel exchange based on public policies will strengthen these collaborations.

V. REFFERENCES

1) Ministry of Construction: Comprehensive Earthquake Hazards Reduction Program for the Urban Area, 1995.4
2) Japan Society of Civil Engineers: Proposal on Earthquake Resistance for Civil Engineering Structures, 1996.5
3) Architectural Institute of Japan: Proposal on Earthquake Resistance for Buildings and

Urban Areas, 1995.7
4) Public Works Research Institute, MOC: Report on the Disaster caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, 1996.3
5) Building Research Institute, MOC: A Survey Report for Building Damages due to The 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, 1996.3

Table-1 Damage caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

Outline	Date	January 17, 1995, 5:46
	Epicenter	Awajishima Island
	Depth	16km
	Seismic intensity (JMA)	7 (estimated): Part of Kobe, Ashiya, Nishinomiya, Takarazuka, Awajishima 6: Kobe, Sumoto 5: Kyoto, Hikone
General damages	Casualties	Death: 6, 308 Missing: 2 Injuries: 43, 177
	Buildings	Housing: 436, 416 (Totally collapsed: 100, 302) Public buildings: 750 General buildings: 3, 952
	Fires	Number of fires: 294
Structural damages (related to MOC)	Road facilities	554 sites (on the road under the jurisdiction of nation) 449 sites(on the road under the jurisdiction of public corporations) 2, 589 sites (on the road under the jurisdiction of prefectures and municipalities)
	River facilities	32 sites on 4 rivers in 3 water systems (under the jurisdiction of nation: bank subsidence, cracks and so on) 2, 589sites(under the jurisdiction of prefectures and municipalities)
	Dam facilities	1 site (under the jurisdiction of nation: deformation of the gate of Kakogawa dam)
	Shore protection facilities	4 sites on 1 coast (under the jurisdiction of nation: bank subsidence, cracks and so on) 9 sites (under the jurisdiction of prefectures)
	Sediment control facilities	10 sites (under the jurisdiction of nation, crack etc) 23 sites (under the jurisdiction of prefectures)
	Landslides	1 site (under the jurisdiction of prefecture)
	Slope failure	7 sites (under the jurisdiction of prefectures)
	Sewage facilities	1, 050 sites
	Public spaces	428 sites (under the jurisdiction of prefectures and cities)
	Urban streets	46 sites (under the jurisdiction of prefectures and cities)
	Government offices	51 buildings
	Public housing, Corporation apartments	2, 333 houses in 34 areas (in Kobe City and other 3 cities and towns)
Lifeline damages	General water supply systems	Suspension of water supply: 1. 3 million houses (immediately after the earthquake)
	Industrial water supply systems	Suspension of water supply: 250 companies (immediately after the earthquake)
	Electricity	Cutting off of the electric power: 2. 6 million houses (immediately after the earthquake)
	Gas	Suspension of supply: 860 thousands houses (immediately after the earthquake)
	Telephone	More than 300 thousands lines influenced
	Railways	Interrupted section: 219km on bullet train, 123km on JR local line, 296km on private enterprise line (which were not restored on the day)
	Harbor facilities	Serious damage: Port Island area, Rokko Island area in Kobe Bay Subsidence and crack of wharf and road: Osaka Bay

Table-2 State of revisions of the seismic design codes for structures after the Hyogoken- nanbu earthquake

September 1997
Ministry of Construction

State of the arts	Facilities (Date)	Contents
Revised	a) Government buildings (Oct. 1996)	Upgrading level of seismic performance
	b) Sewage facilities (Aug. 1997)	Consideration of larger input ground motion Countermeasures to liquefaction Increasing redundancy and structuring facility's network
	c) Riverbanks (May. 1997) (For where the second disasters are expected)	Considering seismic forces newly Countermeasures to liquefaction
	d) Highway bridges (Nov. 1996)	Consideration of larger input ground motion Revising structural detailed design code (for fail safe equipment)
	e) General buildings (Dec. 1995)	Revising structural detailed design code (for pillars in the steel frame structure and pilotis style)
Under Revising	a) Retaining walls of housing lots (Autumn 1997)	Considering seismic forces newly
Others	a) Shore protection facilities	Check of seismic performance based on a manual
	b) Dam facilities	No revising (because their code were judged appropriate)
	c) Sediment control facilities	
	d) Landslide	

三陸はるか沖地震シンポジウム（H10年1月7日～8日、八戸市）

道路施設の即時被害予測システムの開発

三陸はるか沖地震シンポジウム論文集(1998年1月)

道路施設の即時被害予測システムの開発

Development of Real-time Earthquake Damage Estimation System for Road Facilities

杉田 秀樹*、濱田 禎**
Hideki SUGITA and Tadashi HAMADA

＊工博、建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課長(〒350 茨城県つくば市旭1番地)
＊＊建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課研究員(同上)

Earthquake damage on road facilities does not only reduce their functions but affects the socio-economic activities in and around the damaged area. Therefore, besides improving seismic performance of road facilities, post-earthquake emergency responses to reduce the damage effects must be jointly promoted.

This paper presents a Real-time Earthquake Damage Estimation System for Road Facilities which is under development at Public Works Research Institute, Ministry of Construction. By providing rough estimation on damage states and damage distributions in a short time, the system will support decision-makers to facilitate emergency responses immediately after an earthquake.

Key Words: Real-time Information System, Damage Estimation, Emergency Activities, Highway Bridge, and Ground Liquefaction

1. 地震時初期対応の課題

道路施設管理者の震後対応は、地震諸元の把握、管理施設の緊急点検・緊急措置、施設機能を確保するための応急復旧、地域の将来計画を考慮した本復旧の手順で実施される。初期対応は一般に地震諸元の把握から管理施設の緊急点検・緊急措置までの活動段階と定義でき、施設被害の全体像を把握し、二次災害の発生を防ぐための緊急措置を施すことが主眼となる。初期対応を迅速に進めることは、震後対応全体の基本方針を定める上で、また、応急復旧や本復旧を円滑に進める上で極めて重要である。

一方、1995年兵庫県南部地震では、施設管理者の初期対応の遅れが大きな課題として指摘された。これは、①防災担当職員の参集に時間を要したこと、②大規模同時多発的な施設被害の点検に時間を要したこと、③電話回線の不通・輻輳により被災情報の連絡・集約に時間を要したことにより、災害対策本部において施設被害の全体像に係わる情報が得られなかったためと考えられる。

施設被害の全体像を把握するのに要した時間を、施設被害が比較的軽微であった1994年三陸はるか沖地震[1]と比較すると表1の通りである。一般に被災規模が大きいほど全体像の把握に要する時間は増加するが、一方で、対応方針の迅速な策定が必要とされる。大規模地震に対する初期対応の迅速化を図るためには、限られた人員で効率的に点検を行い、被災情報を一元的かつ確実に集約し、できるだけ早期に施設被害の全体像を把握するための仕組み作りが重要である。

表1 施設被害の全体像を把握するのに要した時間

	1995 兵庫県南部地震	1994 三陸はるか沖地震
地震発生	1月17日5時45分	12月28日21時19分
施設の緊急点検	8:00頃～18日8:00頃	21:50～23:22
所用時間	およそ24時間	およそ90分

2. 即時震害予測システム

2. 1 基本方針

土木研究所において研究開発を進める即時震害予測システム[2]は、地震直後の情報の少ない段階において管理施設の被災可能性を推計することにより、施設管理者の初期対応を情報面から支援するものである。本システムの基本的な考え方は、以下の通りである。

1)推計対象とする地震被害は、交通機能に及ぼす影響が

大きい地盤の液状化と橋梁被害とする。

2)震前に蓄積した地盤・構造物情報と、震後に観測される地震動情報を組み合わせることにより、被災可能性を推計する。

3)被災可能性の推計は、防災担当職員が参集して緊急点検の準備を整えるのに必要な15分間で完了させる。

4)管理地域全体の推計結果を、デジタルマップ上にビジュアルに表示する。

本システムの導入により期待される具体的な効果は、以下の通りである。

1)被災可能性の高い地域を特定できるため、限られた人員で効率的な緊急点検が可能になる。

2)効率的な点検を通じて、施設被害の全体像を早期に把握することが可能になる。

3)緊急点検の完了を待たずに、応援体制や資機材運用に係わる意志決定を短時間に行うことが可能になる。

2. 2 システム構成

即時被害予測システムのシステム構成を示すと図1の通りである。本システムの主要パーツである地震計ネットワーク[3]、建設省防災通信無線網及びワークステーションの役割は、それぞれ以下の通りである。

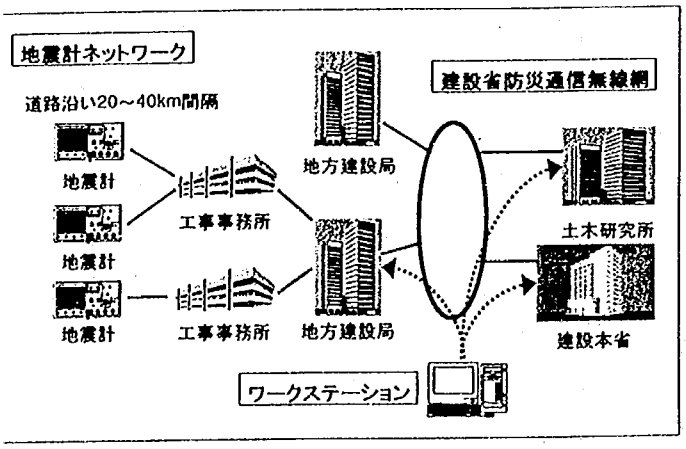


図1 即時被害予測システムのシステム構成

1)地震計ネットワーク:管理施設近傍の地表面における地震動の強さを網羅的に観測し、リアルタイムに施設管理者に集約する。平成7年度より3箇年計画で、都市域で20km間隔、他の地域で40km間隔を目途に、全国約700箇所で観測点の整備が進められている。

2)建設省防災通信無線網:建設本省、地方建設局、工事事務所を網羅しており、観測点で検知された地震動情報の伝送路となる。限られた回線容量のもとで迅速な情報伝送を行うため、地震動情報は最大加速度、SI値、気象庁が定める算出方法に従って計算された計測震度階相当値に限定している。

3)ワークステーション:地盤情報及び構造物情報を格納し、収集された地震動情報に基づく推計計算及び推計結果の表示を行う。推計結果はGISソフトを利用してビジュアルに表示する。

2. 3 プロトタイプシステムの構築

関東地方建設局の管内(1都8県)を対象に開発したプロトタイプシステムを示すと写真1の通りである。平成9年度中に、関東地方建設局への導入及び試験運用を予定している。プロトタイプシステムでは100箇所の観測点で検出された最大加速度とSI値(以下、地震動特性値と呼ぶ)に基づき、6028箇所で路線沿いの地盤が液状化する可能性(以下、路線液状化危険度と呼ぶ)、及び、368箇所で橋梁が被災する可能性(以下、橋梁被災度と呼ぶ)を推計する。推計結果の表示には、GISソフト Genamap を使用している。

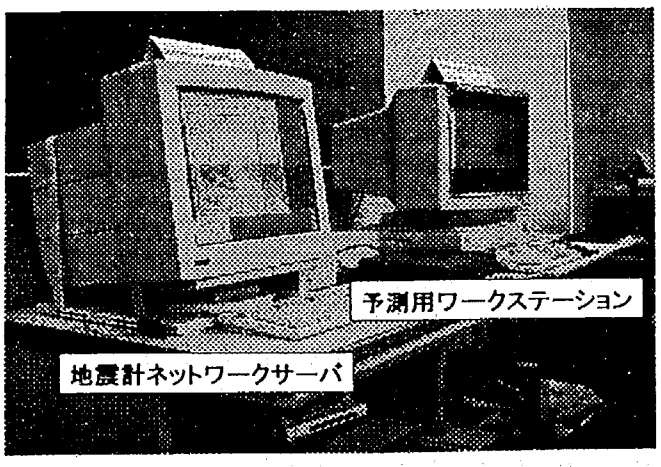


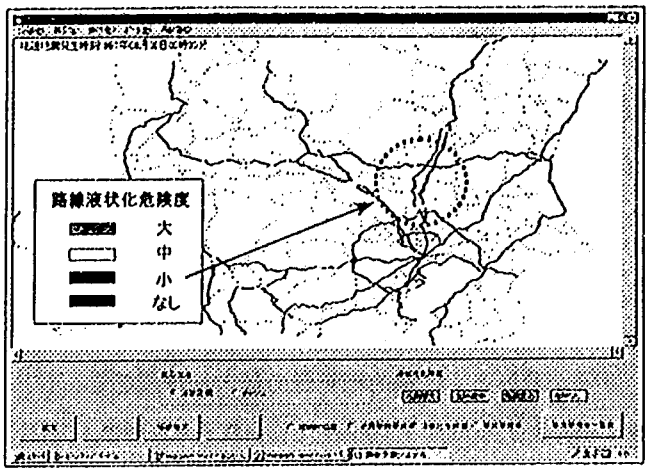
写真1 プロトタイプシステム

プロトタイプシステムによる路線液状化危険度及び橋梁被災度の表示例を示すと図2の通りである。

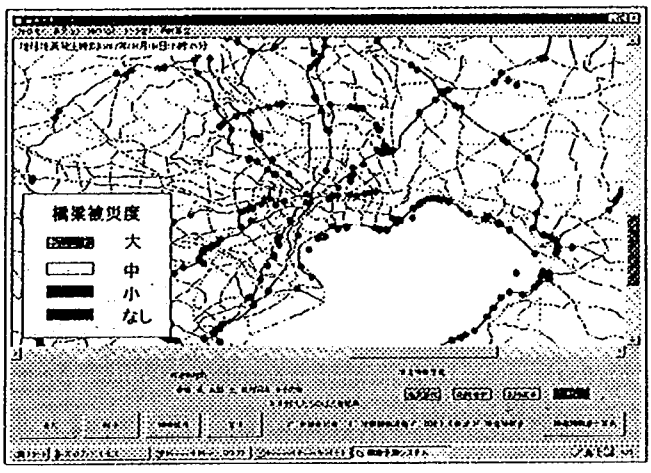
3. 被災可能性の推計

3. 1 推計の基本方針

本システムによる地震被害の推計は、図3に示すフローに基づき、以下の方針で行う。



(a) 路線液状化危険度の推計



(b)橋梁被災度の推計

図2 推計結果の表示例

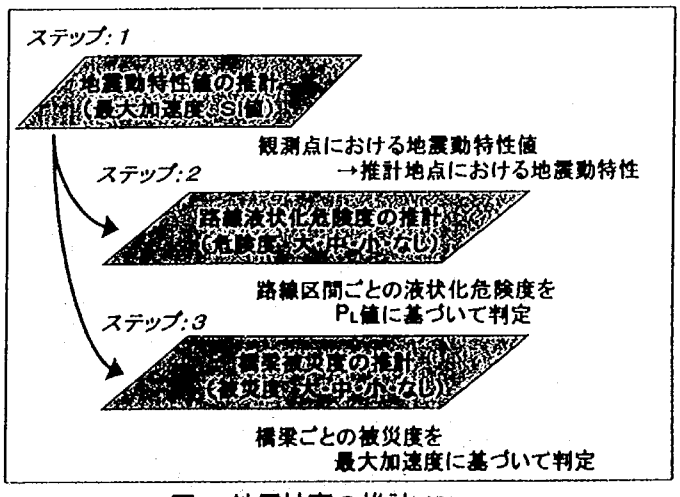


図3 地震被害の推計フロー

1)地震動特性値の推計:観測点で検出された地震動特性値から、路線液状化危険度及び橋梁被災度の推計地点における地震動特性値を推計する。

2)路線液状化危険度の推計:路線沿いの土質縦断図から土質構成がほぼ均一と考えられる区間を設定し、区間ごとに液状化危険度を判定する。液状化危険度の判定は、区間ごとに推計した最大加速度と、液状化に対する抵抗率F_L[4]に基づき次式で算出されるP_Lを比較することにより行う。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x)dx \cdots\cdots\cdots (1)$$

$$F_L = R / L$$

ここで、xは地表面からの深さ(m)、F_Lは液状化に対する抵抗率、P_Lは液状化危険度、Rは動的せん断強度比、Lは地震時せん断応力比である。

3)橋梁被災度の推計:道路防災総点検など平常時の点検で蓄積された構造諸元データに基づき、施設ごとに橋梁被災度を判定する。橋梁被災度の判定は、橋梁位置で推計したSI値から橋梁を構成する主要部材の被災可能性を判定し、主要部材の被災可能性を組み合わせることにより行う。判定に用いるSI値は次式で算出しており、構造物に及ぼす地震動の繰返し特性の影響を反映することができる。

$$SI = \frac{1}{25} \sum_{i=0.1}^{2.5} S_{vi} \cdots\cdots\cdots (2)$$

ここで、S_{vi}:最大速度応答スペクトルのi秒成分(cm/sec)

3. 2 被災可能性の分類

上記の手順で判定された被災可能性は、路線液状化危険度及び橋梁被災度ともに、"大"・"中"・"小"・"なし"の4段階で定性的に表現する。被災可能性をより定量的に表現するために被災確率(%)を用いる方法もあるが、①施設管理者の立場からは意志決定に結びつく定性的な表現が望ましいこと、②定量的な表現に見合うだけの推計精度が得られ難いこと、③定性的な表現とすることで推計時間を短縮できること、から大きく4分類で表現することとした。

表2 被災可能性の分類

被災可能性	道路交通機能	必要な対応
大	長期通行不可となる可能性あり	本復旧
中	ある程度の期間で通行可	応急復旧
小	比較的短期間で通行可	応急復旧
なし	通行に支障なし	必要なし

"大""中""小""なし"の定義を示すと表2の通りである。

被災可能性を具体的に想定される道路交通機能と結びつけて定義することにより、緊急措置や応急復旧に係わる施設管理者の意志決定を容易にできる。

3．3 地震動特性値の推計

1）推計手順

路線液状化危険度及び橋梁被災度の推計地点における地震動特性値の推計は、図4に示す手順で行う。推計に要する時間を考慮せずに精度だけを追求するのであれば、予測の対象となる地盤及び構造物をモデル化し、各地震毎に動的解析を行うのが一般的である。本システムでは、地震発生から15分間で推計計算を完了させ、かつ、実用的な精度を確保できる方法として、以下の推計方法を用いることとした。

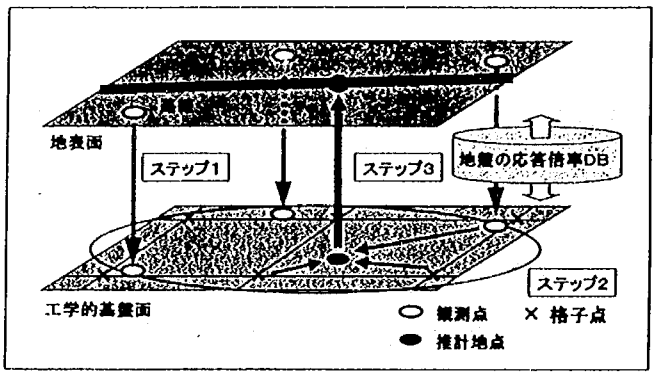


図4 地震動特性値の推計手順

①各観測点における地震動特性値に、事前に用意した地盤の応答倍率を用いて、観測点直下の工学的基盤面位置における地震動特性値を推計する。

②工学的基盤面内で、推計地点直下の地震動特性値を補間により推計する。

③地盤の応答倍率を用いて、推計地点における地震動特性値を推計する。

2）地盤の応答倍率

地盤の応答倍率は地震動の繰返し特性や地盤の非線形性により変化するため、地震ごとの観測波形を用いて計算するのが望ましい。しかし地震計ネットワークから得られる情報に地震波形は含まれないため、既存の標準的な地震波形を用いて、地点ごとの応答倍率を SHAKE により あらかじめ計算しておくこととした。

標準的な地震波形としては、硬質な地盤で観測された代表的な5波形の試計算結果から、平均的な応答特性が得られる開北橋記録を選定した。また地盤の非線形性の影響は、次式により考慮することとした。

$$\alpha = a \times b^{-x} \cdots\cdots\cdots (3)$$

ここに、 α：地盤の応答倍率

x：基盤位置における最大加速度（SI値）

a, b：非線形性の影響を表す係数

係数 a 及び b は、開北橋記録の最大加速度をそれぞれ50、100、300、500gal に調整して得られる4波形を入力とした場合の応答倍率から、回帰分析を行うことにより、観測地点及び予測地点ごとに定めた。一例を示すと図5の通りである。

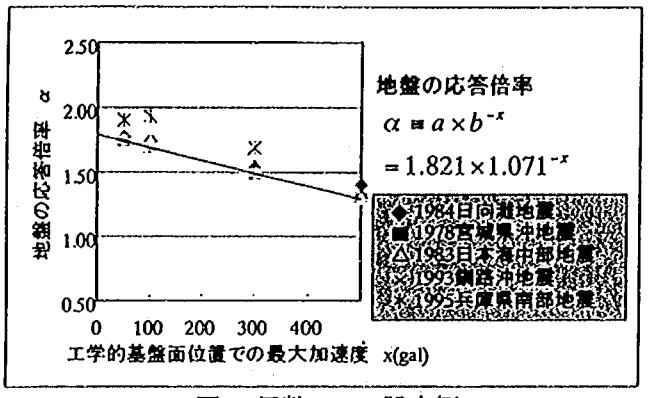


図5 係数a, bの設定例

3）工学的基盤面における地震動特性値の補間

工学的基盤面において、推計地点直下の地震動特性値は、図6に示すように以下の手順で推計する。

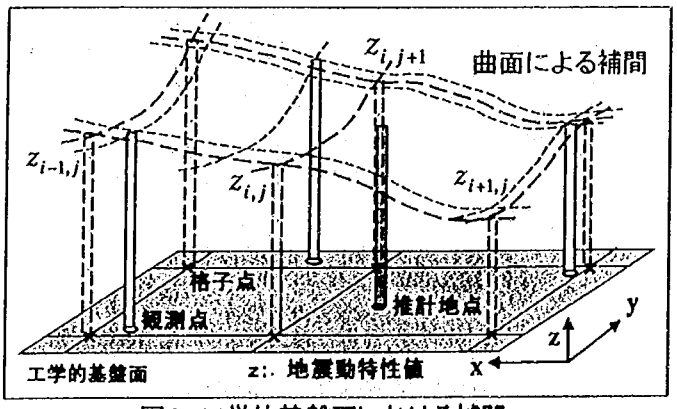


図6 工学的基盤面における補間

①推計対象地域を10km メッシュの格子に分割する。

②(x、y)平面を観測点の位置座標に、また、z 方向を地震動特性値に持つ空間を定義し、地震動特性値を含むなめらかな曲面を設定することにより、格子点における地

震動特性値を推計する。

③推計地点を囲む 4 格子点での地震動特性値から、推計地点での地震動特性値を距離を重みとして推計する。

本手法の特徴は、各観測点における地震動特性値が得られた段階で、地震動特性値を含む曲面を設定する点である。推計地点を囲む複数の観測点での値から直接的に補間する方法と異なり、観測値の欠測が生じた場合でも推定式を立て直すことなく柔軟な対応が可能である。

3. 4 路線液状化危険度の推計

1) P_L～路線液状化危険度マトリクス

路線液状化危険度の判定は、区間ごとに推計されるP_Lを判断指標として、表3に示すP_L～路線液状化危険度マトリクスにより行う。このマトリクスは、土木研究所における既往被害の事例分析結果に基づいて経験的に定めたものである。後述する橋梁被災度マトリクスも含めて、今後の調査研究の進捗に合わせてマトリクスを修正することにより、容易に推計精度の向上を図ることが可能である。なお、表3において危険度"大"に対応するP_Lがないのは、道路施設が地盤の液状化だけで長期間通行不能になる可能性は極めて少ないことを考慮したためである。

表3 P_L～路線液状化危険度マトリクス

路線液状化危険度	大	中	小	なし
P_L	------	$P_L>15$	$15\geqq P_L>5$	$5\geqq P_L$

2) 推計手順

路線液状化危険度の推計は、図7に示すように、以下の手順で行う。本手法の特徴は、被災度判定のしきい値となる最大加速度をあらかじめ区間ごとに計算しておくことにより、地震直後の演算を最大加速度の大小比較のみにし、推計時間の短縮を図っている点である。

①液状化抵抗率Rの事前計算：平常時に蓄積された地盤情報から、区間ごと・地層ごとに、式(1)に示す液状化抵抗率Rを計算する。

②しきい値の事前計算：液状化抵抗率Rと式(2)から、被災度"大""中""小"に応じたP_Lを与える最大加速度(しきい値)を、区間ごとに計算する。

③被災度の判定：区間ごとに推計される最大加速度としきい値の大小比較を行い、区間ごとの路線液状化被災度を判定する。

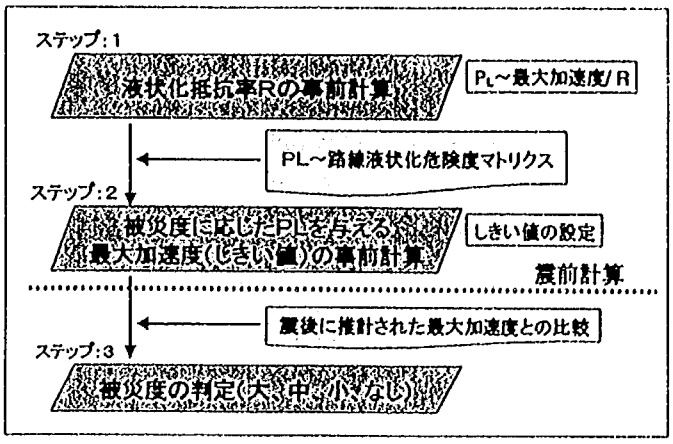


図7 路線液状化危険度の推計手順

3. 5 橋梁被災度の推計

1) SI値～部材被災度マトリクス

橋梁を構成する主要部材の被災可能性は、当該橋梁を含む区間ごとに推計されるSI値を判断指標として、表4に示すSI値～部材被災度マトリクスにより判定する。判定対象とする主要部材と被災モードは、橋梁全体としての被害につながる可能性を考慮して、RC橋脚のまげ破壊、RC橋脚のせん断破壊、鋼製橋脚の座屈、支承の破損、地盤の流動化による基礎の移動、の5種類とした。

表4 SI値～部材被災度マトリクス
(RC橋脚の曲げ破壊に関するマトリクス)

適用示方書	降伏震度	主要部材の被災度			
		終局状態	終局前	降伏状態	降伏前
1979	----------	SI>50	SI>30	SI>10	10≧SI
1990	----------	SI>50	SI>30	SI>10	10≧SI
1995	$0.6>k_{hy}$	SI>50	----------	----------	50≧SI
	$k_{hy}\geqq 0.6$	SI>100	SI>50	----------	50≧SI

本マトリクスは、土木研究所における既往被害の事例分析結果と動的解析による分析結果に基づいて定めたものである。主要部材ごとに、被災度判定の考え方を示すと以下の通りである。

①RC橋脚の曲げ破壊：約375基の設計事例を断面寸法・重量等の構造諸元に応じて類型化し、動的解析により解析的に定めたSI値と被災度の関係に基づき、曲げ破壊の可能性を判定する。

②RC橋脚のせん断破壊：せん断破壊が曲げ破壊に先行

して生じる可能性の有無を、せん断支間比と設計年次に基づき判定する。さらに、せん断破壊による被害の程度をSI値により判定する。

③鋼製橋脚の座屈：座屈が生じる可能性を設計年次に基づき判定する。また、座屈による被害の程度をSI値により判定する。

④支承の破損：破損が生じる可能性をSI値により判定する。さらに、支承の破損が交通機能に及ぼす影響の程度を支承の高さに基づき判定する。

⑤地盤の流動化による基礎の移動：水際線からの距離が100m 以内の基礎に対して、地盤の流動化が生じる可能性をP_Lにより判定する。

2）部材被災度～橋梁被災度マトリクス

橋梁全体としての被災度は、主要部材の被災度を比較することにより、表5に示す部材被災度～橋梁被災度マトリクスを用いて判定する。すなわち、被災度が最も大きいと判定される主要部材の被害が橋梁全体としての被害度を決定すると考え、この部材被災度を橋梁被災度とする。

表5　部材被災度～橋梁被災度マトリクス

主要部材の被災度	橋梁被災度			
	大	中	小	なし
RC橋脚の曲げ破壊	終局状態	終局前	降伏状態	降伏前
RC橋脚のせん断破壊	破壊	破壊前	せん断クラック	せん断クラックなし
鋼製橋脚の座屈	座屈	座屈前	微少な面外変形	面外変形なし
支承の破壊	破壊	破損（支承高：大）	破損（支承高：小）	軽微な破損
流動化による基礎の移動	――	大きな移動	中程度の移動	軽微な移動

3）推計手順

橋梁被災度の推計は、図8に示すように、以下の手順で行う。被災度判定のしきい値となるSI値、及び、橋梁全体としての被害度を決定する主要部材をあらかじめ特定しておくことにより、路線液状化危険度の推計と同様に、地震直後における推計時間の短縮を図っている。

①主要部材のしきい値の事前計算：被災度"大""中""小"に応じたSI値（しきい値）を、主要部材ごとに計算する。

②橋梁全体としてのしきい値の事前設定：被災度"大""中""小"ごとに、主要部材間で最も小さなしきい値を橋梁全体としてのしきい値に設定する。

③被災度の判定：当該橋梁を含む区間で推計されるSI値としきい値の大小比較を行い、橋梁被災度を判定する。

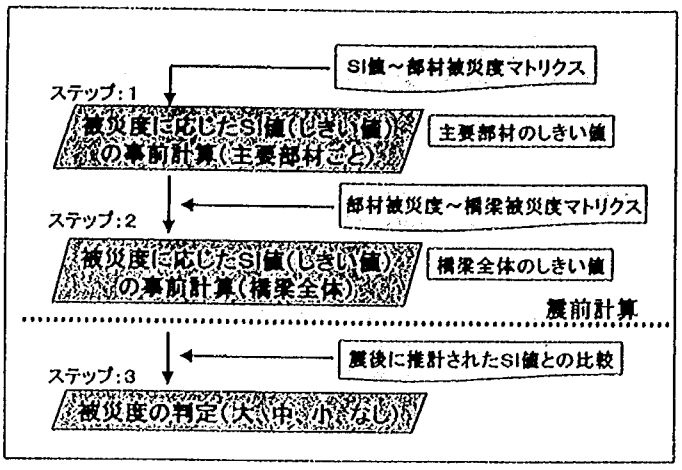


図8　橋梁被災度の推計手順

4.　結論

大規模地震に対する道路施設管理者の初期対応を、情報面から支援するための即時被害予測システムについて示した。本システムは、地震直後の情報の少ない段階において管理施設の被災可能性を推計・表示するものであり、限られた人員での緊急点検、応援体勢の整備及び資機材運用等の迅速な意志決定に貢献できると考えられる。

本システムはプロトタイプを開発した段階である。地震対策での本格的な活用に向けて、さらに以下の課題を検討する必要がある。

1）地盤情報・構造物情報の蓄積とデータベース化

2）震災事例の蓄積と推計精度の向上

3）推計対象施設の拡充

4）平常時の管理システムとの連携

参考文献

1）三陸はるか沖地震災害調査委員会：1994 年三陸はるか沖地震災害調査報告書、1995.7

2）杉田、小田桐、金子：公共土木施設のためのリアルタイム地震防災情報システムの開発、土木技術資料、Vol.39-9、1997.9

3）杉田：リアルタイム地震対応を目指した地震計ネットワークの整備、地震工学振興会ニュース、No.157、1997.11

4）(社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、1996.12

防災セミナー（H10年1月27日～28日、東京）

公共土木施設の地震防災研究の現状

公共土木施設の地震防災研究の現状

建設省土木研究所耐震技術研究センター
防災技術課長　杉　田　秀　樹

1. はじめに

20世紀の最後の10年間を“国際防災の10年（IDNDR）”とすることが国連で決議され、様々な取り組みが行われている。暴風、洪水、高潮、地震、津波等の自然災害により人命・財産等の直接的損失を被るばかりでなく、社会経済的な間接被害も甚大となることから、世界各国の国際協調活動を通じて災害リスクを軽減しようとするものである。しかしながら残念なことに、地震について見ると1994年ノースリッジ地震や1995年兵庫県南部地震等の大規模地震により甚大な被害がもたらされており、まだまだ自然災害に対する取り組みを強化しなければならないといえる。

1995年の兵庫県南部地震は高度に発達した大都市を襲った我が国初めての直下型地震であり、建築物・道路・鉄道・港湾等の公共土木施設に大きな被害を生じ、被災地域内外の都市機能や経済活動に大きな影響を与えた。この地震では、我が国で近代土木工学が始まって以来の地震力が土木施設に作用してとはいえ、例えば鉄筋コンクリート高架橋の倒壊や橋脚の崩壊など従来の技術的な見識では想像し得なかった甚大な被害や、礫質土の液状化など従来認識されていなかった新たな現象も発生した。

兵庫県南部地震により、公共土木施設の設計地震動に対する考え方の再検討、免震・制振等の先端技術を活用した耐震設計技術の高度化、震前・震後を通じた防災計画技術、及び災害復旧を迅速に行うための地震防災情報システムの充実などが緊急の課題となった。現在、各種公共土木施設の耐震設計基準の改訂作業が概ね終了しており、既存施設については耐震点検が実施され、道路橋や河川堤防等については全国で補強工事が進められている。

土木研究所では、平成８年５月に従来の地震防災部から耐震技術研究センターに組織替えを行った。耐震技術研究センターでは従来の３研究室体制に防災技術課が加わり、土木構造物の耐震設計・補強法等のハード技術に関する研究を強化するとともに、兵庫県南部地震で特に充実の必要性が高まった防災計画や地震防災情報システムに関するソフト技術に関する研究を強化し、地方建設局や地方自治体の防災計画に関する業務への技術的支援及び連携プレーに取り組んでいくことにしている。

ここでは、兵庫県南部地震による社会基盤施設の被害をレビューし、公共土木施設の耐震安全性の向上に向けた建設省の取り組み、耐震技術研究センターにおける研究活動の動向を紹介する。

2. 兵庫県南部地震による社会基盤施設の被害と影響

兵庫県南部地震による各種構造物の被害については関係機関から被害調査報告書[1]が出されている。(社)土木学会では「土木構造物の耐震基準等に関する提言（第一次、第二次、同解説）」[2]を発刊

するとともに、地盤工学会及び建築学会と共同で調査報告書のとりまとめ作業が進められている。本セミナーにおいても被害状況に関わる講演がなされているが、震災から3年が経過して各方面の対応も整理されているところであり、社会基盤施設の被害と社会・経済活動への影響に焦点をあてて簡単にレビューする。

兵庫県南部地震による公共土木施設の被害を整理すると表1の通りである。我が国の公共土木施設は、近年の主要な地震のたびに被害を受けてきた。1983年日本海中部地震では主として下水道管路施設に、また1993年釧路沖地震ではガス管路施設に大きな被害が生じた。1995年兵庫県南部地震により生じた通信ネットワークや道路ネットワークをはじめとする各種ライフラインシステムの寸断は、大都市域における災害であったことから施設被害にとどまらず、地域の住民避難や復旧活動の障害となり、さらに国土全体の社会・経済活動に間接的に大きな影響を及ぼした。

表1　兵庫県南部地震による被害

一般被害	人的被害	死者6,308人、行方不明2人、負傷者43,177人
	建物被害	住家436.416棟（うち全壊100,302棟） 公共建物750棟、その他3,952棟
	火災	294件
建設省所管施設	道路	国管理554箇所、公団等管理449箇所、府県・市町管理2,589箇所
	河川	国管理3、水系4、河川32箇所
	ダム	国管理1箇所
	海岸	国管理1海岸4箇所、県管理9箇所
	砂防施設	国管理10箇所、県管理23箇所
	地すべり	県管理1箇所
	急傾斜	県管理7箇所
	下水道	1,050箇所
	公園	県・市管理428箇所
	街路等	県・市管理46箇所
	官庁施設	庁舎51施設
	公営・公団住宅等	崩壊等34団地3,233戸
その他	上水道	断水約130万戸
	工業用水道	受水企業への断水社数約250社
	電気	停電約260万戸
	ガス	供給停止約86万戸
	電話	障害を受けた加入者電話専用回線約30万超
	鉄道	新幹線219km、在来線123km、民鉄296km
	港湾関係	神戸港ポートアイランド地区、六甲アイランド地区に甚大な被害、大阪港等で沈下・亀裂等

2.1　電話・電気・ガス・上下水道

電話等の電気通信については、長時間の停電に伴う障害の影響が大きかったほか、中継系伝送路に

比べ脆弱な加入者回線が大きな被害を受けた[3]。

電気については、発災直後260万軒であった停電軒数は、被害を受けていない系統から切り替えて送電を行い、1月17日7時30分には約100万軒まで減少した。その後1月23日15時には送電可能な箇所への電気の供給が可能となった[4]。時間的な復旧状況を図1に示す。

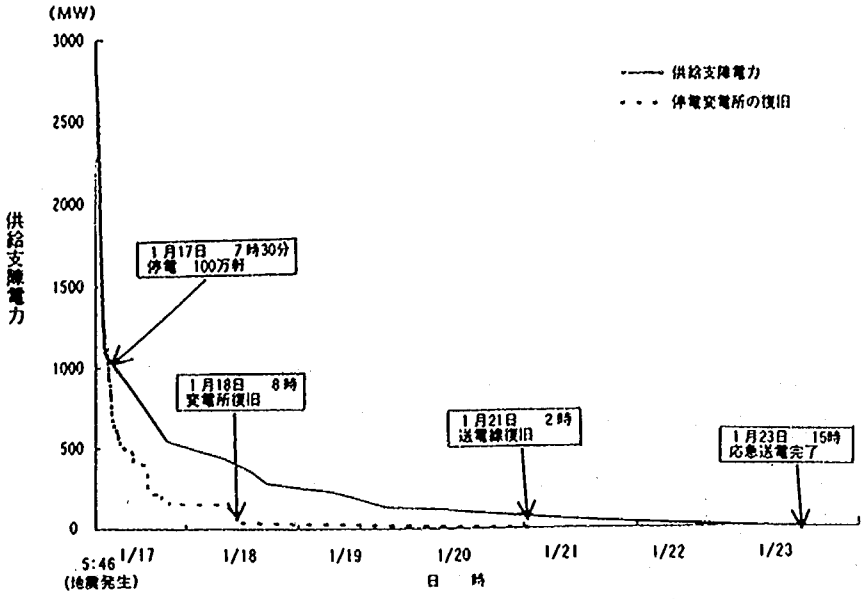


図1　関西電力：供給支障電力の推移[4]

ガスについては、製造設備、高圧導管の被害はなかったが、中圧導管106箇所と低圧導管21,647箇所で被害が生じた。地震直後は供給停止地域を設定したが、導管の復旧作業を進め3月10日には復旧作業の対象となる顧客の80%を復旧し、地震発生後85日目の4月11日に瓦礫の堆積などで復旧作業の出来ない箇所を除く全ての復旧作業を終了した。復旧作業には、導管の中に入った泥や水の処理、倒壊した家屋による道路の閉塞や交通渋滞などが影響を及ぼした。また、復旧作業と並行して地震直後からLPG、LNGを利用した代替燃料が病院など社会的に特に重要な施設に供給された[5]。時間的な復旧状況を図2に示す。

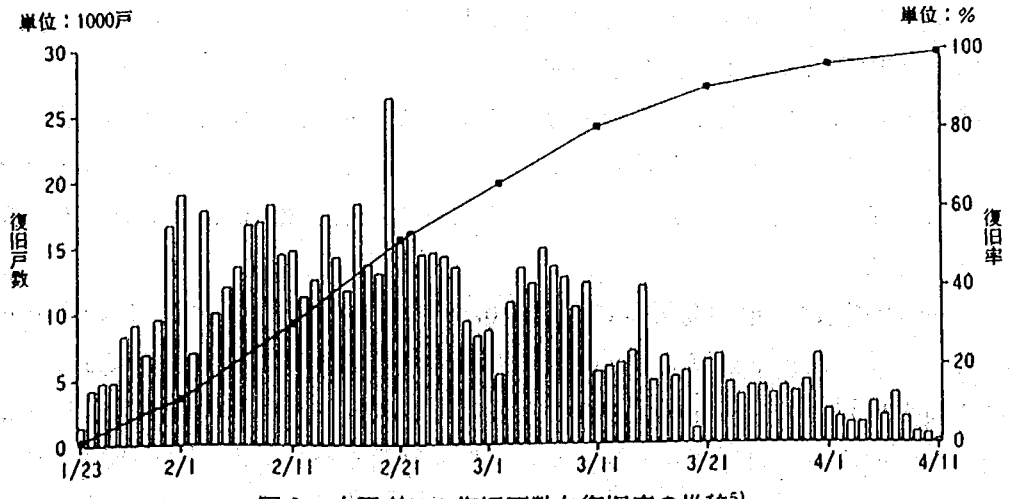


図2　大阪ガス：復旧戸数と復旧率の推移[5]

水道については、神戸市、西宮市、芦屋市などのほぼ全域が断水し、2月末までに当面の仮復旧はほぼ終えたが、一方、仮復旧までに約3ケ月を有する水道施設も見られるなど、応急給水に依存しなければならない期間もかなり長期間になった[3]。また、神戸市の下水道については、処理場ポンプ場は何らかの被害を受け、処理能力が完全に停止したものから数十%に低下するものがあった。これらは平成7年5月1日には仮復旧し機能回復が図られたが、本格復旧には9年度末までかかる予定である。

また、管路施設の被災延長は、汚水幹線が4,500m（調査延長83,000m）、雨水幹線が6,309m（調査延長377,600m）となっていた。各家庭に設置されている排水設備はその埋設深度が浅く、地盤の破壊などによって多大な被害を受けた。水道の断水により水を少量しか流さずに水洗トイレを使ったため、詰って使えなくなったトイレが続出した[6]。

2.2 道路・鉄道

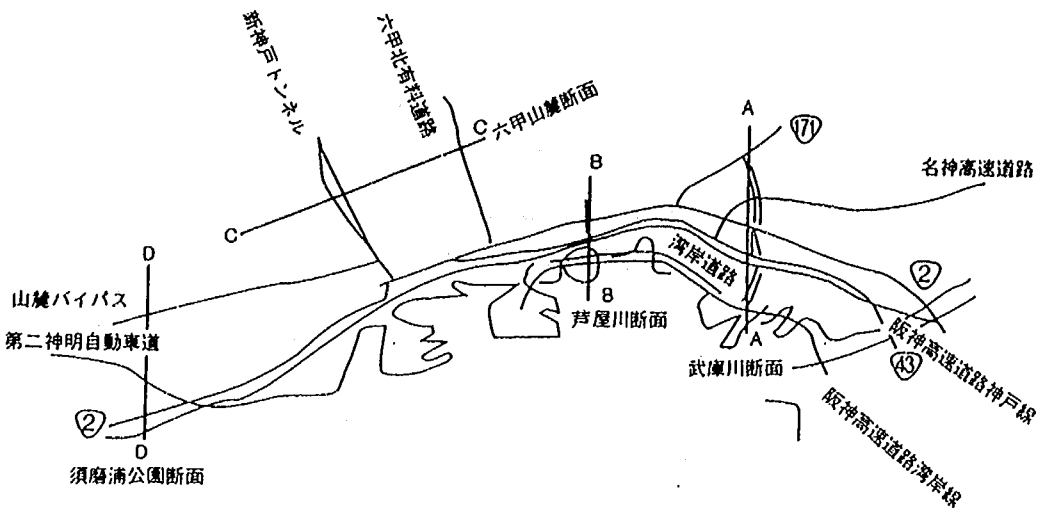
高速道路は、発災直後は名神高速道路、中国自動車道など849.8km、阪神高速道路200kmが交通規制の対象となった。高速道路の被害の大半は高架橋等の橋梁の損傷であった。名神高速道路、中国自動車道はそれぞれ復旧工事の進捗により部分開通しながら、7月29日、7月21日に完全復旧した。また、阪神高速道路では、3号神戸線、5号湾岸線が全線不通となり、湾岸線は1月下旬より緊急輸送路として開通し、7月1日より夜間に限り全線開通、すべての交通規制が解除されたのは9月であった。神戸線は1月下旬に一部復旧したが完全復旧は平成8年10月になった。

神戸・阪神間の阪神高速道路の不通は道路交通に大きな影響を及ぼした。阪神高速道路の復旧状況と交通量の推移を図3に示す。震災前の3号神戸線の1日当たり全利用交通量は187,000台/日となっており、そのうちの8割が神戸市または阪神間の各都市に発着する交通で、神戸～阪神間に係わりのある交通であった。3号神戸線は国道を含む神戸～阪神間の道路の中で、東西交通の約4割を分担し、その時間便益は約1,400億円になると推計されていた。平成7年4月時点では、東灘・灘区界断面での交通量は震災前の約40%（後19,000台/日／前291,000台/日）、神戸市役所→大阪市役所間での所要時間は約4倍（後2時間4分／前33分）となっていた[7]。

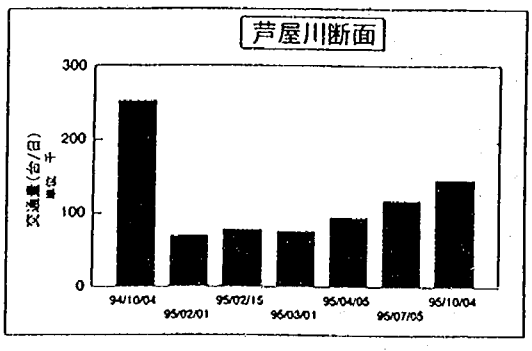
一般道路では被災地域の9市に含まれる市道以上の道路で、被災箇所は2,003ケ所に及んだ。発災直後に緊急輸送ルートとして指定された国道2号と43号には緊急車両等が集中し著しい交通渋滞が発生した。また、信号機や道路交通情報施設が停電により機能停止したことも渋滞の原因になった。市街地では、建物の倒壊等により街路が多数閉塞され避難や救助活動に支障が生じた。

建設省近畿地方建設局が行った4断面での交通量調査によると、東西方向の幹線道路が被害を受けたため神戸市東西の断面で交通量の落込みが激しく、これに代わって六甲山麓断面の交通量が平常時より大きくのびている。また、武庫川～三宮間の旅行速度は前年20km/hであったが、発災直後には3.5km/hまで低下した[1]。

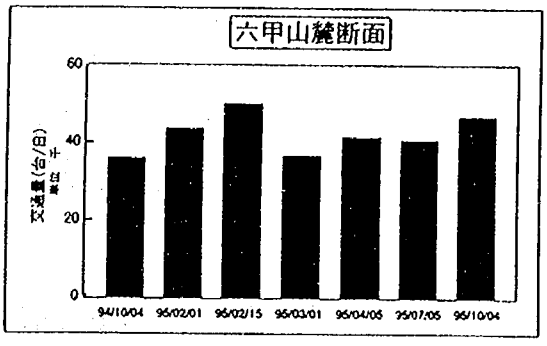
一方、鉄道の不通区間は、地震発災時には約640kmに及んだが、2日後には約半分が復旧した。大阪～神戸間を結ぶＪＲ西日本東海道線、阪急神戸線、阪神電鉄本線の合計の交通量は、1日約45万人、ピーク時1時間約12万人であるが、3線が不通になり大阪～神戸間の鉄道交通機能は完全に麻痺した。このため、復旧作業と同時に震災直後から、他の鉄道やバスによる代替輸送が検討・実施された。地震一週間後の23日には、ＪＲ西日本福知山線～神鉄～北神急行のルートで大阪から神戸中心部



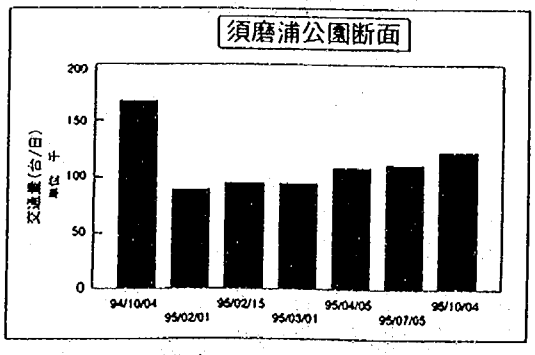
(a) 交通量調査断面図



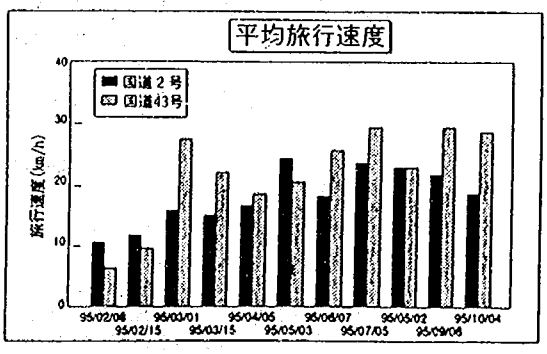
(b) 芦屋川断面における交通量



(c) 六甲山麓断面における交通量



(d) 須磨浦公園断面における交通量



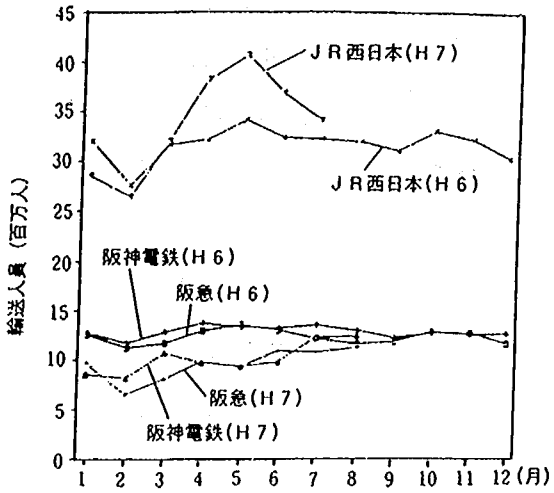
(e) 平均旅行速度(武庫川断面～三宮)

図3 阪神高速道路の交通量の推移[1)]

へ入るルートが開け、30日には西からもＪＲ西日本山陽線が神戸市中心部まで開通した。また、２月16日には神戸市交通が全線で運転を再開し、神戸市内の交通事情は大きく向上した。一方、大阪～神戸間の鉄道は地震発生から９日後の１月26日に阪神電鉄本線が神戸市東端まで達するなど東西から徐々に復旧したが、乗り換えながらもこの区間が鉄道で往復できるようになったのは２月20日のことであった。その後、ＪＲ西日本東海道線が４月１日に、また山陽新幹線も４月８日に開通し、東西の交通事情は飛躍的に改善された。残る阪急神戸線、阪神電鉄本線も６月中に全通し、大阪～神戸間の

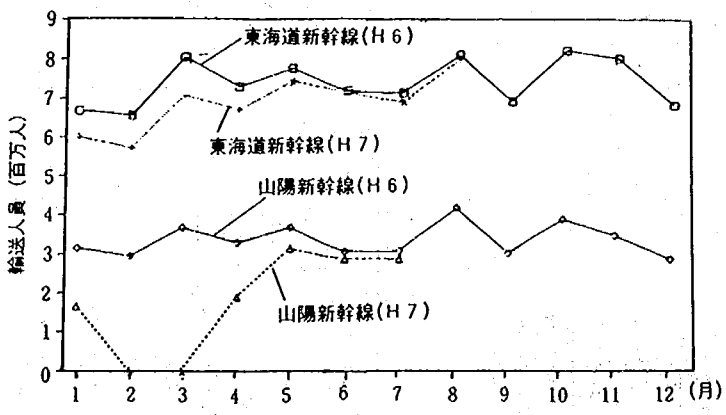
鉄道は地震後５ケ月で震災前の状況に戻った。

鉄道の輸送状況の推移は図４に示すとおりであるが、路線が全通したからといって旅客数がすぐ回復するわけではなく、数ケ月かけて徐々に回復している。一方、新幹線で代表される広域の輸送量は近距離に比べれば全通後の回復は早いが、それでも２ケ月を要している[8)]。



(注) 各データは次のとおりであり、内容に整合はとれていない。
1．ＪＲ西日本：京都駅～神戸駅間の輸送人員（６年：×，７年：▽）
2．阪急　　：神崎川駅～三宮駅間の駅乗降客数の合計（６年：□，７年：＋）
3．阪神電鉄　：出屋敷駅～元町駅間の駅乗降客数の合計（６年：◇，７年：△）

(a)　神戸市東側の輸送状況の推移



(注) 各データは次のとおりでありである。
1．ＪＲ東海　：東海道新幹線　東京駅～新横浜間の輸送人員（６年：□，７年：＋）
2．ＪＲ西日本：山陽新幹線　新大阪駅～西明石間の輸送人員（６年：◇，７年：△）

(b)　新幹線の輸送状況の推移

図４　鉄道の輸送状況の推移[8)]

2.3 港　　湾

神戸港、尼崎西宮芦屋港など24港において埠頭の沈下等の被害が発生した。特に神戸港については耐震強化岸壁の３バースを除き、ポートアイランド地区、六甲アイランド地区を中心にコンテナ埠頭を含め大部分が被災し使用不可能な状態になった。神戸港では、岸壁については１月31日までに当面の応急復旧を終了し、３月までには公共岸壁約150バースのうち、107バースが暫定的に利用可能となった[4)]。

2.4 経済的被害

阪神淡路大震災による人的物的被害は既に見たとおりであり、またライフライン施設の復旧状況が図5[9]にまとめられている。復旧に日時を要したことから多くの市民が長い間避難所などでの不自由な生活を余儀なくされたばかりでなく、また地域の経済活動へも深刻な影響を与えた。近畿地域の生産面では、1月の工業生産指数は前月比1.4%減、消費面での落ち込みはもちろん、物流面では、鉄道・道路施設の被災により輸出入産業資材のみならず国内の搬出入にも深刻な影響を及ぼし、また輸送コストも増加している[3]。

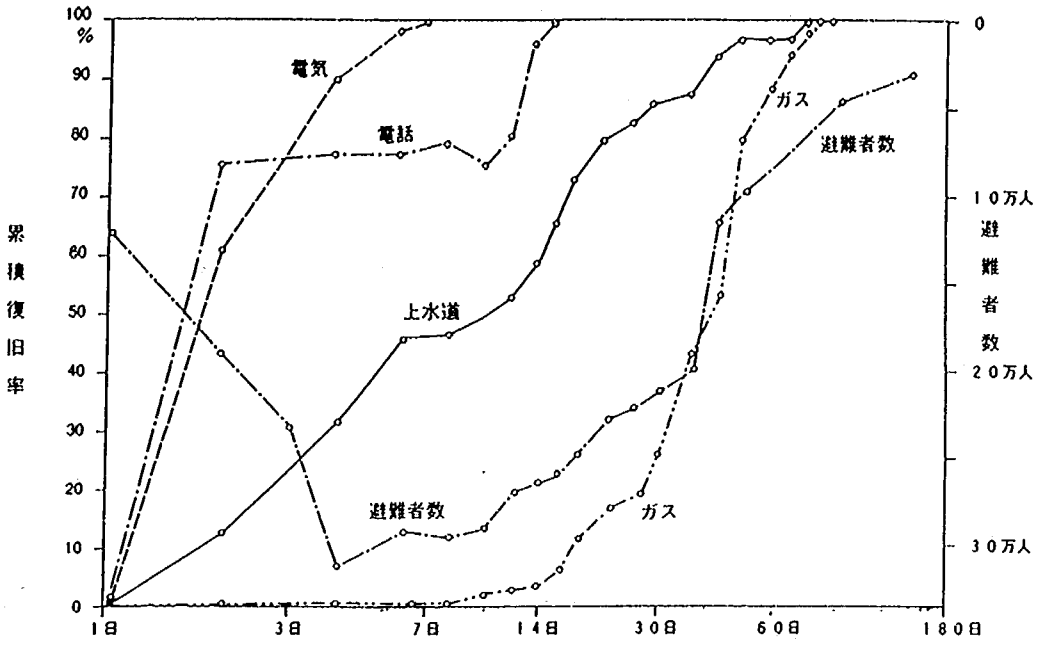


図5　ライフラインの復旧過程と避難者数の推移(阪神淡路大震災)

土木学会「耐震基準等基本問題検討会議」は、交通施設の被災による神戸市、西宮市、芦屋市の間接経済被害（平成7年3月の1ケ月値）の推計を行っており、この結果によれば「3月1ケ月の製造業、小売業の被害総額（被害額は入荷側の被害と出荷できないことによる被害の大きいほうを採っている。）は650億円程度であり、最終的に被害が3年程度まで続くと考えれば、1兆2千億円（18ケ月）となる。これに直接被害の2兆円、他地域、その他産業まで考えれば、最終的には4兆円程度と考えられる。」[2]としている。

また、港湾施設の被災影響として、運輸省の推計[10]によると、「神戸港の被災により神戸港仕向貨物の中には他港への振替輸送も行われ、大阪湾全体で取扱量が4割減少し、また釜山港を利用したものも3%近くあった。港湾被災による代替港利用による輸出費増加は1ケ月で約90億円、物流機能の低下による社会経済的損失額は平成7年3月の1ケ月間で500億円、平成7年内の総被害額は4,000～6,000億円と推計された」。

3. 公共土木施設の耐震安全性向上に向けた建設省の取り組み

3.1 兵庫県南部地震の教訓

兵庫県南部地震では、建設省の所管施設が甚大な被害を受けるとともに、多様な施設が集積された

都市の地震に対する脆弱性が露呈された。公共土木施設を含めて、地震による教訓を整理すると以下のようになる。

1) 耐震性の低い住宅や建築物の倒壊により多くの犠牲者が生じたことから、住宅及び建築物の耐震安全性確保の重要性が認識された。また、木造密集地で火災が多発し広範囲にわたって建築物が焼失したことから、市街地の面的整備の重要性が認識された。

2) 道路橋等の公共土木施設に甚大な被害が生じ、都市域の社会経済活動を支える基盤的な施設の耐震安全性確保の重要性が認識された。特に被災地域の救援活動、災害復旧対策及び生活物資の輸送等を確保するため、緊急輸送道路の整備の重要性が認識された。また、幹線道路の寸断は被災地域のみならず全国の社会経済活動に大きな影響を与えたことから、幹線道路網が被災した場合に、この影響を最小化することの重要性が認識された。

3) 避難地・避難路・防災拠点等が適切に確保されなかった地域で避難・救援・復旧に支承が生じたり、土砂災害及び二次災害の危険箇所等が発生し、都市域の安全確保のための施設整備の重要性が認識された。

4) 長期間にわたる電気・ガス・水道等ライフライン機能の停止により、ライフライン機能に依存する都市の脆弱性が浮き彫りにされた。ライフライン施設の耐震安全性確保の重要性が認識された。

3.2 施設の耐震強化

建設省では所管施設の耐震安全性を向上し、都市の地震に対する脆弱性を軽減することを目的として、公共土木施設（道路、河川、下水道、ダム、砂防、海岸保全施設）及び建築物（一般建築物、官庁施設）に関する耐震委員会を設置し、被害状況・被災原因・今後の対応方針について検討を実施した。

表2に所管施設に関する耐震設計基準の改訂状況を示す。上記の知見を踏まえて耐震設計基準を改訂することにより新設構造物の耐震安全性の向上を、また、耐震点検と耐震補強により既設構造物の耐震強化を図り、所管施設の耐震安全性向上を目指した総合的な政策を計画的に推進しているところである。

表2 建設省所管施設に係わる耐震設計基準の改訂状況

見直しの状況	施設種別	主要な内容
改定済み	官庁施設	保有すべき耐震性能を高める
	下水道	より大きな地震力を考慮／地盤の液状化対策／施設の複数化・ネットワーク化
	河川堤防	新たな地震力を考慮／地盤の液状化対策
	道路橋	より大きな地震力を考慮／構造細目の見直し（落橋防止施設）
	建築物	構造細目の見直し（鉄構造の柱脚部、ピロティ形式）
改定作業中	宅地擁壁等	新たな地震力を考慮
その他	海岸保全施設	耐震点検に基づき必要に応じて対策を実施
	ダム	現行の基準を妥当と判断、基準の改定は実施しない
	砂防施設	
	地すべり防止施設	

3.3 災害に強いまちづくり

一方、想定を超える規模の地震に対しても被害を受けない公共土木施設や建築物を整備することは、技術的にも経済的にも限界がある。想定を超える規模の地震に対しては、地震被害が地域社会に及ぼす影響を最小化することに重点をおいた防災まちづくりへの取り組みが求められている。建設省では、兵庫県南部地震による教訓を背景に“震災に強いまちづくり構想[11)]”を策定し、以下に示す基本方針のもとで“安全で安心できる地域づくり”を推進している。

1) 災害に強いまちづくりの計画的な推進

都市計画マスタープランに地震対策を反映し、各種防災対策を総合的・計画的に推進する。

2) 災害に強い都市構造の形成

木造密集市街地など震災リスクの大きな地区の解消、医療・福祉・行政・備蓄施設など震災時に必要な機能を集積した地区の整備、道路・河川・公園・緑地・耐火建築物による延焼遮断帯の整備を推進する。

3) 防災性向上のための根幹的な公共施設の整備

地震直後の消防活動・避難活動・輸送活動をサポートするため、緊急輸送道路ネットワーク・避難路ネットワーク・地域の中枢防災拠点となる合同庁舎の整備を推進する。

4) ライフライン・情報通信システムの整備

電気・ガス・水道・電話などライフライン機能の地震時安全性を向上するため、共同溝や電線共同溝の整備を推進する。また、河川水や下水処理水等を緊急時の消火用水・生活用水として活用するための施設整備を推進する。また、関係機関・道路利用者・住民の間の通信ネットワークを整備する。

5) 災害に強い国土構造の形成

広域幹線道路の寸断が国土レベルの社会・経済活動に与える影響を最小化するため、広域幹線道路ネットワーク整備を推進し、災害の発生に対して代替路となる径路を確保する。

4. 公共土木施設の地震防災研究の動向

4.1 提起された技術的課題

土木学会は、平成７年３月に「耐震基準等基本問題検討会議」を設置し、５月には「土木構造物の耐震基準等に関する提言」(第一次提言)[2)]を発表した。その骨子は以下の通のである。

1) 構造物の耐震性能の照査では、供用期間内に１～２度発生する確率を持つ地震動強さと、発生確率は低いが極めて激しい地震動強さの２段階の地震動強さを想定することが必要である。

2) 構造物が保有すべき耐震性能、すなわち想定された地震動強さの下での被害状態はその構造物の重要度を考慮して決定すべきである。重要度は、人命への影響、被害の社会経済への影響などを考慮して総合的に決められる。

3) 兵庫県南部地震による被災経験に照らし、現行の耐震基準を見直すべきであり、その際、水平震度の割り増し、地盤の増幅特性の考慮、液状化による地盤の水平変位の照査などについての追加・修正が必要である。

4) 兵庫県南部地震による被災経験を踏まえ、既存構造物の耐震診断を行い、緊急度により優先順

位をつけ、必要な補強を早急に推進する。

5) 耐震基準等の見直しに必要な研究開発を早急に促進する。

平成８年１月10日には地震防災性を向上させるための基本方針を新たに追加して、第２次提言[2)]が発表された。要旨は以下の通り。

1) 土木構造物の耐震性能の照査にあたり、強い地震動であるレベル２地震動については、活断層を同定し、活断層から発生する地震動を予測することを基本とする。

2) レベル２地震動を受けた場合、構造物が損傷をすることを前提として、その程度に立ち入って耐震性能を照査する。このための合理的な耐震設計法を確立しなければならない。

3) １次及び２次の２段階の耐震診断を行って、補強を必要とする構造物を選び、適切な優先順位に基づいて補強を行う。なお、目標とする耐震性能は新設構造物と同等とする。

4) 土木構造物の耐震性能の強化と併せて、計画等の面から総合的な地震防災性の向上を図るとともに、地震災害アセスメント制度の導入や、都市・地域の計画基準の見直し等を検討すべきである。

4.2 日米協力における研究課題

地震防災に関しては、日米両国では両国が地震国であることから以前よりUJNR耐風耐震構造専門部会の活動やその他の研究協力プログラムを通じて研究交流が行われてきたが、最近既存の協力及び新たな地球規模の問題に対する協力をも取り上げ、日米２国間の協力を積極的に推進しようとする枠組みが動き出している。1993年７月、宮沢総理大臣とクリントン大統領が、日米包括経済協議の一環として「地球的展望に立った協力のための共通課題（コモンアジェンダ）」を打ち出した。そして、1996年４月、新たに「自然災害の軽減（地震）」を含む８協力分野を追加した。「自然災害の軽減（地震）」の中には以下の３項目が含まれている。

1) 地震被害軽減パートナーシップ［科学技術庁手導］

2) 日米地震シンポジウム［国土庁主導］

3) 太平洋自然災害監視ネットワーク［気象庁主導］

日米地震シンポジウムは、両国から政府関係者及び科学者を集めて、現在までに２回開催されている（平成８年９月ワシントン、平成９年９月神戸）。シンポジウムでは緊急地震対策の強化方法が討議され、地震災害の軽減とそのための実践方法に関する政府の政策について意見交換が行われた。第１回シンポジウムの共同声明に盛り込まれた今後の協力分野は表３の通りである。また第２回シンポジウムでは、地震防災政策分野での継続的な協力のため、地震防災政策担当者から構成される日米地震防災政策会議（ハイレベルフォーラム）の設置が決定された。第１回会議は平成10年に開催予定であり、リアルタイム地震情報システム利用、地震被害想定モデルの活用、地震発生後の応急・復旧方策と地震被害の予防方策に係わる情報交換を行う。

また、地震被害軽減パートナーシップでは、地震予知及び被害の軽減に関する情報交換等、一層緊密な地震に関する研究開発協力を行うこととしている。平成９年９月に神戸で開催された共同調整委員会では、日米で行うべき幅広い分野の研究課題が表４のように整理された。これらの課題は、国内ではそれぞれ気象庁、郵政省、通産省、運輸省、消防庁と建設省が分担し、米国のカウンターパート機関と共に担当することになっている。

パートナーシップの課題は、いわゆるハードの技術＝地震動の特性を初めとする理学的・技術的課題が中心であり、一方シンポジウムで取りまとめられた協力分野はソフトの技術＝行政サイドの課題が中心である。それぞれ幅広い分野を含んでおり、我が国における今後の地震防災研究の枠組みを与えている。

表3　第1回日米地震シンポジウム：今後の協力分野

開発及び情報交換	○地震警告、緊急対策、復旧及び被害軽減の政策及び手続きの改善 ○地震被害を軽減するための都市計画及び都市開発政策 ○適切かつ迅速な対応を可能にする正確な地震規模評価法 ○高度な捜索・救助・消火技術 ○被災地の復興支援プログラムの改善とこれにより得られた新しい知見 ○新素材及び大規模試験施設の使用を含む建築物・構造物・ライフラインシステム等の耐震脆弱性評価及び耐震補強技術の向上、並びに設計ガイドライン、建築基準等の開発 ○政策担当者、技術者の交流及び地震により得られたデータの交換 ○大都市における危険評価と緊急事態管理
改　　善	○リアルタイム地震モニタリング、警告、予知及び地震危険区域地図 ○建物・構造物・ライフラインシステムの損害危険評価法 ○準備・被害軽減活動を啓発し、地震後の緊急対応を容易にする地震損失評価モデル ○重要施設・公共構造物・公共事業の耐震脆弱性並びにそれらの耐震性能の評価の政策及び手法

表4　日米地震被害軽減パートナーシップの研究テーマ

領域1：地震の脅威の定量化	1）将来の地震ポテンシャルの定量化 2）損失評価方法の強化 3）震源に関する基礎理論の検証 4）震源近傍における地震動・地質学的影響及び構造的反応の理解
領域2：地震災害の軽減	1）鉄骨建築物による地震リスクの軽減 2）既存及び損壊した建築物及びインフラの評価及び見直しの強化 3）性能志向型設計法の開発
領域3：緊急時対応のための技術の改良	1）リアルタイム地震情報システムの開発 2）地震時火災の制御

5.　土木研究所における地震防災研究の動向

5.1　既往の地震防災研究

土木研究所においては、1922年（大正11年）の発足以来、地震防災に関する研究は大きな柱の一つになっている。関東地震、新潟地震、十勝沖地震など多くの地震から貴重な教訓を受けて研究が進められ、橋梁、ダム、土構造物などに対する耐震設計法・対策等に研究成果が活用されている。その他

に、建設省において1972年に創設された総合技術開発プロジェクト（総プロ）では、「新耐震設計法の開発」、「土木構造物の復旧技術の開発」、「災害情報システムの開発」、「大都市地域における地震防災技術の開発」を実施してきている。それぞれの研究内容と成果は表5に示す通りである。

表5　建設省総合技術開発プロジェクト：地震防災関連

プロジェクト	内容
「新耐震設計法の開発」 1972～76	「新耐震設計法」 土木・建築の整合性、地震マップ他 →　建築：1981　建築基準法の耐震規定追加 土木：各施設毎の耐震規定に反映 1980　道路橋示方書・耐震設計編 1990　同上
「震災構造物の復旧技術の開発」 1981～85	「土木・建築構造物の震災復旧マニュアル」 (土木構造物：河川・海岸・砂防施設、道路施設、下水道施設) →　各施設毎の耐震点検・震後対応マニュアル等に反映
「災害情報システムの開発」 1987～92	「災害情報システムガイドライン」 (災害復旧編・水害復旧編・土砂災害復旧編) 基本技術編：ヘリテレビ、空中写真、ＧＩＳ 基幹施設編：震災時に必要な情報、災害情報地上検知システム、震災・復旧情報収集システム、情報伝達システム、地震時地表変状の予測、地中構造物・道路施設等の被害予測
「大都市地域における地震防災技術の開発」 1993～98	地盤震動： 地盤振動増幅(特に不整形地盤)、断層調査法、断層近傍地震動 液状化： 液状化因子の再検討(密度、不規則性)、液状化対策 都市内構造物 高架・地中等の近傍構造物、杭基礎の地震時耐力を考慮した設計 ＲＣ構造地震時せん断耐力、地中構造地の非破壊探査手法

5.2　耐震技術研究センターの研究課題

耐震技術研究センターでは、兵庫県南部地震など最近起きた地震災害からの教訓、土木学会からの提言、日米の地震防災に関する研究課題などを踏まえ、地震防災のための研究の全体像を図6のように整理して考えている。地震動、構造物の耐震設計、評価、補強などの技術に加え、社会経済的影響の評価、地域の耐震性、そのための地震防災情報の収集・活用・伝達などについて幅広く研究を進めていくこととしている。道路橋等のライフラインを中心にいくつかの研究課題を簡単に紹介する。

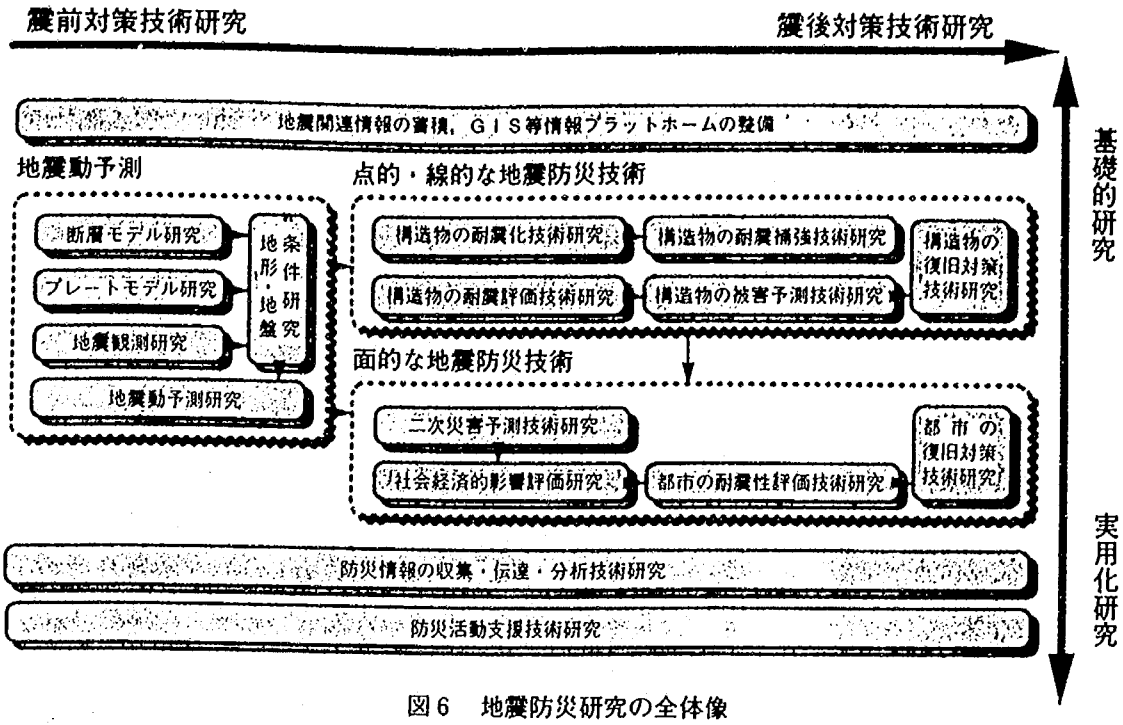


図６　地震防災研究の全体像

5.3　地震動の工学的な評価

公共土木施設の耐震設計において、考慮すべき地震動の大きさは基本要素である。一例として道路橋の設計に用いる地震動の変遷をたどると次のようになる。まず1923年関東地震後の1926年に初めて設計に導入されており、この時の設計震度は各地域における最強地震力を用いることとされた（具体的には地域と地盤条件に応じて0.1～0.3)。1939年には水平震度の標準値が0.2とされ、様々な地震被害の教訓や調査研究成果を反映して、1971年には地盤条件・地域・構造物の固有周期等の影響を考慮して標準的な設計震度が与えられる方式となった。1990年の耐震設計基準ではＲＣ橋脚の地震時保有水平耐力の照査が新たに導入され、設計水平震度は0.7～1.0という値が採用された。

兵庫県南部地震では、多くの点でこれまで我が国で観測された地震動とは異なる特性が見出された。すなわち、①既往地震に比べて加速度が大きい、②短周期から長周期にわたって応答スペクトルが大きい、そして③地震動の繰り返し回数が少ない[12)]。これを受けて道路橋の耐震設計も大幅に改訂され、地震時保有水平耐力法で用いられる設計震度はプレート境界型地震を想定したタイプＩの地震動に加えて、タイプⅡの地震動として内陸直下型地震を想定して1.5～2.0という値が設定された。また、兵庫県南部地震では④大きな地震動に対しては地盤が塑性化することにより軟弱地盤の増幅特性が低下するという現象が見られた。従来の強震記録の整理からは、一般に軟弱な地盤ほど地震動は大きく増幅されるとされてきたが、地震動が大きな場合には軟弱地盤が塑性化し、このために地震動の伝播特性が変化すると考えられる。この点は地盤種別毎の地震動設定において考慮しなければならない点である。

このように、地震荷重はこれまでに改訂され続けており、現在も一層の高度化が求められている。この数十年間で地震観測技術も高度化し、精度の高い情報が蓄積されてきている。それに呼応して、地震のメカニズムに関する研究も格段に進み、地震に対する理解も深まってきた。活断層に起因する直下型地震も含めて設計地震動の高度化を図るためには、土木工学だけでなく、断層モデルによる地

震動の推定や活断層の地質学的情報に基づく地震危険度解析といった、地震学・地球物理学・地質学など他分野との研究協力が必要である。

5.4 公共土木施設の耐震設計技術

(1) 道路橋の耐震設計法

兵庫県南部地震では道路橋に甚大な被害が生じた。鉄筋コンクリート橋脚では、曲げ損傷からせん断破壊に移行する被害や、橋脚基部での被害が生じた。また矩形断面の鋼製橋脚では、ウェブとフランジの局部座屈が角溶接の破断に発展し、大きな被害となった例があった。

建設省では道路橋の耐震性に関する委員会を設置して被災原因の究明を図るとともに、1996年11月に耐震設計基準の改訂を実施した。改訂された耐震基準には地震後の調査研究に基づく最新の技術的知見が導入されているが、さらに耐震設計基準の高度化を図るためには、構造部材の変形性能と耐力の評価法、動的解析の活用法、道路橋全体としての変形性能や動的耐力を確保できる支承構造、衝撃力を考慮した落橋防止装置、けた端から下部構造頂部縁端までの距離、液状化や地盤流動が道路橋に与える影響、及び、道路橋全体としての耐震性向上に関する研究開発の必要性が指摘されている。

改訂された耐震基準では、従来の震度法による設計に加えて、橋梁全体系の変形性能を確保するために鉄筋コンクリート橋脚・鋼製橋脚・基礎に対する地震時保有水平耐力法による設計法が導入された。今後は、活断層の特性を考慮した設計地震動の設定が急務であり、また、道路システムとして見たときに道路橋が所有すべき耐震性を議論し、これを実現できるように新しい設計体系の確立が望まれている。

(2) 新技術の活用

地震時の構造物の振動を低減することにより耐震性の向上を図るための、免震・制振・ハイブリッドコントロール技術の開発が進められている。

免震技術に関しては、変形によりエネルギーを吸収する高減衰ゴムを用いた高減衰積層ゴム支承や、減衰性能の向上と分散を目的とした免震設計法が開発され、道路橋の免震設計法マニュアル(案)(1992) としてまとめられていたが、この免震設計法が改訂された耐震基準に導入された。また、免震設計と制振設計の両者の利点を活用した振動制御方法としてハイブリッドコントロール技術の開発が進められている。ハイブリッド制御装置の一つとして、減衰性能を構造物の振動性状に応じて変化させることが可能なバリアブルダンパーが開発されている。

また、自己修復機能を有する材料や自己診断機能を有する材料等、近年の開発がめざましい新材料を活用し、被災しても簡易に修復可能で、また、被災状況を簡易に診断可能な耐震構造の研究開発が実施されている。

5.5 公共土木施設の耐震評価・耐震補強技術

(1) 道路橋の耐震評価及び耐震補強

道路橋示方書の改訂により、新設橋については従来よりも高い耐震性能を確保することとされたが、一方、既設の道路橋は相対的に耐震性が低く評価されるため、適切な耐震補強を施して耐震性を高める必要がある。兵庫県南部地震のような大規模地震に対して安全性を確保するためには、道路橋の上部構造や下部構造を一体のシステムとして捉え、強度及びじん性を向上することが重要である。

このような考えに基づいた既設道路橋の耐震性評価技術が必要である。

また、橋脚の耐震補強法として鉄筋コンクリート製橋脚のコンクリート巻立て工法や鋼板巻立て工法があり、橋脚の曲げ耐力及びじん性を向上する上で有効である。曲げ耐力及びじん性の評価手法に関する研究開発が、模型載荷実験を通じて実施されている。また、炭素繊維シートを用いた補強方法についても研究開発が進められている。鋼製橋脚に対する耐震補強技術としては、隅角部を補強する工法、補剛版を増設する工法、コンクリートを充填する工法について、研究開発が進められている。

これらを含めて、全ての橋梁に対して同時に耐震補強を進めることは経済的・実務的にも困難が多いことから、優先順位を適切に定めて効果的に耐震補強を進めていく必要がある。このためには優先順位の設定法や補強法の選定方法などが課題となる。

(2) 地下埋設管路施設の耐震評価及び耐震補強

1993年釧路沖地震や1994年北海道東方沖地震において、現地盤や埋戻し地盤の液状化により下水道管路施設に甚大な被害が生じた。液状化地盤中に設置されていたマンホールが1.5mも浮き上がったほか、埋設管路が鉛直方向・水平方向に変形した。埋設管は地盤の液状化により甚大な被害を受けやすく、また、被害の発見及び復旧も困難である。

同様に、共同溝は多くの公益施設を収容しており、都市のライフライン施設の中でも最も重要な施設である。このため、1991年には既存の共同溝に対する全国一斉の耐震点検が実施された。耐震点検により、液状化による被害を受ける可能性がある区間を抽出し、これらの区間に対して詳細調査及び対策計画が実施されている。

1995年兵庫県南部地震を契機として、公共土木施設の耐震設計水準が引き上げられつつある。地下埋設管路施設についても、新たな課題として、大規模地震時の液状化に対する安全性評価手法の構築が必要とされている。ここに、地下埋設管路施設の耐震性向上に関する施設管理者の施策を円滑に推進するためには、実務的かつ経済的な技術開発が不可欠である。このため、液状化対策が必要な地下埋設管路施設の特定、液状化に対する危険度評価技術・対策技術、及び費用便益効果の評価技術に関する研究開発を推進する必要がある。

5.6 緊急対応に向けた防災情報システムの高度化

地震による直接的・間接的な影響を軽減するためには、市民の生活や産業活動を支えるライフライン施設が地震後も機能を保持していることが重要である。このためには、まずライフライン施設の直接的な被害を最小化すること、次にライフラインネットワーク上で被害の影響をできるだけ局所的にとどめることが重要である。

道路ネットワークは、地震後の住民避難路や復旧のための緊急輸送路として極めて重要な役割を担っている。このため、道路ネットワークの損傷は、地震による間接的な影響の広がりを大きく左右することになる。地域レベル・全国レベルともに、地震による間接的な影響を軽減するためには、まず道路ネットワークの地震時の安全性を向上することが急務である。既往の地震災害によれば、道路ネットワーク管理に対する防災情報システムの開発・導入が極めて有効であることが指摘されている。防災情報システムの導入は、道路ネットワークでの耐震評価や耐震強化戦略といった効果的な震前対策を、また、道路ネットワークの被害把握や復旧戦略といった迅速な震後対応を実現するものである。

また様々な産業分野において、GISやGPSに代表されるような新しい情報技術の開発・導入が進められている。施設管理者の道路ネットワーク管理を高度化するためには、これら新技術を防災情報システムに導入するための研究開発が必要である。

5.7 地震災害の影響評価

公共土木施設の地震被害は、当該施設の機能を失わしめるだけでなく、被災地域の活動に大きく影響する。このため施設の危機管理に際しては、施設被害の予測や施設被害の影響評価に関する研究開発が重要である。なかでも、地震後の円滑な緊急活動や復旧活動を保証するためには、公的機関・医療施設・避難拠点・物流拠点等を連結する緊急輸送道路ネットワークの整備が重要である。こうした道路ネットワークの地震に対する脆弱性を軽減するためには、道路ネットワーク全体の耐震性評価手法の研究が必要である。

一方、道路施設被害の長期的な影響としては、交通容量の低下に伴う経済的な波及効果が挙げられる。地震による産業施設の被害が小さくても、関連の深い産業施設間を連絡する道路ネットワークが被災したために通行不能となったり走行時間が増加した場合、産業間の生産物の流通が困難となり、他産業へと影響が波及していく。ネットワーク上の個々の施設被害による経済的な影響を推計することができれば、影響の大小により耐震補強や災害復旧の優先順位付けを支援するデータを提供できる。

6. おわりに

平成7年度兵庫県南部地震による公共土木施設を中心とする被害とその影響について述べ、建設省の対応と地震防災研究の動向を紹介した。地震から3年が経過して被害の実態・メカニズムに関する調査、今後の対応に関する提言や勧告などが出揃い、新たな知見や教訓を反映した各種耐震設計基準の改訂も概ね完了しつつある。また、既存構造物に対する耐震補強も進められており、地震に強い安心して生活できる社会基盤造りが進められている。

しかし、兵庫県南部地震は様々な分野に多くの検討課題を残した。まだまだ調査研究を続けなければならない課題も多い。そのような課題の一つに“設計地震動の設定に活断層の特性をどのように取り込むか？”という問題がある。さらに、社会基盤施設の直接的被害が大きいばかりでなく、間接的被害も大きなものがあり、発災直後からの即時対応・緊急対応、さらには応急・復旧活動に対しても損害を軽減できるハード・ソフト技術が必要である。これらの課題を解決するためには、土木分野だけでなく多くの異分野との協調が不可欠であり、総合的な観点からの地震防災研究が求められている。

参考文献

1）土木研究所：平成7年（1995年）兵庫県南部地震災害調査報告、土木研究所報告、1996.3
2）土木学会：土木学会耐震基準等に関する提言集、1996.5
3）国土庁編：平成7年度防災白書、1995.6、平成8年版防災白書、1996.7
4）関西電力(株)：阪神・淡路大震災復旧記録、1995.6

5）資源エネルギー庁監修、ガス地震対策検討会編：ガス地震対策検討会報告書、ガス事業新聞社、1996.3
6）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、1995.7
7）阪神高速道路公団：阪神・淡路大震災からよみがえる阪神高速道路、1996.3
8）阪神・淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会：よみがえる鉄路、山海堂、1996.5
9）東京都：阪神・淡路大震災調査報告書、p.308、1995.7
10）運輸省港湾局、港湾技術研究所、第三港湾建設局：阪神・淡路大震災による港湾施設等被災状況調査報告書（第2集）、1995.10
11）建設省：震災に強いまちづくり構想、1995.4
12）田村敬一、本田利器：設計地震力、土木技術資料39-2、1997.2
13）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、丸善、1996.11