

土 木 研 究 所 資 料

平成10年度防災技術課調査研究成果
概要報告書

平成11年 8 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 © (1999) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, 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。

平成10年度防災技術課調査研究成果 概要報告書

耐震技術研究センター長	保田	雅彦
防災技術課 課長	杉田	秀樹
管理係長	葛西	伸寛
主任研究員	金子	正洋 ^{*1}
主任研究員	野崎	智文
主任研究員	遠藤	和重 ^{*2}
交流研究員	矢野	和彦 ^{*3}

要 旨

防災技術課で平成10年度に実施した調査研究の成果をまとめたものである。震災対策計画の高度化、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、公共土木施設の耐震性水準の横断的整合、まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発、地震直後における道路の早期啓開支援システム、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、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、リスクアセスメント、クライシスマネジメント、防災計画、強震観測、防災情報システム

- *1 現 企画部国際研究協力推進室
- *2 現 沖縄開発庁沖縄総合事務局開発建設部道路建設課長
- *3 交流研究員在職期間（平成10年4月から11年3月まで）

目 次

調査研究

1. 震災対策計画の高度化に関する研究	7
2. 強震計管理費	11
3. 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	19
4. 公共土木施設の耐震性水準の横断的整合に関する研究	23
5. 地区施設等の救出・救護・非難問題への効果分析 (まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発)	27
6. 震災直後における道路の早期啓開支援システムに関する試験調査	35
7. 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	39
8. 河川施設の耐震強化判定法に関する試験調査	43
9. 河川施設の強震計の点検調査	47
10. 震害予測システム構築に関する試験調査	51

(附属資料)

投稿・発表

1. 土木学会第54会年次学術講演会 (H11年 9月22日～24日・広島県東広島市)
 - ・社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定法に関する基礎的研究……………57
 - ・道路ネットワーク耐震性評価手法を用いた道路ネットワーク耐震化対策に関する
ケーススタディ……………61
2. 第25回地震工学研究発表会 (H11年 7月29日～31日・東京)
 - ・社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定方法に関する基礎的研究……………65
 - ・道路ネットワーク耐震性評価手法の提案……………71
 - ・道路ネットワーク耐震性指標を用いた道路耐震化計画のあり方……………77
3. 第22回土木計画学研究発表会 (H11年10月30日～11月 1日・熊本県熊本市)
 - ・社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定方法に関する基礎的研究……………83
 - ・道路ネットワーク耐震性評価手法の提案……………89
4. 第23回日本道路会議 (H11年10月20日～22日・東京)
 - ・地震時道路管理に向けた即時震害予測システム……………95
 - ・道路ネットワーク耐震性評価指標の提案……………99
5. 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31回合同部会
UJNR-WIND SEISMIC EFFECTS
(1999.5.11～14、Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, Japan)
 - ・RECENT PROJECTS AT PWRI FOR IMPROVEMENT OF SEISMIC
PERFORMANCE OF CIVIL INFRASTRUCTURES ……………103
 - ・SEISMEC INFORMATION SYSTEM FOR NATIONAL LAND MANAGEMENT ……117
6. 第12回地震工学世界会議
12thWORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING
(2000.1.30～2.4、Auckland, New Zealand)
 - ・DEVELOPMENT OF URGENT EARTHQUAKE ENGINEERING
SYSTEM FOR ROAD FACILITIES ……………131
 - ・A METHOD TO DETERMINE SEISMEC PERFORMANCE OF HIGHWAY
NETWORK SYSTEM ……………141

1998 (H10) 年度

調査研究

概要報告書

1. 震災対策計画の高度化に関する研究

研究期間：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、遠藤和重

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、それらを図る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。本課題は、地震防災情報システムを構築する際の考え方およびシステムに利用可能な様々な技術を検討する目的で平成 8 年度に開始され、平成 10 年度を最終年度としている。最終成果としては、「地震防災情報システム整備マニュアル（案）」をとりまとめた。

予算科目 試験研究費

2. 強震計管理費

研究期間：昭 56～平 12

担当：防災技術課 課長：杉田 秀樹 管理係長：葛西 伸寛

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地震計を系統的に配置する高密度観測と、構造物や周辺地盤上に強震計を配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、土木研究所が所有する観測施設の継続的な維持管理、観測記録の処理・蓄積および地震動の伝播特性に関する基礎的な検討を行うことを目的とする。平成 10 年度は、①高密度強震観測施設の保守点検と観測記録集の作成、②一般強震観測施設(土研所有分 12 箇所)の保守点検、③アナログ／デジタル記録変換システムの再構築、④強震観測事業の効果的な推進に向けた課題整理、⑤観測施設・観測記録データベースの拡充を実行した。

予算科目 試験研究費

3. 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

研究期間：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、遠藤和重

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し、さらにその影響は全国の生産活動にも波及する。交通ネットワークの耐震対策計画にあたっては、このような経済的影響にも基づいて検討する必要がある。本研究は、平成 8～10 年度にわたって、交通施設の被害による経済的な影響を定量評価する手法を開発し、その手法に基づいた推計アプリケーション(Earthquake Assessment System for Socioeconomic Effect: EASSE)を開発することを目的としている。平成 10 年度は最終年度にあたり、EASSE を用いて実際の地域における耐震対策計画の箇所優先順位検討を模擬的に行った。

予算科目 試験研究費

4. 公共土木施設の耐震性水準の横断的整合に関する研究

研究期間：平 10～平 12

担当：防災技術課 課長：杉田秀樹、主任研究員：野崎智文、遠藤和重

道路、河川管理施設等の公共土木施設の耐震設計にあたっては、その対象とする入力地震動及び求めら

れる耐震性能が地域内で整合が取れており、適切な投資配分で行われる必要がある。しかし現在のところ、各施設の設計には異なる基準が用いられており、必ずしも整合が取れているとは言い難い。本研究は、複数の構造物の耐震性水準を、その整合性を保ちながら合理的に設定するための手法について検討し、耐震対策事業の効率化に資するものである。平成10年度は、複数構造物の耐震対策内容を比較し、選択するための、耐震性水準、性能レベルの表示法を提案したほか、地域における耐震対策効果を最大にする耐震対策内容を設定する計算法を検討した。

予算科目 試験研究費

5. 地区施設等の救出・救護避難問題への効果分析

研究期間：平10～平14

担当：防災技術課 課長 杉田秀樹 主任研究員 金子正洋

平成7年兵庫県南部地震による市街地の甚大な被害を背景に、各地域で推進される防災まちづくりを技術面から支援することを目的として、平成10年度より5箇年計画で建設省総合技術開発プロジェクト「まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発」が開始された。本総プロでは研究領域を①地区の防災要素の影響評価手法の開発、②地区の防災対策技術の開発、③計画支援技術・防災対策推進方策の開発に分類し、公共施設整備の市街地災害抑制効果、地区レベルの防災対策、及び、住民・行政職員の合意形成支援ツールに関する研究を実施する。本研究は、救出・救護・避難問題に対する幹線系道路の信頼性評価モデルを開発することを目的として、幹線系道路の障害危険度評価手法及び緊急活動に伴う交通需要評価手法の検討を行うものである。5箇年計画の初年度である10年度は、阪神淡路大震災など既往地震時における実態情報を収集・分析し、幹線系道路における地震時機能障害と緊急活動の特性に関する知見を得た。なお本総プロでは、「防災まちづくり総プロ研究開発委員会（学・官）」「共同研究推進会議（地方公共団体・公団）」「防災まちづくり研究会（官・産）」を組織し、産学官の連携のもと研究開発を推進している。

予算科目 建設技術研究開発経費

6. 震災直後における道路の早期啓開支援システムに関する試験調査

研究期間：平7～平11

担当：防災技術課 課長：杉田秀樹 主任研究員：金子正洋

兵庫県南部地震以後、各種公共・公益施設の管理においては、個別の管理施設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うまく使うかというソフト的対処による被害の軽減手法へのニーズが注目を集めている。本課題では、情報を有効に使うことで震災直後の道路管理者の初動活動を支援し、最終的な被害を軽減する手法、すなわち、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行っており、10年度は、システムの動作環境向上のための改良、地震動分布予測手法の検証、盛土被害予測手法に関する検討を行った。

予算科目 道路事業調査費

7. 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

研究期間：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、遠藤和重

共同研究室：道路研究室（H8～9年度）

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状況が与えられた場合に、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 10 年度は、三種類の形態の道路ネットワークに対して、様々な被災パターン、補強パターン、交通規制パターンを設定し、道路ネットワーク耐震性指標を算出し、それらを比較することによって、地震に対する道路ネットワークシステムの機能を確保するためのハード対策、ソフト対策の効率性を定量的に評価した。

予算科目 道路事業調査費

8. 河川施設の耐震強化判定法に関する試験調査

研究期間：平 8 ～ 平 10

担当：防災技術課 課長 杉田秀樹 主任研究員 金子正洋

平成 7 年兵庫県南部地震を背景に、河川堤防の耐震強化事業が 7 年度より開始された。また、“河川砂防技術基準(案)、9 年改訂”では、一般堤防は平水位の地震作用に対して浸水による二次災害を生じないこと、高規格堤防は計画高水位以下の地震作用に対して安全であること等、河川堤防の耐震性水準に関して当面の目標が示された。しかし、高レベル地震動に対してどこまで耐震性能を保証するかについての考え方は必ずしも明確でない。耐震強化事業の将来計画策定に向けて、耐震強化水準や事業優先度を判断するための技術的根拠の明確化が求められている。

本研究は、近年の事業評価手法の主流である費用対効果分析により、河川堤防が保有すべき耐震性水準の合理的な選択手法を検討するものである。最終年度である 10 年度は、耐震性水準の選択フローを提案するとともに、実務への適用を図る上で解決すべき技術的課題を整理した。また、堤防沈下量評価モデルの高度化に向けて既往震災事例を追加調査し、別途開発した“即時震害予測システム”への適用を図った。さらに、設計地震外力の合理化に向けて建設省地震計ネットワーク活用WG（事務局災害対策室）に参画し“地震計ネットワーク活用方針”をとりまとめた。

予算科目 河川事業調査費

9. 河川施設の強震計の点検調査

研究期間：平 10

担当：防災技術課 課長：杉田秀樹 管理係長：葛西伸寛

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・自治体が所管する約 340 箇所の施設で観測が実施されており、観測された地震波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、強震計の年 1 回の動作確認としての保守点検、地震記録の回収、数値化の一次解析を行うことを目的とする。

平成 10 年度は 27 箇所の強震計保守点検を行い、また、「河川堤防における強震計配置計画(第 3 期)」の推進を図った。

予算科目 直轄河川改修費（東北、関東、北陸、中部、近畿、中国、四国、九州）

10. 震害予測システム構築に関する試験調査

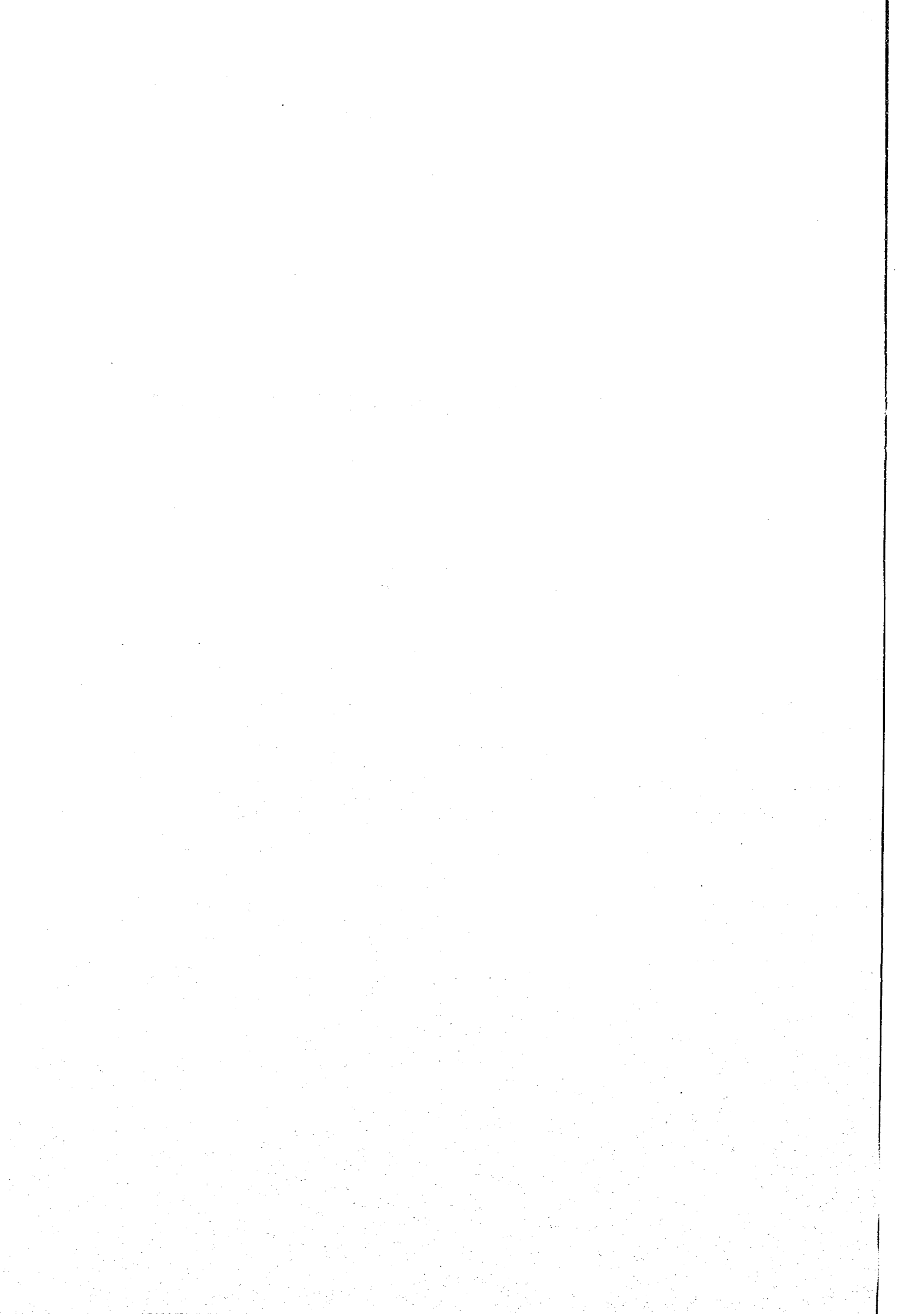
研究期間：平9～平11

担当：防災技術課 課長：杉田秀樹、主任研究員：金子正洋

関東地方建設局では、平成7年度より管理施設に作用した地震動に関する情報を震後即時に収集する地震計ネットワークを構築している。また、これと平行して、得られた地震動情報を利用して管理者に管理施設の被害状況を即時に予測して与える震害予測システムの開発を行っており、既に道路の液状化と橋梁の被害を予測して与える機能の開発を終えている。これは初動体制の確立の迅速化を図ることを目的としたものである。本課題では、既存のシステムに、河川堤防の被害状況を概略予測する機能を付加する。10年度は、河川堤防の液状化危険度予測システムの開発を行うとともに、河川堤防の沈下量予測手法の検討を行った。

予算科目 直轄河川改修費（関東）

1. 震災対策計画の高度化に関する研究



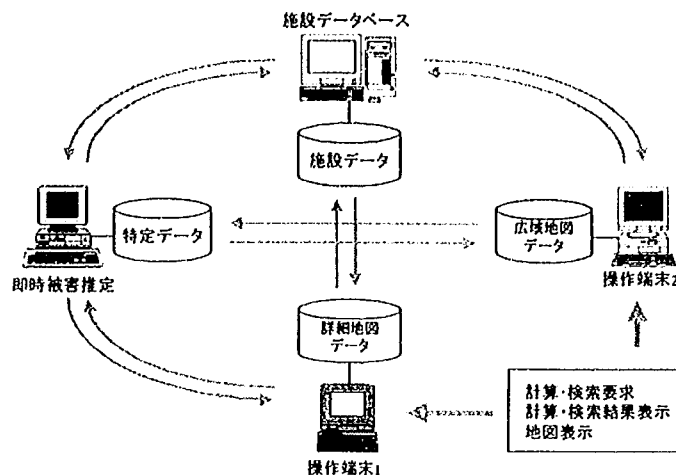
1. 震災対策計画の高度化に関する研究

研究期間：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、遠藤和重

【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。本課題は、地震防災情報システムを構築する際の考え方およびシステムに利用可能な様々な技術を検討する目的で平成 8 年度に開始され、平成 10 年度を最終年度としている。最終成果としては、「地震防災情報システム整備マニュアル（案）」をとりまとめた。



1. 研究方法

建設省地方建設本局、工事事務所等広域にわたる施設を管理する組織における震災対策活動高度化するため、下記の点に留意して調査研究を行ってきた。

- ① 高解像度衛星画像等リモートセンシング技術、GIS 等の地震防災対策への適用性および実用化のための検討
- ② 情報収集、意思決定支援に関するサブシステム機能の検討
- ③ 震災対策組織の効率性評価方法の検討
- ④ 情報・機能の分散化、構造化、共有化により、統一性と柔軟性を兼ね備えた地震防災情報システムの設計・構築方法の検討

2. 研究成果

2. 1 地震防災情報システム整備の基本方針

情報・機能の分散化、共有化は地震防災情報システム全般に関わる事項である。本研究では、従来の大規模なホストコンピュータ等を用いた情報システムと、近年急速に広がっているネットワーク分散型の情報システムの特徴を示し、その欠点を補うシステム整備の考え方を示した。また、地震防災情報システムにおいて情報を有効利用し、拡張性を確保するためには、異なるハードウェア、ソフトウェア間で情報を共有することが必要であるが、その際に留意すべき点（情報の構造化、階層化など）についてとりまとめた。

2. 3 震災対策の活動に即した地震防災情報システムの要求条件

地震防災情報システムの計画、構築にあたっては、個々のハードウェアやソフトウェアの機能が与えられてシステムを構築するのではなく、震災対策活動の内容を分析し、そこで取り扱われる情報を効率的に処理

するために要求されるシステムの機能に基づく必要がある。本課題においては、震災対策の段階を、地震被害検知段階、情報収集段階、応急対策段階、恒久復旧段階の四つに分け、各段階における作業に基づいて、収集、伝達、分析される情報を整理し、その情報処理を高度化するために利用できる技術との対応を示した。

2. 4 地震防災情報システムに必要な個別の技術

地震防災情報システムの要求条件を実現するために利用可能な技術について整理した。それらの概要は以下のとおりである。

- ・ 情報伝送、蓄積といった共通基盤技術
- ・ 強震計、リモートセンシング技術等を含む現象把握技術
- ・ 一斉同報、他機関との情報交換などに必要な情報伝達技術
- ・ GIS、データベース、画像表示などを含む情報表示・分析技術
- ・ 被害の定量化、優先順位づけ、ルート探索等の意志決定支援技術

たとえば現象把握技術としては、今後利用が可能となる高解像度衛星画像の活用の際に、その精度、入手のタイミングや時間など実用の観点から留意すべき点をまとめた(図1)。また、意志決定支援技術としては、即時被害予測技術など直接対策活動に関わるもののほか、震災対策体制そのものの効率性を評価し、その向上を図るための技術についても検討を行った(図2)。

2. 5 地震防災情報システム導入の概略設計例

本マニュアルを活用して情報システムを設計する手順を具体化するため、建設省地方建設本局における新規の情報システム整備を想定し、情報の共有化と個別システムの導入に関する概略設計の過程を例示した。

なお本研究の成果は、現場において地震防災情報システムを構築する際の手引きとなるように、「地震防災情報システム整備マニュアル(案)」としてとりまとめた。

3. 主な研究成果物

- ・ 杉田秀樹、野崎智文、浦野隆、澤田雅孝、震災対策計画の高度化に関する研究、土木技術資料 Vol. 40 No. 4, 6-7 頁, 平成 10 年 4 月
- ・ SUGITA Hideki, Nozaki Tomofumi, SEISMIC INFORMATION SYSTEM FOR CIVIL INFRASTRUCTURES, U. S. -Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, May, 1998
- ・ 杉田秀樹、野崎智文、震災対策体制のパフォーマンス評価手法に関する基礎的研究、土木研究所資料第 3587 号, 平成 10 年 6 月
- ・ 杉田秀樹、野崎智文、道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究(その 1) ネットワーク耐震性指標の提案とその計算方法の開発、土木研究所資料第 3589 号, 平成 10 年 9 月
- ・ 杉田秀樹、野崎智文、矢野和彦、道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究(その 2) 地震時の道路交通管理手法に関するケーススタディー、土木研究所資料第 3621 号, 平成 11 年 1 月
- ・ 地震防災情報システム整備マニュアル(案), 土木研究所資料(作成中)

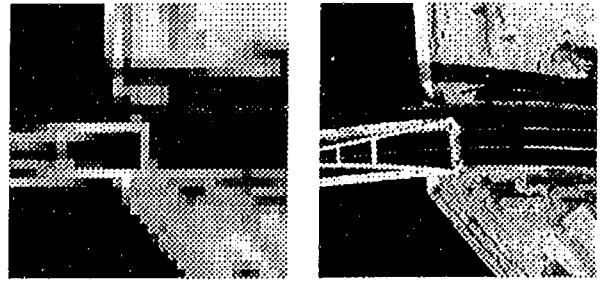


図1 シミュレーションによる人工衛星画像の精度比較

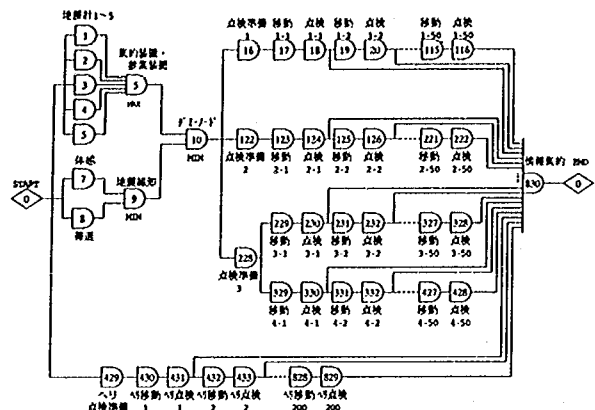
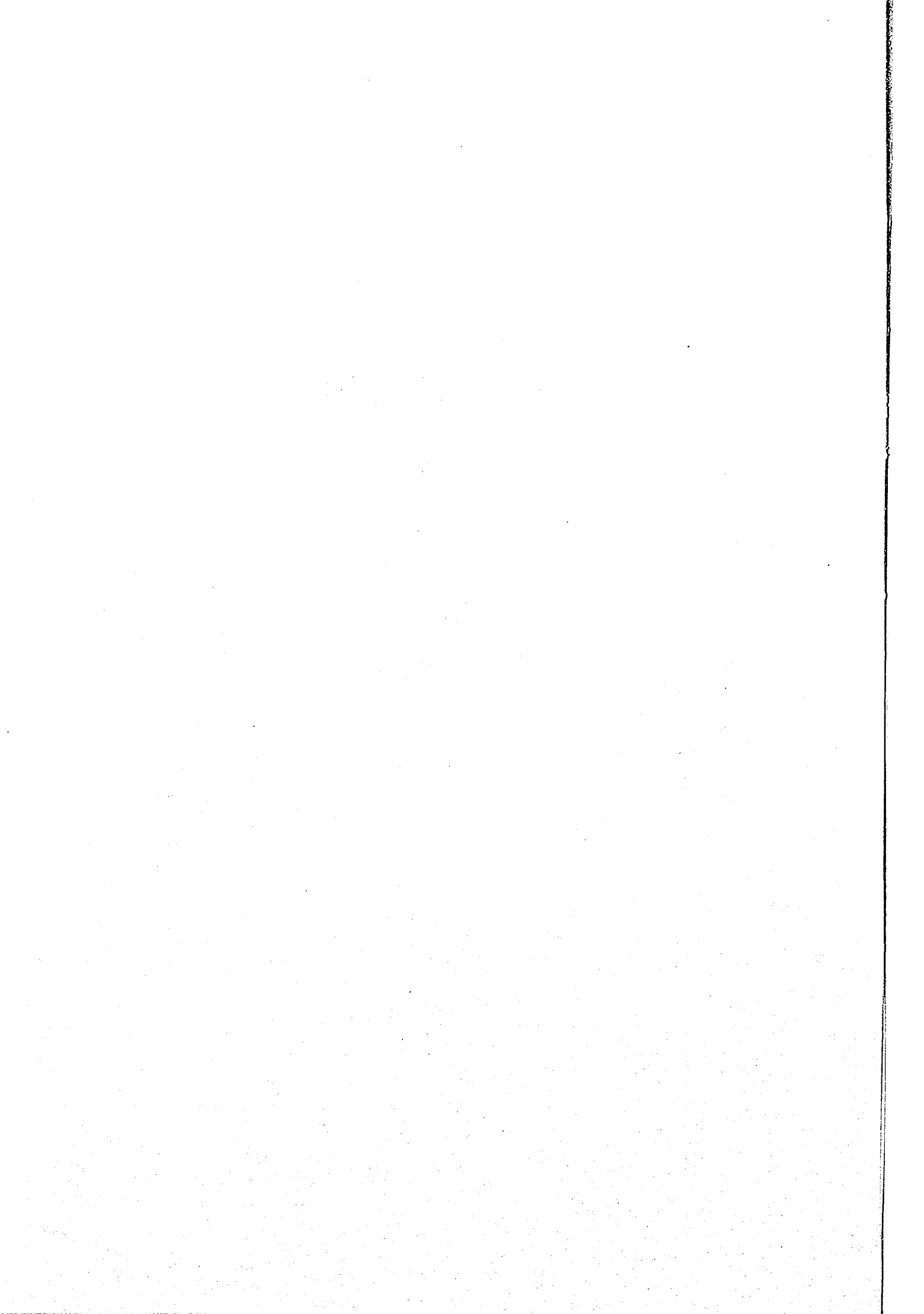


図2 震災対策体制の効率性を評価する技術(体制活動のネットワーク表現)

2. 強震計管理費



2. 強震計管理費

研究期間：昭和56年～平成12年度

担当：防災技術課 課長：杉田 秀樹 管理係長：葛西 伸寛

【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地震計を系統的に配置する高密度観測と、構造物や周辺地盤上に強震計を配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、土木研究所が所有する観測施設の継続的な維持管理、観測記録の処理・蓄積および地震動の伝播特性に関する基礎的な検討を行うことを目的とする。

平成10年度は、①高密度強震観測施設の保守点検と観測記録集の作成、②一般強震観測施設(土研所有分12箇所)の保守点検、③アナログ/デジタル記録変換システムの再構築、④強震観測事業の効果的な推進に向けた課題整理、⑤観測施設・観測記録データベースの拡充を実行した。

1. 研究方法

1. 1 高密度強震観測施設

高密度強震観測は、相良、焼津、沼津、松崎、神戸西、神戸東、小田原、幕張・習志野、館山の9地区で観測している。本観測システムは電話回線を通じた遠隔メンテナンスとデータの自動転送が可能な、自律管理システムであり、管理作業の大幅な効率化に成功している。平成10年度は平成10年4月までの観測データを土木研究所資料として取りまとめたほか、観測施設の現地点検、平成11年3月までのデータの整理・取りまとめを行った。

1. 2 一般強震観測施設

平成10年12月現在における土木研究所が所有する観測施設は表1に示すとおりである。平成10年度は、これら12観測施設の保守点検をうとともに、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)」の推進を図った。

1. 3. アナログ/デジタル記録変換システム

アナログ式観測記録をデジタル記録に変換するために昭和54年度に導入した強震波形読取装置が老朽化したため、汎用性が高く操作が容易な市販OA機器を用いた新規システムを検討し、解析精度の検証を行った。

1. 4 強震観測事業の効果的な推進に向けた課題整理

高密度強震観測をはじめ建設省が建設省が行う公共土木施設の強震観測を効率化するための問題点を、建設省、管理者、メーカーの3者(17名)によるブレインストーミングにより抽出し、整理した。

1. 5 観測施設・観測記録データベースの整備

観測地点に係る諸元資料を整理した。また、大型電算機用保存されている観測記録をPC用データベ

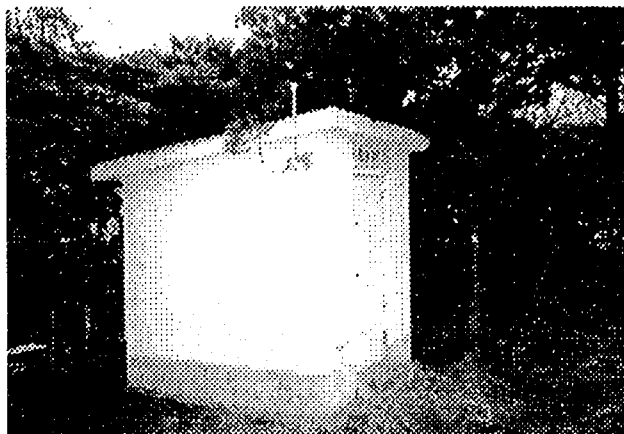


表1 強震計設置状況

ID	観測所名	観測計器数
902	西新井橋	3
903	昭和大橋	2
904	新天竜川橋	1
905	落合橋	1
907	平大橋	1
908	朝比奈川橋	1
909	雲見橋	2
910	駿河大橋	1
911	福井大橋	2
912	御前崎	1
913	天津跨線橋	2
914	八重洲地下街	1

スとして再構築した。

2. 研究結果

2. 1 高密度強震観測施設

表2 高密度強震観測施設の障害と対応

1) 保守点検

保守点検の結果は表2に示したとおり、13箇所において落雷によると思われる通信機器の故障と電源関係等の不備が認められたため修繕を行った。

2) 観測記録集の作成

平成9年4月から平成10年3月までの観測データを土木研究所資料として取りまとめた。本資料には高密度強震観測施設で記録された26地震377波形(1131成分)の加速度記録を掲載している。

地区	観測所	障害状況	対応
神戸西	阪神高速道路公団変電施設	被雷による諸障害	修理済
"	六甲アイランド小学校	ハンドホール破損	"
神戸東	本山第一小学校	電源不備	"
小田原	国府津中学校	"	"
"	酒匂中学校	"	"
相良	町立大沢保育園	被雷による諸障害	"
焼津	水道局牛田資材置場	"	"
沼津	今沢小学校グラウンド	"	"
"	愛鷹中学校	"	"
"	沼津バイパスNo. 4	"	"
"	今沢小学校北門	"	"
"	今沢小学校北農道	"	"
"	今沢中学校	"	"

表3 高密度強震観測記録一覧

地震番号	地震諸元									地区名								
	発震時刻	震央地名	震央位置				最大震度	震源深さ	M	相良	焼津	沼津	松崎	神戸西	神戸東	小田原	幕張・習志野	館山
			北緯		東経													
			度	分	度	分												
EQ-01	1997/05/14 02:37	兵庫県南東部	34	44	135	14	3	13km	M3.5					○	○			
EQ-02	1997/05/16 00:37	兵庫県南東部	34	44	135	14	2	16km	M3.3						○			
EQ-03	1997/05/20 13:20	三宅島近海	34	03	140	00	2	112km	M4.5									○
EQ-04	1997/05/24 02:50	遠州灘	34	30	137	30	3	22km	M5.3	○								
EQ-05	1997/06/12 01:24	兵庫県南東部	34	54	135	26	3	15km	M3.9						○			
EQ-06	1997/06/28 14:11	兵庫県南東部	34	39	135	08	1	13km	M3.1						○			
EQ-07	1997/07/05 15:27	静岡県中部	35	01	138	19	2	25km	M3.9		○							
EQ-08	1997/07/09 18:36	千葉県北西部	35	33	140	08	3	77km	M4.8							○	○	○
EQ-09	1997/08/09 05:34	埼玉県南部	35	50	139	30	3	68km	M4.7			○	○			○	○	
EQ-10	1997/09/07 02:19	京都府南部	35	02	135	31	3	17km	M4.2						○			
EQ-11	1997/09/08 08:40	東京湾	35	33	140	00	3	108km	M3.4			○				○	○	○
EQ-12	1997/09/24 07:02	山梨県東部	35	33	139	01	3	20km	M4.0			○				○		
EQ-13	1997/09/26 23:12	遠州灘	34	25	138	14	1	35km	M4.0		○							
EQ-14	1997/10/09 04:30	相模湾	35	10	139	15	2	14km	M3.3							○		
EQ-15	1997/10/11 14:44	遠州灘	34	25	138	14	3	36km	M4.9	○						○		
EQ-16	1997/11/01 20:37	神奈川県西部	35	15	139	07	3	15km	M3.8							○		
EQ-17	1997/11/04 10:31	神奈川県西部	35	15	139	07	3	15km	M4.0							○		
EQ-18	1997/11/05 04:22	兵庫県南東部	35	53	135	10	2	15km	M3.6						○			
EQ-19	1997/12/06 15:40	千葉県北西部	35	42	140	07	3	56km	M4.6								○	
EQ-20	1997/12/07 08:02	千葉県北西部	35	45	140	08	3	53km	M4.2									
	1997/12/07 08:03	(余震)	35	45	140	07	2	45km	M3.7								○	
EQ-21	1998/01/14 02:17	千葉県北西部	35	35	140	14	3	76km	M4.9				○			○	○	○
EQ-22	1998/01/16 10:57	千葉県南部	35	12	140	18	3	57km	M4.6			○				○	○	○
EQ-23	1998/02/07 10:19	父島近海	24	52	142	06	2	551km	M6.6									○
EQ-24	1998/03/01 02:38	東海道沖	33	33	138	25	2	312km	M5.6									○
EQ-25	1998/03/04 06:02	兵庫県南東部	34	55	135	23	3	11km	M3.8						○			
EQ-26	1998/03/23 18:37	茨城県沖	36	22	141	11	3	45km	M5.3								○	

2. 2 一般強震観測施設

1) 保守点検

土木研究所が設置した12箇所の保守点検結果を表4に示す。障害が確認された2箇所の観測所の機器については現在修理中である。

表4 一般強震観測施設の障害対応

ID	観測所名	障害状況	対応
903	昭和大橋	基盤障害	修理中
911	福井大橋	モーター不良	〃

2) 「河川堤防における強震計配置計画（第3期）」の推進

平成8年度より推進している上記計画について山国川、遠賀川、阿武隈川、菊池川、千曲川、北上川、荒川、北利根川（霞ヶ浦）、鰐川（霞ヶ浦）、吉田川、後志利別川、庄内川、神通川などの観測地点について、強震計および間隙水圧計の設置方法を現場事務所に対して技術指導した。

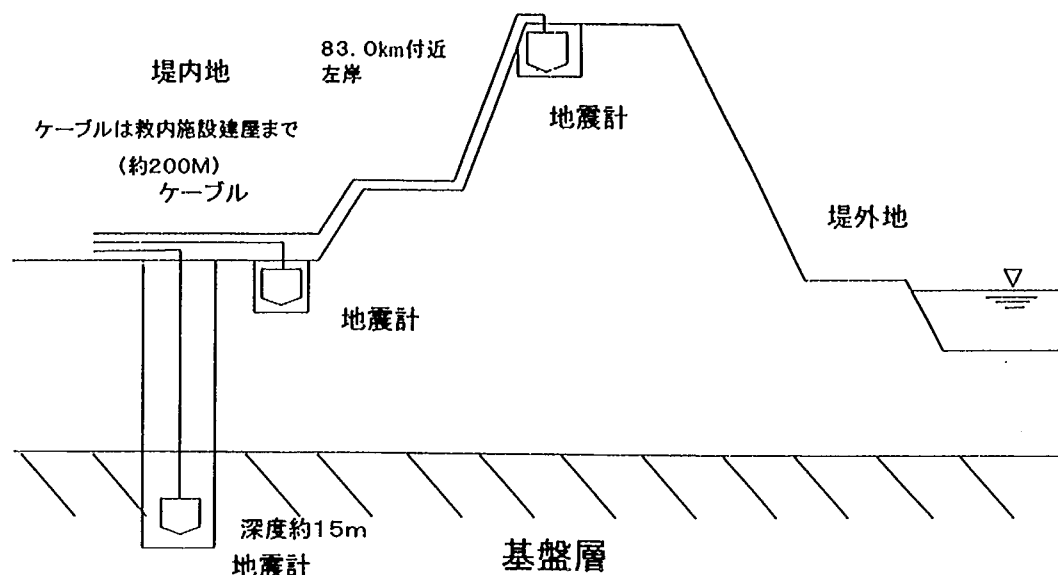


図1 河川堤防における強震計設置状況図(阿武隈川上流河川堤防)

2. 3. アナログ／デジタル記録変換システム

汎用機器を用いた新規システムのデータ処理フローを従来の方法と比較して図2に示す。また、新旧システムの構成上の特徴を比較して表5に示す。

新規システムの特徴としては、①アナログデータからデジタルデータへの変換作業が大型電算機を介さず一括して行える、②市販OA機器の採用により維持費および修繕コストが小さい、③市販PCやCADソフトを使用するため市場の技術革新に伴う機能向上が期待できる、④GUIを採用したため操作が容易である、等がある。

新規システムによる波形読取精度を従来システムと比較した結果を表6に示す。

精度の比較には波形の特性による違いを検討するため比較的密な波形と粗な波形の2種類の実測波形を用いた。

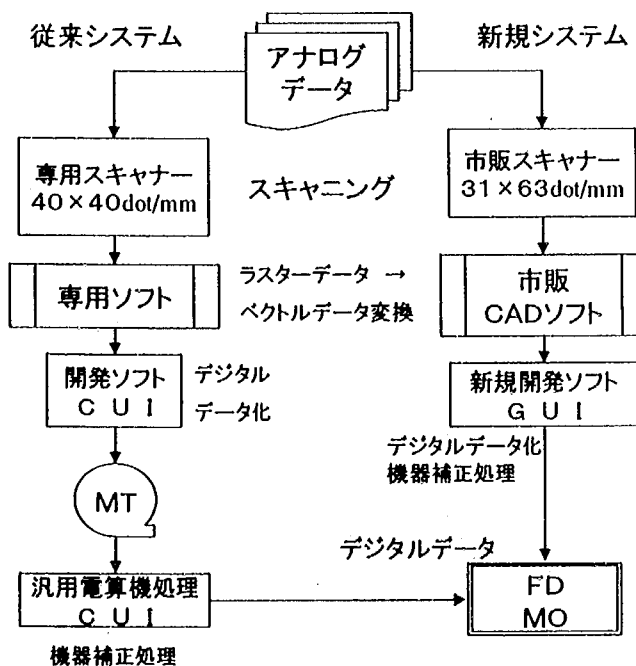


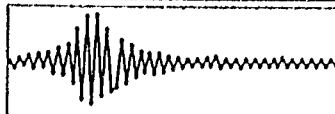
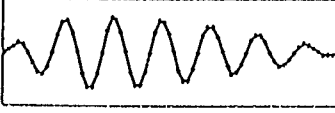
図2 新旧システムのデータ処理フロー比較

表5 システム比較表

	従来システム	新規システム
システム構成	専用機器	市販OA機器
ソフトウェア	専用+開発	市販+開発
操作	CUIのため 熟練を要する	GUIのため 熟練は不要
維持費	メンテナンス に技能を要す ため高価	市販OA機器 のため安価
修繕	専用部品に よるため高価 かつ時間を 必要とする	市販部品に よるため安価 かつ迅速
機能	基本的に 設置時より 変化なし	ソフト・ハード の更新により 機能向上が 見込める

最大加速度値の読取誤差は密な波形で1.246%に対して0%、粗な波形で13.254%に対して3.233%。偏差の実効値は密な波形で22.0に対して11.5、密な波形で8.6に対して6.0である。密な波形に対して粗な波形では読取精度で下まわる傾向はあるが、従来システムに比較して同程度以上の精度を確保できることがわかる。なお、本システムのプログラムは汎用的に機器補正、中心線補正、残留速度補正プログラムとして利用可能である。

表6 新旧システムによる波形読取精度の比較

	従来システム	新規システム
読取分解能	40x40 dot/mm	31x63 dot/mm
波形1(密な波形)		
データの最大加速値	192.6gal	
読取最大加速値	190.2gal	192.6gal
最大加速値の読取誤差	1.246%	0.000%
偏差の2乗平均値	481.8	133.1
偏差の実効値	22.0	11.5
波形2(粗な波形)		
データの最大加速値	92.8gal	
読取最大加速値	80.5gal	89.8gal
最大加速値の読取誤差	13.254%	3.233%
偏差の2乗平均値	74.1	36.3
偏差の実効値	8.6	6.0
最大加速値の読取誤差(2波平均)	7.25%	1.62%
偏差の2乗平均値(2波平均)	277.95	84.7
偏差の実効値(2波平均)	15.3	8.75

$$\text{偏差の2乗平均値} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W1(i) - W2(i))^2$$

W1(i):実測データ W2(i):新旧システムによる読取データ N:データ個数

偏差の実効値 = $\sqrt{\text{偏差の2乗平均値}}$

表7 問題点と属性の関係(アンケート結果)

項目	基準仕様	精度	性能	計画	設置	管理	データ利用	計	備考
1 地震計の観測報告基準が不明	4	0	0	2	1	2	2	22	
2 記録の精度が悪い	4	0	0	1	3	2	2	31	
3 観測値の仕様が決まらず	4	2	3	2	4	2	2	26	
4 設置基準が決まらず	4	0	1	4	0	1	1	18	
5 増設センサーは回収を考慮するかが不明	4	0	0	4	4	0	0	20	
6 増設センサーの必要ボーリング口径がメーカーによって違う	4	0	1	3	0	0	0	20	
7 増設センサーを回収できる方式は別出管理上、問題がある	4	0	1	3	4	0	0	19	
8 耐用年数は10年から15年	4	3	4	4	3	0	0	28	
9 故障率向上とコストダウン	2	0	1	3	1	4	4	27	
10 記録媒体の市場環境が将来は不明	4	1	2	3	1	4	4	22	
11 観測値の仕様は汎用性を考慮すべき	4	1	0	3	3	2	2	28	
12 観測計画計画はトップダウンで決めて欲しい	2	0	0	3	3	4	4	21	
13 維持管理のマニュアルが欲しい	4	0	0	3	0	2	2	18	
14 現状で維持管理されていない機器も多い	2	0	0	3	0	2	2	15	
15 設置の意義が不明	1	0	0	2	2	4	4	18	
16 管理費は専断所で考慮するが主幹主導で実施してほしい	1	1	1	2	2	4	4	22	
17 重要工物に付ける必要は不明	1	0	0	3	4	4	4	20	
18 重要工物の地震時の管理に際して地震計の設置が不明確	1	0	0	3	4	4	4	24	
19 観測値のメーカーによる差異はさほどない	3	0	0	3	1	1	1	22	
20 データの出力フォーマットの統一化が必要	4	0	0	3	1	4	4	22	
21 データ交換作業が必要	4	2	0	2	1	4	4	24	
22 データの交換作業時の方式の統一化が必要	4	2	0	3	0	4	4	24	
23 観測所周辺データが不足している	3	1	0	3	2	2	2	25	
24 観測所周辺データの必要項目が未整理	2	1	0	3	2	2	2	23	
25 観測所周辺データの必要項目の優先順位付けが必要	2	1	0	4	2	2	2	24	
26 観測データは現場で必要	1	0	0	3	0	4	4	14	
27 波形データは研究で必要	1	1	0	3	0	2	2	15	
28 波形データと観測データは同一の観測で記録できる	4	0	0	2	0	3	3	17	
29 研究と現場で必要箇所が違うかどうか不明	1	0	0	2	3	3	3	21	
30 配置計画は研究で必要箇所の明確化が必要	1	0	0	3	0	4	4	21	
31 現場にある施設の全てを研究所側で把握することは不可能	0	0	0	4	4	2	2	17	
32 研究に必要な施設の標準化が必要	4	1	1	4	4	0	0	27	
33 記録の最終目標は全データの記録である	3	1	3	0	3	4	4	23	
34 全データの記録の整理が必要	2	0	1	3	0	4	4	19	
35 メーカーと観測所間隔は1m以下のデータとは差異が大きく違う	3	2	4	4	0	4	4	24	
36 元記録は強震記録の証明であり、また強震記録に相当しない証明でもある	2	1	1	3	0	3	3	16	
37 今回の観測値は過去の記録を保持している	4	2	4	2	1	4	4	23	
38 全データから必要な記録を保存するシステムが必要	3	2	4	4	1	4	4	25	
39 センサーと観測装置のインターフェースの統一は適正な機械競争には必要	4	2	3	2	3	3	0	22	
40 現状ではセンサーと観測装置のインターフェースの統一は不可能	4	1	1	1	2	2	0	19	
41 保守金などでメーカーが固定されるのは悪影響となっている	4	1	1	0	1	4	4	16	
42 管理を主幹だけで行うと現場で観測の保守がおぼろげになる	2	0	0	4	0	4	4	16	
43 管理を現場だけで行うと費用的に悪い	2	0	0	4	0	4	4	17	
44 管理の仕分・区分が必要	2	0	0	4	0	4	4	17	
45 観測計画(水災対策)計画との兼ね合いが必要	2	0	1	4	0	4	4	23	
100計	169	54	76	198	94	178	186	955	

表8 集約・整理した問題点と属性の関係

No.	項目	基準仕様	精度	性能	計画	設置	管理	データ利用
1	地震計の観測報告基準、方式、手順が不明	6	0	0	2	1	6	7
2	記録の精度が悪い	4	5	7	1	3	2	5
3	観測器の仕様未確定	0	2	3	2	4	2	5
4	設置基準未確定	0	0	1	6	4	0	1
6	埋設センサーの設置基準が不明	0	0	1	3	7	0	0
8	耐用年数は10年から15年	6	3	6	4	3	16	0
10	記録媒体の市場提供が将来は不明	5	1	2	3	1	6	4
11	観測器の仕様は汎用性を考慮すべき	0	1	9	5	3	3	2
13	維持管理のマニュアルが欲しい	4	0	0	3	0	9	2
15	設置の意義が不明	1	0	0	9	2	2	4
16	管理費は事務所でも考慮するが主研主導で実施してほしい	1	1	1	7	2	6	4
18	重要工作物の地震時の管理に際して地震計の意義が不明確	1	0	0	8	3	6	6
19	観測器のメーカーによる差異はさほどない	3	7	7	0	3	1	1
23	観測所周辺データが不足している	3	1	0	7	5	2	7
24	観測所周辺データの必要項目が未整理	2	1	0	8	3	2	7
28	波形データと数値データは同一の機器で記録できる	4	0	5	2	0	3	3
30	配置計画は必要な場所の明確化が必要	1	0	0	9	3	0	8
32	研究に必要な施設の規準化が必要	6	1	1	9	4	0	6
33	記録の最終目標は全データの記録である	3	1	3	5	0	3	8
34	全データの記録の整理が必要	2	0	1	3	0	16	7
35	ノードデータと観測下限値(トリガー)以下のデータとは意義が大きく違う	3	2	4	4	0	4	7
38	全データから必要な記録を保存するシステムが必要	3	2	5	4	1	4	6
39	センサーと観測機器のインターフェースの統一は適正な価格競争には必要	9	2	3	2	3	3	0
40	現状ではセンサーと観測記録器のインターフェースの統一は不可能	7	1	6	1	2	2	0
41	保守点検などでメーカーが固定されるのは問題となっている	6	1	1	0	1	7	0
44	管理の仕分・区分が必要	2	0	0	6	0	8	1
45	通信計画(光ファイバー配置計画)との整合が必要	2	0	1	8	5	4	3
計		116	36	63	121	63	97	104

2. 4. 強震観測事業の効果的な推進に向けた課題整理

1) 問題点抽出

ブレインストーミングは、「建設省の地震観測はどうあるべきか」という課題に対して自由発言形式で行った。この結果に新たに7つの属性を設定し、アンケート方式により問題と属性の関係づけを行った結果が表7のとおりである。

この結果から45の問題点をさらに27個の問題点に集約・整理した結果を表8に示す。

表8の結果から属性の相互の関係を求めるため、属性に占める共通する問題点数を整理したものが表9である。この結果を個々の属性における構成比率を計算したものが表10である。この結果から構成比の軽重比較を求めたものが表11となる。この軽重比の結果を「支配-従属」という関係に表現したものが表12である。

以上の結果を構造化解析モデル(ISM)

表8 属性に共通する問題点

	項目数	基準仕様	精度	性能	計画	設置	管理	データ利用
基準・仕様	11	11	0	3	3	1	4	3
精度	2	0	2	2	0	0	0	1
性能	7	3	2	7	1	0	1	2
計画	12	3	0	1	12	2	3	6
設置	3	1	0	0	2	3	0	1
管理	9	4	0	1	3	0	9	3
データ利用	12	3	1	2	6	1	3	12

表9 各属性における問題点の構成比

	項目数	基準仕様	精度	性能	計画	設置	管理	データ利用
基準・仕様	11	11	0	0.2727	0.2727	0.0909	0.3636	0.2727
精度	2	0	1	1	0	0	0	0.5
性能	7	0.4286	0.2857	1	0.1429	0	0.1429	0.2857
計画	12	0.25	0	0.0833	1	0.1667	0.25	0.5
設置	3	0.3333	0	0	0.6667	1	0	0.3333
管理	9	0.4444	0	0.1111	0.3333	0	1	0.3333
データ利用	12	0.25	0.0833	0.1667	0.5	0.0833	0.25	1

表10 構成比の属性間軽重比率

	項目数	基準仕様	精度	性能	計画	設置	管理	データ利用
基準・仕様	11	1.000	—	1.571	0.917	3.667	1.222	0.917
精度	2	—	1.000	0.286	—	—	—	0.167
性能	7	0.636	3.500	1.000	0.583	—	0.778	0.292
計画	12	1.091	—	1.714	1.000	4.000	1.333	1.000
設置	3	0.273	—	—	0.250	1.000	—	0.250
管理	9	0.818	—	1.286	0.750	—	1.000	0.750
データ利用	12	1.091	6.000	1.714	1.000	4.000	1.333	1.000

に準じて解析し、属性を階層構造化したものが図3である。

図3によれば「計画」、「データ利用」、「基準・仕様」が上位レベルに位置づけられており、「設置」、「管理」等はこれに対して下位にある「設置」、「管理」、「性能」、「精度」が問題意識の下位レベルに位置づけられるのは、

これまで強震観測事業がこれらの問題点に対して重点的に進められてきており、これらの問題点が比較的改善されているためと考えられる。

強震観測事業を一層効率化するためには、上位レベルに位置づけられる「計画」、「データ利用」、「基準・仕様」について研究者、管理者、メーカーの3者間で重点的に検討することが重要である。

2) 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。

2. 5 観測施設・観測記録データベースの整備

現在までに整理蓄積された、地盤条件、柱状図等、観測地点関連の資料を整理し、必要な資料を洗出しを行った。これら資料については次年度以降、観測点の現状調査と併せて収集を図る予定である。

また、大型電算機用の媒体に整理・蓄積された観測記録を市販PC用の媒体に記録し、さらに年代別、観測地点別、地震別に整理した。これらは次年度以降にデータベースとして整備していく予定である。

3. 主な研究成果物

1) 杉田、山中、葛西ほか：高密度強震観測記録集(No. 1)－1997. 4～1998. 3の観測記録－、土木研究所資料第3604号

2) 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. 1～22)、土木研究所彙報Vol. 32～65 他

表1 1 属性間の関係

	項目数	基準仕様	精度	性能	計画	設置	管理	データ利用
基準・仕様	11		無関係	支配	従属	支配	支配	従属
精度	2	無関係		従属	無関係	無関係	無関係	従属
性能	7	従属	支配		従属	無関係	従属	従属
計画	12	支配	無関係	支配		支配	支配	同位
設置	3	従属	無関係	無関係	従属		無関係	従属
管理	9	従属	無関係	支配	従属	無関係		従属
データ利用	12	支配	支配	支配	同位	支配	支配	

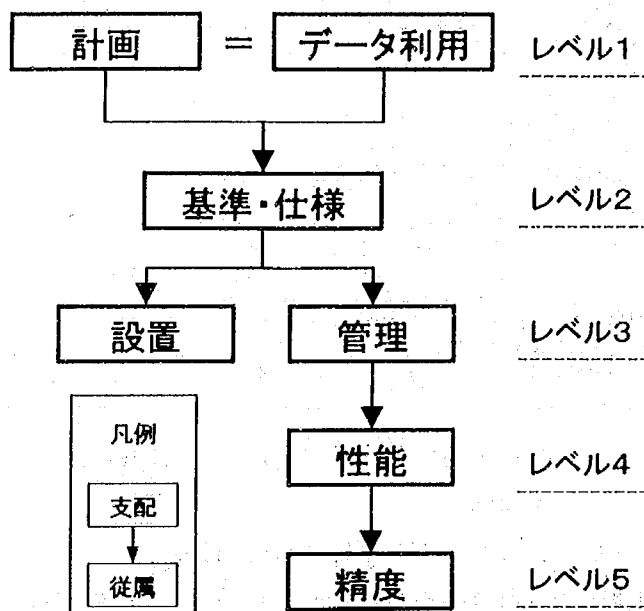


図3 属性の階層構造

3. 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

3. 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

研究期間：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、遠藤和重

【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し、さらにその影響は全国生産活動にも波及する。交通ネットワークの耐震対策計画にあたっては、このような経済的影響にも基づいて検討する必要がある。本研究は、平成8～10年度にわたって、交通施設の被害による経済的な影響を定量評価する手法を開発し、その手法に基づいた推計アプリケーション(Earthquake Assessment System for Socioeconomic Effect: EASSE)を開発することを目的としている。平成10年度は最終年度にあたり、EASSEを用いて実際の地域における耐震対策計画の箇所優先順位検討を模擬的に行った。

1. 研究方法

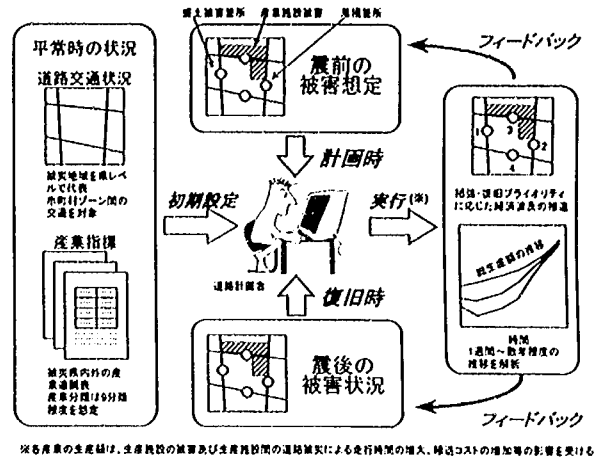
手法の構成は図1のように三つのモジュール(交通推計、変換、経済推計)から成り立っている。交通推計手法は四段階推定法を基本とし、地震によって推計対象地域における道路、鉄道の区間が被災した場合の道路混雑に伴う走行時間の増加を推計する。変換手法は被災地域内の生産施設被害および被災地域と全国各地域間の旅行時間増加に基づき、被災地域の生産額低減の推計を行う。経済推計モジュールは、被災地域内の生産額低減が全国生産に波及する状況を推計する。すなわち、この手法によって算定される経済影響額は、被災地域と全国の他地域との輸送に関係した産業の、域内における被害と全国への波及となる。これらのモジュールはプログラム化され、地図画面上で被災区間を設定して推計を行うPCアプリケーション(EASSE)として作成された。

2. 研究成果

2.1 ケーススタディー設定

EASSEを用いた地域の交通施設の耐震対策計画を模擬的に再現するため、実際の地域におけるデータを準備し、被災を仮定することによってケーススタディーを行った。被災地域としては、EASSEに利用しやすい形で被害想定が行われている仙台市を含む宮城県とし、以下のデータを準備した。

- 全国の一般国道リンクデータ
- 宮城県内の主用地方道以上の道路ネットワークデータおよびJR旅客線ネットワークデータ
- 宮城県内各市町村の人口、商業統計等の社会経済データ



※各産業の生産額は、生産施設の被害及び生産施設間の道路被災による走行時間の増加、輸送コストの増加等の影響を受ける

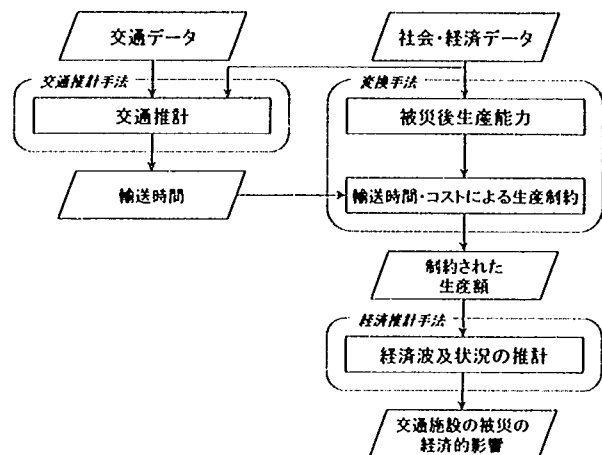


図1 EASSEの推計モジュール構成

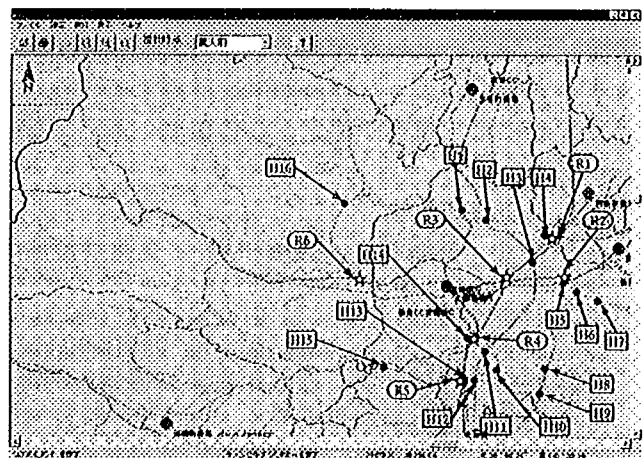


図2 被災区間設定

-宮城県内各市町村と全国各都道府県とのセンサス OD データ、貨物流動量データ

-宮城県および全国の産業連関表

これらのデータを準備した後、仙台市の地震被害想定に基づき、仙台市内の道路区間 16 区間、鉄道区間 6 区間を被災対象箇所とし、それらが被災したとしてリンクカットしたケースと被災区間を一つずつ復活させたケースについて試算を繰り返し、経済的な影響を評価した。図 2 に被災区間の設定状況、表 1 にケース設定の概略を示す。図 2 において、●印は道路の被災区間、☆印は鉄道の被災区間を表し、総ケース数は 25 ケースである。

2. 2 ケーススタディー結果

まず、道路 16 区間、鉄道 6 区間およびその両方 22 区間が被災し通行不能となった場合の、平常時に対する総走行時間(total system travel time: TSTT)の増加および県内・全国の生産額の減少を示したのが図 3 である。TSTT の増加、生産額の減少とも道路被災の方が鉄道被災に比べて影響が大きいことがわかる。ここで三ケースの間で生産額減少の変化に大きな差が出ていないのは、生産施設の被害による生産減少分も含まれており、この規模が道路・鉄道被害の影響よりも大きいためである。また、道路・鉄道の全ての対象箇所が被災した状態から、各区間を一つだけ補強し、被災しないものとして、Case-B との差を取り、TSTT 増加の緩和分、生産減少の緩和額として示したのが図 4 である。双方の傾向に乖離があるもののうち、TSTT への効果が高いが経済的な効果が低いケースは Case-H5,6,7 である。これらの区間の復旧によって域内の交通状況を改善させるので TSTT は緩和されるが、全国的な輸送に対して大きな効果を持たないため、経済的な効果はそれほど高くない。一方、TSTT の効果に対して経済的な効果が高いのは、道路では Case-H9,12、鉄道では R5 となり、交通量あるいは旅客輸送量が大きく、より産業や人口が集中した方面へ直達している区間は重要であることが示されている。今回のケースでは補強対象を一区間ずつとしたが、その場合でも、TSTT という交通指標だけでは補強事業の効果を有効に定量化できず、本研究のような経済効果を計測する必要があることがわかった。さらに具体的な補強戦略を地域で検討する際には、被害が想定される区間に対して経済的な効果を目的関数とした組み合わせ最適化問題を解く必要がある。

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 Vol. 39 No. 9, 26-31 頁, 1997. 9
- ・ 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, 1997, 11
- ・ 杉田秀樹、野崎智文、遠藤和重：交通施設の地震被害による経済的影響評価システム，土木学会第 53 回 年次学術講演会講演概要集 4, pp. 976~977, 1998. 10
- ・ 杉田秀樹、野崎智文：交通施設の地震被害による経済的影響評価システム，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集 第 3 分冊, pp. 3413-3418, 1998. 11 (Proc. The 10th Earthquake Engineering Symposium, Vol. 3)

表 1 ケース設定の概略

ケース名	ケース設定
Case-H	道路16区間がすべて被災
Case-R	鉄道6区間がすべて被災
Case-B	道路16区間と鉄道6区間が全て被災
Case-H1~16	Case-Hのうち道路区間1~16をそれぞれ復活
Case-D1~6	Case-Rのうち鉄道区間1~6をそれぞれ復活

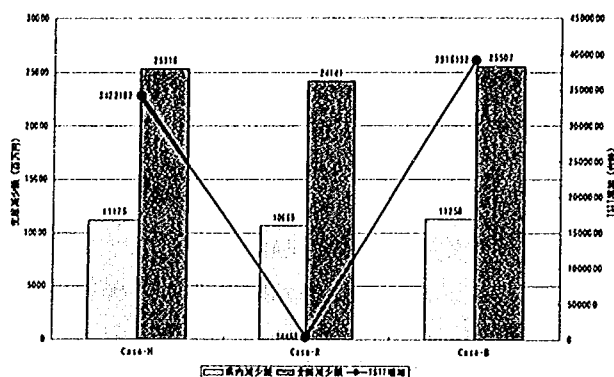


図 3 平常時に対する変化

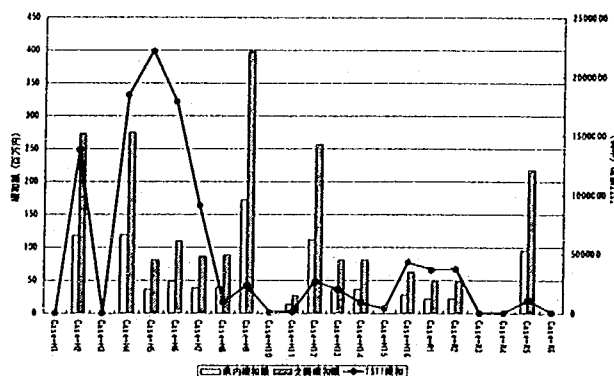
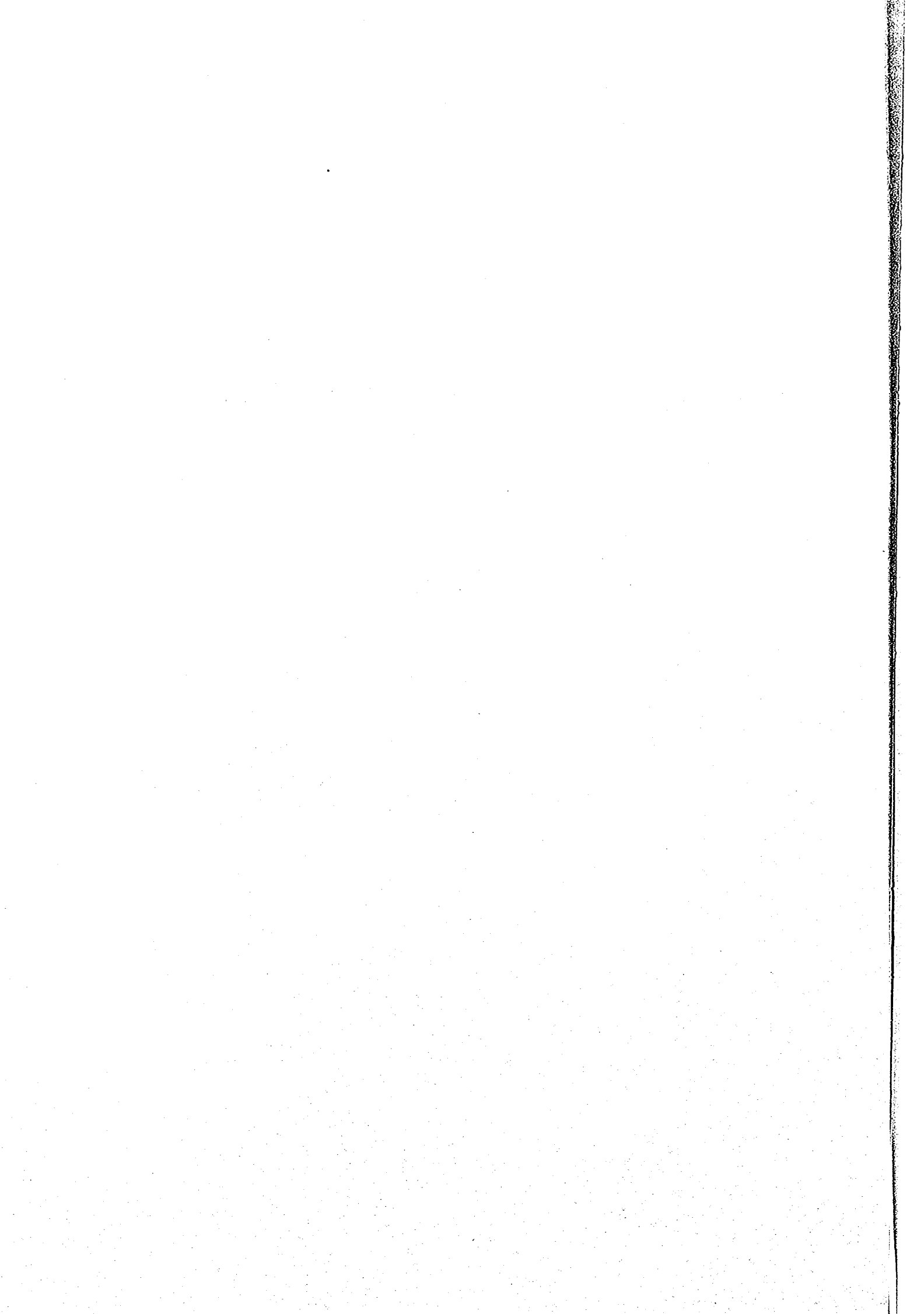


図 4 被災想定区間の補強効果

4. 公共土木施設の耐震性水準の横断的整合に関する研究



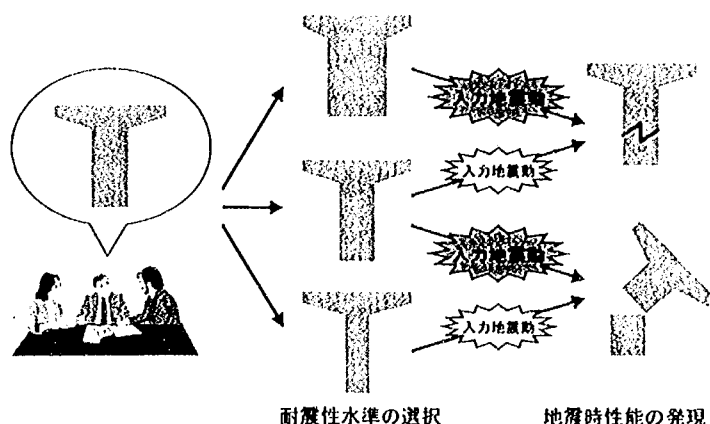
4. 公共土木施設の耐震性水準の横断的整合に関する研究

研究期間：平 10～平 12

担当：防災技術課 課長：杉田秀樹， 主任研究員：野崎智文、遠藤和重

【要旨】

道路、河川管理施設等の公共土木施設の耐震設計にあたっては、その対象とする入力地震動及び求められる耐震性能が地域内で整合が取れており、適切な投資配分で行われる必要がある。しかし現在のところ、各施設の設計には異なる基準が用いられており、必ずしも整合が取れているとは言い難い。本研究は、複数の構造物の耐震性水準を、その整合性を保ちながら合理的に設定するための手法について検討し、耐震対策事業の効率化に資するものである。平成 10 年度は、複数構造物の耐震対策内容を比較し、選択するための、耐震性水準、性能レベルの表示法を提案したほか、地域における耐震対策効果を最大にする耐震対策内容を設定する計算法を検討した。



1. 研究方法

構造物の耐震性水準を把握し選択するためには、地域で想定される複数の地震動レベルとそれに対して水準を変化させた場合に発現する地震時性能を組み合わせる表示することが考えられる。性能の表示法については、これまで合衆国の建築分野を中心として、パフォーマンスマトリックスを用いることが試みられてきた。本研究では、複数の構造物の耐震性水準を比較しながら設定するため、パフォーマンスマトリックスを発展させた IOC カーブ (Input-output-cost curve) を提案し、特定条件の道路橋について実際に概略設計を繰り返して IOC カーブを導いた。また、IOC カーブが与えられた際に、構造物の最適な耐震性を決定する方法を検討した。

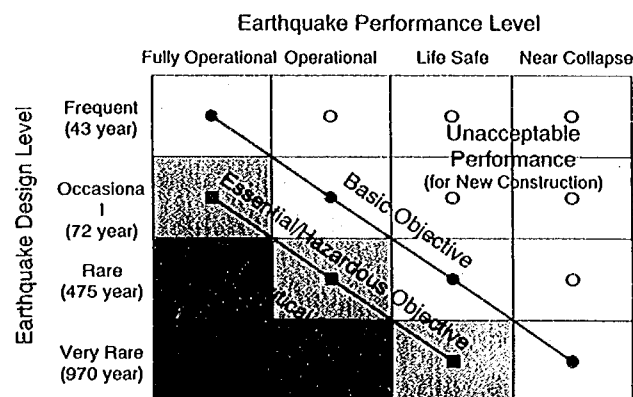


図 1 合衆国 VISION-2000 委員会によるパフォーマンスマトリックス

2. 研究成果

2. 1 IOC カーブの提案

図 1 のパフォーマンスマトリックスは、想定する地震動レベル（確率表示）に対して要求する性能を定めるものであり、構造物の重要度に応じて要求する性能を変化させている。図中斜めの線が地震動レベルとそれに対して要求する性能レベルの組み合わせを示したものであり、構造物に要求する耐震性水準を示したものである。この場合、性能、水準が要求ベースであるため、実際の設計では要求と同じかそれよりも高い水準で設計することになり、マトリックスを示したのみでは実際に選ばれる耐震性水準やそのための構築コストは不明である。本研究では、パフォーマンスマトリックスを要求ベース (demanded performance matrix: DPM) のものから実現ベースのもの (realized performance matrix: RPM) に発展させ、特定のサイトにおいて耐震性水準すなわち設計内容を変化させたときに、想定地震動に対して実際に発現する性能を表示することを提案した (図 2 左)。さらに、このパフォーマンスマトリックスに、各耐震性水準を確保するために必要な

構築費用を加味したものを IOC カーブ (input-output-cost curve) として示した (図 2 右)。IOC カーブを用いて、特定構造物の耐震対策費用を考慮しながら耐震性水準を選択することや、複数構造物の耐震性水準のメリハリを検討することが可能となる。

2. 2 IOC カーブの試算例

実際の橋梁について、一定の架設条件のもとで設計内容すなわち耐震水準を変化させ、RPM および IOC カーブを描いた。架設条件は 3 径間連続橋 (3×50m) で、上部構造は RC 床版鋼桁 (4 車線)、下部構造は高さ 10m の RC 橋脚とし、基礎工は杭長 22m の場所打ち杭と設定した。また、地盤条件は第Ⅱ種地盤とし、粘性土層、砂質土層、砂礫層の三層構成を仮定した。地域で想定されている地震動としては、PGA=100gal (再帰年 1 年) ~ 1100gal (同 1000 年) の範囲で 4 レベルを想定した。図 3 は、橋脚断面を変化させ、各地震動レベルに対して各設計内容の橋脚が示す性能を示したものである。ここで、性能レベルは、次式のパラメータ λ を定義し、塑性状態率と名づけた。

$$\lambda = \frac{\delta - \delta_y}{\delta_u - \delta_y}$$

ここで δ は橋脚天端の変位、 u, y はそれぞれ終局状態、降伏状態を表す添字である。また、図 3 中の各線は設計内容 C1~C6 に対応し、番号が小さいほど耐震性水準が高い設計となっている。これらの線は、同一水準 (設計内容) において各地震力が作用した場合の性能を示したもので、等設計線あるいは等水準線と呼ぶことができる。この等水準線上では設計内容が同じであり、構築コストも同額となることから、図 3 の RPM にコストの軸を加え三次元的に示したものが図 4 で、これが IOC カーブに相当する。図中地震動レベル—性能 (λ) で張られる平面に各等設計線を投影しているが、これは図 3 の RPM にほかならない。図 4 より、一般的な設計において示される IOC カーブの形状が特定された。本年度の検討においては、性能を表すパラメータとして塑性状態率 λ を定義したが、地震後の構造物の使用性 (serviceability)、安全性 (safety)、修復性 (reparability) などの性能規範を適切に選択し、それらと連動するパラメータを検討する必要がある。また、被災した場合の修復にかかる費用などのダメージコストの算入方法についても今後検討する必要がある。さらに、このような検討を経た後、複数の構造物に対して IOC カーブが与えられた際に地域において各構造物の耐震性水準の整合が取れ、最も満足度が高い状態を選択する手法について検討を進める。

3. 主な研究成果物

- ・野崎智文、杉田秀樹、社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定法に関する基礎的研究，土木技術資料 Vol. 41 No. 1, 56-61 頁，平成 11 年 1 月
- ・野崎智文、杉田秀樹、社会基盤施設における耐震性水準の合理的な設定方法に関する基礎的研究，土木研究所資料 (作成中)

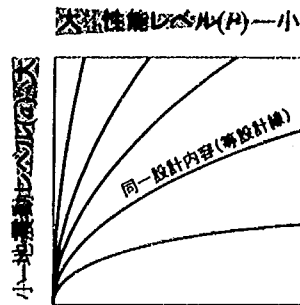


図 2 要求ベースのパフォーマンスマトリックス (左) と IOC カーブ (右)

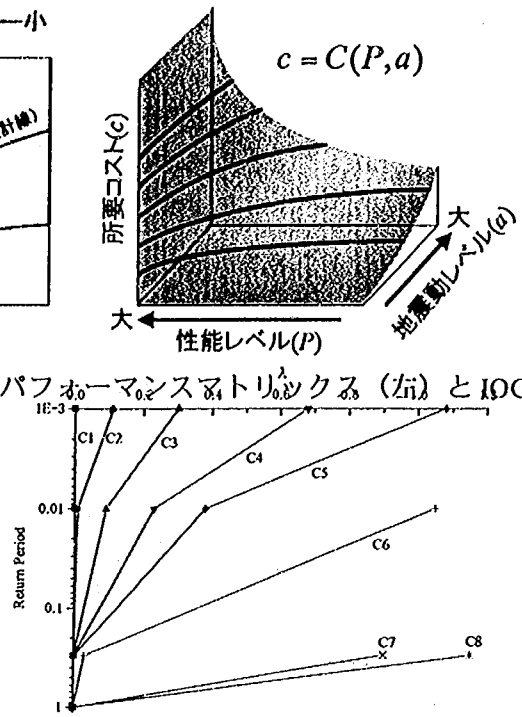


図 3 RPM の試算例

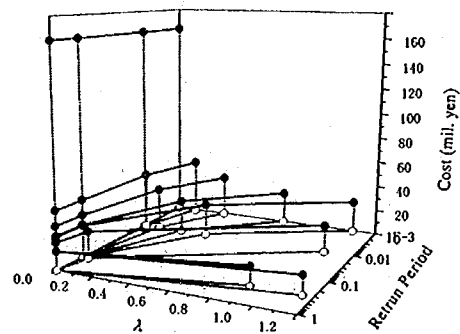
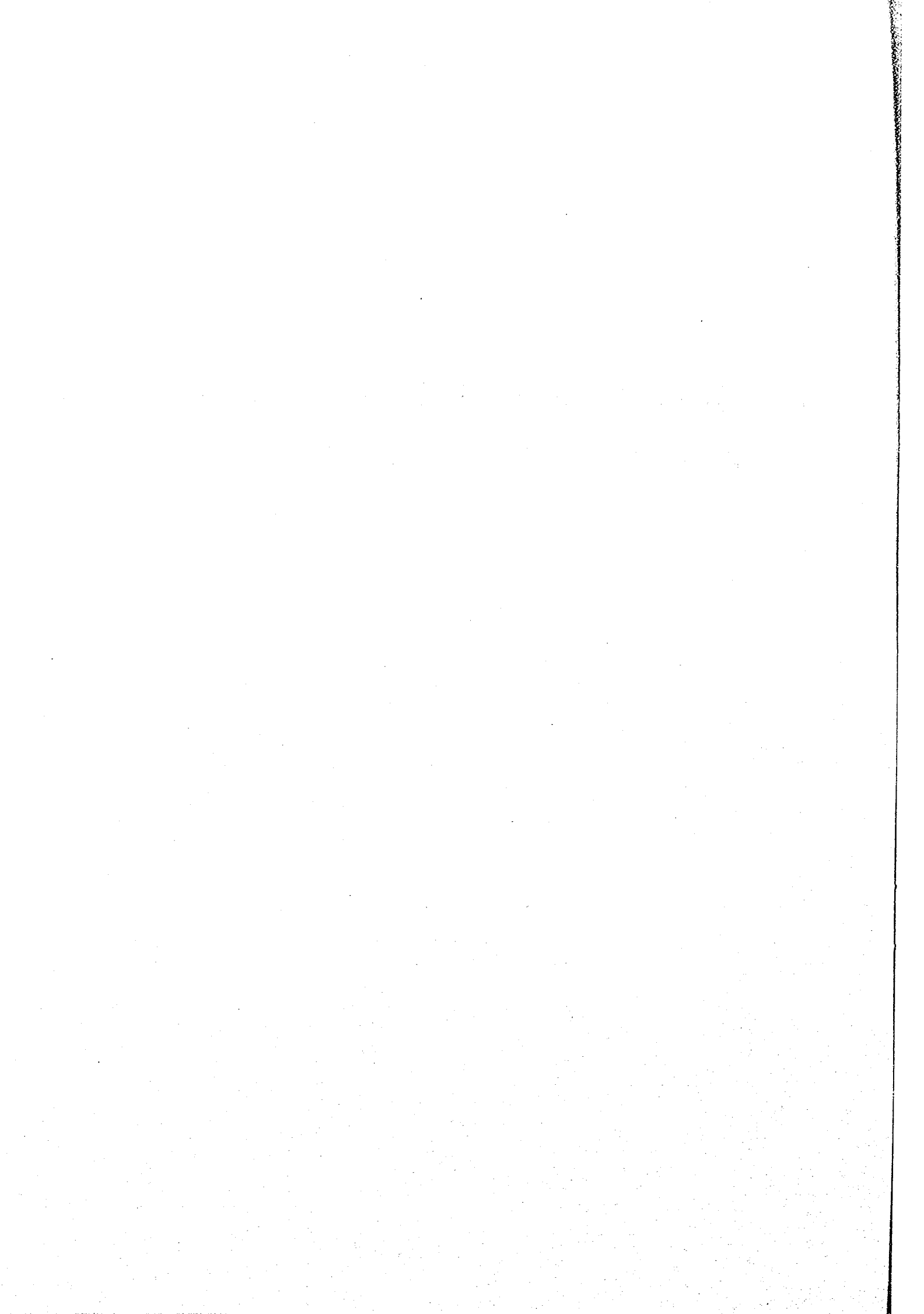


図 4 IOC カーブの試算例

5. 地区施設等の救出・救護・避難問題への効果分析 (まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発)



5. 地区施設等の救出・救護・避難問題への効果分析（まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発）

研究期間：平10～平14

担当：防災技術課 課長 杉田秀樹 主任研究員 金子正洋

【要旨】

平成7年兵庫県南部地震による市街地の甚大な被害を背景に、各地域で推進される防災まちづくりを技術面から支援することを目的として、平成10年度より5箇年計画で建設省総合技術開発プロジェクト「まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発」が開始された。本総プロでは研究領域を①地区の防災要素の影響評価手法の開発、②地区の防災対策技術の開発、③計画支援技術・防災対策推進方策の開発に分類し、公共施設整備の市街地災害抑制効果、地区レベルの防災対策、及び、住民・行政職員の合意形成支援ツールに関する研究を実施する。本研究は、救出・救護・避難問題に対する幹線系道路の信頼性評価モデルを開発することを目的として、幹線系道路の障害危険度評価手法及び緊急活動に伴う交通需要評価手法の検討を行うものである。5箇年計画の初年度である10年度は、阪神淡路大震災など既往地震時における実態情報を収集・分析し、幹線系道路における地震時機能障害と緊急活動の特性に関する知見を得た。

なお本総プロでは、「防災まちづくり総プロ研究開発委員会（学・官）」「共同研究推進会議（地方公共団体・公団）」「防災まちづくり研究会（官・産）」を組織し、産学官の連携のもと研究開発を推進している。

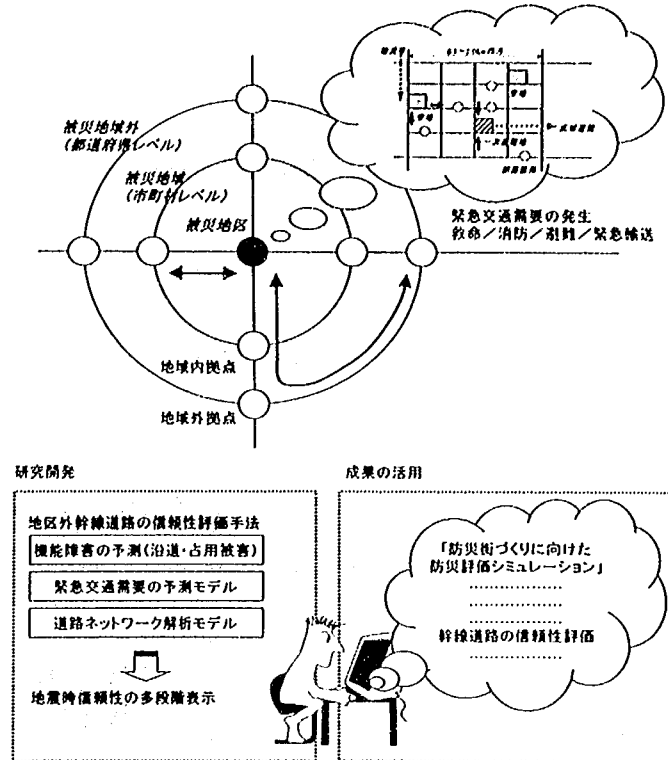
1. 研究方法

1. 1 幹線系道路の障害危険度評価に関する研究

幹線系道路の障害危険度評価に関する研究計画を図1に示す。10年度は、昭和53年伊豆大島近海地震、昭和53年宮城県沖地震、昭和58年日本海中部地震、平成5年釧路沖地震、平成5年北海道南西沖地震について実態情報を収集し、兵庫県南部地震については道路管理者を対象に詳細なヒアリング調査を実施した。実態情報の分析は、通行規制の内容と期間、通行規制と道路機能障害の関係、施設被害の種別・影響・復旧期間、施設被害と地震動強度の視点で行い、障害危険度評価モデル構築の基礎資料を得た。

1. 2 緊急活動に伴う交通需要評価に関する研究

幹線系道路の交通需要評価に関する研究計画を図2に示す。10年度は、地震後の時間区分・活動目的に応じて緊急活動を細分化し、各種緊急車両の活動パターンと活動量に関する兵庫県南部地震時の実態情報を収集・分析した。実態情報の収集は、被災地域の防災機関に対するヒアリング調査と災害報



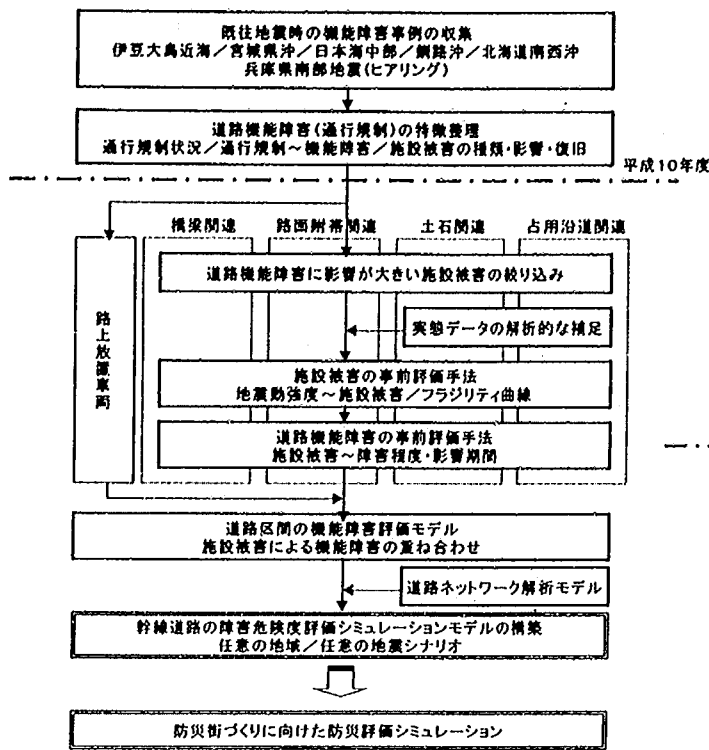


図1 幹線系道路の障害危険度評価に関する研究

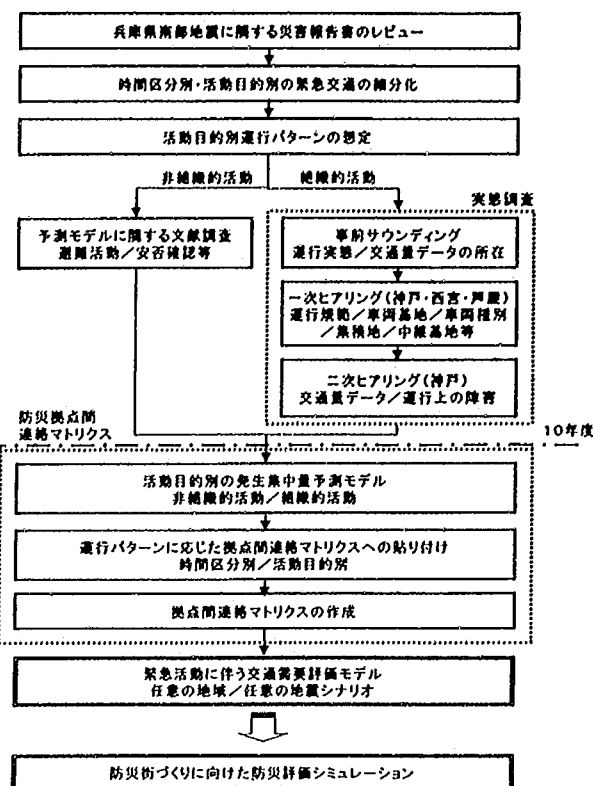


図2 緊急活動に伴う交通需要評価に関する研究

告書等既往文献調査を組み合わせを行い、緊急活動別の交通需要評価に必要な発生集中原単位モデル構築の基礎資料を得た。

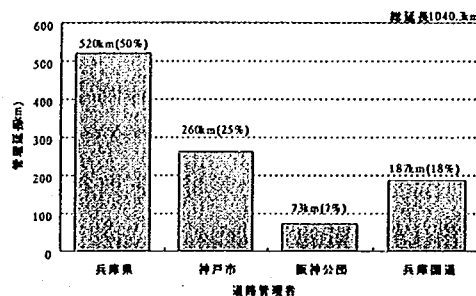
2. 研究結果

2. 1 幹線系道路の地震時機能障害に関する実態調査

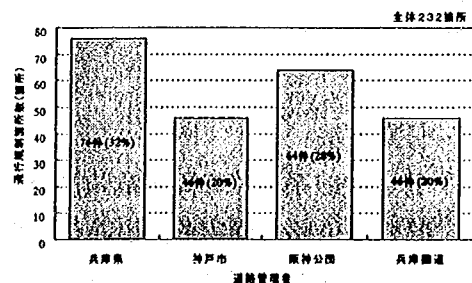
1) 兵庫県南部地震における道路機能障害

道路管理者別の調査延長、道路管理者別の通行規制箇所数、及び、通行規制の内容別割合を図3に示す。調査総延長は1040.3kmであり、兵庫県管理道路が520km(約50%)、神戸市管理道路が260km(約25%)、兵庫国道工事事務所管理道路が187km(約18%)、阪神公団管理道路が73km(約7%)である。通行規制箇所数は全体で232箇所であり、全面通行止めが135箇所(約59%)、車線規制が80箇所(約34%)である。

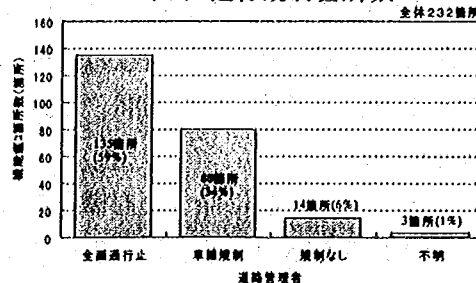
通行規制をもたらした道路機能障害を図4に示す。道路機能障害の種類が多岐にわたるため、支承被害・橋台被害・桁被害・落橋を橋梁関連、路面損傷・付帯設備被害等を路面・付帯関連、落石・崩土・擁壁被害を土石関連、地下施設被害・電柱倒壊・家屋倒壊・道路上への桁落下を沿道・占用関連、また施設点検や復旧工事に伴う規制を復旧点検関連に分類して整理している。これによれば、通行規制をもたらした道路機能障害は路面・付帯関連、橋梁関連、沿道・占用関連の順で多い。路面・



(a) 道路管理者別の調査延長



(b) 通行規制箇所数



(c) 通行規制の内容別割合

図3 道路機能障害の実態調査

附帯関連では路面損傷が 60 件（約 28%）で最も多く、次いで情報表示板等の付帯設備被害が 28 件（約 13%）である。ここで、道路施設以外の占用・沿道関連被害に起因する通行規制は 44 件（19%）を占めており、街路系道路だけでなく幅員の大きな幹線系道路でも、道路機能障害を評価する上で重要な要素となる。

道路機能障害が時間経過に応じてどのように解消されたかを図 5 に示す。沿道・占用関連被害は地震発生から 1 箇月で約 24%に減少しているのに対して、橋梁関連被害と路面・附帯関連被害は約 57%、約 42%にしか減少しておらず、比較的復旧作業が進捗しにくい。

別途推定された地表面最大加速度分布を用いて、通行規制をもたらした各種道路機能障害件数と地表面最大加速度の関係を累積グラフ形式で整理すると図 6 の通りである。各種施設被害による道路機能障害は地表面最大加速度が概ね 200gal を超えた地域で生じ始め、地表面最大加速度が概ね 500gal を超える地域で急増する傾向がある。施設被害のうち橋梁関連、路面・付帯設備関連、沿道・占用関連被害は地表面最大加速度が大きな地域で障害件数が単調増加する傾向があるが、土石関連被害については地表面最大加速度が概ね 500gal を超える地域で障害件数が頭打ちとなる。

橋梁関連、路面・附帯関連、占用・沿道関連、土石関連の各グループごとに、障害件数の累積グラフを示すと図 7 の通りである。路面・附帯関連と橋梁関連は地表面加速度が概ね 200gal を超える地域で、土石関連被害は概ね 300gal を超える地域で機能障害が生じ始めるのに対して、沿道・占用関連については概ね 500gal を下回る地域で機能障害が見られない。これは、幹線系道路の機能障害をもたらす被害が地下施設被害・電柱倒壊・家屋倒壊・道路上への桁落下など比較的大規模な被害に限定されており、これら被害は地表面最大加速度が小さな地域では生じにくいと考えられる。

2) 既往地震における道路機能障害

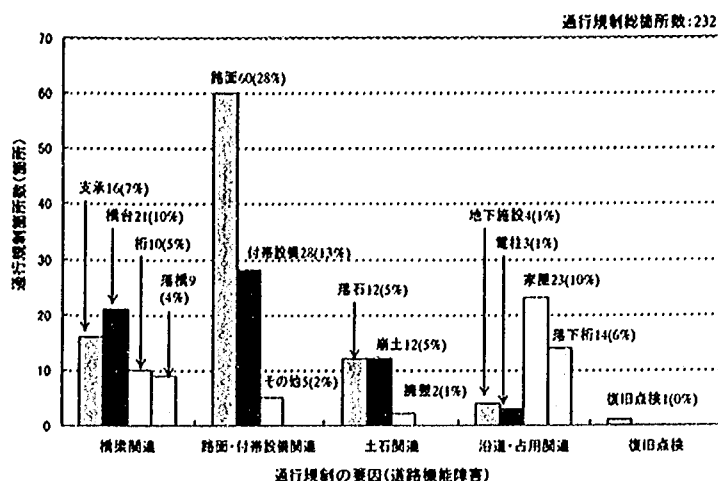


図 4 通行規制をもたらした道路機能障害

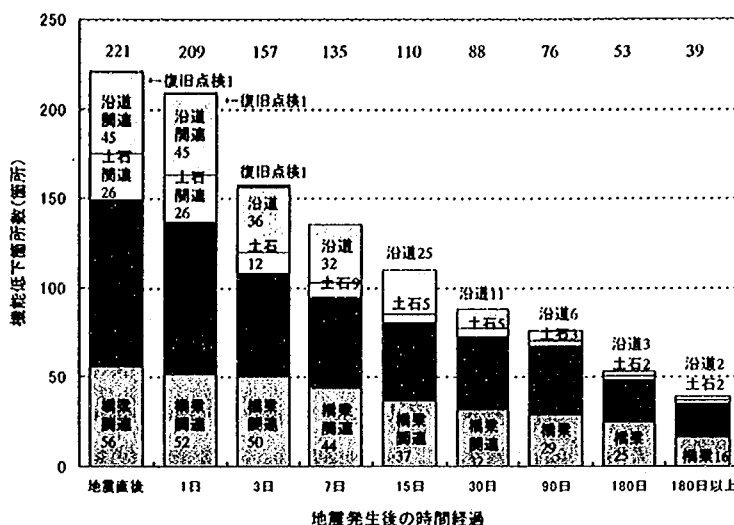


図 5 道路機能障害の時間変化

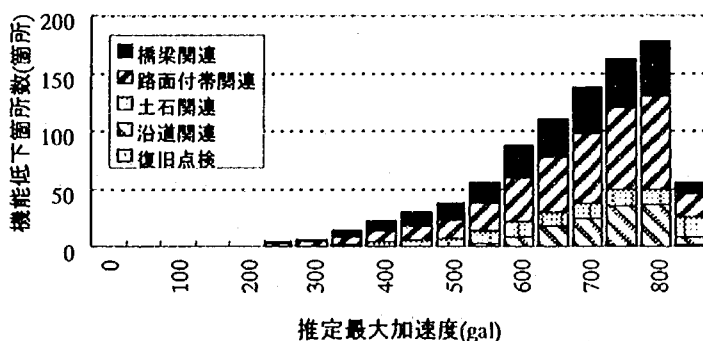


図 6 道路機能障害と地表面最大加速度の関係

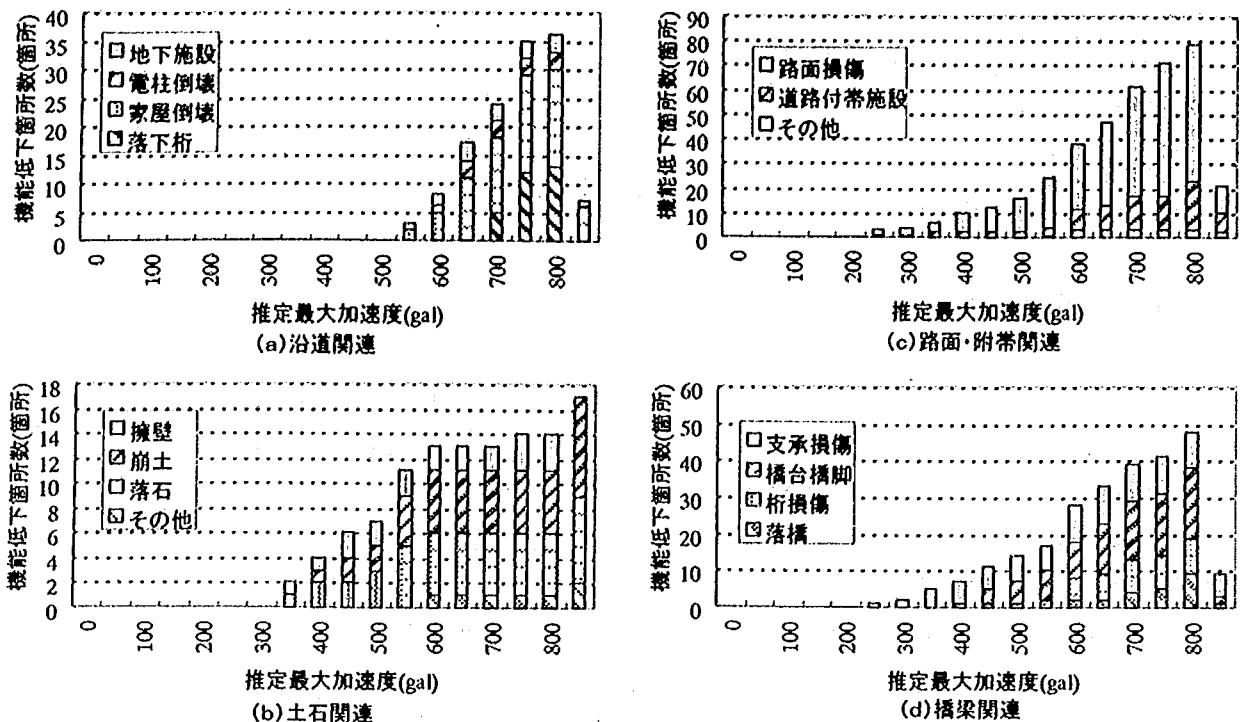


図7 道路機能障害と地表面最大加速度の関係（施設種類別）

既往地震時の調査事例に基づき、道路管理者が幹線系道路で実施した通行規制の種類と、通行規制をもたらす道路機能障害の関係を表1に示す。表中の○印は兵庫県南部地震以前の事例を、●印は兵庫県南部地震の事例を表している。兵庫県南部地震では大規模な施設被害が多く生じたことから、橋梁・橋台の損傷、歩道橋被害、建物被害、道路上への桁落下による完全通行止めの事例が新たに見られた。

既往地震を市街地地震（新潟地震、宮城県沖地震、日本海中部地震）、山間部地震（伊豆大島近海地震）、及び、大都市直下地震（兵庫県南部地震）に分類し、道路機能障害の時間変化を図8の通りである（兵庫県南部地震については図5を参照）。山間部の地震は土石関連被害が多いため、市街地地震に比較して解消に長時間を要する。施設被害が多岐にわたる市街地地震と大都市直下地震では、被害規模が異なるため定量的な比較は難しいが、道路機能障害を概ね9割解消するために市街地地震で3週間程度、大都市直下地震で24週間以上を要する。

2. 2 緊急交通需要に関する実態調査

1) 時間区分別・活動目的別の緊急交通特性

兵庫県南部地震に関する各種災害報告書及び学協会等の既存調査事例に基づき、地震発生からの時間区分、及び、緊急活動の目的別に緊急車両の運行実態を整理すると表2の通りである。地震発生からの時間区

表1 道路機能障害と通行規制の関係

道路機能障害(施設被害等)	交通規制の種類						
	緊急車両通行規制	緊急車両通行規制	通行規制解除	通行規制解除	通行規制解除	通行規制解除	通行規制解除
1. 欠陥			●		●		
2. 亀裂、陥没、段差、隆起			●	●		●	●
3. 落石、土石崩壊			●		●		●
4. 上部工の傾斜、移動、陥没		●	●	●		●	
5. 支保脚の損傷			●	●			
6. 橋脚、橋台、養護の亀裂、剥離、基礎の破壊			○	●			●
7. 橋台の裏込め土の崩壊							●
8. 橋梁取付部の段差		●	●			●	
9. 歩道橋の被害			○				
10. 地下道の被害							
11. 信号機等の被害	●						
12. 地下埋設管の被害			●				
13. 建物の被害			○				●
14. 樹、石橋の倒壊			●				○
15. 道路上への桁落下			○				○
16. 電柱、立木の傾斜、倒壊			●	●			
17. 浸水		●					
18. 市街地火災			○				
19. 避難、緊急輸送活動				○			
20. 車両滞留							

●印：新潟地震、伊豆大島近海地震、宮城県沖地震による通行規制事例
○印：兵庫県南部地震による通行規制事例

分は、公共土木施設の震災復旧に関する時間概念との整合に配慮して発災当日・発災～1週間後・1週間後～1箇月後の3段階とし、表2には紙面の都合上発災当日の緊急活動を示している。

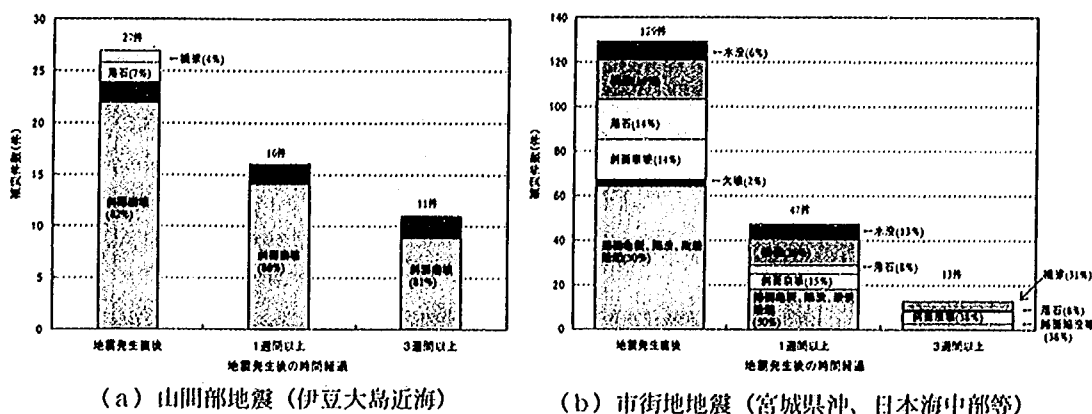


図8 震災特性と道路機能障害の時間変化

発災当日の緊急活動は、被災者本人による非組織的活動と公的機関による組織的活動に分類できる。非組織的活動としては避難・負傷者搬送・物資搬送・安否確認・状況把握の5種類が、また、組織的活動としては救助・消火・物資調達・交通誘導・ライフライン復旧・道路復旧・河川砂防復旧・港湾復旧の8種類が認められる。ただし、公的機関では要員確保と体制構築が主眼となることから、発災当日の緊急活動は非組織的活動の比率が大きい。各種施設の復旧活動も状況確認が主眼であり、人員・資機材の移動は少ない。発災～1週間後までの段階では、消火活動・救助活動が概ね終了し、避難地等への物資搬送需要が増加する。各種施設の復旧活動が本格化し、被災地域への人員・資機材の搬入需要が増加する。1週間～1箇月までの段階では、物資搬送需要に加えて、瓦礫処理・屎尿処理に伴う交通需要が増加する。

車両運行パターンの整理概念を図9に示す。道路ネットワーク解析における拠点間連絡マトリクスの設定に活用することを考慮して、緊急車両の活動範囲を被災地区（0.5～1.0km 四方程度）、被災地

表2 時間区分別・活動目的別の緊急交通特性（発災当日）

活動内容名	使用車両	運行管理者	車両運行パターン	活動内容・既存資料例
① 避難	自家用車	被災者本人	被災地（自宅）→ 被災地外 被災地（自宅）→ 広域避難場所	「阪神・淡路大震災時におけるマイカー利用の実態と今後の課題」小谷 通泰 他
② 人の搬送	自家用車	被災者本人	被災地（自宅）→ 病院等 → 自宅 被災地（自宅）→ 広域避難場所 → 自宅 被災地（自宅）→ 被災地外 → 自宅	土木計画学研究委員会 阪神・淡路大震災調査研究論文集 アンケートサンプル数803（マイカー保有者のみ） 自家用車利用総トリップ数は17日で551トリップ 原単位は551トリップ÷803人＝0.686トリップ/人
③ 安否確認	自家用車	被災者本人 被災者本人 被災者本人	被災地（自宅）→ 被災地（親類縁者）→ 自宅 被災地（自宅）→ 被災地（親類縁者）→ 自宅 被災地（自宅）→ 被災地（親類縁者）→ 自宅	この他に定常的交通と考えられる出勤、業務、帰社、帰宅の各目的が含まれる。
④ 物資の運搬	自家用車	被災者本人	被災地（自宅）→ 被災地（商店等）→ 自宅 被災地（自宅）→ 被災地（商店等）→ 自宅 被災地（自宅）→ 被災地（商店等）→ 自宅	トリップ有りの個人の平均トリップ数は2.03トリップ/人と概ね1往復となっていることから、避難を除く各項目の移動に対する燃りのトリップがあると考えられる。
⑤ 状況把握	自家用車	被災者本人	被災地（自宅）→ 被災地（自宅周辺）→ 自宅	
⑥ 救助	警察車両 自衛隊車両 救急車	警察署 自衛隊 消防署	警察署 → 被災地（自宅）→ 警察署 自衛隊 → 被災地（自宅）→ 自衛隊 消防署 → 被災地（自宅）→ 消防署	行方不明者の捜索活動 被災地から被災地内の設置拠点への移動 被災者の救出、救助活動 怪我人等搬送 （発災当日救急出動件数264回 阪神・淡路大震災における消防活動の記録－神戸市域－）
⑦ 消火	消防車両	消防署	消防署 → 被災地（火災現場）→ 消防署	消火活動（神戸市では17日に109件火災発生）
⑧ ライフライン復旧	貨物車等	電力会社 ガス会社 水道事業者 電話会社	電力会社 → 被災地（変電所）→ 電力会社 （被害50変電所、大被害5変電所、主要送電経路） ガス会社 → 被災地（変電所）→ ガス会社 管理事務所 → 被災地（変電所）→ 管理事務所 （応急給水対象は病院及び一部の学校等緊急避難場所） 不明	応急送電のための復旧開始 （発災当日 2,149 人動員 阪神淡路大震災復旧記録 関電） 供給停止区域確定のための被害状況調査 断水状況の把握、応急給水の開始 （発災当日は61台を運用） （当日の活動内容不明）
⑨ 物資調達	貨物車等 給水車	自治体 自衛隊（海上）	市役所 → 被災地（避難場所）→ 市役所 港 → 被災地 → 港	発災当日は生活関連物資（食糧、毛布等）を配達 17日当日は海上自衛隊
⑩ 道路の復旧	貨物車等 警察車両	道路管理者 交通管理者 警察署	各事務所 → 被災地（自宅）→ 各事務所 警察署 → 被災地（自宅）→ 警察署	安全点検作業、危険箇所の応急措置 通行不能箇所の調査
⑪ 港湾の復旧	貨物車等	港湾管理者	各事務所 → 被災地（自宅）→ 各事務所	港湾の被害状況確認
⑫ 河川、砂防等復旧	貨物車等	河川管理者	各事務所 → 被災地（自宅）→ 各事務所	河川施設の被害状況確認
⑬ 交通誘導	警察車両	警察署	各警察署 → 被災地 → 各警察署	交通整理誘導要員の輸送

表3 活動目的別緊急交通の原単位モデルの考え方（一部）

活動目的	運行管理者	車両運行パターン	原単位算出の考え方	把握すべき項目
救助	警察署	警察署 → 被災地区 → 被災地区 → 警察署	行方不明者捜査1グループ当り投入車両数÷1グループ担当面積 (1投入当りの平均移動回数が把握可能なら把握する)	担当1グループ面積、1投入当り平均移動回数 行方不明者捜査1グループ当り投入車両数、
	自衛隊	被災地域外(駐屯地) → 被災地域	自衛隊投入車両全数÷投入部隊数 or 投入員数 (被災規模により投入規模も異なると想定されるが、この把握は困難か)	(自衛隊投入車両全数、投入員数は把握済み)
		被災地域 → 被災地区 → 被災地区 → 被災地区	1救助担当地区当りの投入台数÷1救助担当地区の平均面積 (1投入当りの平均移動回数が把握可能なら把握する)	1救助担当地区当りの投入台数、1救助担当地区の平均面積、1投入当りの平均移動回数
	消防署	消防署 → 被災地区 → 病院等 → 消防署	延べ出動台数÷救助件数 (病院への移送比率の把握が可能か)	病院への移送率 (病院での受け入れ台数、延べ出動台数、救助件数は把握済み。)
消火	消防署	消防署 → 被災地区(火災現場) → 消防署	延べ出動台数÷火災件数 (消火の火災現場を巡回するかどうかの把握、その場合には平均移動回数)	火災件数、延べ出動台数とも把握済み
ライフライン復旧	電力会社	事業所 → 被災地区 → 事業所	・応急送電 (動員延べ人員数÷平均乗車人員)÷被災箇所数 (投入車両数が直接把握可能なら把握する)	動員延べ人員数、平均乗車人員、被災箇所数 (応急送電(変電所等)と復旧活動や各戸の復旧)では活動内容が異なる)
		事業所 → 被災地区 → 被災地区 → 事業所	・復旧活動 (動員延べ人員数÷平均乗車人員)÷被災箇所数 (投入車両数が直接把握可能なら把握する) (1投入当りの平均移動回数が把握可能なら把握する)	動員延べ人員数、平均乗車人員、被災箇所数 (なお、応急送電を含めた動員延べ人員数、被災箇所数は把握済み。)
	ガス会社	事業所 → 被災地区 → 被災地区 → 事業所	①中圧管復旧作業(震災後1週間) (修理延べ班数×1班当り車両数)÷被災箇所数	1班当り車両数 (班数、被災箇所数=修理箇所数は把握済み)
		事業所 → 被災地区 → 被災地区 → 事業所	②低圧管復旧作業(一般住宅等) (修理延べ班数×1班当り車両数)÷被災箇所数 (1投入当りの平均移動回数が把握可能なら把握する)	1班当り車両数 (班数、被災箇所数=修理箇所数は把握済み)
	水道事業者	水道局 → 被災地区 → 被災地区 → 水道局 (応急給水対象は病院及び一部の学校等緊急避難場所)	①応急給水作業 1日給水箇所数 (1給水当りの平均移動回数が把握可能なら把握する)	給水箇所数 (給水車両台数は把握済み)
		水道局 → 被災地区 → 被災地区 → 水道局	0. 復旧作業 (動員延べ人員数÷平均乗車人員)÷被災箇所数 (投入車両数が直接把握可能なら把握する)	平均乗車人員 (動員延べ人員数、被災箇所数は把握済み。)
電話会社	電話局	電話局 → 被災地区 → 被災地区 → 電話局	0. 特設公衆電話等の設置 投入車両台数÷設置台数 (1車両1台当りの平均移動回数が把握可能なら把握する)	投入車両台数 (設置台数は把握済み) (避難所に主に設置されたことから、原単位適用時には避難所数から設置台数に換算も可)

域(市町村レベル)、被災地域外(県レベル)の3領域に区分するとともに、実際には多岐にわたる運行パターンを3領域間の移動事象として類型化した。すなわち、時間区分・活動目的別の運行パターンは、地区～地区、地区～地域内拠点、地域内拠点～地域内拠点、地域内拠点～地域外拠点、地区～地域外拠点の組み合わせとして表現される。

2) 発生集中量原単位モデルの基本的な考え方

兵庫県南部地震による被災地域内の公的機関を対象としたヒアリング調査結果に基づき、活動目的別緊急交通の原単位モデルの考え方を整理すると表3の通りである。救助活動・消火活動・物資搬送活動等は原単位モデル作成に必要な実態情報が概ね把握できるのに対して、各種復旧活動は被災内容に応じて対応状況が多岐にわたり、復旧単位あたりの投入車両数を特定するのが難しい。原単位モデルは自治体等が実施する被害想定項目に対応(例えば、瓦礫処理に伴う搬送活動原単位×倒壊棟数)することが望ましいが、実態把握の難易に応じてモデルの精度を下げ、入手が容易な情報(例えば、被災人口あたり、被災面積あたり)による原単位モデル化の可能性を検討する必要がある。また、非組織的活動の原単位モデルについては、震災当時の既存調査事例を詳細に調査するとともに、補完的な実態調査を通じて原単位モデル化の検討を進める必要がある。

3. 主な研究成果物

土木研究所、建築研究所：防災まちづくり総プロ-平成10年度成果報告書

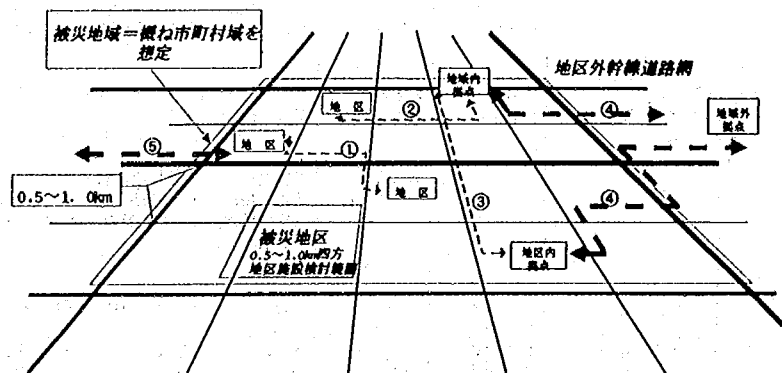


図9 緊急活動を行う車両運行パターンの概念

6. 震災直後における道路の早期啓開支援システムに 関する試験調査

6. 震災直後における道路の早期啓開支援システムに関する試験調査

研究期間：平7～平11

担当：防災技術課 課長：杉田秀樹、主任研究員：金子正洋

【要旨】

兵庫県南部地震以後、各種公共・公益施設の管理においては、個別の管理施設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うまく使うかというソフト的対処による被害の軽減手法へのニーズが注目を集めている。本課題では、情報を有効に使うことで震災直後の道路管理者の初動活動を支援し、最終的な被害を軽減する手法、すなわち、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行っており、10年度は、システムの動作環境向上のための改良、地震動分布予測手法の検証、盛土被害予測手法に関する検討を行った。

1. 研究方法

1.1 システムの動作環境向上のための改良

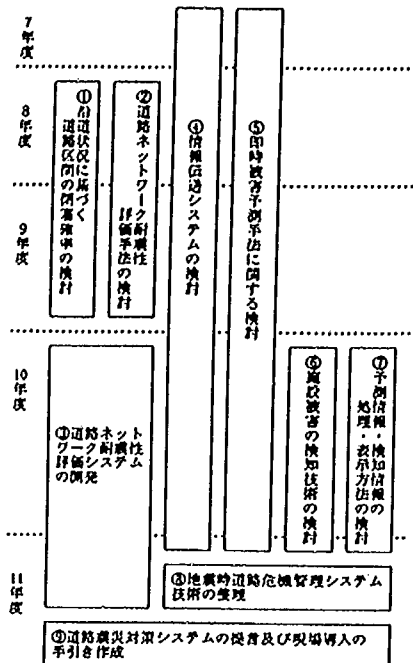
システムの動作環境を向上させるために、県庁所在地の表示、表示色の暗色化、距離スケールの表示等の改良を行った。

1.2 地震動分布予測手法の検証

関東地方建設局管内の強震計ネットワークの強震記録を用いて、震害予測システムの地震動分布予測手法を検証した。検証方法は、最初に、地中の7観測地点の記録を用いて地中の地震動分布を算出し、地中の観測記録と比較した(基盤面での補間モデルの検証)。次に、地中の7観測地点の記録を用いて地震応答解析により地表の波形を算出し、地表の観測記録と比較した(地盤応答倍率モデルの検証)。さらに地表の110観測地点の記録を用いて地表の地震動分布を算出し、観測記録と比較した(上記2つも含めて、地表面での推定モデルの検証)。強震記録が観測された地震を表-1に示す。

1.3 盛土の被害予測手法に関する検討

ニューマーク法により、震後の盛土の沈下量を算出し、沈下量と最大加速度との関係について整理した。検討に用いた盛土構造物のモデルは、盛土高さ3種類×のり面勾配2種類×盛土材料強度3種類の18モデルとし、平成8年度道路防災点検(地震)に関する資料を用いて作成した。作成したモデルについて円弧すべり法を用いて震度法(Kh法)による安定計算を行い、最小安全率 $F_s=1.0$ となる円弧位置及び水平震度(Khc)を決定した。ニューマーク法では、1995年兵庫県南部地震JR西日本鷹取駅の観測記録(EW成分)の最大加速度を150, 200, 300, 400及び600galに調整したものを、円弧内の平均的な応答加速度時刻歴とし、滑動変位量を式(1)により計算した。さらに図-1に示す関係を用いて盛土の沈下量を算出し、盛土の沈下量と入力最大加速度の関係について整理した。ここで、本検討においては、簡便な方法として、入力した地震動がそのまま円弧内の平均的な応答加速度時刻歴と考えている。ここで、本検討で用いたニューマーク法による盛土の被害予測手法については、その適用性について、被害事例の検証などにより更なる検討が必要である。



※H11は本課題と「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」が一本化される予定

表-1 強震記録が観測された地震

NO	地震発生日時	震源地	M
1	1997/08/09	埼玉県南部	5.1
2	1997/09/08	東京都湾	5.2
3	1997/12/06	千葉県北西部	4.7
4	1998/03/23	茨城県沖	5.4
5	1998/04/09	福島県南部	5.4
6	1998/05/16	福島県南部	4.9
7	1998/06/24	茨城県南部	4.7
8	1998/08/29	東京都湾	5.4

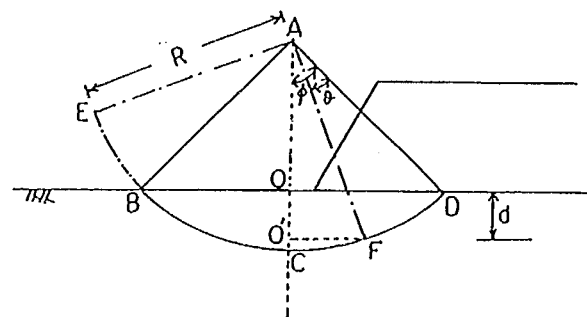


図-1 滑動回転角(θ)と沈下量(d)の関係図

$$\delta = R \cdot \theta = \int_0^T \int_0^1 (A(t) - Khc \cdot g) dt dt \quad (1)$$

ここで、

δ : 滑動変位量(cm)、 R : 安定計算の円弧の半径(cm)、 θ : 安定計算の円弧の回転角 (ラジアン)

$A(t)$: 応答加速度時刻歴、 Khc : 円弧が $F_s=1.0$ となる時の水平震度

2. 研究結果

2. 1 地震動分布予測手法の検証

地表面での推定モデルの検証結果の一例として、福島県沖の地震(No5)について計算結果と観測記録の相関を図-2に示す。また、合わせて表-1の各地震記録の相関係数を表-2に示す。SI値は、いずれの地震記録も0.5以上の相関係数となっているが、最大加速度は、相関係数が0.5以上となるのは2地震記録のみである。これは、SI値に比較して最大加速度の値が瞬間的な値を取ることに由来するものと考えられる。また、N03, 7, 8の地震において最大加速度値の相関係数が特に小さくなっているが、他の地震と比較して、最大加速度値、基盤面での補間モデルの精度、地盤応答倍率モデルの精度について、差異は見られなかった。

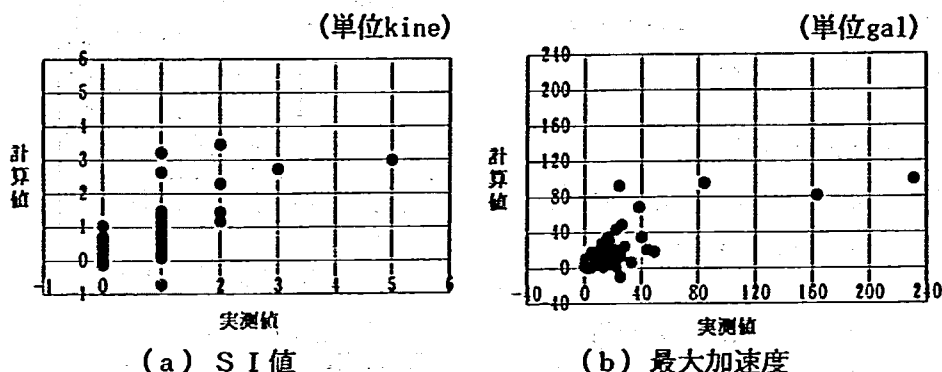


表-2 各地震記録の相関係数

NO	SI 値	最大加速度値
1	0.696	0.457
2	0.799	0.499
3	0.607	-0.070
4	0.672	0.583
5	0.721	0.734
6	0.558	0.330
7	0.597	0.146
8	0.626	0.103

図-2 計算結果と観測記録の相関 (福島県沖の地震)

2. 2 盛土被害予測手法に関する検討

水平震度と最小安全率の関係を図-3に示す。各水平震度ともにのり面勾配が2.0割の最小安全率が1.5割の最小安全率より大きな値を示しており、のり面勾配1.5割・材料強度aと2.0割・材料強度cが、ほぼ同じ値となっている。また、入力最大加速度と滑動変位量・盛土の沈下量の関係を図-4に示す。滑動変位量、盛り土の沈下量ともに、材料強度によらずほぼ同じ値となっており、入力最大加速度600galで、85~100cm程度の沈下量を示している。

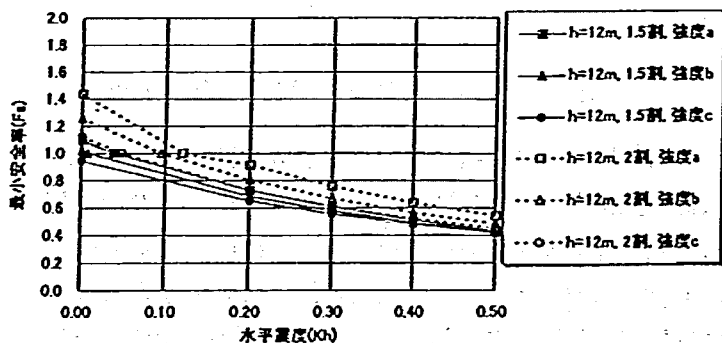


図-3 水平震度と最小安全率の関係 (盛土高12m)

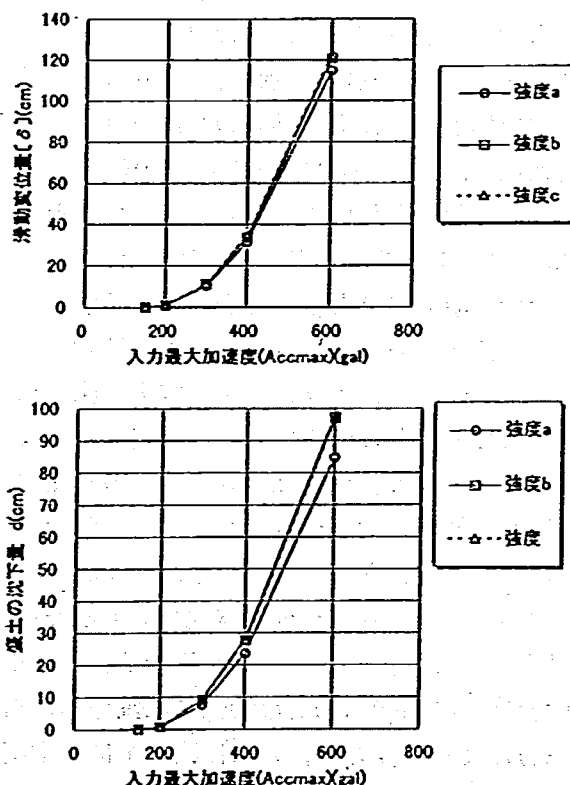
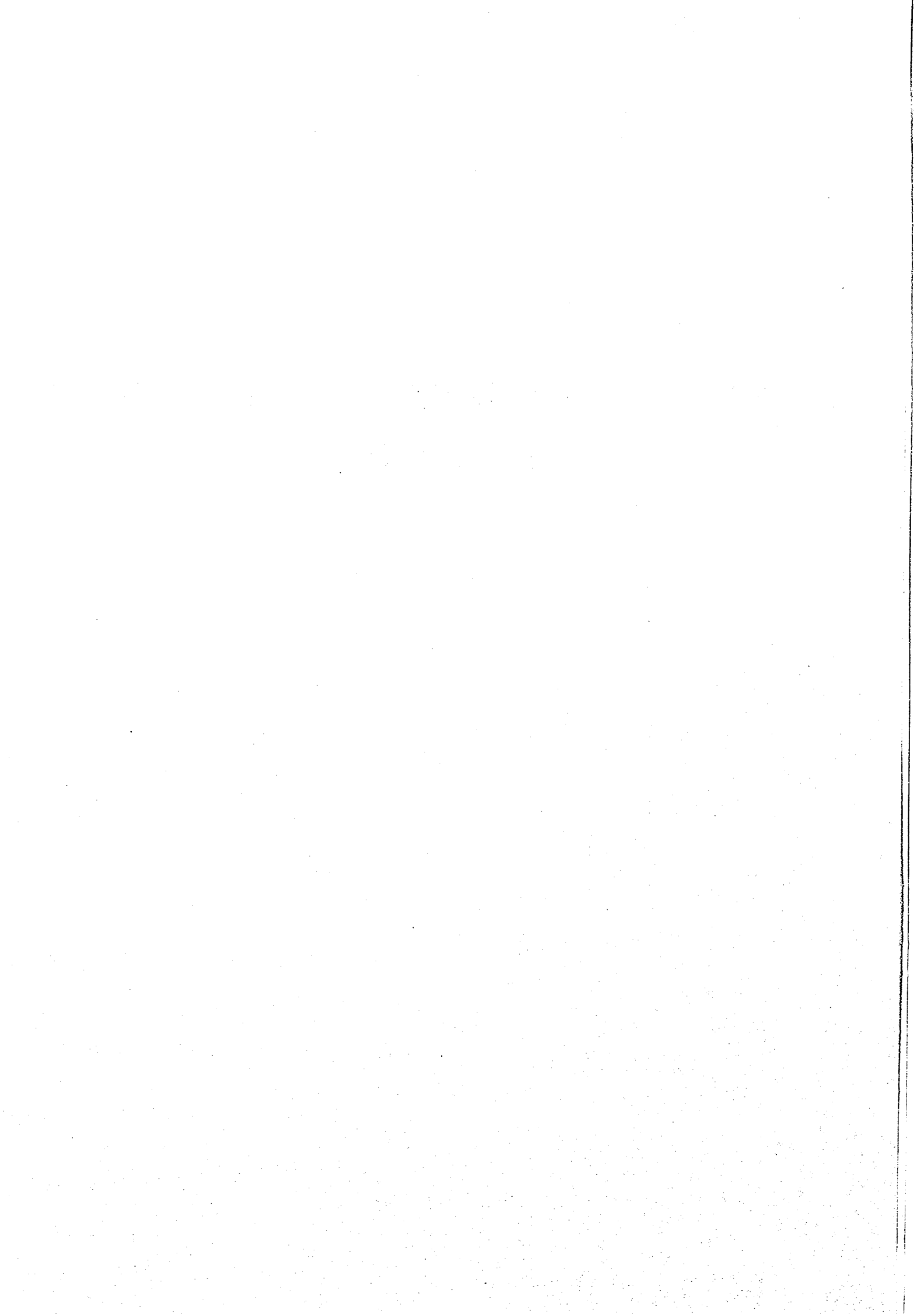


図-4 入力加速度と滑動変位量・盛り土の沈下量の関係 (盛土高8m、勾配2割)

7. 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



7. 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

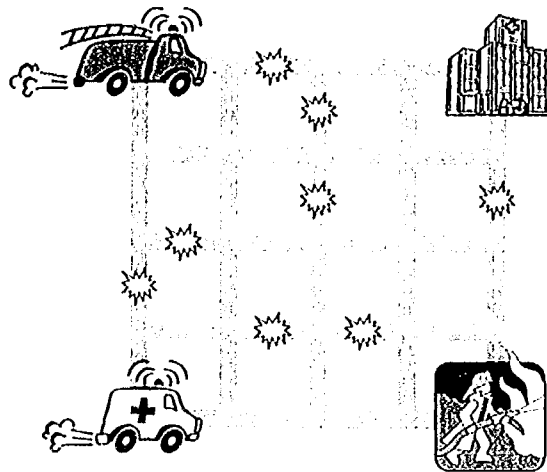
研究期間：平 8 ～ 平 11

担当：防災技術課 課長：杉田秀樹、主任研究員：野崎智文、遠藤和重

共同研究室：道路研究室（H8～9 年度）

【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状況が与えられた場合に、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 10 年度は、三種類の形態の道路ネットワークに対して、様々な被災パターン、補強パターン、交通規制パターンを設定し、道路ネットワーク耐震性指標を算出し、それらを比較することによって、地震に対する道路ネットワークシステムの機能を確保するためのハード対策、ソフト対策の効率性を定量的に評価した。



道路ネットワーク全体の耐震性は？
各区間の耐震上の優先順位は？

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。平成 10 年度は、放射・環状、格子、ラダー型の三種類のネットワークに対し、様々な被災パターンを想定し、耐震補強パターン、交通規制パターンの効果を耐震性指標に基づいて定量化・視覚化することによってハード対策としての耐震補強とソフト対策としての交通規制の効率性を比較評価した。

2. 研究成果

2. 1 道路ネットワーク耐震性指標の考え方

道路ネットワーク耐震性指標 SP は、地震後における救急、消防等の緊急交通の旅行時間に基づき、それらの目的の達成度を計算することにより得られる。地震によって道路区間が被災すると、迂回距離の増加や避難、見舞いといった時間的制約が厳しくない交通による道路混雑のために緊急交通の旅行時間が増加し、 SP が低下する。一方、補強によって被災区間を減らしたり、交通規制によって緊急交通が背景交通の混雑の影響を受けないようにすることによって、 SP は被災状態の値から向上する。もともとの被災状態のネットワークに対する指標 SP_0 に対して、補強によっていくつかの区間が被災しない場合や交通規制によって緊急交通が円滑に流れる場合の指標 SP を計算し、それらの差をとることによって、特定区間の補強や交通規制パターンの効果を定量的に評価することができる。

2. 2 交通規制の考え方

地震後に交通規制を行うことによって、被災後の道路網における緊急交通を背景交通から分離し、その効

果を増大させることができる。解析上の交通規制条件としては、①被災地域への域外交通の流入を規制する流入規制、②道路の往復片方のみを緊急交通専用とする方向規制、③往復車線の一部を緊急交通専用割り当てる防災レーンの三種類を考えた。

2. 3 解析ケース

ネットワーク形態としては放射環状型、格子型、ラダー型の三種とし（図1）、これらに対して道路区間の被災パターンを設定し、想定地震被害パターンとした。これらのパターンに対していくつかの被災区間が補強により被災しなかったとしてハード対策の効果を計算する一方で、被災したネットワークに前出の三種の交通規制を施し、ソフト対策の効果を計算し、双方の対策の効果、特徴を比較した。

2. 4 解析結果

解析結果は、各ネットワークパターンごとに分け、設定した補強・規制パターンのケースに対する耐震性指標 SP として表示した。また、交通規制は緊急交通を円滑に流す一方で背景交通の混雑を悪化させることから、対比のために各ケースについて、背景交通の一台あたり有効旅行時間 $TTPV$ （孤立交通を除いた平均旅行時間）を併せて表示した。たとえば放射環状型のネットワークの結果は図2のようになり、棒グラフでネットワーク耐震性指標 SP が折れ線で $TTPV$ が表されている。これより耐震補強は背景交通の状況を悪化させずに SP を向上させること、放射路／環状路といった路線の性格によって、交通規制の効果が異なること、交通規制のネットワーク耐震性向上の効果と背景交通への影響はトレードオフになりうることなどが判断できる。

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手法の提案，土木技術資料，44-49 頁，平成 10 年 8 月
- ・杉田秀樹、野崎智文：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究（その 1）ネットワーク耐震性指標の提案とその計算方法の開発，土木研究所資料第 3589 号，平成 10 年 9 月
- ・杉田秀樹、野崎智文、矢野和彦：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究（その 2）地震時の道路交通管理手法に関するケーススタディー，土木研究所資料第 3621 号，平成 11 年 1 月

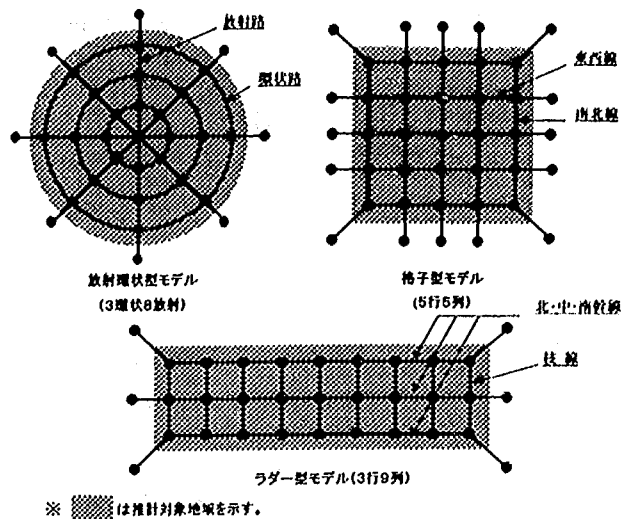


図1 解析ネットワーク

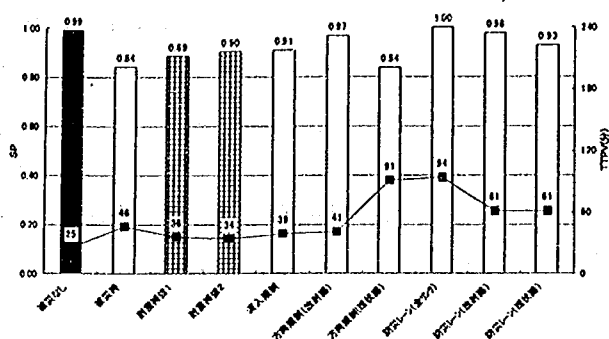
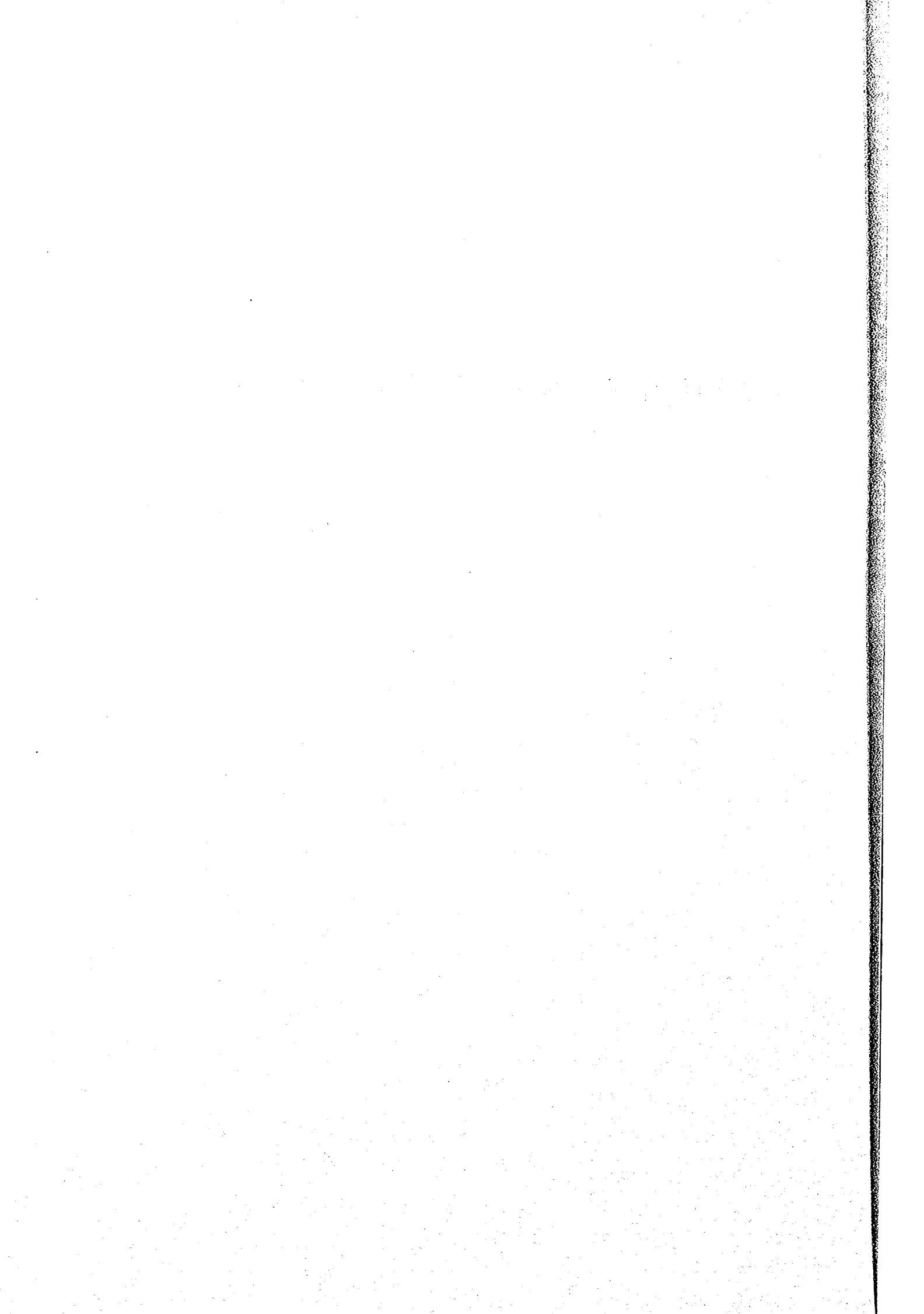


図2 放射環状型の SP と $TTPV$

8. 河川施設の耐震強化判定法に関する試験調査



8. 河川施設の耐震強化判定法に関する試験調査

研究期間：平 8 ～ 平 1 0

担当：防災技術課 課長 杉田秀樹 主任研究員 金子正洋

【要旨】

平成 7 年兵庫県南部地震を背景に、河川堤防の耐震強化事業が 7 年度より開始された。また、“河川砂防技術基準(案)、9 年改訂”では、一般堤防は平水位の地震作用に対して浸水による二次災害を生じないこと、高規格堤防は計画高水位以下の地震作用に対して安全であること等、河川堤防の耐震性水準に関して当面の目標が示された。しかし、高レベル地震動に対してどこまで耐震性能を保証するかについての考え方は必ずしも明確でない。耐震強化事業の将来計画策定に向けて、耐震強化水準や事業優先度を判断するための技術的根拠の明確化が求められている。

本研究は、近年の事業評価手法の主流である費用対効果分析により、河川堤防が保有すべき耐震性水準の合理的な選択手法を検討するものである。最終年度である 10 年度は、耐震性水準の選択フローを提案するとともに、実務への適用を図る上で解決すべき技術的課題を整理した。また、堤防沈下量評価モデルの高度化に向けて既往震災事例を追加調査し、別途開発した“即時震害予測システム”への適用を図った。さらに、設計地震外力の合理化に向けて建設省地震計ネットワーク活用WG（事務局災害対策室）に参画し“地震計ネットワーク活用方針”をとりまとめた。

1. 研究方法

1. 1 費用対効果分析に基づく耐震性水準設定手法：8 年度成果である堤防被害の生起確率評価手法と、9 年度成果である期待被害額評価手法を組み合わせ、耐震性水準の選択フローを提案した。

1. 2 堤防沈下量評価モデルの高度化：濃尾地震以降河川堤防に被害を生じた 10 地震を対象に 691 被災事例を追加調査し、地震時安全率と液状化指数による沈下量評価の可能性を検討した。また、本モデルを用いて即時被害予測システムに堤防被害評価機能を付加した（地建依頼と合せて実施）。

1. 3 地震計ネットワーク活用方針：地震計ネットワーク（河川系 295 観測点、9 年度整備完了）の震前／震後対策への活用方針を、災害対策室、技術調査室、道路防災対策室等関連部局と共同して定め、地建等地震計担当部局に周知した。

2. 研究成果

2. 1 費用対効果分析に基づく耐震性水準設定手法

費用対効果に基づく耐震性水準の選択フローを図 1 に示す。すなわち、1) 単位堤防区間の分割：

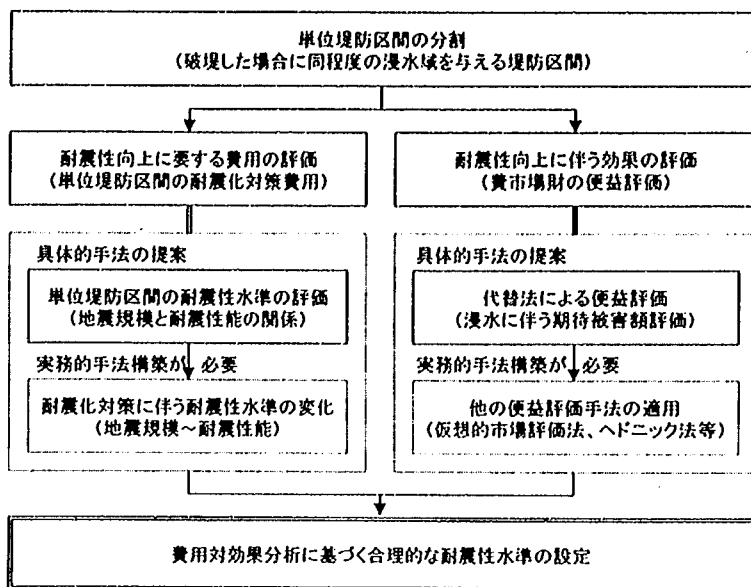


図1 費用対効果分析に基づく耐震性水準の選択フロー

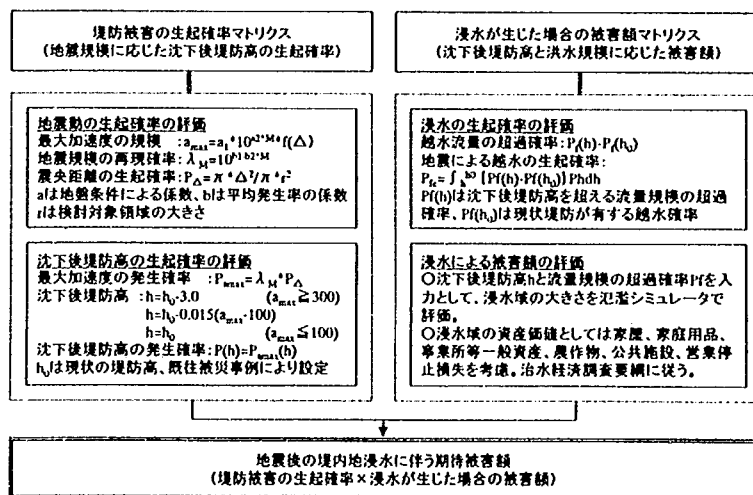


図2 浸水に伴う期待被害額の評価フロー

破堤した場合に同程度の浸水域を与える堤防延長を単位堤防区間と定義し、当該区間に対して費用便益比較を行う。

2) 耐震性向上に要する費用の評価：現状堤防が保有する耐震性水準（地震動強度と堤防沈下量の関係）を評価し、各種耐震化対策による耐震性水準の向上度合と対策費用のメニューを準備する。3) 耐震性向上に伴う効果の評価：非市場財である河川堤防の防災投資効果を評価する。評価には代替法を適用し、堤内地の浸水に伴う期待被害額を耐震強化便益と考える。ただし、代替法による便益評価は間接被害やオプション価値を含まないことに注意する必要がある、バイアスの問題が存在するものの、直接流域住民に支払意思額を尋ねる仮想的市場評価法（CVM）の適用性について別途検討する必要がある。

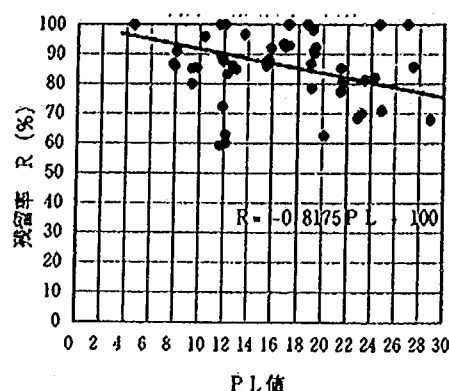


図3 液状化指数と残留率の関係

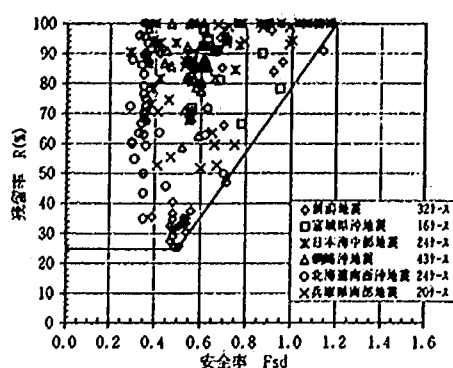


図4 安全率と残留率の関係

堤内地の浸水に伴う期待被害額の評価フローを図2に示す。すなわち、1) 堤防被害の生起確率評価：当該堤防区間で生じ得る地表面最大加速度と生起確率を経験的手法により評価する。また、堤防沈下量評価モデルを用いて最大加速度と沈下後堤防高の関係を想定し、沈下後堤防高と生起確率の関係を整理する。2) 浸水が生じた場合の被害額評価：沈下後堤防高と流量規模の超過確率から浸水の生起確率を評価する。また、土木研究所で別途開発された氾濫シミュレータを用いて浸水域と被害額を解析し、流量規模と被害額の関係を整理する。3) 期待被害額の評価：堤防被害の生起確率と浸水による被害額を乗じて期待被害額を算定する。

2. 2 堤防沈下量評価モデルの高度化
液状化指数 P_L と残留率 R の関係を図3に、また、安全率 F_{sd} と残留率 R の関係を図4にそれぞれ示す。安全率 F_{sd} は“河川堤防耐震点検マニュアル”に示される液状化と地震時慣性力に対する安全率の最小値、残留率 R は沈下後堤防高の初期堤防高に対する比率を表わす。これによれば、液状化指数や安全率と残留率の間に明確な相関は認められない。既往震災事例による評価モデル構築は現状では難しいが、実務上扱い易い液状化指数と安全率を指標とした評価モデルの高度化について、今後解析的検討を進めることが望ましい。

2. 2 堤防沈下量評価モデルの高度化

即時震害予測システムによる堤防沈下量の評価画面を図5に示す。本システムは地震計ネットワークと連動して、中～大規模地震直後に被災状況を概略推定する目的で土木研究所が開発したものであり、9年度より関東地方建設局で運用されている。

2. 3 地震計ネットワーク活用方針
地震発生時の初期点検への活用法、復旧時または平時の耐震研究への活用法、及び、観測データの公開法を定めた。観測施設／観測情報データベースを土木研究所に構築しており、河川堤防の設計地震外力を検討する際の基礎資料となる。

2. 3 地震計ネットワーク活用方針

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、Vol.39-9、1997
2) Hideki SUGITA, Tadashi HAMADA: Development of Real-time Earthquake Damage Estimation System for Road Facilities, UJNR Lifeline Workshop, 1997.11
3) 地震計ネットワーク活用 WG：地震計ネットワーク活用方針、1999.3

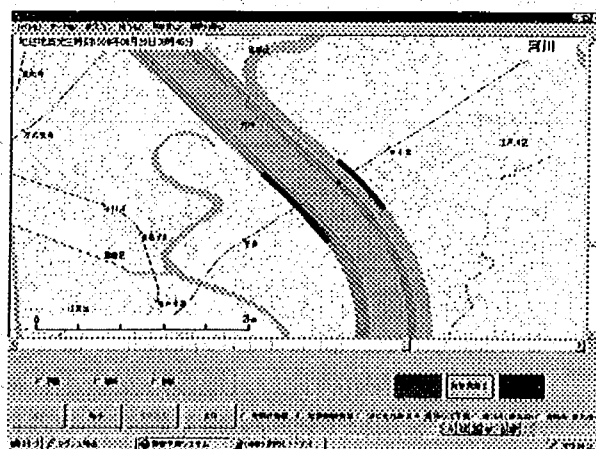
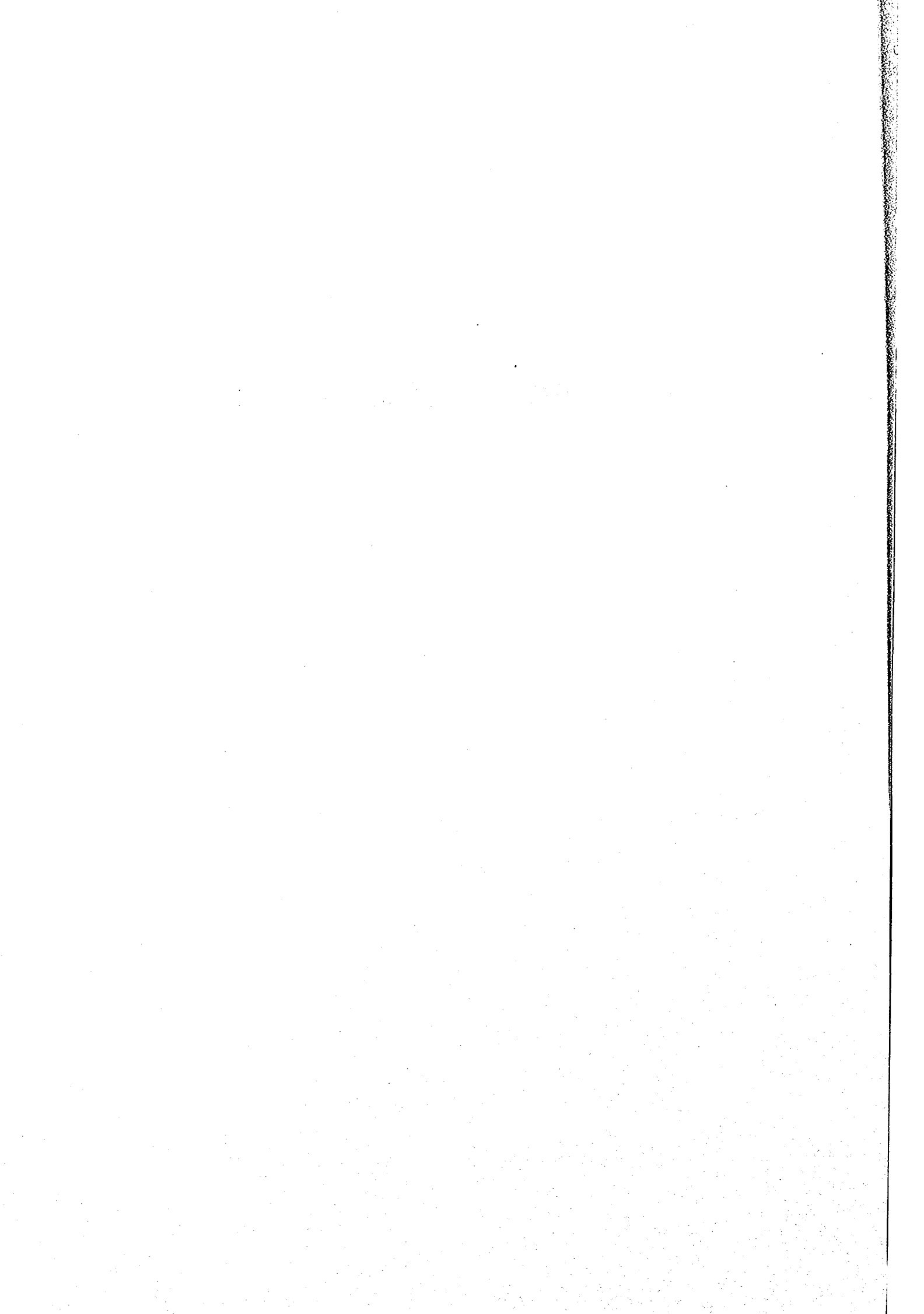


図5 即時震害予測システム(堤防沈下量評価)

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、Vol.39-9、1997
- 2) Hideki SUGITA, Tadashi HAMADA: Development of Real-time Earthquake Damage Estimation System for Road Facilities, UJNR Lifeline Workshop, 1997.11
- 3) 地震計ネットワーク活用 WG：地震計ネットワーク活用方針、1999.3

9. 河川施設の強震計の点検調査



9. 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：葛西 伸寛

【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・自治体が所管する約340箇所の施設で観測が実施されており、観測された地震波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、強震計の年1回の動作確認としての保守点検、地震記録の回収、数値化の一次解析を行うことを目的とする。

平成10年度は27箇所の強震計保守点検を行い、また、「河川堤防における強震計配置計画(第3期)」の推進を図った。

1. 研究方法

1.1 強震計の保守点検

平成10年12月現在、建設省、公団、自治体が管理する51箇所の河川施設で強震観測が実施されている。設置機関別に設置箇所、強震計型式別に整理すると表-1のとおりである。この中で、建設省所管の27箇所の観測施設を対象に動作確認としての保守点検を実施し、観測記録を回収した。

表-1 河川施設における強震計設置状況

(平成10年12月現在)

	総数	SMAC型	普及型	電磁式
建設省	27	14	13	0
都道府県	7	6	1	0
北海道開発局	12	4	1	7
水資源公団	5	0	5	0
計	51	24	20	7

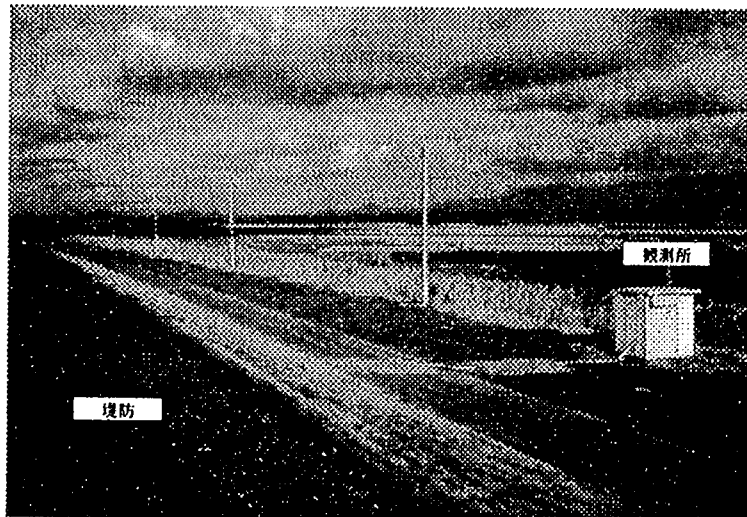
これら強震計の中には20年を経過した物もあり、早急な機器の更新が望まれる。

また、アナログ式記録計も幾つかあるが、これらはデジタル記録方式強震記録計への更新も早急に実施されることが望ましい。

1.2 「河川堤防における強震計配置計画(第3期)」の推進

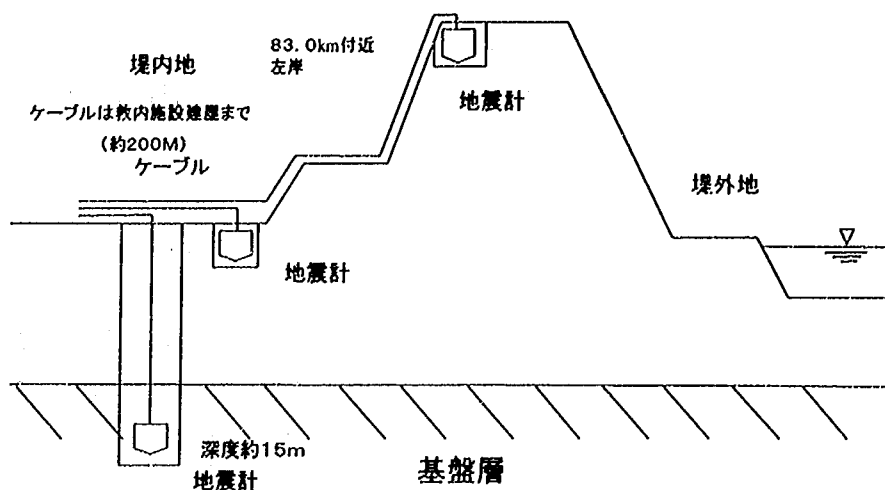
「河川堤防における強震計配置計画(第3期)」は第1期(昭和53年)、第2期(平成元年)を元に、観測施設の更新・増強と多様な条件下での観測記録の収集を目的に策定されたものである。平成8年より観測点の整備を行っており、3箇年計画で90箇所の強震計の設置が計画されている。

平成10年度は山国川、遠賀川、阿武隈川、菊池川、千曲川、北上川、荒川、北利根川(霞ヶ浦)、鰯川(霞ヶ浦)、吉田川、後志利別川、庄内川、神通川などの観測地点で、強震計・間隙水圧計の設置方法について現場事務所と意見交換を行い、計画の進捗に勤めた。





(a) 位置図



(b) 断面模式図

図1 河川堤防における強震計設置状況図(阿武隈川上流河川堤防)

2. 研究結果

2. 1 強震計の保守点検

平成10年度の点検の結果、障害が発見されたのは表2のとおり8箇所である。強震計の障害発生率は29.6%であり、昨年と同数の障害数件となっている。これらは基本的に老朽化によるものが多く、抜本的な対策が求められるところである。

なお、軽微な不具合、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などに修理要求を行うことにより、観測環境の維持に勤めている。

2. 2 観測記録の数値化

平成10年9月4日8時2分日向灘(宮崎県)を震源とする地震(M4.5、震源深さ32km)による大淀川堤防(地盤-12m地点)での記録を図2に示す。これらの主要な観測記録については数値化しデータベースに蓄積する。

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. 1~22)、土木研究所彙報Vol. 32~65 他

2) 小俣、杉田、山中ほか：河川堤防における強震計配置計画(第3期)、土木研究所資料第3499号

3) 杉田、葛西：公共土木施設の強震観測について、土木技術資料Vol. 41, No. 1, 10~11頁, 1999年1月

表-2 障害箇所一覧

種別	ID	観測所名	障害状況
普及	s 707	久慈川堤防	センサー老朽化
普及	s 709	大淀川堤防	蓄電池老朽化
SMAC	s 711	高瀬川堤防	電話回線不良
SMAC	s 713	紀ノ川堤防	ch4、ch6センサー不良
SMAC	s 717	雄物川堤防	センサー電圧、電話回線不良
SMAC	s 718	最上川堤防	ch8センサー不良
SMAC	s 719	岩木川堤防	電話回線不良
普及	s 725	筑後川堤防	蓄電池老朽化

観測所名称:大淀川堤防

起動時刻:1998/09/04 08:02:47

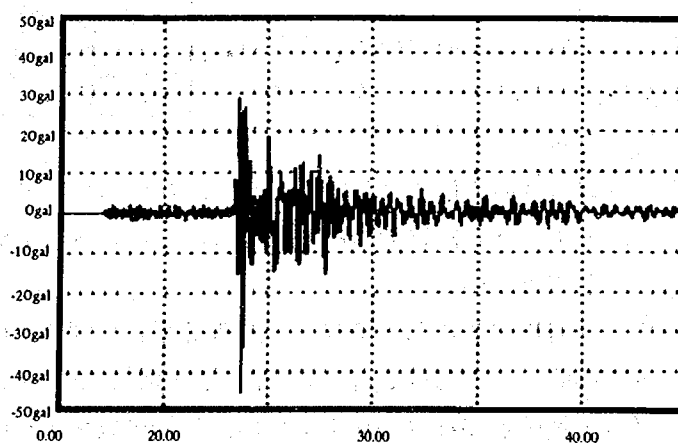


図-2 大淀川堤防 観測記録

10. 震害予測システム構築に関する試験調査

10. 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、主任研究員：金子正洋

【要旨】

関東地方建設局では、平成7年度より管理施設に作用した地震動に関する情報を震後即時に収集する地震計ネットワークを構築している。また、これと平行して、得られた地震動情報を利用して管理者に管理施設の被害状況を即時に予測して与える震害予測システムの開発を行っており、既に道路の液状化と橋梁の被害を予測して与える機能の開発を終えている。これは初動体制の確立の迅速化を図ることを目的としたものである。本課題では、既存のシステムに、河川堤防の被害状況を概略予測する機能を付加する。図-1に全体計画を示す。10年度は、河川堤防の液状化危険度予測システムの開発を行うとともに、河川堤防の沈下量予測手法の検討を行った。

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

堤防沈下の主たる要因となる液状化について、震後即時に被害の概略予測を行う機能の検討を行った。液状化の評価指標としては、液状化に対する抵抗率 F_{li} 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。ここで、液状化危険度の判定は、すでに開発している道路沿いの液状化危険度判定と同様に、 $P_L \leq 5$ でなし、 $5 < P_L \leq 15$ で小、 $15 < P_L$ で中と判定するものとした。

1. 2 河川堤防の沈下量予測手法の開発

土構造物の沈下量の予測手法については、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等の手法があるが²⁾、ここでは、入手できる地盤条件と解析の簡便さを考慮して被害事例に基づく変形予測法及び円弧滑りによる安定計算法を用いることとした。

1. 3 動作環境の改良

システムの動作環境を向上させるために、県庁所在地の表示、表示色の暗色化、直轄管理区間の河川の強調表示、距離スケールの表示の改良を行った。

2. 研究成果

2. 1 河川堤防の液状化危険度予測システムの開発

関東地建が管理している河川堤防のうち耐震点検が実施された区間（堤内地地盤高さが朔望平均満潮位+1.0mよりも低い区間）から、表-1に示す区間(91.3km)を平成10年度の対象区間としている。平成9年度の対象区間(76.1km)と合わせて、耐震点検が実施された区間全体を対象区間とした。表-1に示す区間を、既存の堤防沿いの土質縦断面図及びボーリングデータを参考に、地質構成が同一を見なせる区間に再分割した結果、308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

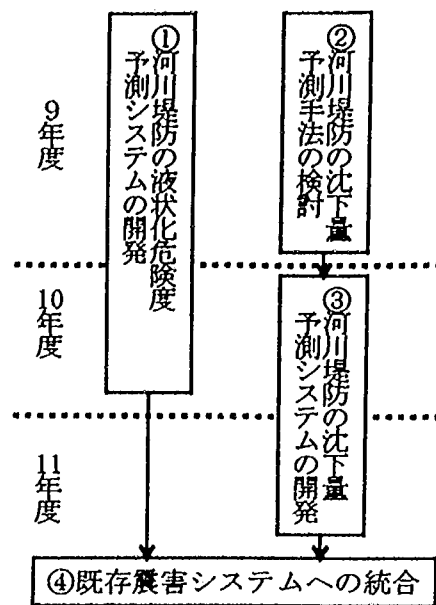


図-1 全体計画

表-1 液状化予測区間

單位: km											
工事事務所名	河川名		自	至	自	至	自	至	自	至	合計
利根川下流工事事務所	利根川	左岸	20.75	44.25	60.25	65.75	—	—	—	—	29.00
		右岸	14.25	35.75	42.75	50.75	—	—	—	—	29.50
利根川上流工事事務所	利根川	左岸	154.00	159.00	—	—	—	—	—	—	5.00
		右岸	154.00	158.00	—	—	—	—	—	—	4.00
下館工事事務所	小貝川	左岸	9.60	12.60	27.00	33.00	—	—	—	—	9.00
		右岸	9.50	12.50	27.00	33.00	—	—	—	—	9.00
京浜工事事務所	多摩川	左岸	0.30	0.50	1.50	2.30	2.90	3.30	3.90	4.10	1.60
		右岸	1.50	2.70	—	—	—	—	—	—	1.20
	鶴見川	左岸	0.60	1.70	2.00	2.50	2.70	3.10	—	—	2.00
		右岸	1.30	1.50	2.20	2.80	3.50	3.70	—	—	1.00
總合計											91.30

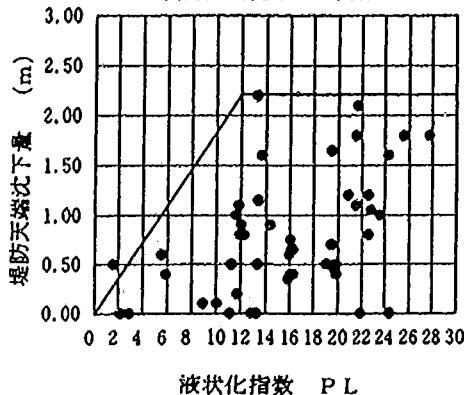
単位：km

リングデータをもとに計算した。

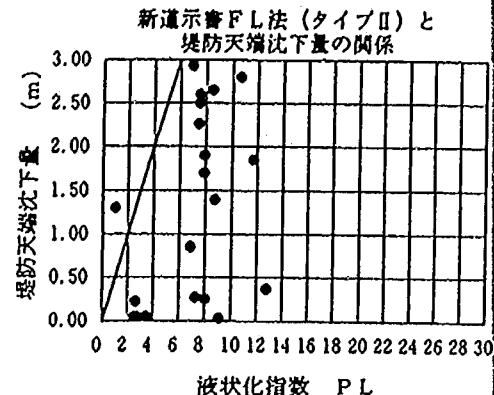
2. 2 河川堤防の沈下量予測手法の開発

被害事例に基づく変形予測法：

過去の河川堤防の地震被害事例から設定したPL値～堤防沈下量の関係を用いて、沈下後の堤防高が「平均朔望満潮位+1m」「平均朔望満潮位+1m」「平均朔望満潮位-1m」となるPL値を算出し、さらに、算出したPL値となる加速度を算出した。本手法の適用区間は、小貝川、江戸川、中川、綾瀬川、荒川、中川の76.1km (256区間)とした。算定に用いたPL値と堤防沈下量の関係を図-2に示す。



(a)タイプⅠ地震動に対するFLを用いる場合



(b)タイプⅡ地震動に対するFLを用いる場合

図-2 算定に用いたPL値と堤防沈下量の関係

円弧すべりによる安定計算法：円弧すべり法を用いて安全率 F_s を算出し、「河川堤防耐震点検マニュアル(案)」をもとに設定した、安全率～沈下量の関係(表-2)から沈下量を算出する。ここでは、堤防条件により堤外と堤内別に円弧を設定し、加速度の値を変えて繰り返し安全率の計算を行い、沈下後の堤防高が「平均朔望満潮位+1m」「平均朔望満潮位」「平均朔望満潮位-1m」となる加速度の値を算定した。本手法の適用区間は、河川堤防の耐震点検において詳細点検が実施された49.5km(98断面)とした。図-3、4に安全率 F_s と入力加速度の関係、沈下後の堤防高と入力加速度の関係の算出例をそれぞれ示す。図-4のプロットは、安全率 $F_s=1.0, 0.8, 0.6$ の値を示している。沈下後の堤防高さが、平均朔望満潮位+1mになる加速度は、堤外で97gal、堤内で154galであり、 $F_s \leq 0.6$ (堤防高の75%沈下)でも、沈下後の堤防高さは平均朔望満潮位以上の高さであることがわかる。

表-2 安全率と沈下量の関係

安全率	沈下量
$1.0 < F_s$	堤防高の0%
$0.8 < F_s \leq 1.0$	堤防高の25%
$0.6 < F_s \leq 0.8$	堤防高の50%
$F_s \leq 0.6$	堤防高の75%

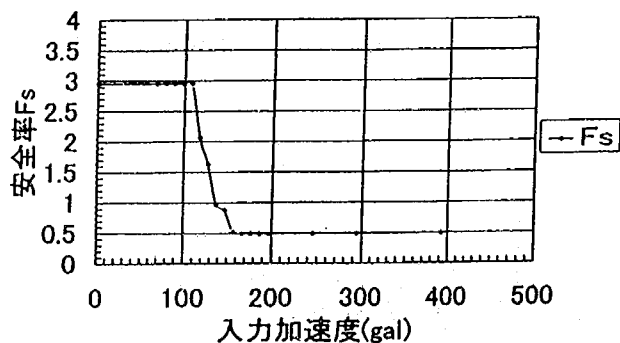


図-3 安全率 F_s と入力加速度の関係
(鶴見川左岸3.0km地点、堤内)

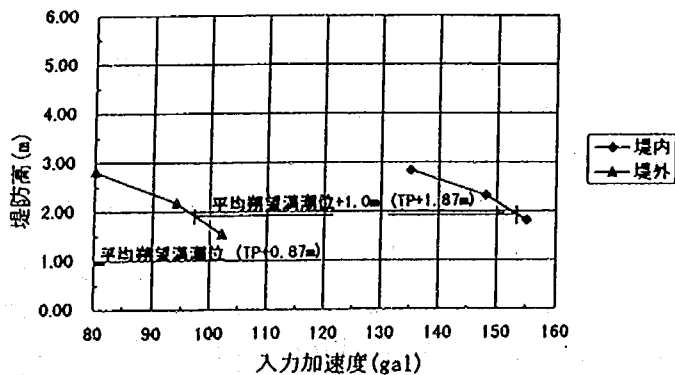


図-4 沈下後の堤防高と入力加速度の関係
(鶴見川左岸3.0km地点)

3. 主な研究成果

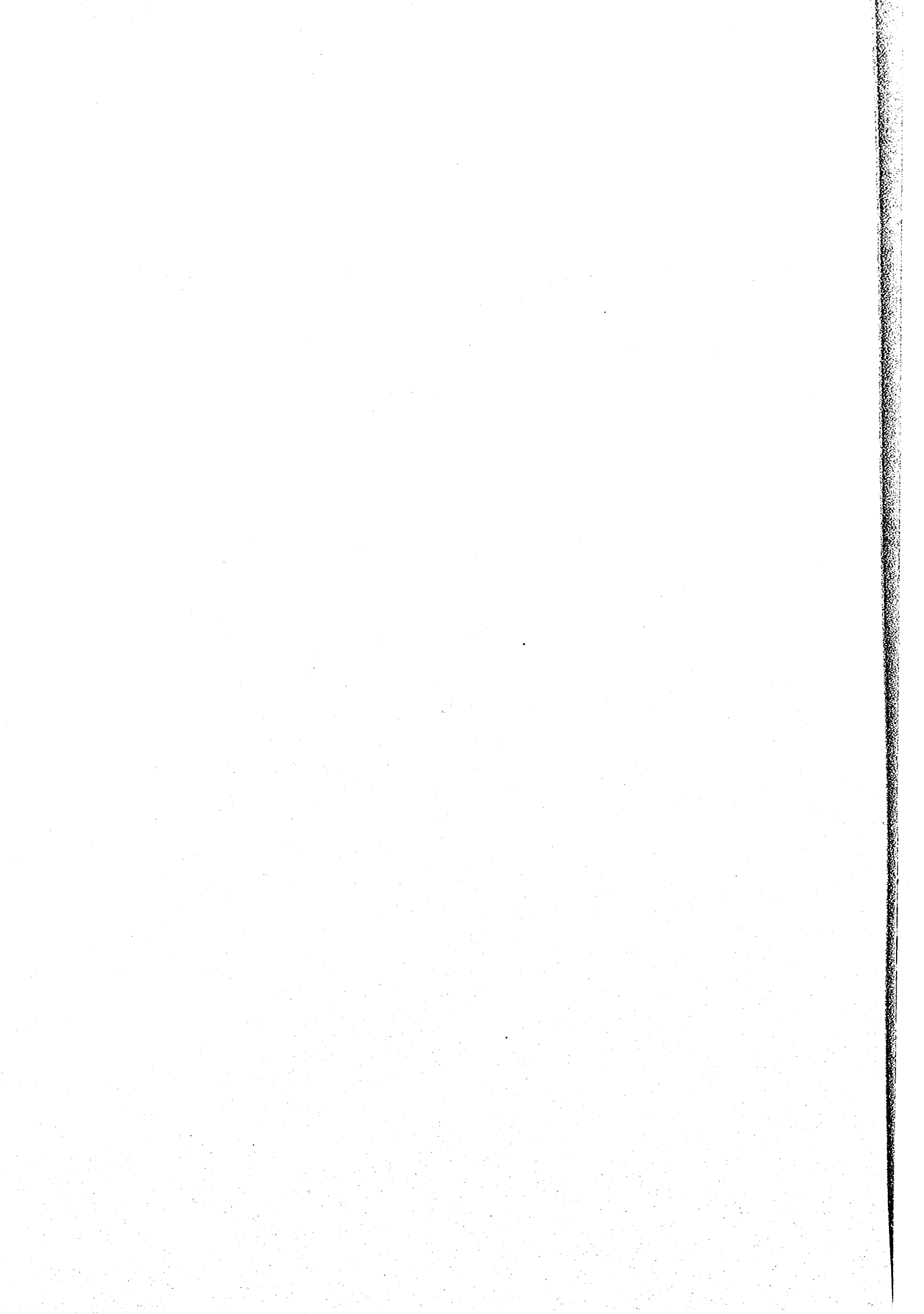
・河川堤防の震害予測システム、関東地方建設局に導入

参考文献：1) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編、(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

付属資料

土木学会第 54 回年次学術講演会（H11 年 9 月 22 日～24 日・広島県東広島市）

社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定法に関する 基礎的研究



社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定法に関する基礎的研究

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

1. はじめに

市場の規制緩和、国際的な市場の開放、コスト縮減などの流れの中で、構造物の耐震設計の性能規定化が進められつつある。1995年、合衆国カリフォルニア構造学会(SEAOC)によって発表された VISION 2000 レポートでは、建築物に作用する複数規模の地震動とそれに対して発現する性能をマトリックスとして表現し、その中に建築物の重要度別に要求する水準を描いたパフォーマンスマトリックスが示されている。本研究は、この考えを拡張し、複数構造物の耐震性水準(あるいはそれを規定する投資コスト)の整合性を保ちながら、国、地域において適切な意思決定を行うための手法について検討を行うものである。

2. パフォーマンスマトリックスの拡張

SEAOCによるパフォーマンスマトリックスは、個々の建築物を設計する際に、あらかじめ重要度が与えられており、そのとき想定される地震動に対して一般的に要求する性能を示したものであるため、実際の設計段階で選択されるレベルには任意性がある。建築物の様に一つの構造物について限られた意志決定者が判断を行うには問題はないが、公共土木施設のように多数の人々が関わり、また施設の社会的影響が大きい場合には、従来のパフォーマンスマトリックスでは十分とは言えない。

そこで筆者らは、与えられた設計条件に対して様々な水準の設計を行い、それに対して地震動が作用した場合に発現する性能をプロットした「等設計線」によってパフォーマンスマトリックスを表示することを考案した(図2)。

3. IOC カーブ

拡張されたパフォーマンスマトリックス中の各等設計線上では設計内容が同一であり、対応する構築コストが計算できる。筆者らは、パフォーマンスマトリックスに当該設計内容による構築コスト(あるいは耐

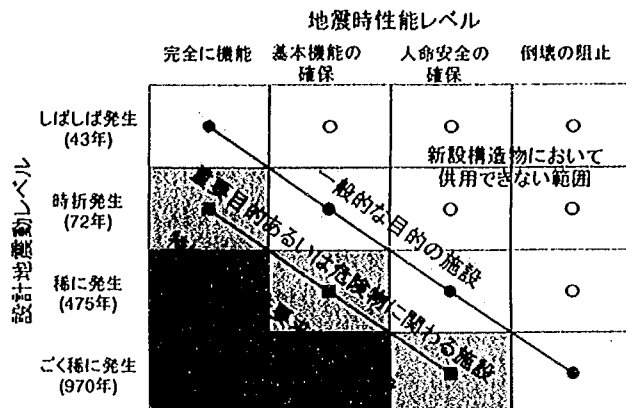


図1 VISION 2000 のパフォーマンスマトリックス

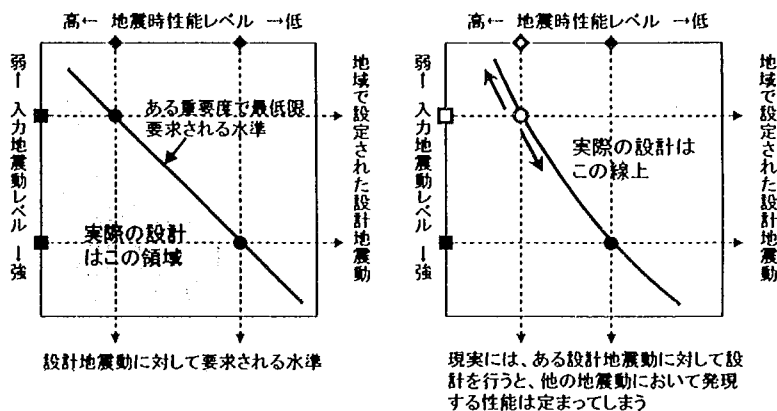


図2 パフォーマンスマトリックスの拡張

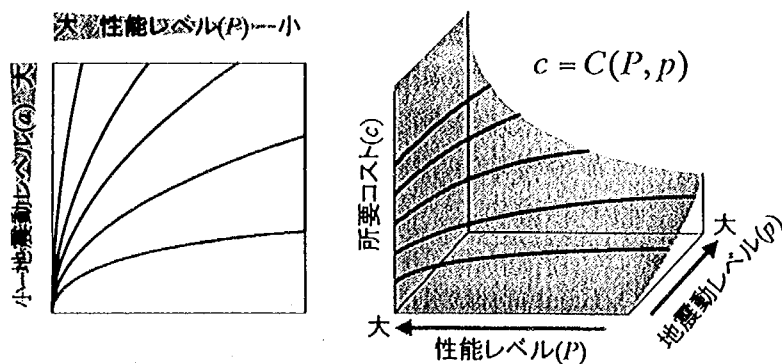


図3 IOC カーブの概念

キーワード：地震、防災、性能、投資配分、耐震性水準

連絡先：〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地 (TEL)0298-64-2211 (FAX)0298-64-0598

震対策コスト)を加え、三次元的に表現したものを「IOCカーブ(Input-output-cost curve)」と定義した(図3)。

$$c = C(P, p) \quad (1)$$

ここで、 c :施設の構築コスト(あるいは耐震対策コスト)、 p :施設に作用する地震動(ここでは発生確率で表示)、 P :施設の性能レベルである。地震動レベルは設計に用いられる地震動の強度あるいはそれに対応する発生確率で表示する。また性能レベル P は独立変数として扱われており、式(1)は「レベル p の地震動に対して性能レベル P が発現するような構造物の構築コストは c 」であることを意味している。このような表現により意思決定者は想定地震動に対して発現する性能と、その水準を実現するためのコストを比較しながら、当該構造物の耐震性水準を選択することが可能となる。

4. 耐震対策投資配分の最適化

通常、地域においては複数の(場合によっては異なる種類の)施設の耐震対策を考慮しなければならない。そこで筆者らは、提案したIOCカーブを用いて複数構造物間の投資配分を最適化する手法について検討した。いま、地域において二つのレベルの地震動 $e = 1, 2$ が想定されており、この地域で二つの施設 $s = 1, 2$ が計画されているとして以下の様に問題を設定する。

$$\begin{aligned} \max_{P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}} \quad & EU - p_0 U(P_{10}, P_{20}) = p_1 U(P_{11}, P_{21}) + p_2 U(P_{12}, P_{22}) \\ \text{s.t.} \quad & C_1(P_{11}, p_1) = C_1(P_{12}, p_2), \quad C_2(P_{21}, p_1) = C_2(P_{22}, p_2), \quad C_1(P_{11}, p_1) + C_2(P_{21}, p_1) = c^* \end{aligned} \quad (2.a, b, c, d)$$

ここで、 $p_0 = 1 - p_1 - p_2$ 、 P_{se} :地震動レベル e に対して発現する施設 s の性能レベル(実数)、 $U(P_{1e}, P_{2e})$:施設1,2の性能レベルに応じた地域の効用関数、 p_e :レベル e の地震動の発生確率、 $C_s(P_{se}, p_e)$:施設 s のIOC関数、 c^* :総耐震対策コストである。式(2.a)は地域の期待効用を最大化するような性能レベル P_{se} を求めることが目標であることを示し、制約条件式(2.b, c)は、性能レベル P_{se} と地震動レベル p_e が等設計線上にあることを保証している。式(2.d)は、施設の耐震コストの費用制約条件である。効用関数、IOC関数の関数形を $U(P_{1e}, P_{2e}) = P_{1e}^{\alpha_1} P_{2e}^{\alpha_2}$ 、 $C_s(P_{se}, p_e) = P_{se}^{\eta_s} p_e^{\xi_s}$ ($s, e = 1, 2$)と特定し、式(2)を解くと、性能レベルの解として次式を得る。

$$P_{se} = \left(\frac{\alpha_s / \eta_s}{\sum_s \alpha_s / \eta_s} p_e^{-\xi_s} c^* \right)^{\frac{1}{\eta_s}} \quad (s, e = 1, 2) \quad (3)$$

この解より、たとえば施設 s の α_s / η_s が大きいほど、すなわち性能レベルに対する効用増加の感度(α_s)が費用増加の感度(η_s)に対して大きいほど、その施設で実現される性能レベルが高くなることなどがわかる。地震動の発生確率と性能レベルから耐震対策コストすなわち耐震性水準が導かれる。

5. おわりに

本研究は、公共構造物の耐震性水準を合理的な手順で設定する方法論を確立することを目的とし、1998年度から開始した研究プロジェクトである。これまでに、構造物の耐震性水準の適切な表示法としてのIOCカーブを提案するとともに、それを用いた投資配分の最適化法を検討した。今後は、様々な施設の性能の表示方法、IOCカーブの導出手順、最適化問題の目的関数に用いる便益や効用関数の計測法を検討してゆく。

参考文献

- 1) Ronald O. Hamburger, "The Development of Performance-based Buildings Structural Design in the United States of America", International Workshop on Harmonization of Performance-based Building Structural Design in Countries Supporting the Pacific Ocean, December 1-4, 1997
- 2) VISION 2000 - Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineers Association of California Vision 2000 Committee, April 1995
- 3) 上田孝行, 「防災投資の便益評価—不確実性と不均衡の概念を念頭に置いて—」, 土木計画学研究・講演集 No.19(2), pp17, 1996年11

土木学会第 54 回年次学術講演会（H11 年 9 月 22 日～24 日・広島県東広島市）

道路ネットワーク耐震性評価手法を用いた道路 ネットワーク耐震化対策に関するケーススタディ

道路ネットワーク耐震化対策に関するケーススタディ

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 矢野 和彦

建設省土木研究所 正会員 野崎 智文

1. はじめに

震災時の道路交通を確保するためには、道路施設の耐震補強や改築等によるリダンダンシー確保等のハード対策と交通規制等のソフト対策が考えられる。このようなハード／ソフト対策あるいはその組み合わせによる施策を検討する場合、定性的な論議のみならず、定量的な評価に基づく必要があるが、そのためには、道路ネットワーク全体としての耐震性や道路区間の補強効果に基づく重要度を定量的に評価することが必要となる。筆者らは、土木研究所が提案した道路ネットワークの耐震性手法¹⁾を用いて、ハード対策とソフト対策によるネットワーク耐震性向上への効果を比較・検討した。

2. 震性評価手法

本研究で用いた手法におけるネットワーク耐震性指標（Seismic Performance : SP ）は、震災時の交通を消火活動や救急活動等の緊急を要する交通（緊急交通）とそれ以外の背景交通（通勤、業務、避難等）に分け、緊急交通が目標時間内に目的地に到着できることによって達成できる活動効果量を算定し（図1）、これを緊急交通の総量で除して無次元化して算定するものである（式(1)）。ケーススタディーでは、緊急交通として負傷者の病院への搬送を想定し、 $t_0=30$ 分、 $t_{max}=90$ 分と設定した。

<ネットワーク耐震性指標 SP の算定式>

$$SP^k = \frac{E_{TOT}^k}{T_{TOT}^k} = \frac{\int_0^\infty E^k(t_r) T^k(t_r) dt_r}{\int_0^\infty T^k(t_r) dt_r} \quad \cdots (1)$$

ここで、 SP^k : 目的 k のネットワーク耐震性指標

(SP^k は0～1の範囲)

E_{TOT}^k : 目的 k の総緊急活動効果量

T_{TOT}^k : 目的 k の総緊急交通量

t_r : 目的 k の緊急交通の旅行時間

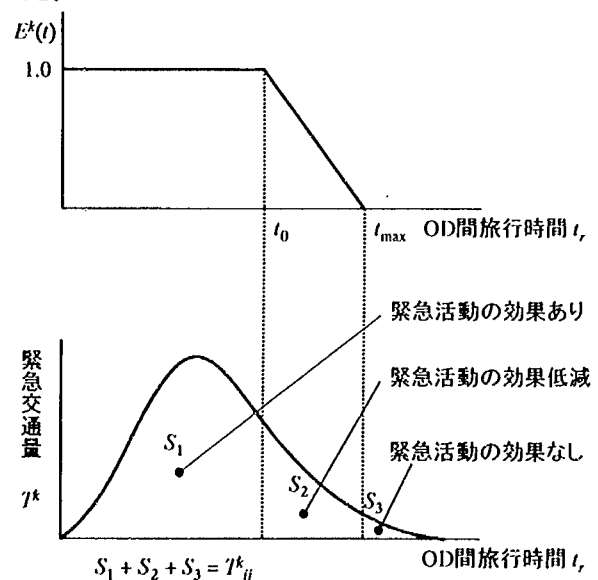


図1 活動効果量関数の例

3. ケーススタディー

ケーススタディーでは、放射環状型、格子型、ラダー型の3つのモデルネットワークを想定し、それぞれに被災パターンを設定して、耐震補強を施した場合と方向規制や防災レーンの設置などの交通規制を実施した場合について SP を算定・比較した。また、各対策が背景交

キーワード：道路ネットワーク、耐震性、交通推計、耐震補強、交通規制、リスク評価

連絡先：〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地 TEL 0298-64-2211 FAX 0298-64-0598

通に与える影響を評価するために、背景交通1台当たりの走行時間（Travel Time Per Vehicle : *TTPV*）も同時に比較した。

なお、緊急交通のODとなる防災拠点は各道路区間の結節点に均等に配置した。また、背景交通のOD交通量については、各結節点に均等に配分された人口に基づくグラビティモデルで設定し、多段階配分を用いてネットワーク上に配分した。

図2に放射環状型ネットワークの試算ケースのうちの一つについて、被災パターンおよびそれに対する補強と交通規制のパターンを示し、図3にその計算結果を示す。ケーススタディーの結果から、地震に強い道路ネットワークづくりに関し、次のような知見を得た。

1) ハード対策としての耐震補強は、確実にSPを向上させるのに対して、ソフト対策としての交通規制は、場合によっては緊急交通の活動や背景交通の状況を悪化させることもある。ただし、規制パターンを適切に選択すれば限られた区間の補強よりも高い効果を示す。

2) したがって、地震に強い道路ネットワークを構築するには、ハード／ソフト対策の特性、利害得失を本手法のような定量的な評価手法に基づいて事前に吟味し、費用対効果を考慮して規制パターンや補強戦略の比較を行う方法を検討する必要がある。

3) 平常時においてすでに混雑が激しい道路ネットワークの場合、少数の区間が被災した場合でもSPは大きく減少する。この場合、交通規制による対策では対象エリア全域での大がかりな規制でなければ大きな効果は見込めず、耐震補強あるいは抜本的な新設・改築が必要となる。

4. おわりに

土木研究所が提案した手法を用いることで地震に強い道路ネットワークづくりのための意思決定支援を図ることができる。特に災害時の交通規制は、耐震補強やリダンダンシー確保などのハード対策の実施優先度を考える上で大きな影響を与えるものであり、欠く事のできない検討事項であることが示された。また、本手法は、平常時の補強／規制計画の策定を支援するものであるが、地震発生後の道路応急復旧の優先度を設定するための手がかりにも応用することができる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究（その1）ネットワーク耐震性指標の提案とその計算方法の開発，土木研究所資料，第3589号，1998
- 2) 建設省土木研究所：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究（その2）地震時の道路交通管理手法に関するケーススタディー，土木研究所資料，第3621号，1999
- 3) 藤原健一郎・朝倉康夫・柏谷増男：道路網の機能的階層性とネットワーク信頼性指標との関連，土木計画学研究・講演集19(2)，1996年11月，pp275，土木学会
- 4) 永松善敬・大塚久哲・松田泰治・富永臣悟：緊急輸送道路網における耐震安全性評価手法の開発，自然災害西部地区部会報・論文集-22号，1998年3月，pp173

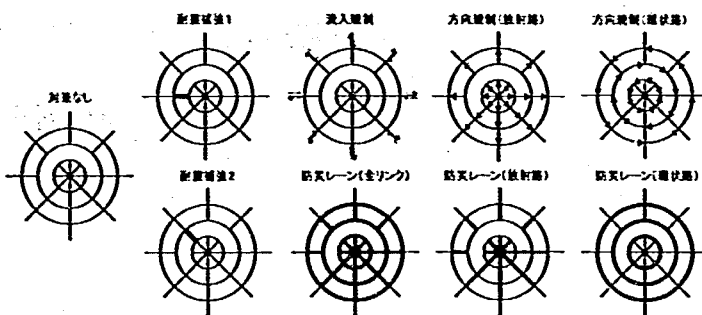


図2 想定したハード／ソフト対策の一例

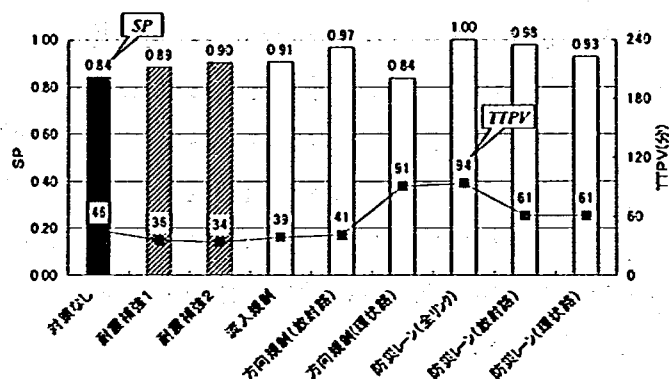


図3 ネットワーク耐震性指標SPの比較の一例

第 25 回地震工学研究発表会(H11 年 7 月 29 日～31 日・東京都)

**社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定方法に
関する基礎的研究**

社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定方法に関する基礎的研究

野崎智文¹・杉田秀樹²

¹正会員 工修 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（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番）

²正会員 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（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番）

道路、河川管理施設等の社会基盤施設の耐震設計にあたっては、地域で想定される地震動に対する地震時性能が国・地域の要求を満たし、リスクが最小化される必要がある。しかしながら、現在のところ各施設の設計には異なる基準が用いられており、またそれらにおいては構造物の重要度等が与件として与えられた上で設定されているため、地域全体として耐震対策投資が最適化されているかどうか不明確である。本研究は、構造物の耐震性水準を合理的に設定するための手法について検討することを目的としているが、本稿では、複数の構造物の耐震対策内容を比較し、選択するための、耐震性水準、性能レベルの表示法を提案するほか、地域における耐震対策効果を最大にする耐震対策内容を設定する計算法を紹介する。

Key Words : Earthquake, Disaster prevention, Risk management, Optimization

1. 序 論

地震災害は、その発生頻度の低さと発生時の被害規模の大きさの点で際立った特徴を有する。このことから、特定の地域において多数の施設の耐震性水準の整合を取りながら妥当な水準を確保するための投資の考え方が重要となる¹⁾²⁾。本研究は、地域に存在する複数の社会基盤施設の耐震性水準を、合理的方法により設定する手法を検討するものであり、その内容は大きく分けて①施設の耐震性水準の表示方法、②複数施設の耐震性に対する地域の満足度を表す目的関数の設定、③目的関数の最大化による耐震性水準の設定手順からなる。

本稿では、特に施設の耐震性水準の表示方法に焦点を当て、第2章においては、現在示されている性能表示の考え方を整理し、これを拡張する。第3章では、拡張した耐震性水準の表示方法を実際の道路橋の計画に適用した試算結果を示す。さらに第4章において、複数施設の耐震性水準の合理的な設定法の手順について例示する。なお、本稿では、以下のように用語を定義する（図1）。

（入力）地震動：施設に作用する地震動で、設計に用いられる最大加速度(peak ground acceleration: PGA)

等の値とその発生確率で表現される。

（地震時）性能：構築された施設に地震動が作用した場合に発現する利用性、安全性、修復性などの状態。

耐震性水準：施設が特定の設計内容で構築された際に持っている耐震性の水準で、入力地震動と地震時性能の対で表現される。

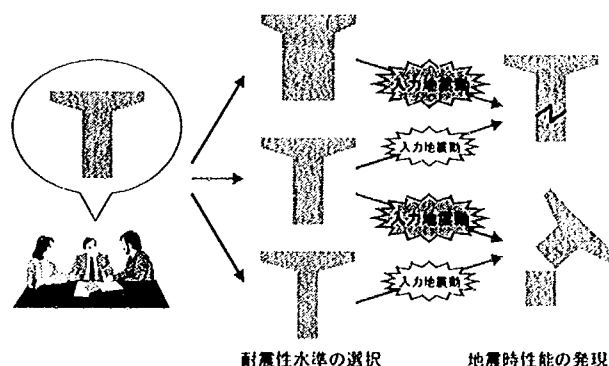


図1 耐震性水準、地震時性能の概念

2. 耐震性水準の表示方法

(1) 既往の耐震性表現法

性能を基盤とした耐震設計の考え方は先進各国で

検討されているが、その概念をわかりやすく表したものに、合衆国カリフォルニア州 SEAOC の VISION 2000 committee によるパフォーマンスマトリックスがある³⁾ (図2)。

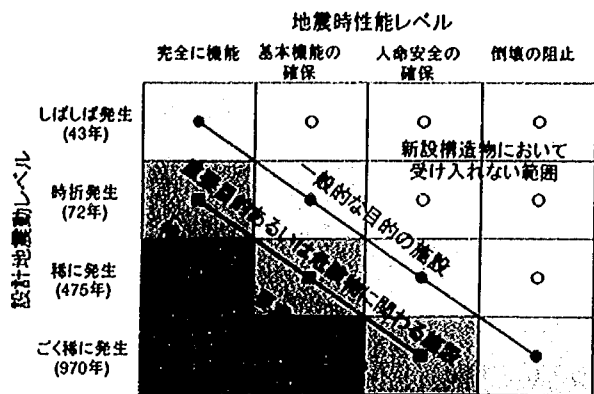


図2 VISION 2000 report のパフォーマンスマトリックス

このパフォーマンスマトリックスは建築物の設計における地震動、地震時の性能を表したもので、行に地震動のレベル、列に建築物の地震時性能を示し、各地震動レベルに対して要求される地震時性能をマトリックス中の線として表している。なお、この線は施設の重要度に応じて複数描かれている。

(2) パフォーマンスマトリックスの拡張

図2に示されるような従来のパフォーマンスマトリックスは、想定される地震動に対して施設が満足すべき性能を示すものであり、要求レベルのパフォーマンスマトリックス(demanded performance matrix: DPM)と呼ぶことができる(図3左)。これに対し、実際の施設を設計する際には、ある地震動レベルに対して所定の性能を満足するように設計すると、他の地震動レベルに対して発現する性能も定まってしまうため、耐震性水準を表す曲線が設計内容ごとに一本ずつ描かれる(図3右)。この曲線は設計内容ごとに一本定まることから、「等設計線」と呼ぶことができる。あるいはある設計内容の耐震性水準を表すことから、「等水準線」とも表現できる。この等水準線で示されたパフォーマンスマトリックスを、実現レベルのパフォーマンスマトリックス(realized performance matrix: RPM)と呼ぶことにする。

DPM は、施設の重要度を与件として、一般的な施設に要求される耐震性水準を示したものであり、要求された水準線と実現される水準線は必ずしも一致しない。これに対して、RPM は個別の施設ごとに一つずつ作成され、その中に水準の異なる複数の設計内容に対する等水準線が描かれる。したがって、地

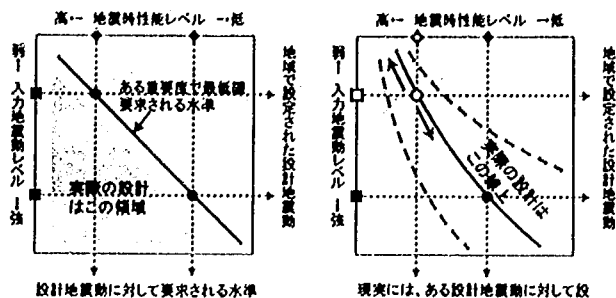


図3 DPM と RPM の比較

域で想定される地震動と RPM に基づいて対象となる施設の地震時性能を吟味しながら、意志決定者が当該施設の耐震性水準すなわち設計内容を選択することができる。

(2) IOC カーブ

意志決定者が施設の耐震性水準をより綿密に検討したり、複数施設の耐震性水準を比較するためには、各水準を確保するために必要なコストを表示する必要がある。そこで、RPM の等水準線を実現するために必要なコストを第3の軸とし、以下のような関数を考える。

$$c = C(P, p) \quad (1)$$

ここで、 P : 実数で表示された施設の性能、 p : 地震動レベルに対応する地震の発生確率、 c : p で表されるレベルの地震動に対して性能が P となるような施設の構築に必要なコスト。

ここで関数 C を、入力としての地震動に対して出力としての性能が発現するようなスループットの関数として、input-output-cost 関数 (IOC 関数) と名づける。その形状は図4のような形状になると考えられ、この曲面を IOC カーブと呼ぶことにする。

RPM に対してさらにコストが追加された IOC 曲面は、意志決定者が施設の耐震性水準を検討するのにより有用な根拠となる。

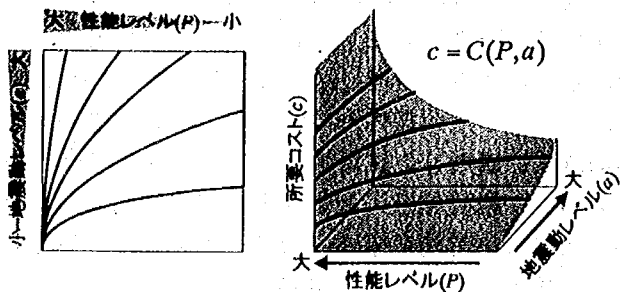


図4 IOC カーブの例

3. 試算例

(1) 試算条件

第2章で示したRPM及びIOCカーブを実際に想定される施設について試作成した。対象としたのは高架の道路橋であり、3径間連続、RC床版鋼桁橋（上下線分離の4車線）などの与件を設定した。対象橋梁の概要を図5に示す。このほかにも、地層構成等の土質条件を設定している。

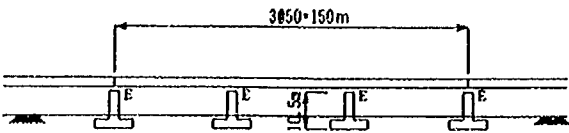


図5 対象橋梁の諸元概要

一方、これらの与件に対して、設計耐震性水準を変化させた11ケースを設定した（表1）。これらは主として橋脚の断面を変化させて設定した。なお、ここでは上部構造及び支承は損傷を受けないものとし、死荷重の反力をすべて下部構造に伝達する。また基礎の水準については、各地震動レベルに対して基礎の損傷程度が橋脚の損傷程度に卓越しないように設計することとした。

(2) 地震動レベル及び地震時性能の表現

表1 耐震性水準ケース設定

設計ケース	橋脚躯体断面 直角方向×橋軸方向 (mm)	躯体主鉄筋	基礎
D1	6700×6700	D32(2段)/D32	ケーソン
D2	4900×4500	D32(2段)/D32	杭(12本)
D3	4500×3500	D32(2段)/D32	杭(8本)
D4	4000×3000	D32(2段)/D32	杭(6本)
D5	3500×2900	D32(2段)/D32	杭(6本)
D6	4300×2800	D29(2段)/D29	杭(8本)
D7	3900×2500	D29(2段)/D29	杭(6本)
D8	3500×2300	D29/D29	杭(6本)
D9	2300×2100	D22/D22	杭(6本)
D10	2100×2100	D22(2段)/D22	杭(4本)
D11	2100×2100	D25/D25	杭(4本)

ケーソン断面は10000×10000
場所打ち杭の杭径は1200(鉄筋はD25)

表2 想定地震動レベル

地震動 レベル	PGA (gal)	再帰年	年超過 確率	50年 超過確率	備考
1	100	10	0.1	99.5%	耐用年限中における発生確率が高い地震。道示の震度法レベル
2	250	100	0.01	39.5%	
3	700	1000	0.001	4.9%	既往最大、道示のタイプIIレベル
4	1100	10000	0.0001	0.5%	既往最大以上の地震

対象橋梁のサイトにおいて、表2のような地震動が想定されているとした。実際にRPMを計算するにあたっては、各施設の計画サイトにおいて確率年と地震動の強さが結び付けられたハザードマップが準備されていることを前提としている。

一方、本試算における橋梁の地震時性能は、式(2)のようなパラメータλによって評価することとした。

$$\lambda = \frac{\delta - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \tag{2}$$

ここで、δ：橋脚天端の応答変位、δ_y：同降伏変位、δ_u：終局変位であり、ここでは仮にλを塑性状態率と呼ぶ。通常用いられる応答塑性率μは、特に橋脚断面が小さいケースにおいてδ_yからδ_uまでの間隔がδ_yの絶対値に近くなった場合に過大な値を示すため、橋梁としての性能を表すのに適切ではないため、ここで上記のパラメータを用いた。λの値と言語表現された地震時性能としては表3のように設定した。

表3 塑性状態率λと性能表現の対応

λ	損傷程度	性能表現
0以下	被災なし(弾性範囲内)	完全に機能
0~0.25	軽微な損傷	使用可能
0.25~0.6	中規模な損傷	補修後に使用可能
0.6~0.9	大規模な損傷	使用不可
0.9~	倒壊の可能性	倒壊の可能性

(3) 試算結果

設定した条件のもとで、各設計ケースに対して複数のレベルの地震動を作用させた場合のλを計算し、RPMとして表現したのが図6である。予想される一般的なRPMの形状と一致していることがわかる。

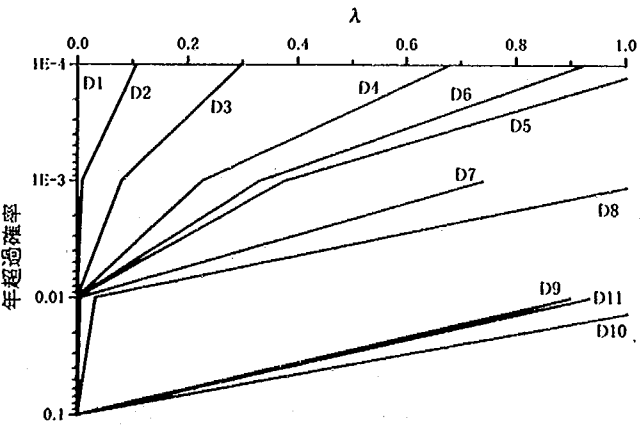


図6 RPMの試算結果

また、これに各設計ケースの初期構築コストを加えて三次元空間内の等設計線としてプロットしたのが図7である。

$$\begin{aligned} & \max_{P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}} p_1 U(P_{11}, P_{21}) + p_2 U(P_{12}, P_{22}) \\ \text{s.t.} \quad & C_1(P_{11}, p_1) = C_1(P_{12}, p_2) \\ & C_2(P_{21}, p_1) = C_2(P_{22}, p_2) \\ & C_1(P_{11}, p_1) + C_2(P_{21}, p_1) = c \end{aligned} \quad (3)$$

制約条件の第1式、2式は性能レベル P_{se} が施設ごとに同一水準線上にあることを保証し、第3式は予算制約を示す。式(3)を解くことにより、施設 s ごとに地震動レベル e に対する性能 P_{se} が求まり、各施設の耐震性水準が決定される。

たとえば効用関数、IOC 関数が次式のように同定されているとする。

$$\begin{aligned} U(P_{1e}, P_{2e}) &= P_{1e}^{\alpha_1} P_{2e}^{\alpha_2}, \\ C_1(P_{1e}, p_e) &= P_{1e}^{\eta_1} p_e^{\xi_1}, \quad C_2(P_{2e}, p_e) = P_{2e}^{\eta_2} p_e^{\xi_2} \end{aligned} \quad (4)$$

このとき、式(3)の解は次式のように得られる。

$$P_{se} = \left(\frac{\alpha_s / \eta_s}{\sum_s \alpha_s / \eta_s} p_e^{-\xi_s} c \right)^{\frac{1}{\eta_s}} \quad (s, e = 1, 2) \quad (5)$$

式(5)において、全体コストが高いほど同じ地震に対する各施設の地震時性能は高くなり、また性能上昇に対するコストの感度(η_s)よりも効用の感度(α_s)が高い施設ほど高い地震時性能が求められるなど、一般的に予想される結果が得られる。

5. 結 論

本研究では、発生頻度が非常に小さく、被害規模が甚大な地震災害について、投資制約を考慮しながら施設の適切な耐震性水準を設定する手順を検討するものである。通常、設計論においては構造物の性能を所与として与え、また計画論においては、各施設の設計論に立ち入らないことが多いが、本研究ではその両者を融合させることを試みている。今後、施設の性能のより適切な表現方法や、地域の満足度を表す効用関数あるいは純便益の同定方法等について検討を進める。

参考文献

- 1) 上田孝行：防災投資の便益評価—不確実性と不均衡の概念を念頭に置いて—, 土木計画学研究・講演集 No.19(2), pp17, 1996年11月
- 2) 水谷守・中村孝明・下野正人・亀村勝美：確率論的アプローチによる地震リスクマネジメント(SRM)手法の提案, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, pp738-739, 1996年9月
- 3) VISION 2000 - Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineers Association of California Vision 2000 Committee, April 1995

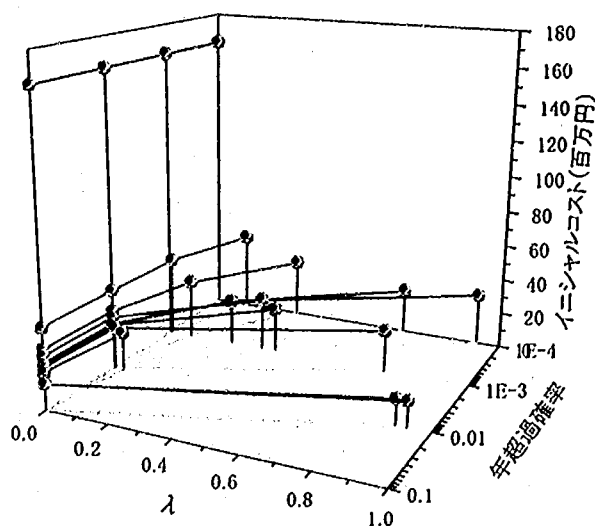


図7 IOCカーブにおける等水準線の試算結果

4. 耐震対策投資の最適化

(1) 問題設定

いま、二つのサイトにおいてそれぞれ構造物が計画されており、その耐震性水準を設定することを考える(表4)。

表4 耐震性水準の問題設定

Eq-level	sites	site-1	site-2
	prob. \ cost	$C_1(P, p)$	$C_2(P, p)$
normal	$p_0 = 1 - p_1 - p_2$	P_{10}	P_{20}
eq-1	p_1	P_{11}	P_{21}
eq-2	p_2	P_{12}	P_{22}

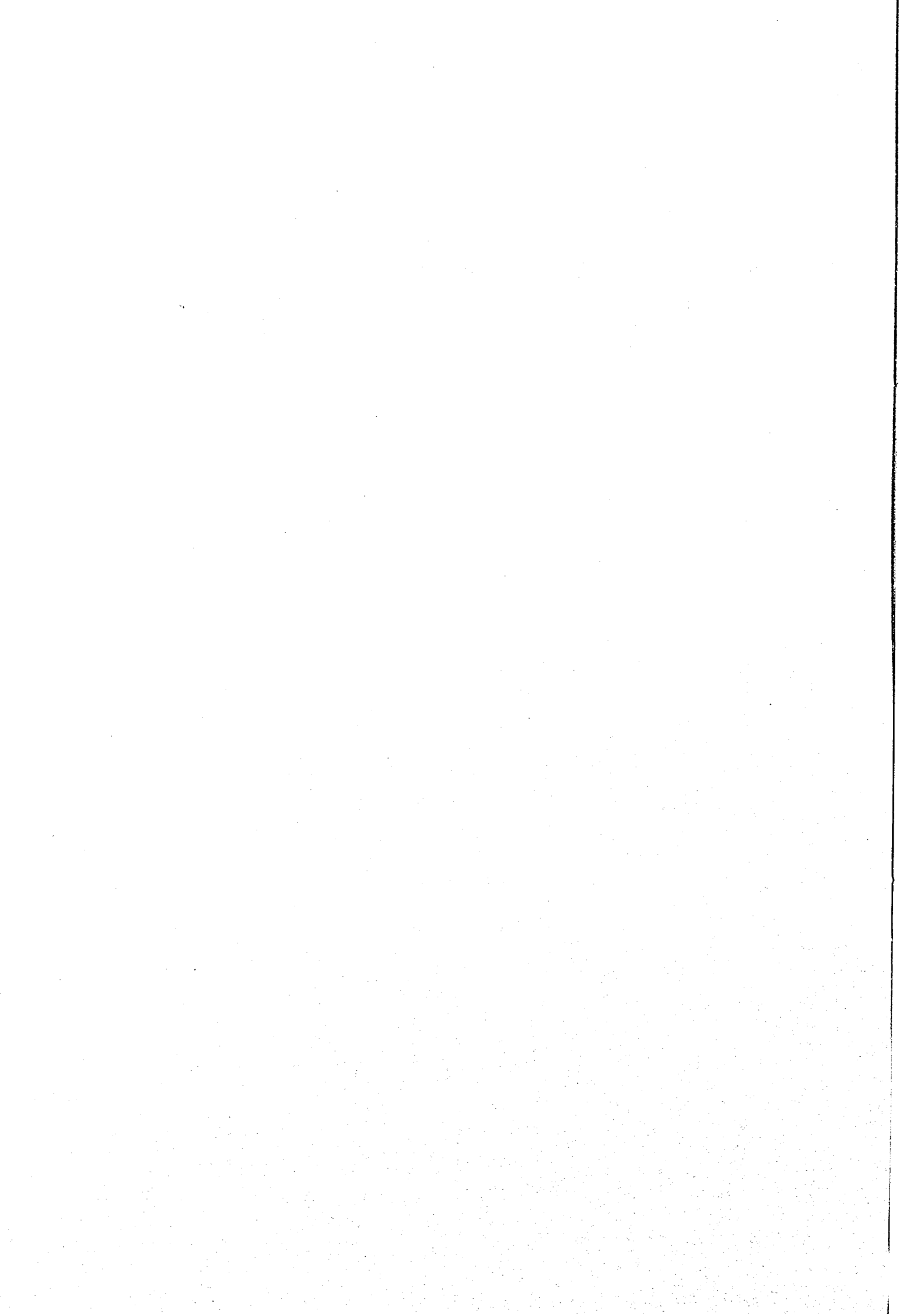
ここで、 s : サイト(すなわち施設)を表すパラメータ、 e : 地震動レベルを表すパラメータ、 p_e : レベル e の地震動が当該地域で発生する確率、 P_{se} : レベル e の地震動に対して発現する施設 s の性能、 C_s : 施設 s の IOC 関数。このような設定の後、与えられた投資制約のもとで地域の満足度を最も高くするような P_{se} ($s, e = 1, 2$) を決定することにより、各施設の耐震対策費用 C_s すなわち耐震性水準を決定することができる。

(2) 定式化と解

たとえば、二つの施設の性能 P_1, P_2 が与えられた場合の地域の満足度が効用 $U(P_1, P_2)$ で測定できるとする。このとき、想定される地震動に対する期待効用を目的関数とし、これを最大化する問題は式(3)のように書くことができる。

第 25 回地震工学研究発表会 (H11 年 7 月 29 日～31 日・東京都)

道路ネットワーク耐震性評価手法の提案



道路ネットワーク耐震性評価手法の提案

杉田秀樹¹・野崎智文²

¹正会員 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（〒305-0820 茨城県つくば市旭1番）

²正会員 工修 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（同上）

大規模地震が発生した直後には、救急・消防・非難等防災目的の様々な交通活動が大量に発生する。この一方で、これら交通活動に必要な道路交通基盤が必ずしも被害のない万全の状態であるとは限らない。このため建設省では、地方公共団体等と協力しながら地域の緊急輸送道路ネットワークを策定し、個々の道路施設のみならず、ネットワークとしての耐震安全性の向上を図ることとしている。

本文は、地震により被災した道路ネットワークの防災活動交通に対する機能提供度合を“ネットワーク耐震性指標”として評価する手法を提案する。本手法を適用することで、地域で想定する被災パターンに応じて、道路ネットワークとしての耐震安全性と道路区間の重要性を定量的に分析できる。

Key Words: Highway Network, Network Analysis, Seismic Safety, Earthquake Disaster

1. はじめに

これまで道路施設の地震対策は、橋梁等道路構造物の適切な設計・施工や沿道・占用施設の管理など、主として“点の視点”に基づいて実施されてきた。しかしながら道路は、交通需要が発生するゾーンから到着するゾーンまでが適切に連結されて始めて機能を発揮したと言えるのであり、道路区間単位での耐震性確保が必ずしも道路ネットワークとしての機能確保の十分条件足り得ない。これは、切迫した状況下で迅速に行われるべき防災活動交通では、特に留意すべき点である。

ネットワーク信頼性解析に関しては、電力・ガス・水道等のライフライン施設を対象として同種の目的で研究が進められているが、交通容量と需要量の関係で処理量に変化する特殊性や、交通需要そのものの予測困難性といった特徴は、ライフラインネットワークに比較して道路ネットワークの耐震性を検討する際の障壁となる。

一方、橋梁・土構造物等道路施設の耐震補強に際して、道路のネットワーク性を考慮することは実務面から指摘されており、米国においては道路施設の震前対策マニュアルに具体的な方法が盛り込まれつつある。本文は、上記の背景を踏まえて、道路ネットワークの耐震性を評価するための実用的な手法を提案するものである。本手法を適用することで、地域で想定する被災パターンに応じて、道路ネットワークとしての耐震性及び被災した道路区間の重要性を定量的に分析できる。

2. 耐震性評価の流れ

ある地域の道路ネットワークにおいて、防災活動交通を確保するために、複数箇所の耐震対策を計画することを想定する。この場合、①地震直後の防災活動交通に対して道路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ネットワーク内の複数箇所における重要度や事業優先順位をどのように考えるか、の2点を明確にする必要がある。本検討では、上記①に対してネットワーク耐震性指標（*Seismic Performance : SP*）を、また、②に対して区間重要性指標（*Link Importance : LI*）を評価する手法を開発した。

本検討で開発した2つの手法を、耐震対策に活用するイメージを示すと図1の通りである。道路ネットワーク全体の耐震性を表現するネットワーク耐震性指標は、様々な補強パターンの効果を比較する場合だけでなく、防災拠点等の適切な施設配置計画を策定する場合にも有用である。また区間重要性指標は、道路区間の被災がネットワーク耐震性指標の低下に与える度合を表現するものであり、耐震補強の優先順位を検討する場合に、防災活動を支援する視点からの参考資料となる。

本手法の流れを示すと図2の通りである。ネットワーク耐震性指標 *SP* は、被災後のネットワーク全体に対して一つ得られる。この指標は、①被害想定に基づく各リンクの被災パターン、②地域防災計画等で設定された防災拠点間の交通需要、③防災拠点と被災地域間の交通需要、に基づいて評価されるが、防災活動交通のために必要な旅行時間の増加によって防災活動の効果（防災活動効果量）が低下するといった概念を導入した。また、

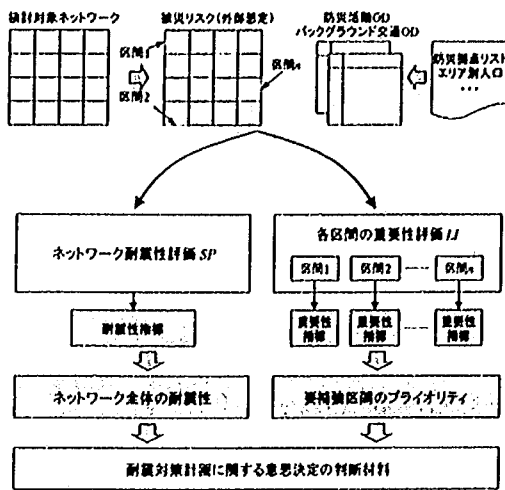


図1 耐震対策への活用イメージ

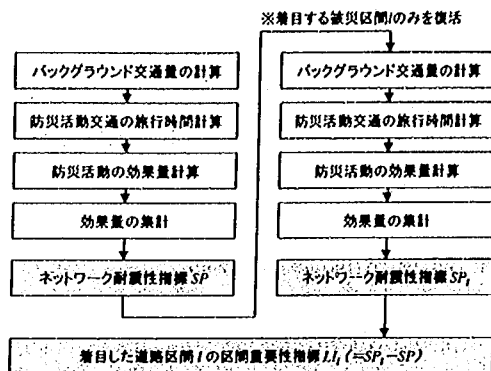


図2 耐震性評価の流れ

旅行時間の評価に際して、防災活動とは直接関係のないバックグラウンド交通量の影響を考慮した。

3. 耐震性評価指標

3.1 ネットワーク耐震性指標 SP

防災活動の考え方を示すと図3の通りである。救急・消防・避難等防災活動の目的を k で表わし、ネットワーク上の発生集中交通を生じるノード(セントロイド) i から j に向かう目的 k の OD 交通分布 T_{ij}^k が与えられているとする。この交通が利用する i から j へのルートは複数存在し得るが、このうち任意の一つを r とし、ルート r 上の交通量を π_{ij}^k 、所要時間を t_r とする。ただしこれらの量は、地震直後に道路ネットワークが被災した状態で把握されているものとする。ここで、目的 k の交通が時間 t_0 以内に到着すれば所要の目的を達成でき、 t_{max} 以上の時間を要した場合には目的を達成できないと考え、単位防災活動効果量 $E^k(t)$ を定義する。この $E^k(t)$ を用いれば、

$$E_{ij}^k = \sum_r E^k(t_r) \pi_{ij}^k \quad \Delta \Delta \Delta \Delta (1)$$

$$SP^k = \frac{\sum_i \sum_j E_{ij}^k}{T} = \frac{\sum_i \sum_j \sum_r E^k(t_r) \pi_{ij}^k}{\sum_i \sum_j \sum_r T_{ij}^k} \quad \Delta \Delta (2)$$

ノード i から j に向かう目的 k の防災活動交通の効果量

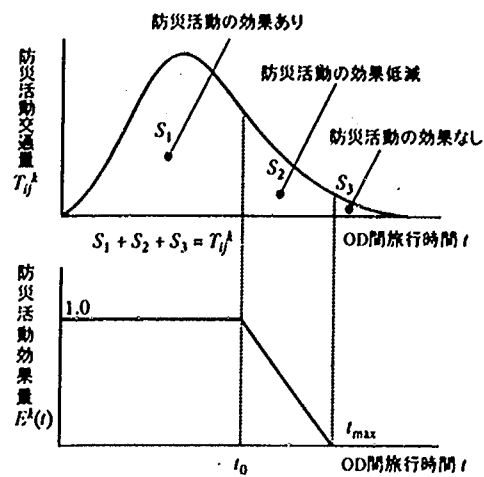


図3 防災活動交通量と防災活動効果量

E_{ij}^k は式(1)により与えられる。

この E_{ij}^k をすべての OD ペアに対して加算し、さらにこれをネットワーク中の総交通量 T を用いて無次元化したものを、活動目的 k に対するネットワーク耐震性指標 SP^k として定義する。

SP^k は 0~1 の値をとり、すべての防災活動交通トリップが目標時間 t_0 以内に完了すれば SP^k は 1 となる。一方、旅行時間が t_0 を超えるトリップが増加するに従って、 SP^k は 1 よりも小さくなる。すなわち、ネットワーク耐震性指標 SP^k は、検討対象エリアにおいて防災活動交通の目的が達成される程度を表現する指標と言える。

3.2 区間重要性指標 LI

防災活動目的 k に対する道路区間 l の重要性 LI_l^k は、被災後のネットワーク耐震性指標 SP^k と、道路区間 l のみを復活させた場合のネットワーク耐震性指標 SP_l^k を比較することにより得られる。

$$LI_l^k = SP_l^k - SP^k \quad \Delta \Delta \Delta \Delta (3)$$

すなわち、区間重要性 LI_l^k は、想定された被災パターンの下で、ネットワーク耐震性に対する道路区間 l の感度を表現する指標であると言える。

4. 防災活動交通の想定

防災活動交通 π_{ij}^k を算定するためには、防災活動の目的に応じた OD マトリクス、及び、ネットワーク上への交通量配分が必要となる。まず、防災活動交通によって連絡が必要な防災拠点を表した防災拠点間連絡マトリクスを表1のように準備する。図中の●印は、連絡が必要な防災拠点ペアを表している。これは、被災地及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合せを選んだものである。

防災拠点間連絡マトリクスと防災拠点間の防災活動交通量は、本来、地震発生後の状況を想定した未知量である。地域特性や地震規模により変化すると考えられる

表1 防災拠点間連絡マトリックスの例

		医療機関				救急・救命			避難地被災地	
		17	18	19	20	21	22	23	30	31
医療機関	17	県立・市立病院	●	●	●		●		●	●
	18	総合病院		●	●		●		●	●
	19	保健所・支庁			●		●		●	●
	20	血液センター							●	●
救急救命	21	警察署								●
	22	消防署								●
	23	自衛隊								●
避難地被災地	30	広域避難地								●
	31	被災地								●

防災活動交通の特性を地震前に想定する手法については、阪神淡路大震災の経験等を踏まえて、別途検討が必要である。本検討においては、便宜上、解析対象エリアを分割した各ゾーンの防災拠点数と平常時ネットワークにおけるゾーン間距離に基づいたグラビティーモデルを利用して、防災活動交通のODマトリックスを作成した。

$$(T_{ij1}^k, T_{ij2}^k) = T_i^k \frac{(T_{ij1}^k, T_{ij2}^k)}{T_{ij1}^k + T_{ij2}^k} \Lambda \Lambda \Lambda \quad (4)$$

$$T_{ij}^k = (N_{ij}^k)^{\beta} (d_{ij})^{\gamma}$$

ここに、 N_{ij}^k はゾーン j における目的 k の防災拠点数、 d_{ij} はゾーン ij 間の抽象距離、 T_i^k はゾーン i から発生する目的 k の交通量、 T_{ij}^k はゾーン i から j の実交通需要、 β 及び γ はパラメータである。式(4)において、ゾーン i から発生する防災活動は、ゾーン i に最も近いふたつのゾーン j_1 及び j_2 を選択するものとし、これらふたつのゾーンへの交通量 ($T_{ij_1}^k, T_{ij_2}^k$) を、各ゾーンの防災拠点数に基づくグラビティーモデルによって配分している。

また防災拠点ゾーンの選択については、①行き先固定型、②行き先変動型の2種類を想定した。行き先固定型では、防災活動交通は平常時のネットワーク上の距離に基づいて到達拠点を選択する。また行き先変動型では、与えられた被災ネットワーク上での旅行時間に基づいて到着拠点の選択を行う。前者の場合、 d_{ij} として平常時のネットワークにおける最短距離形路上の距離を用い、後者の場合は d_{ij} として被災後のネットワークにおける最短距離経路上の旅行時間を用いて計算を行う。

5. 簡単なモデルケースによる試算

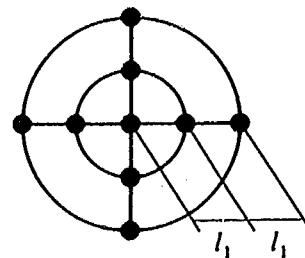
5.1 道路ネットワークと防災活動交通需要

本検討で提案した耐震性評価手法の妥当性を確認するため、図4に示すような簡単な放射環状型の道路ネットワークを設定して試算を行った。モデルネットワークを規定する l_1 は、平均的な地方生活圏の圏域面積、市町村数に基づいた市町村間距離(可住地面積換算)より

6.0km と設定した。また、交通量と速度の関係はすべてのリンクで同一とした。

防災活動交通の目的は救急活動の一種類のみとし、死傷者等の率を用いてゾーンあたり 142 トリップ発生

すると想定した。ここに、図4 モデルネットワーク人口密度は東京都を除く関東全域の平均値、死傷者等の率は阪神淡路大震災による兵庫県内の死者・行方不明者・負傷者の対人口比率を用いた。救急活動に関する単位防災活動効果量の関数形は、 t_0 を 60 分、 t_{max} を 90 分と想定した。また、防災活動交通の配分に用いる防災拠点数については、①拠点が中心部付近に多く存在する拠点集中型、②拠点がネットワーク全体に均等に存在する拠点分散型の2種類を想定した。



5.2 試算ケース

ネットワーク耐震性指標を比較するための試算は、①道路区間の被災パターン(被災区間はいずれも4区間で共通)、②防災活動交通の拠点選択パターン(行き先固定又は行き先変動)、③防災拠点の分布パターン(拠点集中型又は拠点分散型)を変化させて、表2に示す組み合わせについて行った。

また、区間重要性指標を比較するための試算は、モデルネットワーク上で被災区間の部位を内環状部、内放射部、外環状部、外放射部の2種類に変化させて、表3に示す組み合わせについて行った。

5.3 ネットワーク耐震性指標の比較

防災活動交通の所要時間が、道路区間の被災パターンによってどのように変化するかを図5に示す。図5(a)は拠点選択が行き先固定型で拠点分布が集中型の場合、

表2 ネットワーク耐震性指標SPの試算ケース

拠点分布パターン	拠点集中型		拠点分散型		計
拠点選択パターン	行き先固定型	行き先変動型	行き先固定型	行き先変動型	
放射部のみ被災	14	14	14	14	56
環状部のみ被災	14	14	14	14	56
放射部と環状部が被災	41	41	41	41	164

表3 区間重要性指標LIの試算ケース

被災部位の組み合わせ	被災箇所数			
	外放射部	内放射部	外環状部	内環状部
外放射部+内放射部	2	2		
外環状部+内環状部			2	2
外放射部+外環状部	2		2	
内放射部+内環状部		2		2
外放射部+内環状部	2			2
内放射部+外環状部		2	2	

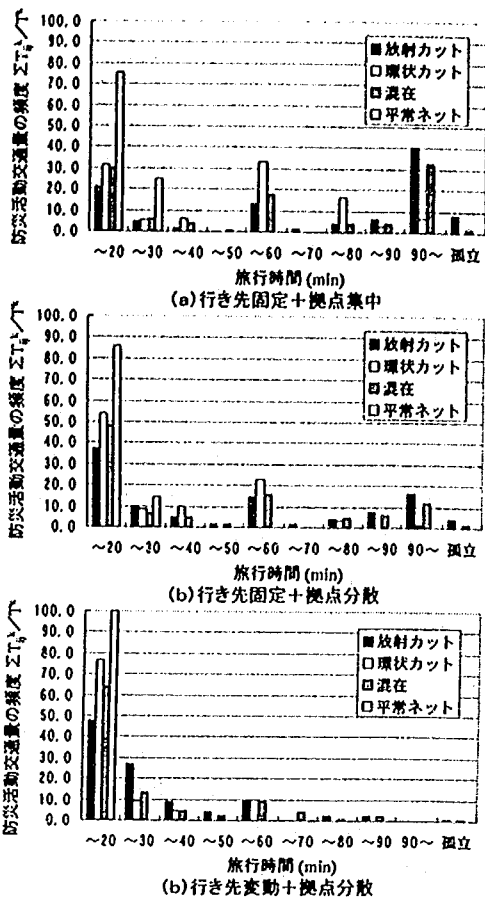


図5 被災パターンによる防災活動交通の所要時間
(b)は拠点選択が行き先固定型で拠点分布が分散型の場合、また、(c)は拠点選択が行き先変動型で拠点分布が分散型の場合に対応している。これらと比較すると、拠点選択パターンは行き先固定型よりも行き先変動型の方が、また、拠点分布パターンは集中型よりも分散型の方が防災活動交通の所要時間が短いことがわかる。

ネットワーク耐震性指標 SP の計算結果を図6に示す。これによれば、拠点分布は集中型よりも分散型の方が、また、拠点選択パターンは固定型よりも集中型の方が SP が大きく、ネットワーク耐震上有利であると判断できる。また、被災パターンによる SP の変化に着目すると、環状部よりも放射部が被災した場合の方が概ね SP が小さく、ネットワーク耐震性に与える影響が大きい。

5. 4 区間重要性指標の比較

区間重要性指標 LI の計算結果を表4に示す。区間重要性指標は、それぞれ被災部位の組み合わせパターンにおいて、4区間の被災区間のうち1区間を復活させた場合のネットワーク耐震性指標 SP の変化を示すものである。これによれば、想定する被災パターンによって、同一部位であっても区間重要性指標は変化する。たとえば、同じ外放射部の道路区間であっても、外環状部が被災している場合には11.54、内環状部が被災している場合には5.15（行き先固定型で拠点集中型の場合）となる。表中には被災部位ごとの区間重要性指標の平均値を併せて示

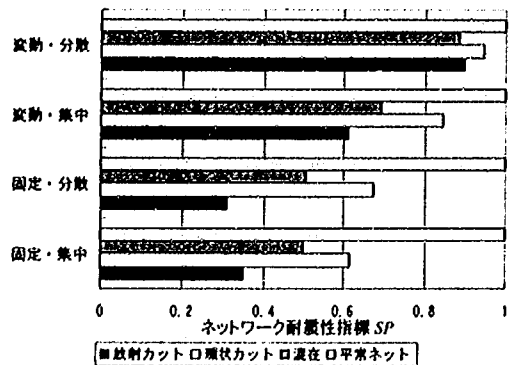


図6 ネットワーク耐震性指標 SP の変化

表4 区間重要性評価指標 LI の変化

		行き先固定型		行き先変動型	
		拠点集中型	拠点分散型	拠点集中型	拠点分散型
外放射部+内放射部	外放射部	9.24	11.27	18.44	4.60
	内放射部	28.50	25.96	3.47	3.90
外環状部+内環状部	外環状部	0.62	0.62	0.47	0.00
	内環状部	0.00	0.00	0.00	0.00
外放射部+外環状部	外放射部	11.54	13.14	11.27	16.61
	外環状部	27.49	31.97	17.50	14.35
内放射部+内環状部	内放射部	12.87	9.90	20.08	4.68
	内環状部	19.81	17.00	19.26	4.68
外放射部+内環状部	外放射部	5.15	11.23	18.01	2.07
	内環状部	7.10	4.99	2.88	1.09
内放射部+外環状部	内放射部	0.31	0.31	0.55	1.05
	外環状部	14.70	8.11	3.86	1.05
被災部位別平均	放射部平均	11.27	11.97	11.97	5.48
	環状部平均	11.62	10.45	7.33	3.53
	外側部平均	11.46	12.72	11.59	6.45
	内側部平均	11.43	9.69	7.71	2.57

しているが、これによれば定性的な傾向として、放射部は環状部に比較して重要性が高いこと、また、外側部は内側部に比較して重要性が高いことがわかる。

6. まとめ

本文では、防災活動交通に対する道路ネットワークのサービス程度を表現するネットワーク耐震性指標 SP と、道路ネットワーク上の道路区間の重要性を表現する区間重要性指標 LI を提案した。本手法は、道路施設等の補強優先度の設定など道路管理者の地震防災対策に際して、ひとつの客観的な判断材料を与えるものである。

今後、防災活動交通量、防災活動効果量関数、バックグラウンド交通特性等の想定手法を検討して本手法の高度化を図る。また本手法を応用して、震前対策としての耐震補強と震後対策としての交通規制を適切に組合せた合理的な道路ネットワーク管理手法についても検討を進める。

7. 参考文献

建設省土木研究所：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究(No.1)(No.2)、土木研究所資料第3589号、第3621号、1998.9、1999.1

第 25 回地震工学研究発表会 (H11 年 7 月 29 日～31 日・東京都)

道路ネットワーク耐震性指標を用いた

道路耐震化計画のあり方

道路ネットワーク耐震性指標を用いた 道路耐震化計画のあり方

矢野 和彦¹，杉田 秀樹²，野崎 智文³

¹正会員 工学 アジア航測（株）防災部都市防災課（〒243-0014 神奈川県厚木市旭町 5-42-32）
（元建設省土木研究所交流研究員）

²正会員 工学 建設省土木研究所耐震技術研究センター 防災技術課長（〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番）

³正会員 工学 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（〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番）

要 約

震災時の道路交通を確保するためには、道路施設の耐震補強等のハード対策と交通規制等のソフト対策が考えられる。したがって、地震に強い道路ネットワークを構築するためには、道路ネットワーク全体としての耐震性や道路区間の補強効果に基づく重要度を定量的に評価することが必要となる。筆者らは、土木研究所が提案する道路ネットワークの耐震性を緊急交通に対するサービス性能に着目した評価手法を用いて、簡単なモデルネットワークにおけるハード／ソフト対策によるネットワーク耐震性向上への効果を比較・検討した。

Key Words : Earthquake, Highway network, Seismic performance, Emergency transportation, Transportation analysis, Traffic control

1. はじめに

震災時の道路交通を確保するためには、道路施設の耐震補強や改築等によるリダンダンシー確保等のハード対策と交通規制等のソフト対策が考えられる。このようなハード／ソフト対策あるいはその組み合わせによる施策の効果を比較する場合、定性的な議論のみならず、道路ネットワーク全体としての耐震性や道路区間の補強効果に基づく重要度を定量的に評価することが必要となる。筆者らは、道路ネットワークの耐震性を土木研究所の提案する道路ネットワーク耐震性評価手法、すなわち救急、消火などの緊急活動に対して道路ネットワークが提供する機能に着目した評価手法を用いて、平常時における耐震補強等のハード対策と地震発生後の交通規制等のソフト対策によるネットワーク耐震性向上への効果を比較・検討する方法を提案した。またモデルネットワークにおける試算に基づき、これらハード／ソフト対策の特徴や道路耐震化計画に応用する際の留意点をとりまとめた。

2. 道路ネットワーク耐震性手法と 道路耐震化計画への応用

(1) ネットワーク耐震性指標の定義

a) ネットワーク耐震性指標 SP の算定式

本研究で用いる道路ネットワーク耐震性指標（Seismic Performance : SP）は、震災時の交通を消火活動や救急活動等の緊急を要する交通（緊急交通）とそれ以外の背景交通（通勤、業務、避難等）に分け、緊急交通が目標時間内に目的地に到着できることによって達成できる活動効果量を算定し、これを緊急交通の総量で除して無次元化して算定する（式(1)）。緊急交通の到達目標時間には t_0

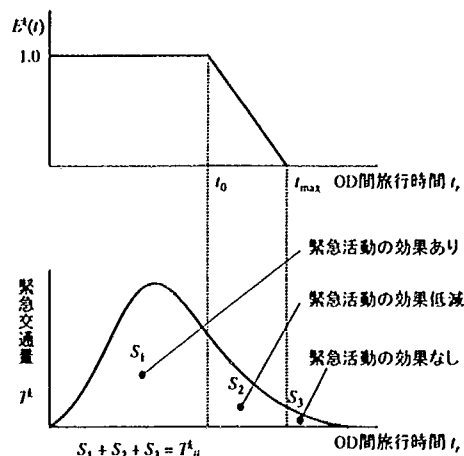


図-1 活動効果量関数の例

と t_{max} を設定する (図-1)。

t_0 は緊急交通の目的を完全に満足させることができる閾値となる時間であり、到達時間が t_0 より早ければ緊急交通の目的は 100% 達成できる。 t_{max} は緊急交通の効果が多少なりとも発揮できる限界時間である。 t_0 を越えて t_{max} までの間では緊急交通の目的達成率が徐々に低下し、 t_{max} を越えると交通の目的が全く達成されない。

$$SP^k = \frac{E_{TOR}^k}{T_{TOR}^k} = \frac{\int_0^\infty E^k(t_r) T^k(t_r) dt_r}{\int_0^\infty T^k(t_r) dt_r} \quad (1)$$

ここで、 SP^k : 目的 k のネットワーク耐震性指標 (SP^k は 0~1 の範囲)

E_{TOR}^k : 目的 k の総緊急活動効果量

T_{TOR}^k : 目的 k の総緊急交通量

t_r : 目的 k の緊急交通の旅行時間

b) 背景交通 1 台当たりの旅行時間

また、各対策が背景交通に与える影響は、背景交通 1 台当たりの走行時間 (Travel Time Per Vehicle : $TTPV$) の変化となって表される。 $TTPV$ は、ネットワーク全体での背景交通の総走行時間をネットワーク上に配分された総交通量 (孤立 OD を除く) で除することで算定される (式(2))。

$$TTPV = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij} T_{ij}}{\sum_i \sum_j T_{ij}} \quad (2)$$

ここで、 t_{ij} : 背景交通の ij 間旅行時間

T_{ij} : ij 間の背景交通量 (孤立交通を除く)

(2) 補強対策/交通規制の表現方法と評価方法

災害時の道路交通確保対策には、ハード対策とソフト対策が考えられるが、ここで着目する道路ネットワークに対する SP ならびに $TTPV$ の変化量を求めることで、ハード対策とソフト対策の比較優劣を検討し、道路耐震化計画に役立てることができると考えた (図-2)。

a) 耐震補強によるネットワーク耐震性の向上

耐震補強効果は、着目する道路区間を復活させた場合と復活させない場合について交通推計を行い、 SP や $TTPV$ の値を比較する。 SP の向上は緊急交通に対するネットワークの耐震性の向上を示し、 $TTPV$ の減少は背景交通に対する耐震性の向上を示している。

b) 交通規制によるネットワーク耐震性の向上

交通規制によるネットワーク耐震性の向上は、ネットワーク・トポロジーを変えることなく、交通の流れを変化させて道路交通の円滑化を図るものである。同様の手

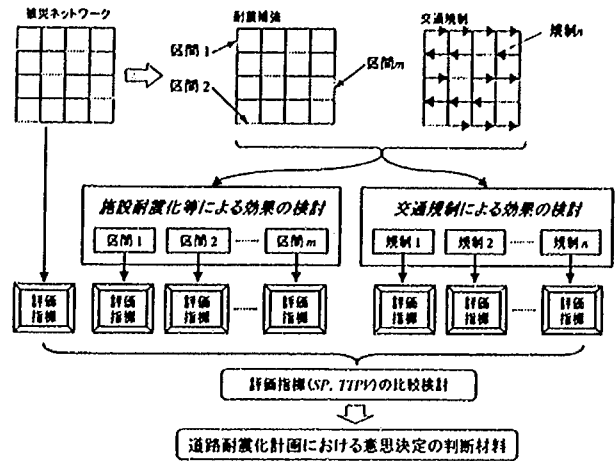


図-2 道路耐震化計画への応用イメージ

法として交通需要制御等があるが、本研究では対象外としている。交通規制の効果は、耐震補強の効果と同様、 SP の向上と $TTPV$ の減少によって表される。

3. ケーススタディー

(1) モデルの設定と諸条件

本研究では、提案した道路ネットワーク耐震性の評価手法を用いて、簡単なモデルネットワークによるケーススタディーを行った。想定する緊急交通は、負傷者等の搬送、すなわち救急活動である。検討するモデルネットワークは、放射環状型、格子型、ラダー型 (はしご型) の 3 つとした (図-3)。

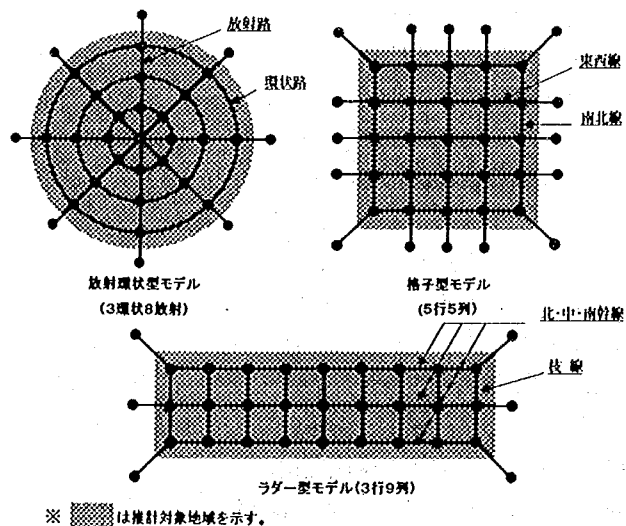


図-3 検討に用いたモデルネットワーク

3つのモデルネットワークの圏域面積、道路密度は全国の平均的な地方生活圏を想定して設定する。また、人口、病院は各ノードに均等に配分した。すなわち、全てのノードが緊急/背景交通のセントロイドとなる。

ケーススタディーでは、3つのモデルについてそれぞれ

れに被災パターンを想定し、耐震補強を施した場合と方向規制や防災レーンの設置などの交通規制を実施した場合についてSPおよびTTPVを算定・比較した。

緊急交通のネットワークへの配分は、背景交通の配分結果から得られる各リンクの区間速度に基づく一括配分とした。これは、緊急交通が背景交通に比べて交通量が少なく、震後の区間速度に大きな影響を及ぼさないと考えたことによる。一方、背景交通は多段階配分手法により配分した。また、ODマトリックスの生成については、緊急交通では被災時の道路ネットワークを用い、背景交通では無被災時の道路ネットワークを用いた。これにより、緊急交通には被災区間が知らされているが交通の混雑状況は知らされていない状態、背景交通には被災区間自体が知らされていない状態を表現する。

(2) 耐震補強と交通規制の効果比較

耐震補強と交通規制の効果比較を行ったひとつの事例として、放射環状型モデルにおいて放射路の一部が被災したケースの検討結果を示す。図4はそのケースにおける耐震補強と交通規制のパターンの一例であり、図5はこのときのSPとTTPVを示したものである。耐震補強と交通規制の効果量は、対策実施前後のSPの差 ΔSP で表わされる。

放射環状型モデルでは、ネットワークに被災区間が生じない場合、緊急交通はほぼ100%満足される($SP=1.0$)が、図4に示す被災パターンでは84%の目的達成率とな

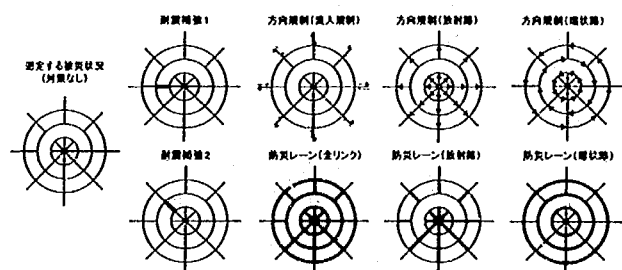


図4 想定したハード/ソフト対策の一例

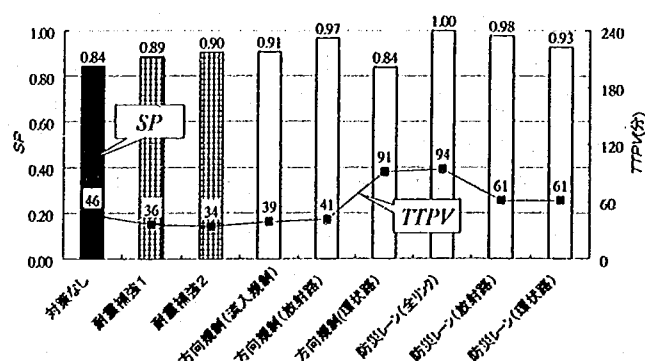


図5 道路耐震化対策の効果比較の一例
(放射環状型モデル)

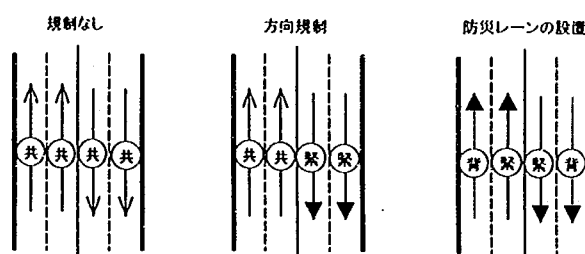
る。

a) 耐震補強の効果

耐震補強は図4に示すように被災リンクのうち1本をつなげることで表現する。耐震補強を行った場合、SPはわずかに向上し、TTPVが減少する(図5)。このように耐震補強では、緊急交通/背景交通ともに交通サービスが向上しており、補強区間を増やせばそれだけ大きな効果も期待できる。

b) 交通規制の効果

想定した交通規制は2つに大別される(図6)。ひとつは背景交通に対する進行方向規制であり、本稿ではこれを方向規制と呼ぶこととする。ケーススタディーでは、片側2車線道路を想定し、交通規制を実施しない場合、緊急交通と背景交通が車線を共有している状況を想定しているが、方向規制では、背景交通の規制方向(進行可能な方向=図4の矢印方向)では緊急交通/背景交通は車線を共有し、反対方向を緊急交通専用とするものと設定する。もうひとつの交通規制は、緊急交通専用車線(防災レーン)の設定である。防災レーンを設定する場合、片側2車線のうち1車線を緊急交通専用とし、緊急交通の優先的な通行を想定する。したがって、背景交通については車線数が減少し、旅行速度の低下が予想される。



- (共) 背景交通と緊急交通
- (緊) 緊急交通のみ通行可
- (背) 背景交通のみ通行可

図6 想定した交通規制

以上の条件下で交通規制による効果を検討した結果、次のような特徴がみられた。

- ア) 方向規制では、想定する被災パターンと規制方法の組み合わせによってその効果が異なる場合があり、必ずしもSPが向上するとは限らない(図5中、放射路の方向規制→ $SP=0.97$ 、環状路の方向規制→ 0.84)。また、TTPVの増加や、孤立交通の発生など、背景交通に与える影響は大きい。
- イ) 防災レーンの設置では、背景交通と緊急交通を切り離すことでSPを規制前よりも確実に高くすることができる。特にネットワークの全区間に防災レーンを設置した場合には、緊急活動は完全に満たされる

($SP=1.0$)。一方、背景交通への影響は大きく、交通サービス供給量が半減することにより $TTPV$ は大きく増加する (対策なし $\rightarrow TTPV=46$ 、全リンク防災レーン $\rightarrow TTPV=94$)。

格子型/ラダー型モデルについても、上記と同様の特徴があることが分かった。すなわち、方向規制においては、規制の区間や方向を適切に設定しなければ緊急交通の効率化は図れず、また、防災レーンの設置では、必要最小限の規制にとどめる努力が必要であるといえる。さらにここでは示していないが、ラダー型モデルにおいて一部の道路区間に防災レーンを設定した場合、緊急活動をほぼ満足し、かつ $TTPV$ も低下することが確認された。このことは、背景交通への影響を抑えながら緊急交通の効果を満足する防災レーンの設置に関する可能性を示している。なお全体として、格子型/ラダー型モデルでは放射環状型モデルに比べて SP が低く、道路ネットワークのトポロジーによってリダンダンシーの傾向に違いが出ることを確認された。

4. 考 察

ケーススタディーの結果から、震災時の道路交通管理に関し、次のような知見を得た。

- ア) ハード対策としての耐震補強は、確実に SP を向上させるのに対して、ソフト対策としての交通規制は、場合によっては緊急交通の活動や背景交通の状況を悪化させることもある。ただし、規制パターンを適切に選択すれば限られた区間を補強するよりも高い効果を示す。
- イ) ネットワークモデルによっては、被災区間を設定した場合にネットワーク全体の区間速度が大きく低下する場合が多くみられた。これは、平常時の時点で交通容量の限度に近い交通状況であり、設定した単位効果量関数の閾値に近い値のため、わずかな道路区間の被災によってたちまち緊急交通の円滑な処理が困難になってしまう状況に対応する。このような道路ネットワークは、背景交通の交通状況も含めて考えたときに、ネットワーク全体としての耐震性が低い。すなわち、対象とする道路ネットワークが十分な耐震性を確保できているかどうかについて、本手法を用いることで把握することが可能であり、震災前における道路ネットワークを整備する上で有効である。
- ウ) 交通規制は、緊急交通に有利に働く反面、多くの場合、背景交通を阻害する。したがって、費用対効果を十分考慮し、規制パターンや補強戦略との比較を行う方法を検討する必要がある。

なお、今回のケーススタディーにおいて、補強対策と

交通規制の併用による効果の検討は行わなかったが、実地域における応用を考える場合、考えられる広域的な交通規制と耐震補強の最適な組み合わせを事前に検討しておくことが、定められた予算規模の中で効率的に道路ネットワークの耐震性を高めていくひとつの方法であると考えられる。

5. おわりに

本稿において提案した手法を用いることで、地震に強い道路ネットワークづくりのための意思決定支援を図ることができると考えられる。特に災害時の交通規制は、耐震補強やリダンダンシー確保などのハード対策の実施優先度 (プライオリティー) を考える上で大きな影響を与えるものであり、欠く事のできない検討事項である。また、本手法は、平常時の補強/規制計画を支援するものであるが、地震発生後の道路応急復旧の優先度を設定するための手がかりにも応用することができる。

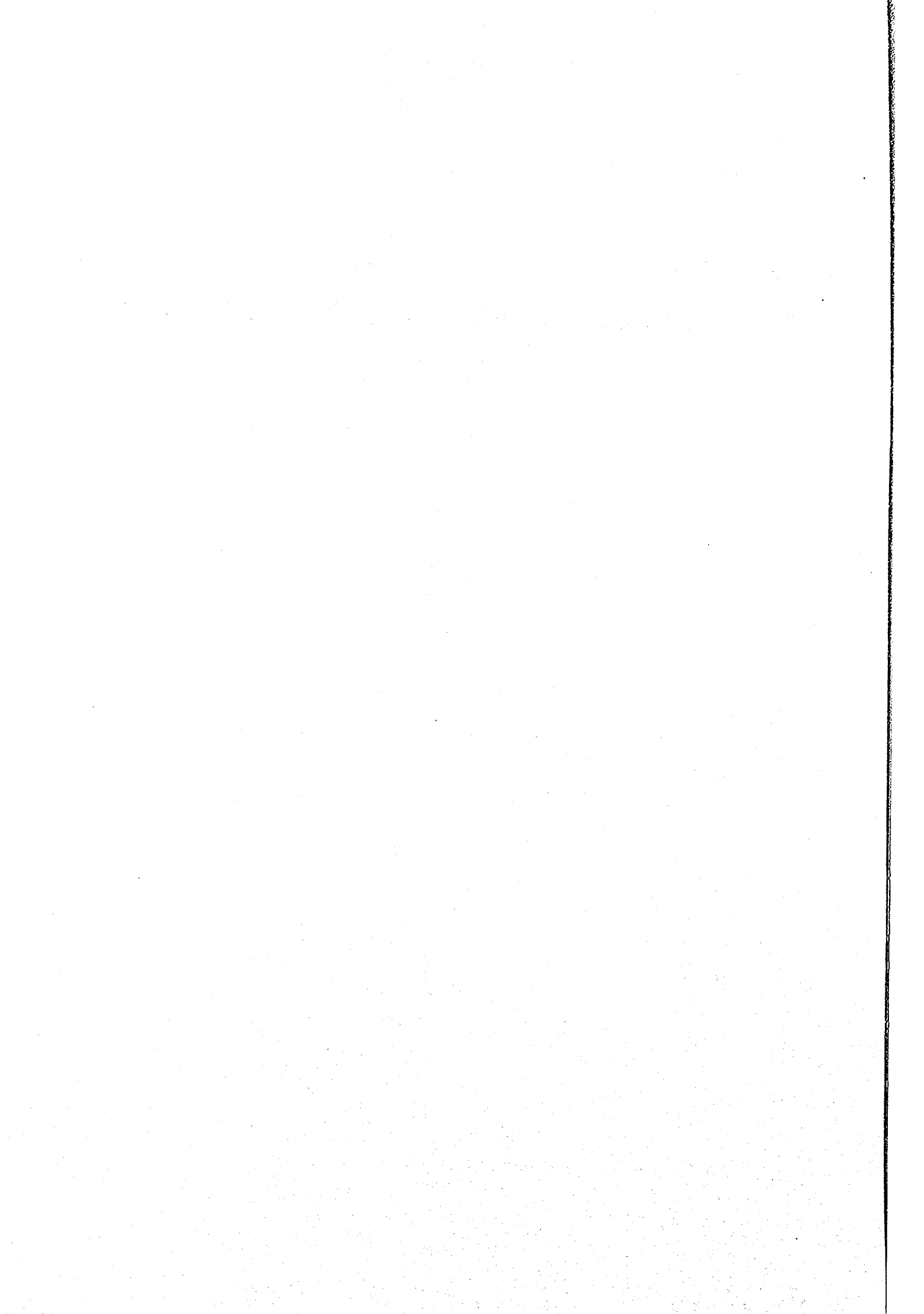
なお、本研究のケーススタディーで得られた結果は、設定した条件下におけるものであり、普遍的なものではない。具体的には、対象とする地域の道路ネットワーク形状、道路の属性、効果量関数の設定等に加え、防災拠点施設の配置や人口分布等に左右される交通特性により、求められる指標は変化する。ただし、緊急交通と背景交通それぞれに対するネットワークの耐震性を、 SP や $TTPV$ を用いて定量的に評価することが可能であることは確認できた。今後、実地域におけるケーススタディー等により、さらに問題点を洗い出すことで実用化に向けて前進できると考える。

参考文献

- 1) 藤原健一郎・朝倉康夫・柏谷増男：道路網の機能的階層性とネットワーク信頼性指標との関連，土木計画学研究・講演集 19(2)，1996 年 11 月，pp275，土木学会
- 2) 永松善敬・大塚久哲・松田泰治・富永臣悟：緊急輸送道路網における耐震安全性評価手法の開発，自然災害西部地区部会報・論文集-22 号，1998 年 3 月，pp173
- 3) 建設省土木研究所：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究 (その 1) ネットワーク耐震性指標の提案とその計算方法の開発，土木研究所資料，第 3589 号，1998
- 4) 建設省土木研究所：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究 (その 2) 地震時の道路交通管理手法に関するケーススタディー，土木研究所資料，第 3621 号，1999

第 22 回土木計画学研究発表会 (H11 年 10 月 30 日～11 月 1 日・熊本県熊本市)

社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定方法に関する 基礎的研究



社会基盤施設の耐震性水準の合理的な設定方法に関する基礎的研究

Research on Method to Rationally Determine Seismic Potential of Civil Infrastructures

野崎智文**・杉田秀樹***

By NOZAKI Tomofumi**, SUGITA Hideki***

1. 序 論

地震災害は、その発生頻度の低さと発生時の被害規模の大きさの点で際立った特徴を有する。そのような地震災害に対して、地域に存在する多種多様な社会基盤施設の耐震性を確保しなければならないが、その際には、各施設の耐震性の整合を取りながら妥当な水準を確保するための投資の考え方が重要となる¹⁾。本研究は、地域に存在する複数の社会基盤施設の耐震性水準を合理的な方法により設定する手法を検討するものであり、その内容は大きく分けて①施設の耐震性水準の表示方法、②複数施設の耐震性に対する地域の満足度を表す目的関数の設定、③目的関数の最大化による耐震性水準の設定手順からなる。

本稿では、特に施設の耐震性水準の表示方法に焦点を当て、現在示されている性能表示の考え方を整理し、拡張するとともに、それを用いた複数施設の耐震性水準の合理的な設定法の手順について例示する。なお、本稿では、以下のように用語を定義する(図1)。

(入力)地震動：施設に作用する地震動で、設計に用いられる最大加速度(peak ground acceleration: PGA)等の値とその発生確率で表現される。

(地震時)性能：構築された施設に地震動が作用した場合に発現する利用性、安全性、修復性などの状態。

耐震性水準：施設が特定の設計内容で構築された際に持っている耐震性の水準で、入力地震動と地震時性能の対で表現される。

*キーワード：地震、防災、リスクマネジメント、最適化

**正会員、工修、建設省土木研究所

(茨城県つくば市旭1番、

TEL 0298-64-2211、FAX 0298-64-0598)

***正会員、工博、同上

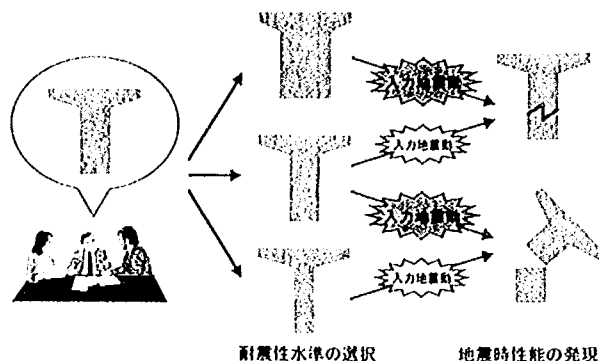


図1 耐震性水準、地震時性能の概念

2. 耐震性水準の表示方法

(1) 既往の耐震性表現法

性能を基盤とした耐震設計の考え方は先進各国で検討されているが、その概念をわかりやすく表したものに、合衆国カリフォルニア州 SEAOC の VISION 2000 committee によるパフォーマンスマトリックスがある²⁾(図2)。図中3本の線の線は施設の重要度に応じて描かれており、各地震動レベルとそれに対して要求される性能で表される点を連ねたものである。

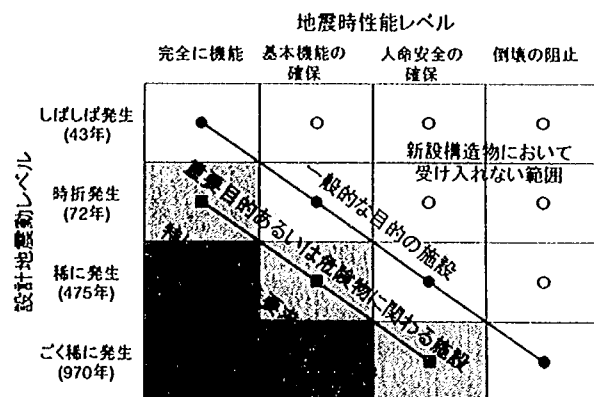


図2 VISION 2000 report のパフォーマンスマトリックス

(2) パフォーマンスマトリックスの拡張

図2に示されるような従来のパフォーマンスマ

トリックスは、想定される地震動に対して施設が満足すべき性能を示すものであり、要求レベルのパフォーマンスマトリックス(demanded performance matrix: DPM)と呼ぶことができる(図3左)。これに対し、実際の施設を設計する際には、ある地震動レベルに対して所定の性能を満足するように設計すると、他の地震動レベルに対して発現する性能も定まってしまうため、耐震性水準を表す曲線が設計内容ごとに一本ずつ描かれる(図3右)。この曲線は設計内容ごとに一本定まることから、「等設計線」と呼ぶことができる。あるいはある設計内容の耐震性水準を表すことから、「等水準線」とも表現できる。この等水準線で示されたパフォーマンスマトリックスを、実現レベルのパフォーマンスマトリックス(realized performance matrix: RPM)と呼ぶことにする。

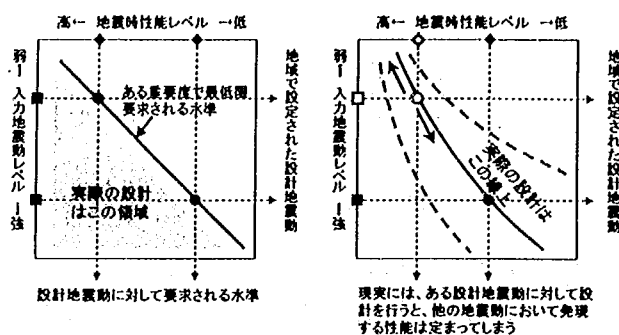


図3 DPM と RPM の比較

DPM は、施設の重要度を与件として、一般的な施設に要求される耐震性水準を示したものであり、要求された水準線と実現される水準線は必ずしも一致しない。これに対して、RPM は個別の施設ごとに一つずつ作成され、その中に水準の異なる複数の設計内容に対する等水準線が描かれる。したがって、地域で想定される地震動と RPM に基づいて対象となる施設の地震時性能を吟味しながら、意志決定者が当該施設の耐震性水準すなわち設計内容を選択することができる。

(3) IOC カーブ

意志決定者が施設の耐震性水準をより綿密に検討したり、複数施設の耐震性水準を比較するためには、各水準を確保するために必要なコストを表示する必要がある。そこで、RPM の等水準線を実

現するために必要なコストを第3の軸とし、以下のような関数を考える。

$$c = C(P, p) \quad (1)$$

ここで、 P ：実数で表示された施設の性能、 p ：地震動レベルに対応する地震の発生確率、 c ： p で表されるレベルの地震動に対して性能が P となるような施設の構築に必要なコスト。

ここで関数 C を、入力としての地震動に対して出力としての性能が発現するようなスループットの関数として、input-output-cost 関数 (IOC 関数) と名づける。その形状は図4のような形状になると考えられ、この曲面を IOC カーブと呼ぶことにする。

RPM に対してさらにコストが追加された IOC 曲面は、意志決定者が施設の耐震性水準を検討するのにより有用な根拠となる。

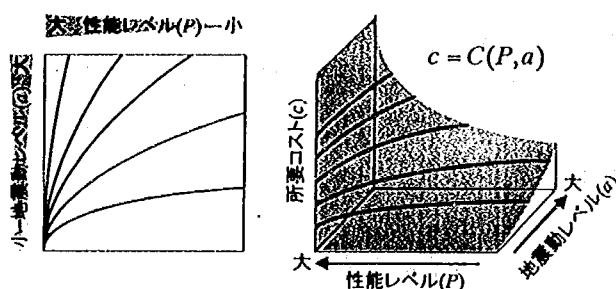


図4 IOC カーブの例

3. 計算例

(1) 試算条件

第2章で示した RPM 及び IOC カーブを実際に想定される施設について試作成した。対象としたのは高架の道路橋であり、3 径間連続、RC 床版鋼箱桁橋(上下線分離の4車線)などの与件を設定した。対象橋梁の概要を図5に示す。

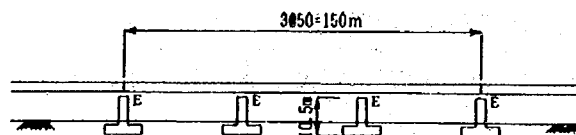


図5 対象橋梁の諸元概要

一方、これらの与件に対して、設計耐震性水準

を変化させた 11 ケースを設定した (表 1)。これらは主として橋脚の断面を変化させて設定した。なお、ここでは上部構造及び支承は損傷を受けないものとし、上部工の荷重をすべて下部構造に伝達する。また基礎の水準については、各地震動レベルに対して基礎の損傷程度が橋脚の損傷程度を卓越しないように設計することとした。

表 1 耐震性水準ケース設定

設計ケース	橋脚断面 直交方向×橋軸方向 (mm)	躯体主鉄筋	基礎
D1	6700×6700	D32(2段)/D32	ケーソン
D2	4900×4500	D32(2段)/D32	杭 (12本)
D3	4500×3500	D32(2段)/D32	杭 (8本)
D4	4000×3000	D32(2段)/D32	杭 (6本)
D5	3500×2900	D32(2段)/D32	杭 (6本)
D6	4300×2800	D29(2段)/D29	杭 (8本)
D7	3900×2500	D29(2段)/D29	杭 (6本)
D8	3500×2300	D29/D29	杭 (6本)
D9	2300×2100	D22/D22	杭 (6本)
D10	2100×2100	D22(2段)/D22	杭 (4本)
D11	2100×2100	D25/D25	杭 (4本)

ケーソン断面は10000×10000
場所打ち杭の杭径は1200(鉄筋はD25)

(2) 地震動レベル及び地震時性能の表現

対象橋梁のサイトにおいて、表 2 のような地震動が想定されているとした。実際に RPM を計算するにあたっては、各施設の計画サイトにおいて確率年と地震動の強さが結び付けられたハザードマップが準備されていることを前提としている。

表 2 想定地震動レベル

地震動 レベル	PGA (gal)	再帰年	年超過 確率	50年 超過確率	備 考
1	100	10	0.1	99.5%	耐用年限中における発生確率が高い地震、道示の震度法レベル
2	250	100	0.01	39.5%	
3	700	1000	0.001	4.9%	既往最大、道示のタイプIIレベル
4	1100	10000	0.0001	0.5%	既往最大以上の地震

一方、本試算における橋梁の地震時性能は、式 (2) のようなパラメータ λ によって評価することとした。

$$\lambda = \frac{\delta - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \quad (2)$$

ここで、 δ : 橋脚天端の応答変位、 δ_y : 同降伏変位、 δ_u : 終局変位であり、ここでは仮に λ を塑性状態率と呼ぶ。 λ の値と言語表現された地震時性能とし

ては表 3 のように設定した。

表 3 塑性状態率 λ と性能表現の対応

λ	損傷程度	性能表現
0以下	被災なし(弾性範囲内)	完全に機能
0~0.25	軽微な損傷	使用可能
0.25~0.6	中規模な損傷	補修後に使用可能
0.6~0.9	大規模な損傷	使用不可
0.9~	倒壊の可能性	倒壊の可能性

(3) 試算結果

設定した条件のもとで、各設計ケースに対して複数のレベルの地震動を作用させた場合の λ を計算し、RPM として表現したのが図 6 である。予想される一般的な RPM の形状と一致していることがわかる。

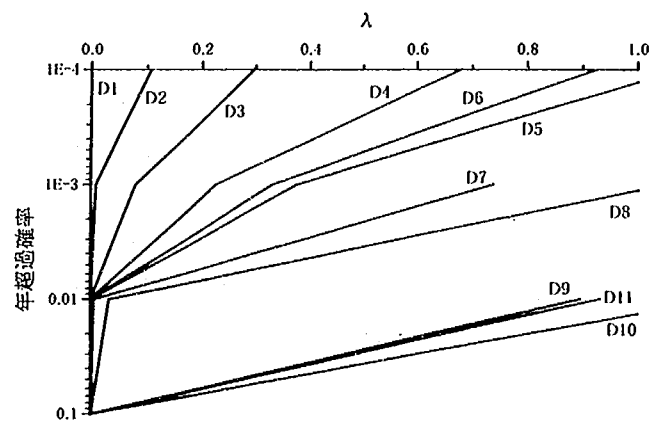


図 6 RPM の試算結果

また、これに各設計ケースの初期構築コストを加えて三次元空間内の等設計線としてプロットしたのが図 7 である。

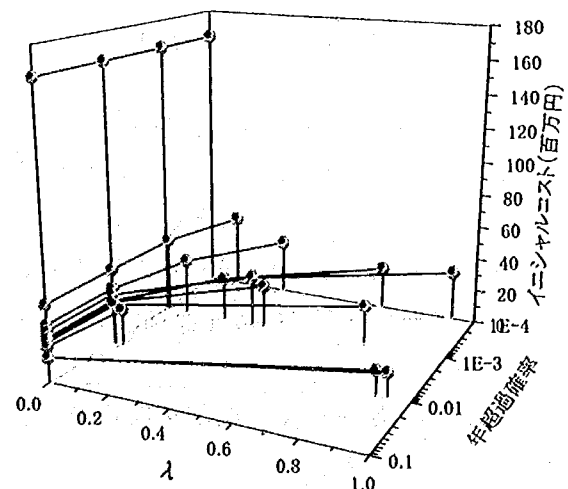


図 7 IOC カーブにおける等水準線の試算結果

4. 耐震対策投資の最適化

(1) 問題設定

いま、二つのサイトにおいてそれぞれ構造物が計画されており、その耐震性水準を設定することを考える(表4)。

表4 耐震性水準の問題設定

Eq-level	sites	site-1	site-2
	prob. \ cost	$C_1(P, p)$	$C_2(P, p)$
normal	$p_0 = 1 - p_1 - p_2$	P_{10}	P_{20}
eq-1	p_1	P_{11}	P_{21}
eq-2	p_2	P_{12}	P_{22}

ここで、 s : サイト(すなわち施設)を表すパラメータ、 e : 地震動レベルを表すパラメータ、 p_e : レベル e の地震動が当該地域で発生する確率、 P_{se} : レベル e の地震動に対して発現する施設 s の性能。 C_s : 施設 s のIOC関数。このような設定の後、与えられた投資制約のもとで地域の満足度を最も高くするような P_{se} ($s, e = 1, 2$)を決定することにより、各施設の耐震対策費用 C_s すなわち耐震性水準を決定することができる。

(2) 定式化と解

たとえば、二つの施設の性能 P_1, P_2 が与えられた場合の地域の満足度が効用 $U(P_1, P_2)$ で測定できるとする。このとき、想定される地震動に対する期待効用を目的関数とし、これを最大化する問題は式(3)のように書くことができる。

$$\begin{aligned} \max_{P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}} & p_1 U(P_{11}, P_{21}) + p_2 U(P_{12}, P_{22}) \\ \text{s.t.} & C_1(P_{11}, p_1) = C_1(P_{12}, p_2) \\ & C_2(P_{21}, p_1) = C_2(P_{22}, p_2) \\ & C_1(P_{11}, p_1) + C_2(P_{21}, p_1) = c \end{aligned} \quad (3)$$

制約条件の第1式、2式は性能レベル P_{se} が施設ごとに同一水準線上にあることを保証し、第3式は予算制約を示す。式(3)を解くことにより、施設 s ごとに地震動レベル e に対する性能 P_{se} が求まり、各施設の耐震性水準が決定される。

たとえば効用関数、IOC関数が次式のように同定されているとする。

$$\begin{aligned} U(P_{1e}, P_{2e}) &= P_{1e}^{\alpha_1} P_{2e}^{\alpha_2}, \\ C_1(P_{1e}, p_e) &= P_{1e}^{\eta_1} p_e^{\xi_1}, \quad C_2(P_{2e}, p_e) = P_{2e}^{\eta_2} p_e^{\xi_2} \end{aligned} \quad (4)$$

このとき、式(3)の解は次式のように得られる。

$$P_{se} = \left(\frac{\alpha_s / \eta_s}{\sum_s \alpha_s / \eta_s} p_e^{-\xi_s} c \right)^{\frac{1}{\eta_s}} \quad (s, e = 1, 2) \quad (5)$$

式(5)において、全体コストが高いほど同じ地震に対する各施設の地震時性能は高くなり、また性能上昇に対するコストの感度(η_s)よりも効用の感度(α_s)が高い施設ほど高い地震時性能が求められるなど、一般的に予想される結果が得られる。

5. 結 論

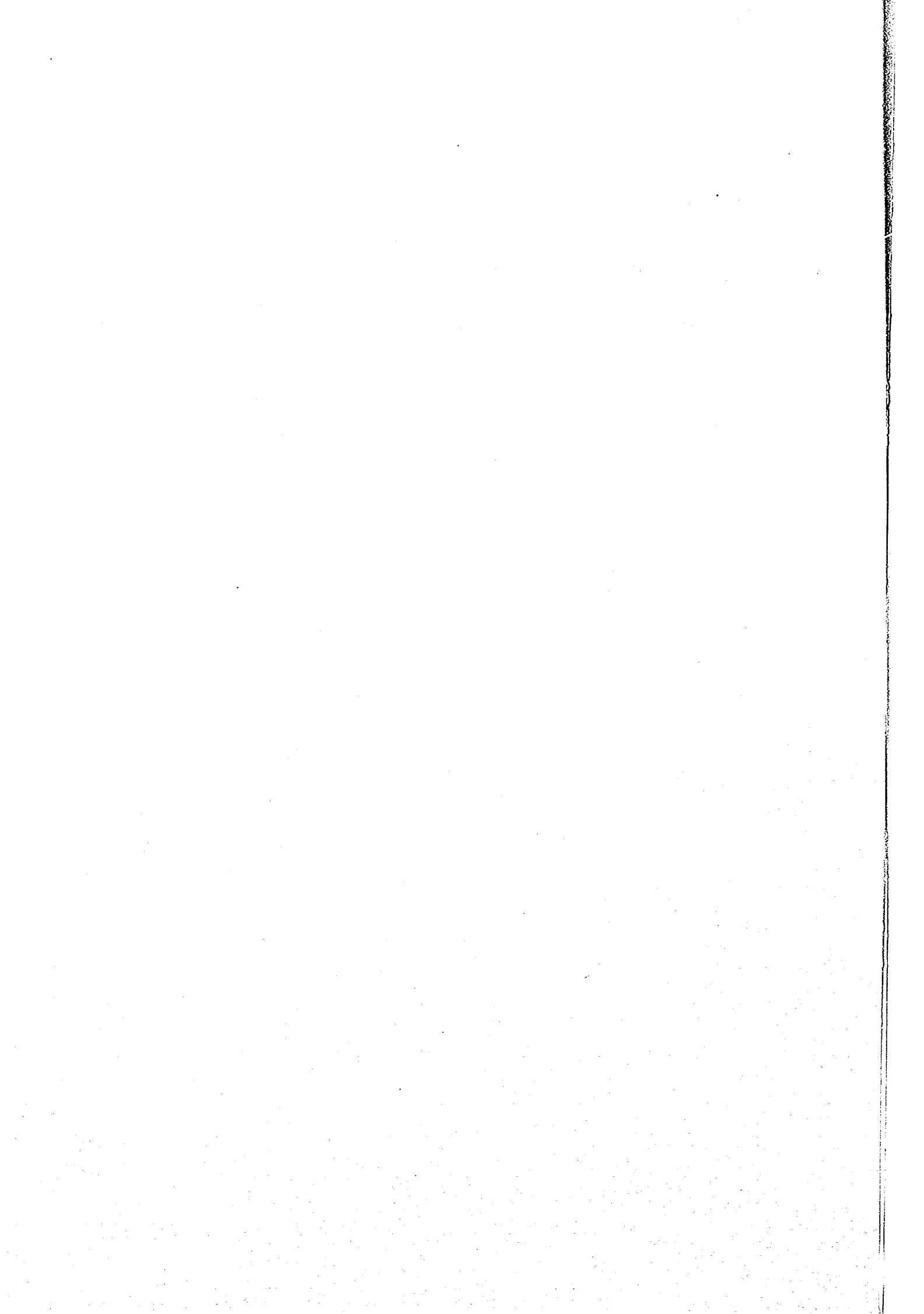
本研究では、発生頻度が非常に小さく、被害規模が甚大な地震災害について、投資制約を考慮しながら施設の適切な耐震性水準を設定する手順を検討するものである。通常、設計論においては構造物の性能を所与として与え、また計画論においては、各施設の設計論に立ち入らないことが多いが、本研究ではその両者を融合させることを試みている。今後、施設の性能のより適切な表現方法や、地域の満足度を表す効用関数あるいは純便益の同定方法等について検討を進める。

参考文献

- 1) 上田孝行: 防災投資の便益評価—不確実性と不均衡の概念を念頭に置いて—, 土木計画学研究・講演集 No.19(2), pp17, 1996年11月
- 2) 水谷守・中村孝明・下野正人・亀村勝美: 確率論的アプローチによる地震リスクマネージメント(SRM)手法の提案, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, pp738-739, 1996年9月
- 3) VISION 2000 - Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineers Association of California Vision 2000 Committee, April 1995

第 22 回土木計画学研究発表会（H11 年 10 月 30 日～11 月 1 日・熊本県熊本市）

道路ネットワーク耐震性評価手法の提案



道路ネットワーク耐震性評価手法の提案

Evaluation Method of Highway Network Performance against Earthquake

杉田秀樹**・野崎智文***・矢野和彦****

by SUGITA Hideki**, NOZAKI Tomofumi*** and YANO Kazuhiko****

1. はじめに

道路施設の地震対策は、橋梁等道路構造物の耐震設計や沿道占用施設の管理等、主として“点の視点”から行われてきた。しかしながら道路は、交通需要が発生するゾーンと到着するゾーンが連結されて始めて機能を果たすのであり、道路区間単位での耐震性確保が必ずしも道路ネットワークとしての機能確保の十分条件足り得ない。これは、切迫した状況下で迅速に行われるべき防災活動交通では特に留意すべき点である。

ここで、地震時の道路交通を確保するためには、道路施設の耐震補強、路線改築等による冗長性確保等のハード対策と、交通規制等のソフト対策が考えられる。道路ネットワークの耐震強化を目指してハード／ソフト対策を効果的に選択するためには、定性的な議論だけでなく、各種対策の効果を相互比較が可能な形で定量的に評価するための方法論が求められている。

本文は、上記の背景を踏まえて、道路ネットワークの耐震性を評価するための実用的な手法を提案するものである。本手法を用いれば、地域で想定される道路施設被害に応じて、道路ネットワークの防災活動交通に対する機能提供度合を定量的に表現できる。また、複数のハード対策／ソフト対策パターンを想定してネットワーク機能への感度分析を行うことにより、耐震補強の優先度評価や交通規制方策の選択に際して定量的な情報を提示することが可能である。

2. 耐震性評価の流れ

任意の地域において、道路ネットワークの耐震強化を図るために、複数の耐震補強対策と地震時交通規制を組合わせて計画する場合を想定する。この場合、

* キーワード：地震防災、道路ネットワーク、信頼性評価、緊急車両

** 正会員、工博、建設省土木研究所防災技術課
(茨城県つくば市旭1番, TEL/FAX 0298-64-3244/ 64-0598)

*** 正会員、工修、同上

**** 正会員、アジア航測(株) (元土木研究所交流研究員)

①地震直後の防災活動交通に対して道路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複数箇所の重要度や事業優先順位をどのように考えるか、③震前の耐震補強対策と地震時の交通規制をいかに効果的に組み合わせるか、の3点を明確にする必要がある。

本検討では、上記①に対してネットワーク耐震性指標 (Seismic Performance :SP) を、②に対して区間重要性指標 (Link Importance: LI) を提案し、③に対しては背景交通1台あたりの旅行時間 (Travel Time Per Vehicle: TTPV) と SP を用いて優劣比較を行う方法を提案する。

これら3つの手法を道路ネットワークの耐震強化に活用するイメージを図1に示す。ネットワーク耐震性指標 SP は、①被害想定に基づく各リンクの被災パターン、②地域防災計画等で想定される防災拠点間の交通需要、③防災拠点と被災地域間の交通需要、に基づいて評価される。防災活動交通の旅行時間の増加により防災活動の効果 (防災活動効果量) が低下するという概念を導入している点が特徴である。

3. 耐震性評価指標

(1) ネットワーク耐震性指標 SP

防災活動の考え方を示すと図2の通りである。救急・消防・避難等防災活動の目的を k で表わし、ネットワーク上の発生集中交通を生じるノード (セントロイド) i から j に向かう目的 k の OD 交通分布 T_{ij}^k が与えられているとする。この交通が利用する i から j へのルートは複数存在し得るが、このうち任意の一つを r とし、ルート r 上の交通量を T_{ij}^{rk} 、所要時間を t_r

$$E_{ij}^k = \sum_r E^k(t_r) T_{ij}^{rk} \wedge \wedge \wedge (1)$$

$$SP^k = \frac{\sum_i \sum_j E_{ij}^k}{T} = \frac{\sum_i \sum_j \sum_r E^k(t_r) T_{ij}^{rk}}{\sum_i \sum_j \sum_r T_{ij}^{rk}} \wedge \wedge (2)$$

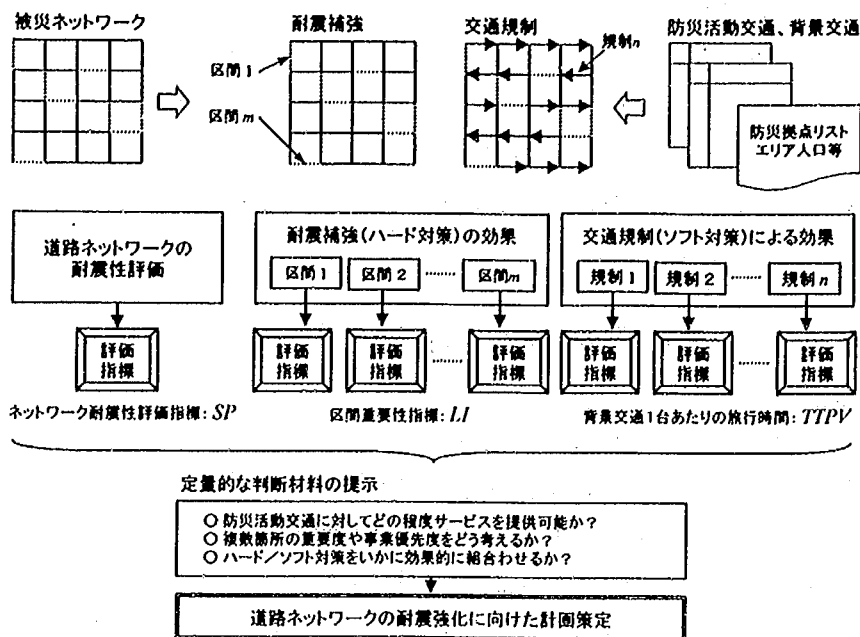


図1 耐震性評価手法の道路ネットワーク耐震強化への活用

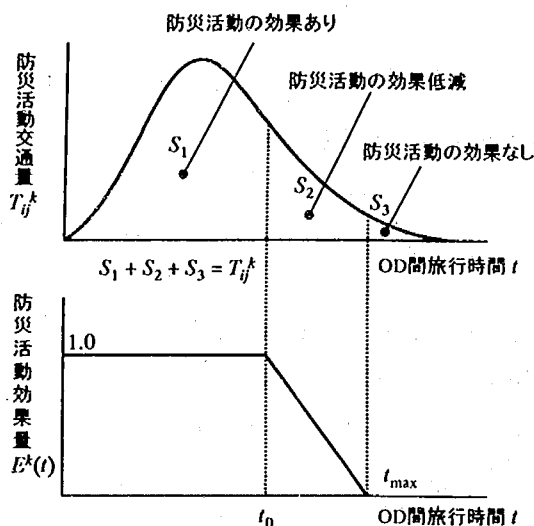


図2 防災活動交通量と防災活動効果量

とする。ただしこれらの量は、地震直後に道路ネットワークが被災した状態で把握されているものとする。ここで、目的 k の交通が時間 t_0 以内に到着すれば所要の目的を達成でき、 t_{max} 以上の時間を要した場合には目的を達成できないと考え、単位防災活動効果量 $E^k(t)$ を定義する。この $E^k(t)$ を用いれば、ノード i から j に向かう目的 k の防災活動交通の効果量 E_{ij}^k は式(1)により与えられる。この E_{ij}^k をすべてのODペアに対して加算し、さらにこれをネットワーク中の総交通量 T を用いて無次元化したものを、活動目的 k に対するネットワーク耐震性指標 SP^k として定義する。

SP^k は0~1の値をとり、すべての防災活動交通トリップが目標時間 t_0 以内で完了すれば SP^k は1となる。一方、旅行時間が t_0 を超えるトリップが増加するに従

って、 SP^k は1よりも小さくなる。すなわち、ネットワーク耐震性指標 SP^k は、検討対象エリアにおいて防災活動交通の目的達成率を表現する指標と言える。

(2) 区間重要性指標 LI

防災活動目的 k に対する道路区間 l の重要性 LI_l^k は、被災後のネットワーク耐震性指標 SP^k と、道路区間 l のみを復活させた場合のネットワーク耐震性指標 SP_l^k を比較することにより次式で得る。

$$LI_l^k = SP_l^k - SP^k \quad \Delta \Delta \Delta \Delta \quad (3)$$

すなわち、区間重要性 LI_l^k は、想定された被災パターンの下で、ネットワーク耐震性に対する道路区間 l の感度を表現する指標であると言える。

(3) 背景交通1台あたりの旅行時間 $TTPV$

防災活動交通の確保を目的とした耐震補強や交通規制は、地震時の背景交通にも影響を与える。ハード/ソフト対策の優劣比較では、防災活動に対する機能提供度合だけでなく、背景交通への影響も総合的に勘案する必要がある。ここに、各対策が背景交通に与える影響は、背景交通1台あたりの走行時間 $TTPV$ の変化で評価できる。 $TTPV$ は、ネットワーク全体での総走行時間をネットワーク上に配分された総交通量(孤立ODを除く)で除することにより次式で得られる。

$$TTPV = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij} T_{ij}}{\sum_i \sum_j T_{ij}} \quad \Delta \Delta \Delta \Delta \quad (4)$$

すなわち、 SP の向上は防災活動交通に対するネットワーク耐震性の向上を表わし、 $TTPV$ の減少は背景交通に対する耐震性の向上を表わす。

(4) 防災活動交通の想定

防災活動交通 π_{ij}^k を算出するためには、防災活動目的に応じた防災拠点間連絡マトリクスと防災活動交通量が必要である。これらは本来未知量であり、地域特性や被災規模により変化する交通特性を適切に想定する手法については別途検討する必要がある。本研究では便宜上、防災拠点間連絡マトリクスを表1のように定め、ゾーン内の防災拠点数と平常時ネットワー

表1 防災拠点間連絡マトリクスの例

			医療機関				救急・救命			避難地・被災地	
			17	18	19	20	21	22	23	30	31
			県立・市立病院	総合病院	保健所・支庁	血液センター	警察署	消防署	自衛隊	広域避難地	被災地
医療機関	17	県立・市立病院	●	●	●		●			●	●
	18	総合病院		●	●		●			●	●
	19	保健所・支庁			●		●			●	●
	20	血液センター									
救急・救命	21	警察署									●
	22	消防署									●
	23	自衛隊									●
避難地・被災地	30	広域被災地									●
	31	被災地									●

クのゾーン間距離に基づく重力モデルから、防災活動交通量を算定した。

4. 簡単なモデルケースによる試算

(1) モデルネットワーク

本検討で提案した耐震性評価手法を用いて、図3に示す放射環状型、格子型、ラダー型の簡単なモデルネットワークに対する試算を行った。3種類のモデルネットワークの各々に被災パターンを想定し、耐震補強を実施した場合と交通規制を実施した場合についてSP及びTTPVを比較した。

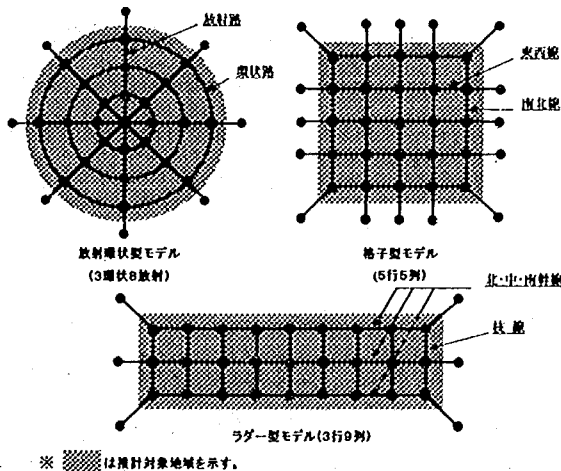


図3 モデルネットワーク

ここに、防災活動交通は救急活動の1種類のみとし、モデルネットワークの圏域面積と道路密度は平均的な地方生活圏を想定して定めた。また、人口と病院は各ノードに均等に配分し、全てのノードを防災活動と背景交通のセントロイドとした。

防災活動交通のネットワーク上への配分は、背景交

通の配分結果から得られる各リンクの区間速度に基づく一括配分とした。これは、防災活動交通量が背景交通に比べて少なく、震後の区間速度に大きく影響しないと考えたためである。一方、背景交通は多段階配分手法により配分した。また、ODマトリクスの生成では、防災活動交通には被災後のネットワークを、背景交通には被災前のネットワークを各々用いた。これにより、防災活動交通には被災区間が知らされているが交通の混雑状況は知らされていない状態、背景交通には被災区間自体が知らされていない状態を表現した。

(2) ネットワーク耐震性

耐震補強と交通規制が各々ネットワーク耐震性の向上に与える効果を、放射環状型モデルを対象に比較検討した一例を示す。耐震補強パターンと交通規制パターンを図4に、また、ネットワーク耐震性指標SPと背景交通の走行時間TTPVの変化を図5に示している。これによれば、ネットワークに被災区間が生じない場合は防災活動交通がほぼ100%満足される($SP=1.0$)のに対して、被災状況下では目標達成率は低下する($SP=0.84$)。

(2) 耐震補強の効果

図4に示すように、耐震補強は被災リンクのいずれか1本を復活することで表現する。耐震補強を実施した場合、SPはわずかであるが向上し、TTPVは減少する。震前の耐震補強は、防災活動交通と背景交通の双方に対して交通サービスを向上させる傾向があり、補強箇所を増加させただけ大きな効果が期待できる。

(3) 交通規制の効果

本検討では、片側2車線道路を想定し、図6に示す2種類の交通規制の効果を検討した。一つめは背景交通に対する進行方向規制（以下、方向規制と呼ぶ）である。交通規制を実施しない場合には防災活動交通と背景交通が車線を共有している状況を想定し、方向規制下では背景交通の規制方向（図4の矢印方向）では防災活動交通と背景交通は車線を共有し、反対方向を防災活動交通が占有するものとした。二つめの交通規制は、防災活動交通専用車線の設定（以下、防災レーン設置と呼ぶ）である。防災レーン設定の場合、片側2車線のうち1車線を防災活動交通専用とするため、背景交通に対しては車線数が減少することになる。

交通規制の特徴として、以下の点が指摘される。

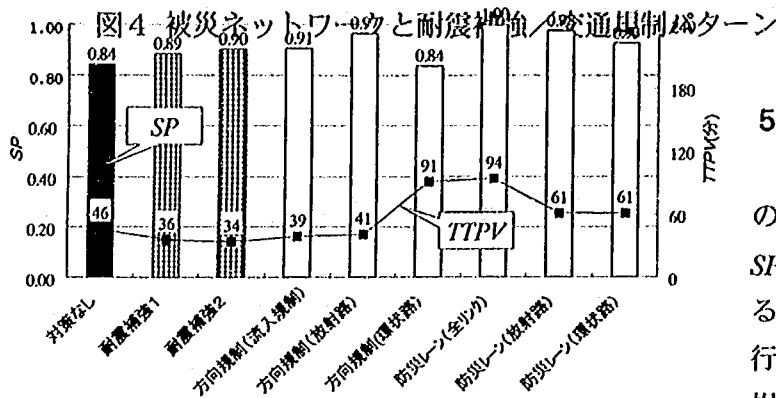
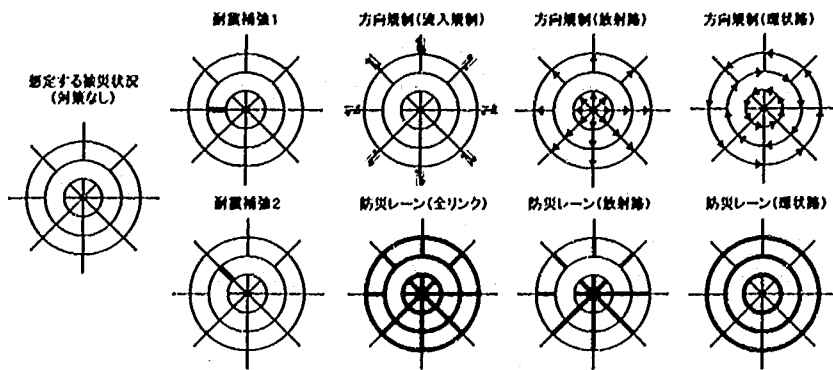


図5 耐震補強と交通規制の効果（放射環状型モデル）

a) 方向規制については、被災パターンと規制方法の組合せによって効果が異なる場合があり、SPが必ず向上するとは限らない。また、TTPVの増加や孤立交通の発生など、背景交通に与える影響は大きい。

b) 防災レーンを設置すれば、背景交通と防災活動交通が分離されるためSPを確実に向上できる。例えばネットワークの全区間に防災レーンを設置すれば、防災活動交通は完全に満足される。しかしながら、背景交通への影響は大きく、交通サービス供給量が半減することによりTTPVは大きく増加する。

なお、格子型モデル及びラダー型モデルについても、上記と同様の傾向が認められた。すなわち、方向規制では規制区間や規制方向を適切に設定しなければ防災活動交通の効率化は図れず、また、防災レーン設置で

は、必要最小限の規制に止める工夫が必要である。さらに本文では示していないが、ラダー型モデルにおいて一部の道路区間に防災レーンを設定した場合、防災活動交通をほぼ満足し、かつTTPVも低下することが確認された。このことは、耐震補強等ハード対策以外でも、背景交通への影響を抑えながら防災活動交通を満足できるソフト対策の可能性を示唆するものである。

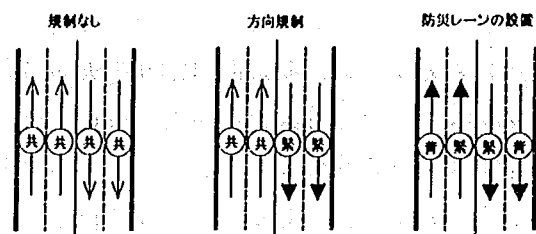
5. まとめ

本文では、防災活動交通に対する道路ネットワークのサービス程度を表現するネットワーク耐震性指標SP、ネットワークにおける道路区間の重要性を表現する区間重要度指標LI、及び、背景交通1台あたりの旅行時間TTPVとSPを用いて耐震補強対策と地震時交通規制の優劣比較を行う方法を提案した。本文で提案した手法は、耐震補強優先度の設定や交通規制区間の設定など、道路管理者がハード/ソフト対策を組合わせて道路ネットワークの耐震強化を計画する際に定量的な判断材料を与えるものである。

また、簡単なモデルネットワークを想定した試算を通じて、耐震補強や交通規制がネットワーク耐震性に与える効果の傾向を検討した。ただし、解析対象地域のネットワーク形状、道路属性、効果量関数の設定法等に加え、防災拠点配置や人口分布等により左右される交通特性に応じて、求められる指標は変化する。今後、実地域を対象とした試算を通じて、本手法の実用化に向けた検討を継続する。

参考文献

- 1) 建設省道路局道路防災対策室監修：新時代を迎える地震対策—地震に強いみちづくりへの提言、H8.10
- 2) 藤原健一郎、朝倉康夫、柏谷増男：道路網の機能的階層性とネットワーク信頼性評価指標との関連、土木計画学研究・論文集19(2)、1996.11
- 3) 永松善敬、大塚久哲、松田泰治、富永臣悟：緊急輸送道路網における耐震安全性評価手法の開発、自然災害西部地区部会報・論文集、Vol.22、1998.3
- 4) 建設省土木研究所：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究（その1）（その2）、土木研究所資料第3589号、第3621号、1998.9、1999.1

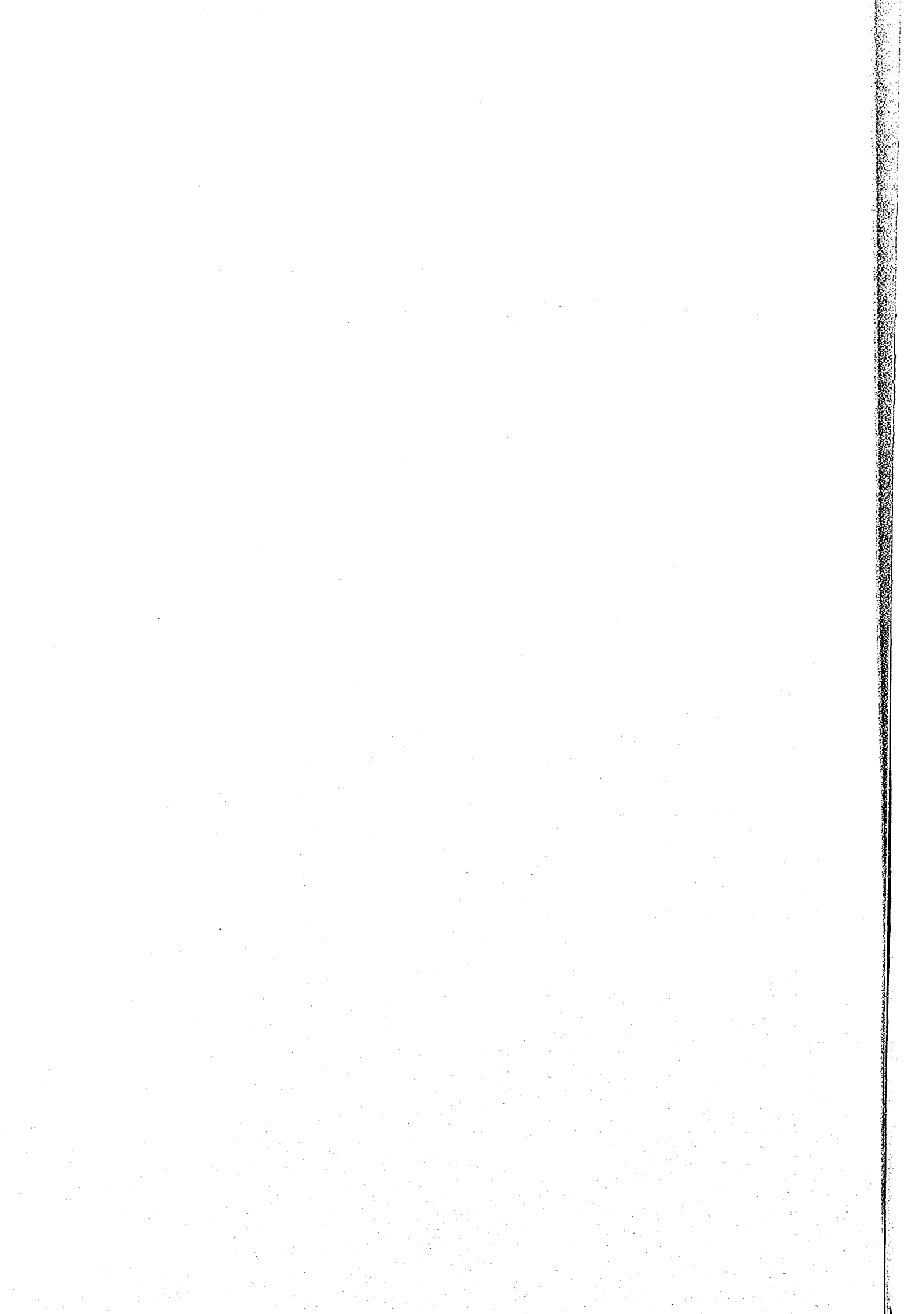


- 背景交通と緊急交通
- 緊急交通のみ通行可
- 背景交通のみ通行可

図6 交通規制のパターン

第 23 回日本道路会議 (H11 年 10 月 20 日～22 日・東京)

地震時道路管理に向けた即時震害予測システム



地震時道路管理に向けた即時震害予測システム

建設省土木研究所 ○杉田 秀樹
同 金子 正洋

1. はじめに

土木研究所が関東地方建設局と共同開発した即時震害予測システムは、建設省地震計ネットワークで得られるオンライン観測情報を活用して、地盤の液状化や橋梁被害の可能性を地震発生後15分程度で推定する情報支援システムである。地震直後の混乱期に施設被害の全体像を概略把握することで、体制構築や緊急点検など道路管理者の初期対応の効率化が期待される。本文では、建設省地震計ネットワーク及び即時震害予測システムを紹介するとともに、関東地方建設局における即時震害予測システムの試験運用状況を報告する。

2. 建設省地震計ネットワーク

建設省地震計ネットワークによる観測情報の流れを図1に示す。所管施設近傍の地表面上に20～40 km 間隔で設置した強震計（全国697観測点、平成11年3月現在）をマイクロ回線等でオンライン化することで、地震動特性値（最大加速度、SI値）を地方建設局及び建設本省に集約でき、また時刻歴波形情報は観測施設毎の記録媒体に保存される。建設省関係部局により統一的な活用方針¹⁾が示されており、即時震害予測システムへの活用が将来構想に位置付けられている。

3. 即時震害予測システム

即時震害予測システムによる被害推定は、被害推定位置での地震動特性値の推定、地盤液状化の可能性判定、橋梁被害の可能性判定の手順^{2) 3)}で行う。ここに地震動特性値の推定は、図2に示すように、地盤応答倍率関数を用いた地表面位置から工学的基盤面位置（基盤面位置から地表面位置）への地震動特性値の変換計算と、工学的基盤面位置での地震動特性値の補間計算を組合わせて行う。また、地盤液状化及び橋梁被害の判定は各々最大加速度及びSI値を判断指標とし、既往被害事例等の知見に基づき、可能性を大・中・小・なしの4段階で表示する。

4. 試験運用状況

関東地方建設局において試験運用が開始された平成9年4月から平成10年9月までの間に、関東地域周辺を震源とするM4.5以上の地震が8回発生している。東京湾を震源とする地震（平成10年8月29日、M5.4）について、即時震害予測シ

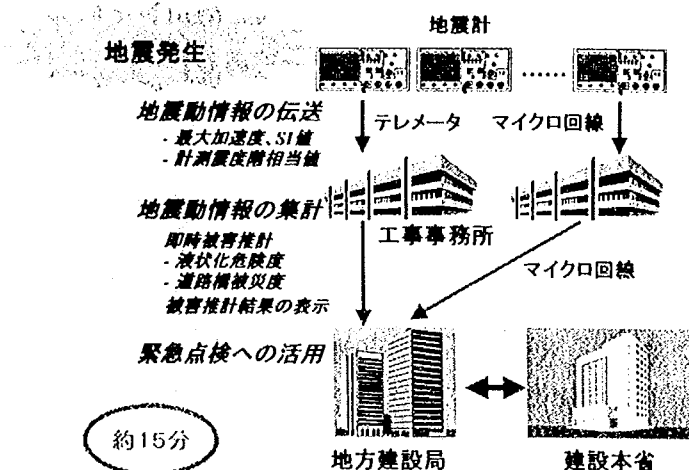


図1 地震計ネットワークによる観測情報の流れ

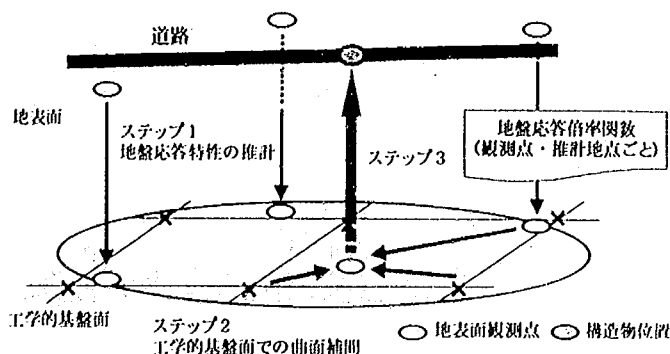


図2 被害推定位置での地震動特性値（最大加速度、SI値）の推定

システムの表示画面を例示すると図3の通りである。東京湾沿岸の比較的広範囲で震度4の揺れが観測されており、房総半島西側の一部地域で地盤液状化と橋梁被害の可能性が示唆されている。

地震動特性値の推計モデルの妥当性を、実観測情報と推計情報との比較により検討した結果を図4及び図5に示す。合計110箇所の観測点のうち1箇所を被害推計位置であると想定し、被害推計位置における実観測／推計最大加速度を対比した結果を図4に、また、工学的基盤面位置でも観測を実施している8観測点において、地表面位置で実観測／推定最大加速度を対比した結果を図5に示している。これによれば、観測点や対象地震によりばらつきはあるが、実観測／推定最大加速度は概ね対応していることがわかる。

5. 今後の課題

地震計ネットワークや即時震害予測システム等、道路管理者の震後対応を支援するための技術的環境が整いつつある。今後、これら開発技術の普及・運用・検証を図るとともに、高解像度衛星や各種センサー機器を活用した広域被害把握技術等について検討を進める予定である。

参考文献

- 1)地震計ネットワークの活用方針、建設省河川局災害対策室、H11.3.31
- 2)地震発生直後におけるリアルタイム震害予測システム（冊子）、土木研究所・関東地方建設局
- 3)土木研究所：震後早期啓開を支援する震害予測システムの開発、第22回日本道路会議、H9.12

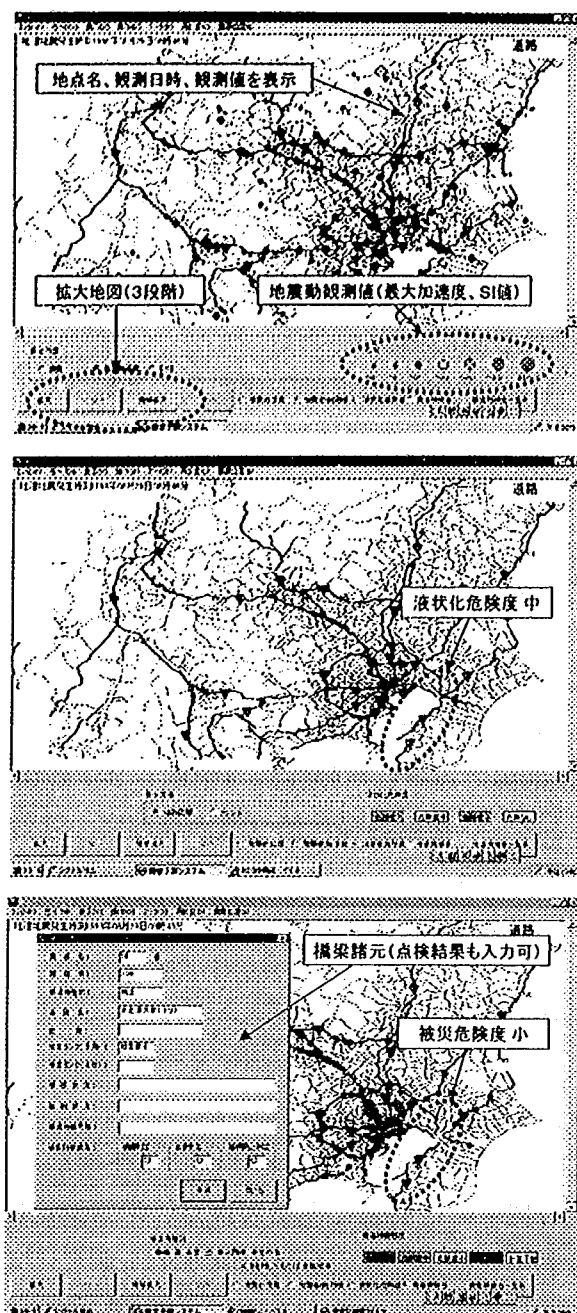


図3 東京湾を震源とする地震、H10.8.29
(上から、最大加速度の分布、地盤液状化の可能性、橋梁被害の可能性)

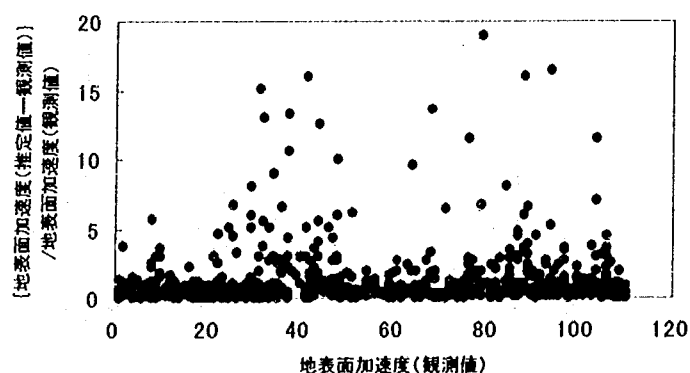


図4 被害推定位置における観測／推定最大加速度の比較

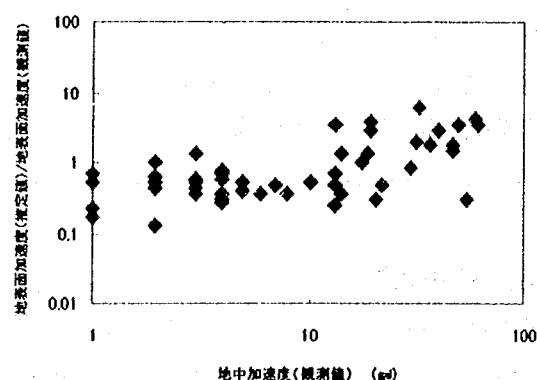


図5 地盤応答倍率関数の検証

第23回日本道路会議（H11年10月20日～22日・東京）
道路ネットワーク耐震性評価指標の提案

道路ネットワーク耐震性評価指標の提案

○建設省土木研究所
同

野崎智文
杉田秀樹

1. はじめに

道路の震災対策に際しては、橋梁・土構造物など個々の構造物の耐震性だけではなく、ネットワークとしての機能についても把握し、向上させる必要がある。本研究においては、道路ネットワークの各区間の被災状況が与えられた場合に、ネットワーク全体としての耐震性を定量的に評価する指標（道路ネットワーク耐震性指標）を検討している。またこの耐震性指標に基づき、個々の区間の重要度や、通行規制といったソフト面の対策の有効性を比較する方法についても検討している。現在までに基本的な指標の計算方法を開発し、さらにこれを用いて震前における道路区間の耐震性向上対策（ハード対策）と震後の通行規制対策（ソフト対策）の比較をモデルネットワークについて行い、その利害得失を分析した。

2. 指標の計算方法

道路ネットワーク耐震性指標(seismic performance: SP)は、地震直後の救急・消火といった緊急活動に関連する交通（緊急交通）の効果が満足される程度によって計算する。緊急交通の効果量は、図1のような関数で定義され、緊急交通の旅行時間が長くなると低減する。 SP はこれをネットワーク上の全ての緊急交通について加えたものに相当する。ただし緊急交通の走行速度は、地震後の不急の活動に伴う交通（背景交通）の混雑によって影響を受けるため、本手法ではまず大量の背景交通の配分を行い、これに基づいた走行速度によって緊急交通の旅行時間を求めて SP を計算している。被災想定に基づいていくつかの道路区間が通行不能となった状態での SP を基本とし、震前の補強対策によって道路区間が被災しないとした場合の SP を比較することで補強効果を定量的に把握できる。また、震後の通行規制についても、さまざまな規制パターンに対する SP を計算することで、規制対策の効果を定量的に評価できる（図2）

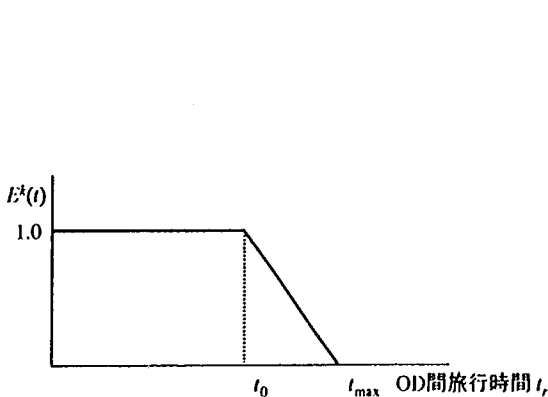


図1 緊急交通の効果

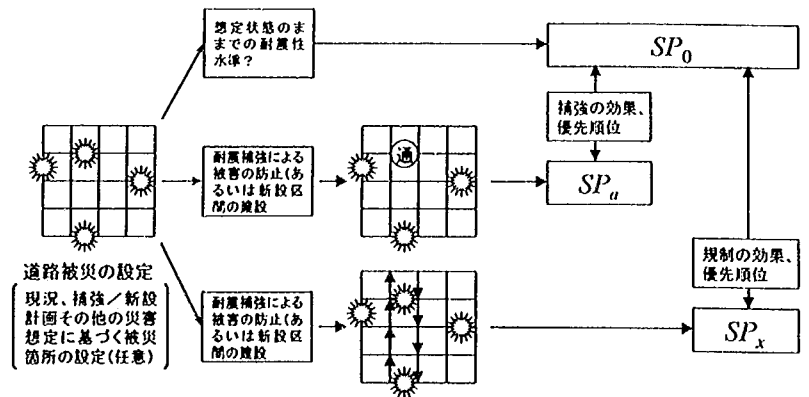


図2 道路ネットワーク耐震性指標の利用法

3. モデルネットワークを用いた施策評価の例

放射環状型、ラダー型、格子型の三つのモデルモデルネットワークについて地震による被災区間を想定し、道路ネットワーク耐震性指標 SP を計算した。また、これらのネットワークにハード対策、ソフト対策を施した場合の SP の向上についても分析した。このうち放射環状型のケース設定を図3に示す。被災区間としては4区間を想定し、震前の補強対策は4区間のうち1区間のみを震前に補強して被災なしとし、震後の通

行規制対策としては、地域内への背景交通の流入規制、方向規制、防災レーンの設置の三つを地震発生後に設定するとした。このうち方向規制と防災レーン設置の方法について図4に示す。各ケースのSPと初期の被害想定の場合（対策なし）に対するSPを比較することにより、各対策の効果が定量的に比較できる。

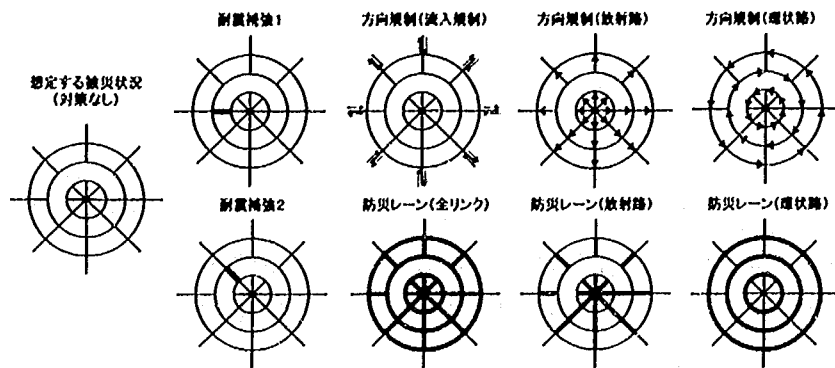


図3 放射環状型ネットワークのケース設定

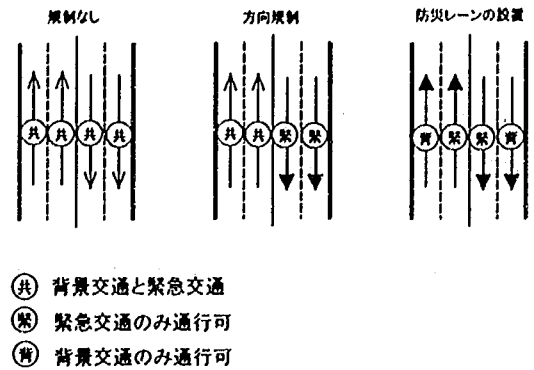


図4 通行規制の方法

放射環状型のSPの計算結果を示す(図5)。ここで、SPは緊急交通の効果の達成度に対応するが、背景交通への影響は加味されていない。そこで図5中には、走行可能な背景交通1台あたりの平均旅行時間(travel time per vehicle: TTPV)も各ケースについて表示している。TTPVが小さいほど背景交通は効率的に流れていることを示す。この結果から、次のようなことがわかる。

- ・ 震前の補強対策はSPを向上させるとともに背景交通の効率も向上させる
- ・ 一般に、震後の通行規制対策は背景交通の効率を低下させる
- ・ 通行規制対策は規制パターンによってその効果が変化し、補強対策を上回る効果を示す場合もあれば、これよりも悪化する場合がある
- ・ したがって、対策パターンを論じる際には、本指標のように交通状況を反映した定量的な指標によって事前に補強・規制のパターンを検討しておくのがよい。

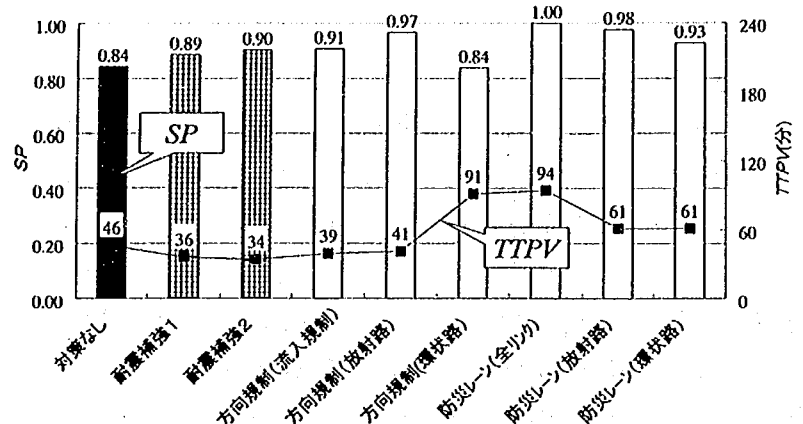


図5 放射環状型ネットワークの試算結果

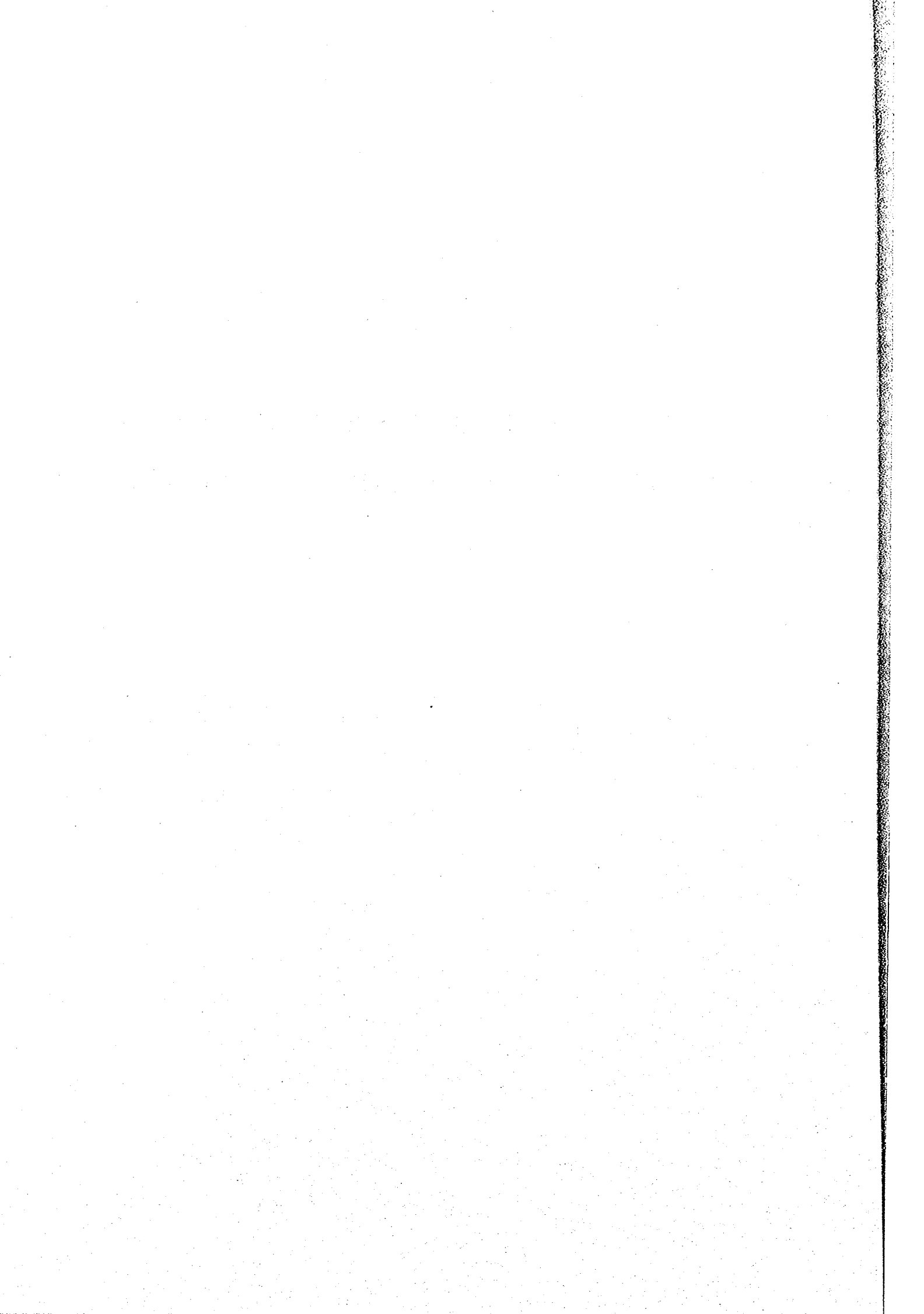
ラダー型、格子型についても同様の結果が現れている。また、平常時から混雑状態に近い道路ネットワークにおいては、少数の道路区間が通行不能となった場合でもSPが低下する結果が見られ、平常時における道路の機能と地震時の道路の信頼性は連動していることがわかった。

4. おわりに

地震時の道路ネットワークの機能は、道路の形態のみならず、道路を利用する交通の状況にも基づいて評価を行う必要がある。本手法は、一般的に用いられる交通推計手法を用いて道路ネットワークの耐震性を評価するものであり、より実用レベルに近いものである。今後、フィールドテストによって実際の地域の道路ネットワーク耐震性を評価し、施策への適用性を高めていくことが必要である。

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31回合同部会
(1999. 5. 11～14, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, Japan)

RECENT PROJECTS AT PWRI FOR IMPROVEMENT OF SEISMIC PERFORMANCE OF CIVIL INFRASTRUCTURES



RECENT PROJECTS AT PWRI FOR IMPROVEMENT OF SEISMIC PERFORMANCE OF CIVIL INFRASTRUCTURES

by

YASUDA Masahiko¹⁾

1. INTRODUCTION

Since the Hyogo-ken Nanbu Earthquake four years ago, seismic performance of civil infrastructures has been improved through revising the seismic codes for newly constructed facilities and nationwide retrofit for existing facilities. However, there still exist many problems in order for farther improvement of their seismic performance. This paper describes the recent projects that are especially propelled by Public Works Research Institute (PWRI) to cope with some of the problems. Those include,

- (1) Rational Methodology to Determine Seismic Potential of Civil Infrastructures
- (2) Very Strong Design Ground Motions with Direct Consideration for Source Faults
- (3) Development of Seismic Design Methodology for Bridges
- (4) Earthquake Resistance Design for Soil Structures

2. RATIONAL METHODOLOGY TO DETERMINE SEISMIC POTENTIAL OF CIVIL INFRASTRUCTURES

The question that has been posted since the Hyogo-ken Nanbu earthquake is that if the seismic performance between different types of infrastructures or between different structures of same types is consistent. Because each facility is designed based on its own code and because the performance is required respectively, the seismic performance between different types of facilities may have imbalance in their damages and their societal effects. Also the seismic performance of

facilities may deviate affecting the functions of the system such as a highway network composed of those facilities. In such cases, validity of earthquake resistant investment needs to be examined carefully by taking the seismic performance of the facilities in the earthquake. Therefore, the methodology to determine the well-balanced seismic potential for the facilities in an area by counting their seismic performance realized in the earthquakes (Fig. 2.1).

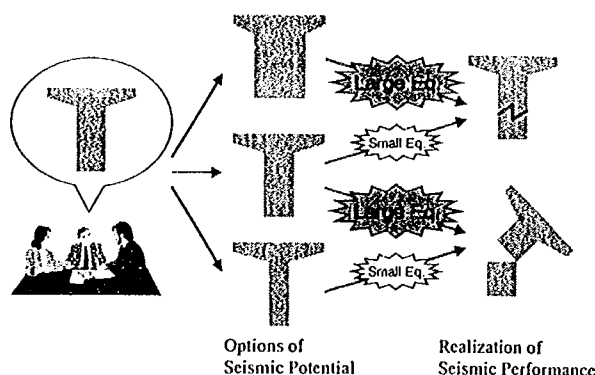


Fig. 2.1 Seismic Potential, Input Earthquake Level and Seismic Performance

Many countries are trying to revise their design codes to performance based expressions. An example of such attempt is the performance matrix proposed by the VISION 2000 committee of SEAOC, U.S.. It shows the lines indicating demanded seismic potentials corresponding to the importance of facilities in

1) Director, Earthquake Disaster Prevention Research Center, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Tsukuba Ibaraki 305-0804, Japan

the rectangle area provided by the input earthquake strong motion levels and the performance levels. Here, the lines mean the seismic potential that must be satisfied in the design, and their importances are supposed to be given by externally. In this sense this potential matrix can be referred as the "demanded performance matrix" (DPM), (Fig. 2.2).

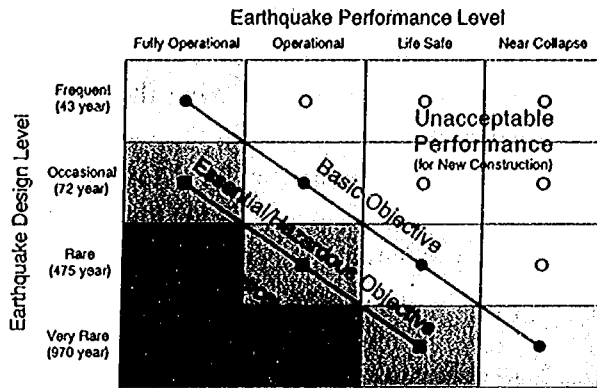


Fig. 2.2 Performance Matrix

In contrast, when a structure is designed, a seismic performance is determined from an input strong motion level dependently. Thus, the potential line that can be actually drawn corresponding to the specific design does not necessarily agree with that of conventional DPM. The performance matrix shown by this actual potential line can be referred as the "realized performance matrix" (RPM). When one consider the investment assigning plan for more than one facilities in the area, it needs to maximize the area's satisfactory by taking RPM of each structure into account.

In this research the idea of RPM is extended to the "input-output-cost curve" (IOC curve), in which the cost for structural earthquake resistant measure is displayed in addition to the input strong motion level and the seismic performance level in three dimensional space (Fig. 2.3). Given this IOC curve, decision makers can compare the earthquake resistant investment

plans.

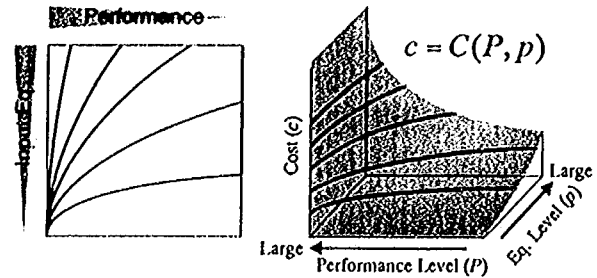


Fig. 2.3 IOC curve

Besides proposing and showing the example of the RPM and IOC curve, this research deals with a methodology to select the seismic potentials of more than one structure so that the combination of their potentials maximizes the satisfactory of the area. Assuming that there are two structures in the area, let us set the objective to maximize the quantitatively derived community's satisfactory under the several constraints such as the limit of the budget.

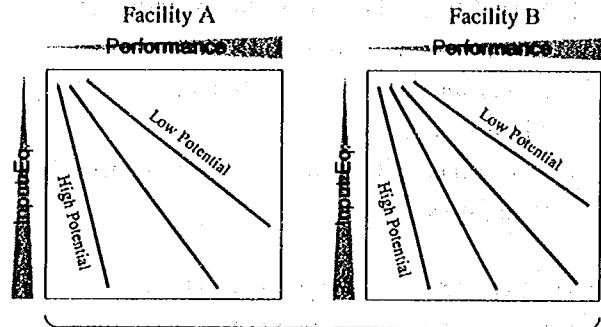


Fig. 2.4 Selecting Seismic Potentials

When the satisfactory is measured as the expected utility (EU), the problem is written as equations below.

$$\begin{aligned}
 & \max_{P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}} p_1 U(P_{11}, P_{21}) + p_2 U(P_{12}, P_{22}) \\
 & \text{s.t. } C_1(P_{11}, p_1) = C_1(P_{12}, p_2) \\
 & \quad C_2(P_{21}, p_1) = C_2(P_{22}, p_2) \\
 & \quad C_1(P_{11}, p_1) + C_2(P_{21}, p_1) = c
 \end{aligned}$$

where, p_e : occurrence probability of level e strong motion ($e = 1, 2$), P_{se} : seismic performance level of structure s ($s = 1, 2$) revealed when it experiences the strong motion of level e , $C_s(P_{se}, p_e)$: cost for such seismic potential that performance P_{se} realizes at the input level of e with the probability p_e , ; i.e., IOC function, and c^* : the limit of total cost. The equations were solved analytically by assuming the unique function forms for U and C_s . In addition, an IOC function was tentatively derived for various levels of seismic potentials of the bridge under a given condition.

The concept in this paper is expected to be utilized in the regional earthquake resistant plans in the future, and is related to the seismic codes of various facilities. To apply the methodology to the practical planning and design, several problems must be solved; i.e., expressing the facility's seismic performance in adequate manners and determining the objective function forms of the net benefit or the representative utility as the objective function.

3. VERY STRONG DESIGN GROUND MOTIONS WITH DIRECT CONSIDERATION FOR SOURCE FAULTS

Numerous valuable strong motion records were obtained by various organizations during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake and it has been found that the earthquake generated extremely strong ground motion that had rarely been recorded in Japan. Design ground motions for public works, in general, had been based on the ground motions in rather far field due to large interplate earthquakes such as the 1923 Kanto earthquake, whereas those in near field due to earthquakes by inland active faults such as the Hyogo-ken Nanbu earthquake had not been taken into account. The Hyogo-ken Nanbu earthquake triggered revision of various

seismic design codes based on its strong motion records and previous researches. However, because of lack of strong motion records obtained in near field, characteristics of near field ground motion still leave much room for discussion.

To study and grasp the characteristics of near field ground motions, in addition to the conventional techniques making use of strong motion records and attenuation relations, ground motion estimation techniques based on fault models have been developed and investigated. According to the techniques, the fault plane of a target event is divided into subfaults and the ground motion of the target event is synthesized by superimposing ground motions generated by each subfault.

The techniques can be applied to estimation of near field ground motion, which may be beyond the application of the conventional attenuation relations, because the extent and rupture process of the source fault are taken into account. On the other hand, the techniques require various source parameters, such as the location, extent,

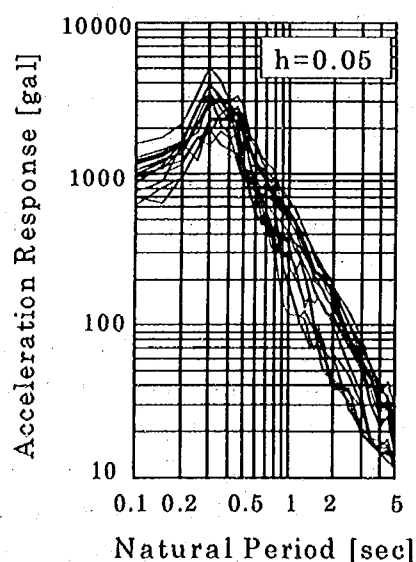


Fig. 3.1 Acceleration Response Spectra for the Estimated Ground Motions at JMA Kobe

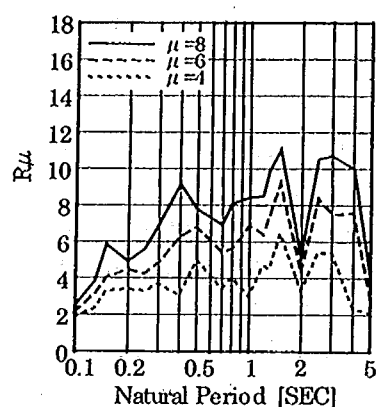
and rupture process, most of which are difficult to be determined accurately. Moreover, those parameters have noticeable effects on estimated ground motions as shown in Fig. 3.1. Fig. 3.1 compares acceleration response spectra (damping ratio $h=0.05$) of estimated ground motions at JMA Kobe during the Hyogo-ken Nanbu earthquake with various source parameters. We can see that the largest acceleration response may be more than 5 times as large as the smallest one at certain natural periods.

Currently, the ground motion estimation techniques based on fault models have been developed and expected to be practical for seismic design along with surveys of inland active faults. Researches on attenuation relations for near field ground motion using strong motion records due to earthquakes by inland active faults and seismic hazard analyses considering active faults and regional characteristics of seismicity have also been carried out.

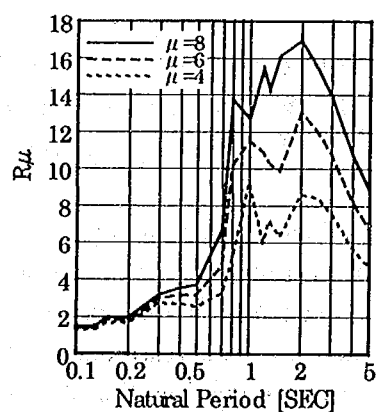
For rational seismic design against very strong ground motions, such as those generated by the Hyogo-ken Nanbu earthquake, energy absorption capacity should be improved by ensuring allowable appropriate displacement ductility. Because structures cannot withstand such ground motions only by strengthening structural members.

In order to evaluate the differences in the inelastic behavior of structures due to ground motion characteristics, strength reduction factor $R\mu$ can be used. $R\mu$ indicates the possible reduction of the strength of a structure when a certain displacement ductility is allowed. $R\mu$ can be calculated for arbitrary natural period and therefore it makes spectrum, namely strength reduction factor spectrum ($R\mu$ spectrum).

Fig. 3.2 shows $R\mu$ spectra for Kaihoku Bridge record and JMA Kobe record. Kaihoku Bridge record is ground motion from the Miyagi-ken Oki Earthquake, inter-plate earthquake, and JMA Kobe record is ground motion from the Hyogo-ken Nanbu earthquake, intra-plate earthquake. Both records were obtained on the stiff ground. The Fig. 3.2 shows that non-linear response of the structure varies depending on the ground motion characteristics.



(a) Kaihoku Bridge Record



(b) JMA Kobe Record

Fig. 3.2 Strength Reduction Factor Spectra

The effects of ground motions on inelastic behavior of structures are studied using strength reduction factor spectra and the ground motion characteristics. The ground motion characteristics affecting the inelastic response of structures should be considered when design

forces and design ground motions are discussed:

4. DEVELOPMENT OF SEISMIC DESIGN METHODOLOGY FOR BRIDGES

4.1 Future Scopes for Development of Seismic Design Methodology

1) Performance-based Design

The use of the performance-based design has been recently suggested in terms of the better-cost performance of construction, the promotion of new technology and the activation of international trade. To clarify the seismic performance demand and satisfy above demands, it is needed to describe seismic performance criteria and limit states of civil engineering infrastructures and establish the performance-based approach for the seismic design. The analytical and experimental verification systems would be also required to evaluate the performance capability of the structures and to prove an applicability of new technology. Moreover, development of social system to accept the performance-based engineering would be also required

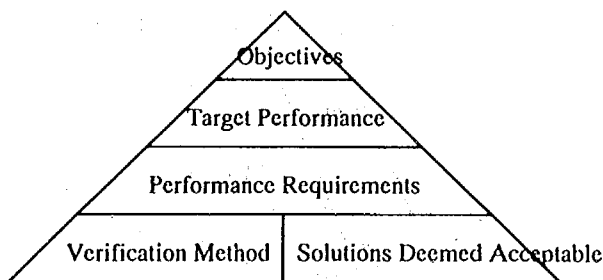


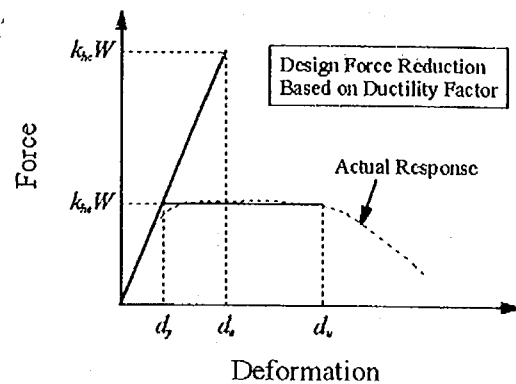
Fig. 4.1 Framework of Performance-based Design

2) Displacement-based Design

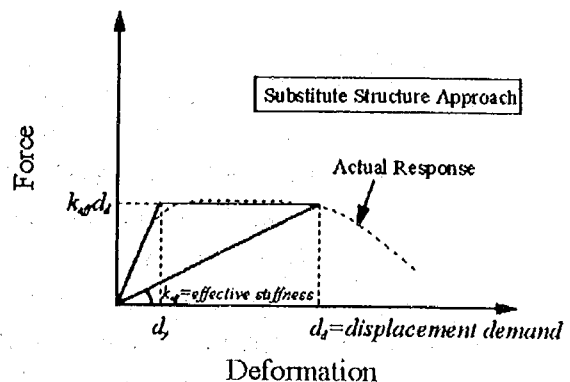
Current seismic design is one of the force-based approaches in nature. Although the current force-based design approach involves allowance for inelastic damage during major earthquakes, it does not directly address the inelastic nature of a system during the earthquakes. Furthermore

it requires the use of the controversial reduction factors which are based on an energy conservation assumption or displacement conservation assumptions. Seismic damage can be easily described by the deformation of the structures so that the alternative design approach using displacement as a reliable indicator of the structural damage.

The displacement-based design is a response spectra based methodology to design a structure to achieve a specified level of displacement in incorporated with the substitute structure approach. The substitute structure approach is a design approach whereby an inelastic system can be modeled using equivalent elastic properties such as the effective stiffness K_{eff} and the effective damping ξ as shown in Fig. 4.2.



(a) Force-Based Design



(b) Displacement-Based Design

Fig. 4.2 Design Concepts of Force-Based and Displacement-Based Design

3) Capacity Design and Reliability-based Design

The capacity design is a design methodology with the concept that the collapse mechanisms are clearly identified. In other words, an appropriate strength difference should be made between the plastic hinges and capacity-protected members. The concept of capacity design is illustrated in Fig. 4.3, where a ring 1 is strong enough to protect its capacity, while a ring 2 has a well-ductile property. In this system, the ring 1 cannot be subjected to its yield force or more and the ring 2 must exhibit an inelastic response when a large force is applied to the system. In order to achieve the capacity design process, the maximum feasible flexural strength for the plastic hinge regions should be adequately evaluated with considering over-strength and variation of materials using reliability based approach.

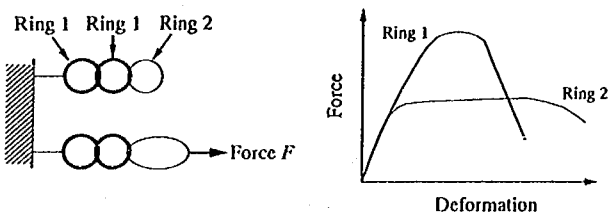


Fig. 4.3 Concept of Capacity Design

4) Strength and Ductility

It is one of options to increase a section or steel percent so as to increase the flexural strength of columns. On the other hand, the significant increase in the flexural strength causes design of a big column and thus results in high construction cost. Therefore, it may be unreasonable to design the column with high flexural strength. However, the design of well-ductile column can reduce a seismic force but causes a large displacement response and then significant residual displacement may be developed after excitation. Furthermore, P-Δ

effects are not ignored if the column exhibits such large inelastic response during the earthquake. Accordingly, an appropriate balance between the flexural strength and ductility should be given to the column to satisfy the seismic performance demand.

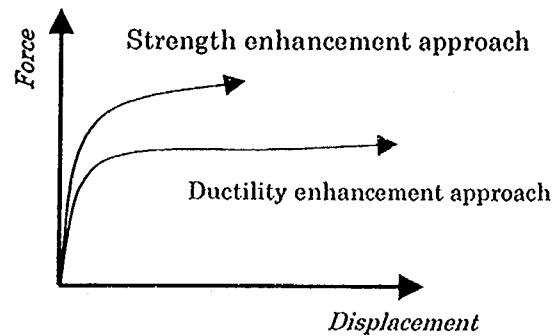


Fig. 4.3 Seismic Design Approach

5) Directional Uncertainty

Seismic forces have been applied to structures in both longitudinal and transverse directions independently, according to the current design code of highway bridges in Japan, except complicated structures such as the long-span bridges. In the United States, on the other hand, the directional uncertainty has been considered in evaluation of the seismic design forces. An

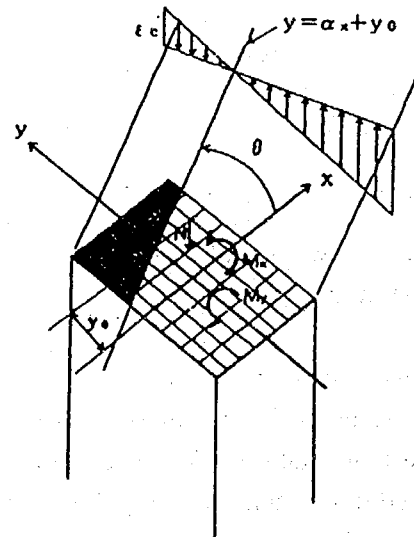


Fig. 4.4 Schematic Image of Bi-axial Bending

additional lateral force corresponding to 30% of the design force in the orthogonal direction is taken into account. Since the actual seismic force acts to the structures in two- or three-dimensional direction, the directional uncertainty effect on the structural response should be investigated.

4.2 Future Research Topics on Development of Evaluation Methodology of Structure Limit States

1) Studies on Failure Mechanisms and Inelastic Response Properties

Lack of the study on the failure mechanisms for members subjected to high axial load, variable



Photo 4.1 Shaking Table Test using Large Scale Unit

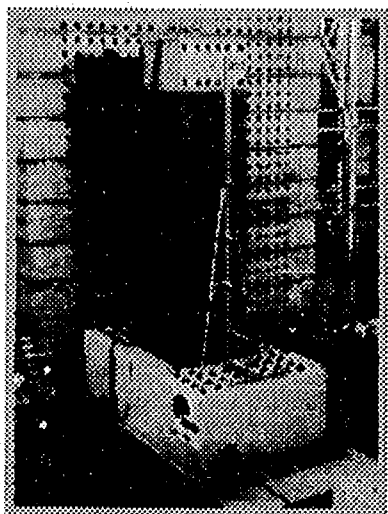


Photo 4.2 Cyclic Loading Test using a Real Scale Specimen

axial load, bi-axial bending during an earthquake is a constraint against developing the seismic design based on the structure limit states. The failure mechanism of overall structure systems and their structural members should be studied through loading tests and shaking table tests with use of large-scaled units.

2) Determination of Limit States

There are several useful limit states of structural response in the seismic design process. In terms of the reinforced concrete members, four limit states may be determined, that is, cracking limit state, yield limit state, spalling limit state and ultimate limit state. The overall structure limit states can also be determined as serviceability limit state, damage-control limit state and survival limit state. These limit states may be defined based on the strength and ductility of the structures. Therefore, it is required to clarify the relation between the strength/ductility response and damage level at the plastic hinge.

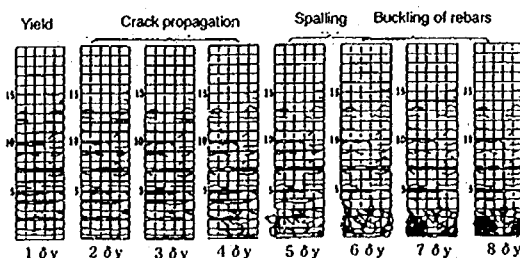


Fig. 4.6 Common Damage Progress of Reinforce Concrete Column

3) Modeling and Analysis

Nonlinear hysteresis models, in which the fundamental dynamic properties such as the stiffness and the damping of structures can be incorporated adequately, are required in the limit state design process with convenient analytical tools applicable to the dynamic response analysis.

4.3 Use of Advanced Technology

By using the interlocking steel with spiral and advanced materials such as the high strength concrete and the high performance steel, the columns would exhibit more ductile behavior than the conventional reinforced concrete structures. Development of new earthquake protective systems such as seismic isolation devices is also expected, to reduce the seismic effects.



Photo 4.3 Carbon Fiber Retrofit Technology (Sakawa Bridge)

5. SEISMIC DESIGN FOR SOIL STRUCTURES

(1) Improvement of the Conventional Pseudo-static Analysis Procedure

The conventional pseudo-static analysis procedure which is based on the combined use of the limit equilibrium theory and the seismic coefficient method is considered the out-of-date technique. However, there do not exist alternative procedures to be used in the field practice with satisfactory reliability. Thus, the conventional procedure should be used until more rational and practical alternatives are

developed. The use of the pseudo-static analysis procedure, which yields only a factor of safety, is justified only if there exists any correlation between the safety factor and the extent of deformation. Fig. 5.1 shows the correlation between the peak ground acceleration and the seismic coefficient to be used in the circular sliding method, which was obtained by back-analysis of damaged/non-damaged case records. The dotted line in the figure well separates both cases. This may indicate a potential of the method to predict the extent of deformation, although further study is needed to verify the procedure.

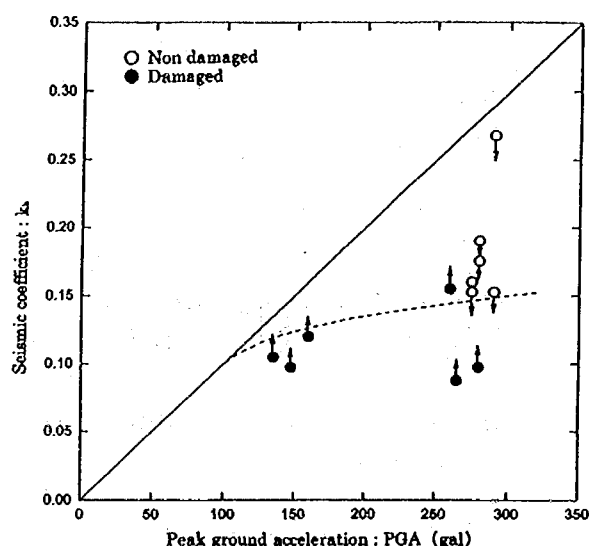


Fig.5.1 Correlation between the peak ground acceleration and the seismic coefficient to be used in the circular sliding method

(2) Development of the Deformation Analysis

Prediction of earthquake-induced deformation is usually needed when the very strong earthquake is considered in the design, as in the case of the other structures. Several methods which can predict deformation have been proposed so far, but none of the methods has reached in the level of wide practical use. Among these, the most rational and potential

method would be the elasto-plastic finite element analysis method. In order to introduce the procedure into practice, more research work should be done to verify the capability through a number of case studies.

Fig.5.2 shows an example result of such case study using the elasto-plastic finite element method for a river bank which was damaged by the Hyogo-ken Nanbu earthquake. The predicted crest settlement was 2.9 m, while the measured one was 2.7 m. Although this example shows a very good agreement, if this type of analyses is established in the level of practical use, introduction of performance-based design into soil structures would be realized.

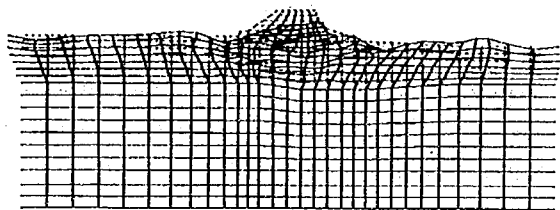


Fig.5.2 Result of the simulation, at Yodo river left bank, Torishima

(3) Development of the Rational Countermeasures Against Earthquakes

A wide variety of countermeasures such as ground improvements and soil reinforcements have been proposed to date. But the effectiveness of these countermeasures under very strong earthquake has not been evaluated quantitatively, and consequently the seismic design procedures have not yet been established. Thus, further research is needed. In particular, prediction procedures of permanent deformation of soil structures with any countermeasure will play a very important role in elaborating the design methods.

Another aspect is that the cost of seismic countermeasures for the existing structures is expensive as compared with the construction cost of the soil structure itself. The cost may be

sometimes as much as or more than that of the soil structure, unlike in the case of reinforcement of reinforced concrete or steel structures. Therefore to make it economical, a method or procedure which aims at making the damage to be within the allowable limit rather than preventing the damage has to be developed.

(4) Development of the Simple and Practical Soil Surveying Methods

As was mentioned before, seismic performance of soil structures is strongly affected by the ground conditions. Therefore, the ground surveying and evaluation of the data play an important role in predicting seismic stability of soil structures. On the other hand, the soil structures are typical as embankments are usually large in size and in length. To grasp the soil profile along the soil structure, a number of sounding must be executed, resulting in very expensive cost. The standard penetration test has been widely used to identify the soil profile and to assess liquefaction potential of the soils. However, this is not cost-effective. One of the potential sounding techniques which can substitute the SPT and are more economical would be the piezometric cone penetration test. The advantage of this test is listed below as compared with the standard penetration test.

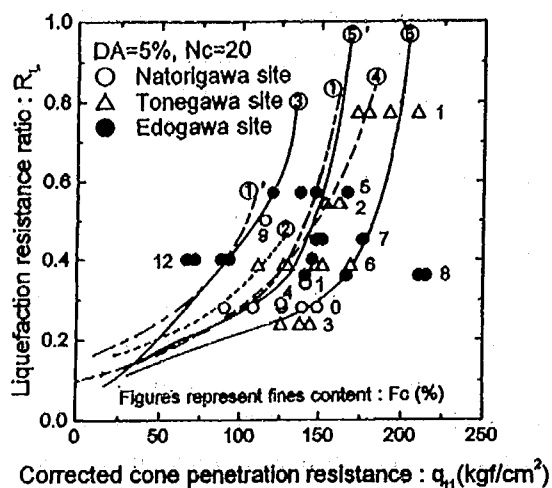
- cost for a unit length is about one third
- continuous data can be acquired along the vertical direction

Defects are as follows:

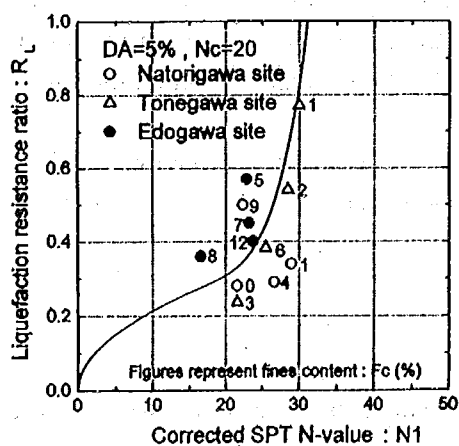
- as the soil sample is not retrieved, the soil type must be estimated from the measured value
- it cannot be penetrated into the gravelly soil, etc.

Fig.5.3(a) shows the relationship between the

cone tip resistance and the liquefaction resistance that was obtained by the field tests. Result of the standard penetration test is also presented in Fig. 5.5(b) for comparison. Judging from these two figures, the cone penetration test has almost the same accuracy as the standard penetration test. Reliability of the testing method would be enhanced by further accumulating the field data.



(a) cone penetration test



(b) standard penetration test

Fig.5.3 Relationship between the penetration resistance and the liquefaction resistance

6. CONCLUSIONS

- (1) As a rational methodology to determine the seismic potential of civil infrastructure, the new concepts of the realized performance matrix (RPM) and the IOC curve was proposed. Also, the example of optimization of the earthquake resistant investment was introduced. Such approaches from the planning point of view will become important to thrust the earthquake disaster prevention measures with the consensus in the near future.
- (2) The researches regarding the rational methods to determine the very strong design ground motion were introduced. The estimation of near field ground motions makes it feasible to take region specific active faults into account in the process to determine the very strong design ground motion. The strength reduction factor spectrum can be used to evaluate inelastic behavior of structures for rational seismic design against such very strong ground motion.
- (3) Future scopes for development of seismic design methodology were presented and the future research needs were also discussed. Among all the research topics stated in this paper, development of the performance-based design method is one of the needed projects to be finished within a few years in Japan. The five-year project was already launched in 1998 to establish the performance-based seismic design method and to improve the related performance evaluation methods.
- (4) For most of the soil structures typically as soil embankments, seismic design had not

been mandatory until the Hyogo-ken Nanbu earthquake took place. But now, very strong earthquake should be considered in the design of very important structures. Major researches that need to be focused on would be development of the new design procedure based on the allowable deformation, improvement of the conventional pseudo-static analysis procedure and development of cost-effective countermeasures.

Resistant Design of Bridges, Proc. of the First Japan-Italy Workshop on Seismic Design of Bridges, 1995

Matsuo, M. and T. Tsutsumi: Evaluation of Cone Penetration Testing as an in situ Liquefaction Resistance Measurement, Proc. 1st Intl. Conf. On Site Characterization-ISC'98/ Atlanta/ Georgia/ USA/ 19-22 April 1998, pp. 1309-1315.

REFERENCES

Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges, U.S. DOT, Federal Highway Administration, May 1995

VISION 2000 - Performance Based Seismic Engineering of Buildings, Structural Engineers Association of California Vision 2000 Committee, April 1995

Tamura, K. and Nakao, Y.: Strong ground motion estimation based on source modeling and semi-empirical Green's function technique, 14th U.S.-Japan Bridge Engineering Workshop, UJNR, 1998.

Miranda, E. and Bertero, V. V.: Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design, Earthquake Spectra, Vol. 10, 357-379, 1994.

M.J.N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi: Seismic Design and Retrofit of Bridges, 1996

CALTRANS: Bridges Design Specifications, 1990

Transit New Zealand: Bridge Manual, 1995

P. E. Pinto: Eurocode 8, Part 2, Earthquake

1. The first part of the document is a letter from the President of the United States to the Congress, dated January 3, 1862.

2. The second part is a report from the Secretary of the Interior, dated January 10, 1862, on the subject of the land grant to the State of California.

3. The third part is a report from the Secretary of the Interior, dated January 10, 1862, on the subject of the land grant to the State of California.

4. The fourth part is a report from the Secretary of the Interior, dated January 10, 1862, on the subject of the land grant to the State of California.

5. The fifth part is a report from the Secretary of the Interior, dated January 10, 1862, on the subject of the land grant to the State of California.

6. The sixth part is a report from the Secretary of the Interior, dated January 10, 1862, on the subject of the land grant to the State of California.

7. The seventh part is a report from the Secretary of the Interior, dated January 10, 1862, on the subject of the land grant to the State of California.

8. The eighth part is a report from the Secretary of the Interior, dated January 10, 1862, on the subject of the land grant to the State of California.

9. The ninth part is a report from the Secretary of the Interior, dated January 10, 1862, on the subject of the land grant to the State of California.

10. The tenth part is a report from the Secretary of the Interior, dated January 10, 1862, on the subject of the land grant to the State of California.

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31回合同部会
(1999. 5. 11～14、Tsukuba-shi , Ibaraki-ken , Japan)

SEISMIC INFORMATION SYSTEM FOR NATIONAL LAND MANAGEMENT

国土管理に資する地震防災情報システム

杉田秀樹¹⁾、野崎智文²⁾

本論文は、建設省により提唱されている国土管理(national land management: NLM)の基本的な考え方を紹介し、特に地震防災と国土管理の関連に留意しつつ、これらを支援する地震防災情報システムの機能とそれに利用可能な各種の技術について解説するものである。

ここで国土管理とは、効率的で安全な国民の生活を確保するために必要な課題(mission)を解決する活動(tasks)であるとしている(図1)。このうち災害対策は、事前のリスクマネジメントと災害発生時のクライシスマネジメントの二つのモードが存在するという特徴がある(図2)。災害対策の中でも、地震防災は、その発生確率の低さと被害の広域性から特に特徴がある。地震防災のための活動(tasks)を実現する方策(method)としては、広域モニタリング、情報収集、情報分析、意志決定の4つがありそれらは震災対策体制において実行される。地震防災情報システム(SIS)は、情報システム等の機能を活用し、この体制活動を支援するものと位置付けられる(図3)。

広域モニタリング(wide area monitoring: WAM)技術としては、特に①人工衛星からの画像・データによる事前のリスク把握と地震発生時の被害状況把握、②GPS や光ファイバケーブル、地震計などのセンサーによる異常検知と状況把握について整理した。また、情報収集(data collection: DAC)技術としては、被害情報の収集を支援するモバイルギアなどの技術および情報収集活動を効率化する位置情報のGPSによる収集技術等をまとめた。収集された情報は、相互に重畳して地図画面に表示され、あるいは条件検索されるなどの分析によって、対策上有効な情報となる。これらは情報分析(data analyze: DAN)技術に分類される。さらに、得られた情報に基づいて、二地点間の最短ルートを見出したり、対策箇所のプライオリティをつけたり、資機材等の最適な配分を行う必要がある。意志決定支援(decision making support: DMS)技術は、このような震災対策における意志決定をサポートする技術である。

SIS は、情報の重複を避け、情報や各サブシステムの維持管理を容易にし、技術革新に応じて随時拡張可能なものでなければならない。そこで、SIS においては、各サブシステムのハードウェア、ソフトウェアに関わらず情報が共有されることが望ましい。そのためには、まず震災対策活動の内容を整理し、そこで扱われる情報を整理した上で、情報の構造を明確にし、それらを共有すべきである。このようなシステムあるいは情報の記述方法や、実際の情報共有技術の例として、UML (unified modeling language)、XML (extensible markup language)が挙げられる。

なお、現在、土木研究所において、上記のような SIS のアーキテクチャや個別の技術を「地震防災情報システム整備マニュアル(案)」としてまとめているところである。

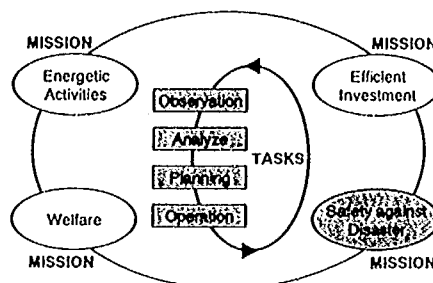


図1 NLM の概念

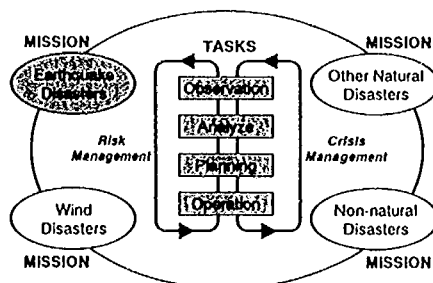


図2 NLM としての防災

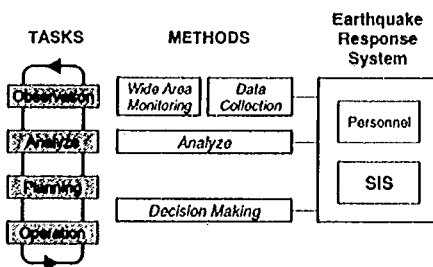


図3 SIS の位置づけ

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、〒305-0804 茨城県つくば市旭一番

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、〒305-0804 茨城県つくば市旭一番

SEISMIC INFORMATION SYSTEM FOR NATIONAL LAND MANAGEMENT

by

SUGITA Hideki¹⁾, NOZAKI Tomofumi²⁾

ABSTRACT

This paper introduces the basic concept of National Land Management that is advocated by Ministry of Construction in Japan recently. By especially concentrating on the relation between the earthquake disaster prevention and the National Land Management concept, the function and the promising technologies of the seismic information system is explained. The technologies include the advanced ones such as the high-resolution image from the artificial satellites and GIS. Besides those hardware/software technologies, the importance of the system architecture for data sharing is considered. Those topics for SIS are being organized as a manual by PWRI, whose structure is also explained.

KEY WORDS: Seismic Information System
Earthquake Disaster Prevention
Information Sharing

1. INTRODUCTION

To secure the energetic activities and to achieve the safety of the country, construction of civil infrastructures has been enforced in Japan. However, considering the recent circumstances such as change of natural environment and the experiences of severe natural disasters, only constructing facilities is not sufficient. To cope with those wide area problems or emergency situations, management for national land including observation and planning as well as construction is necessary. This concept is proposed as "National Land Management"

(NLM) by Ministry of Construction (MOC).

As it concerns many advanced technologies, MOC has launched the new four-year project: "Development of Advanced Technologies for National Land Management" since fiscal year of 1999 as one of the Comprehensive Research Development Projects. One of its main sub projects is the risk management information system by utilizing the recent advanced technologies including the remote sensing from the artificial satellites and GIS.

However, there is not the completely united view or concept for NLM yet. Thus, first this paper shows one of the understandings of NLM from the viewpoint of earthquake disaster prevention. Second, it concentrates on the seismic information system (SIS) that realizes NLM-based earthquake disaster prevention, and lastly, state-of-the-art of the technologies which can be applied for SIS.

2. NATIONAL LAND MANAGEMENT AND EARTHQUAKE DISASTER PREVENTION

In this paper, NLM is defined as the combined tasks to cope with the missions to secure and improve the efficiency and the safety of 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

people's life, where the various measures are utilized as well as the construction measures. General understanding of NLM is shown on Fig. 2.1.

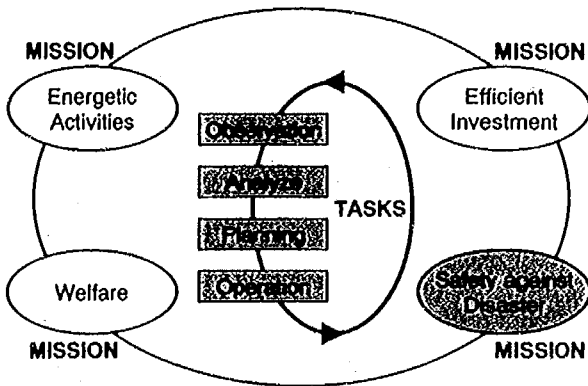


Fig. 2.1 General understanding of NLM

To cope with the missions, usually the four tasks are executed. Those tasks, observation, analyze, planning and operation are common to the activities of people and organization.

Disaster prevention is one of the important missions of NLM. There are two distinct management methods for the disaster prevention as shown on Fig. 2.2.

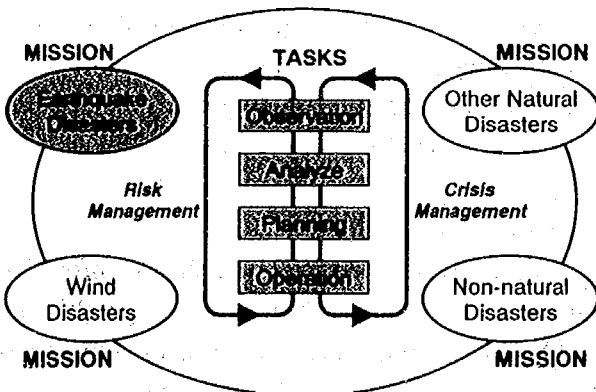


Fig. 2.2 Disaster prevention for NLM

One is the risk management where the risk means the expected loss or damage with uncertainty or chance of occurrence. Therefore, the risk management aims to minimize the

expected risk based on the uncertain or probabilistic information before the disaster. The other is the crisis management where the crisis means the emergency situation after the occurrence of the disaster. Therefore the crisis management aim to localize and minimize the negative effects of the disaster once it occurs.

The earthquake disaster prevention is particular because of several characteristics: e.g., extremely small chance of occurrence and large amount of damage once it occurs, and demand for especially quick response immediately after the earthquake. In other words, the earthquake disaster prevention can be said that it deals with the very much specific aspect of NLM.

To cope with the difficulties of the earthquake disaster prevention, several methods are required to accomplish the four tasks of NLM.

- wide-area monitoring to acquire the overall information both before and after the earthquake
- data collection to acquire data at limited sites for detailed information of phenomena and state of facilities before/ after the earthquake
- analyze to aggregate, filter and overlay the data to extract the useful information for the planning and the response
- decision making support to provide information for choosing alternatives of planning and operation through more complicated execution than analyze

In reality, the methods above are executed by the personnel and the information system that organize the earthquake response system to cope with the earthquake disaster. The seismic information system (SIS) is expected to improve the speed/ efficiency of the earthquake resistant actions¹⁾²⁾(Fig. 2.3).

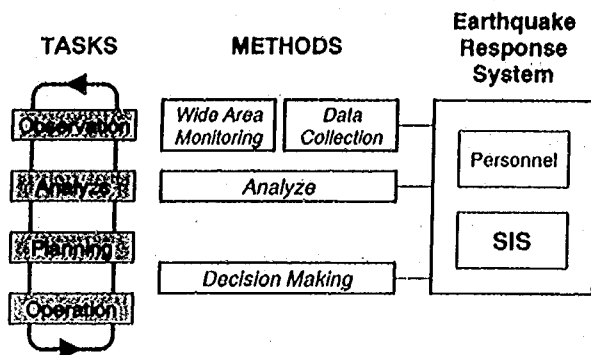


Fig. 2.3 Earthquake disaster prevention for NLM

The examples of the technologies regarding SIS are, the high resolution image data from artificial satellites, Global Positioning System (GPS) and Geographical Information System (GIS). Also, hi-performance personal computers (PCs) and network technologies are the key technologies. The state-of-the-art of those technologies are introduced in the sections from 3 to 6. Besides those element technologies, the system architecture especially concerning to data sharing is important to SIS, and is explained in section 7. From the viewpoint of the extensibility and efficient information sharing, Public Works Research Institute (PWRI) is preparing the draft construction manual of SIS, which is briefly introduced in section 8.

3. MONITORING TECHNOLOGY FOR WIDE AREA

Monitoring the state and the phenomena of the national land is the fundamental of NLM (Fig. 3.1), and it is also useful for SIS. Objectives of the wide area monitoring (WAM) are listed as follows.

- risk survey : detecting active fault, assessing landslide risks, monitoring crustal deformation, investigating risk factors such as accumulation of population and properties

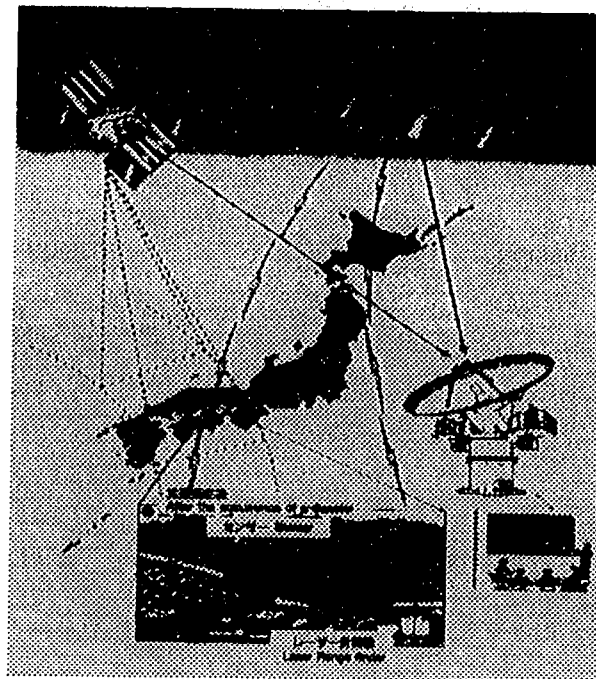


Fig. 3.1 Technologies for wide area monitoring and data collection

- event detection : detection of earthquake occurrence and direct/ indirect damage caused by earthquake
- damage state survey : surveying distribution of fire, facilities' damage and other disasters caused by earthquake

They are characterized by facts that the information comes from wide spread area and that it must be treated in extremely short time. Several advanced technologies can be applied to realize the objectives above.

(1) Artificial Satellites

As data from artificial satellites provides information of wide area from very high altitude, it fits to the wide area monitoring objective. Usually the data is provided as the images of surface that represents the surface topography or vegetation and the underground formation and so on. The satellite remote sensing is characterized by the orbit of the platform and the type of the sensor (Fig. 3.2).

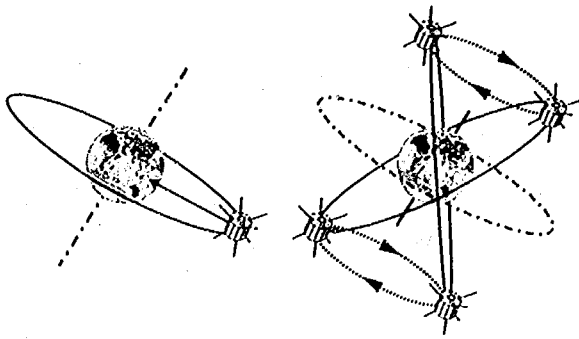


Fig. 3.2 Types of satellite orbits: geostationary orbit and sub-recurrent orbit

Because the height of the geostationary orbit is approximately 36,000 km, the resolution of the surface image cannot be much improved. For the monitoring satellites the sub-recurrent orbit with smaller height on which the satellite returns to the same position at several days interval is usually chosen.

The another characteristic is the types of the sensor equipped on the platform. The high-resolution images of the multi band sensors provide various kinds of information such as distribution of the temperature and the lineament as a clue to the active fault. The Synthetic Aperture Radar (SAR) can give the surface topography including the detailed shape of facilities.

The satellite data can be used following objectives.

- risk survey : detecting active fault by checking the lineament, surveying landslide risk based on the multi band images
- damage state survey : to detect and to survey the facilities' damage, liquefaction and landslides, fire and the secondary induced state such as traffic congestion.

Fig. 3.3 indicates the images of the same site

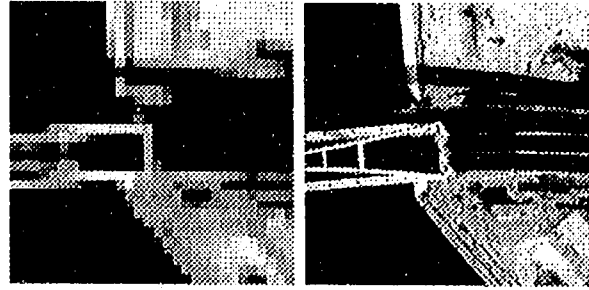


Fig. 3.3 Images: resolution 10m/ 1m

with different resolutions. Even the shape of large structure such as a bridge is hardly recognized for the resolution of 10m. On the other hand, from the high resolution image one can distinguish objects and phenomena as follows.

- structural damage in horizontal structural damage
- grand failure in horizontal direction such as ground flow and land slide
- signs of possible damages or failure in vertical direction

As the satellites with sub-recurrent orbit have their recurrent time, it may take several hours or days for them to take the image of the desired point. One must take the time for the image transaction, database control and the file transfer into account when he/she plans to use the satellite images to the emergency response.

(2) Sensors for Crisis Management

The rapid damage/ disaster detection is necessary for the efficient crisis management. Although installing sensors may cost more than WAM, it is still useful if one must detect the damage of the important facilities.

(a) GPS

Positioning a fixed point by GPS relative positioning is comparatively accurate (several centimeters for some products) than the point positioning, so one can monitor the displacement of the ground surface to detect the

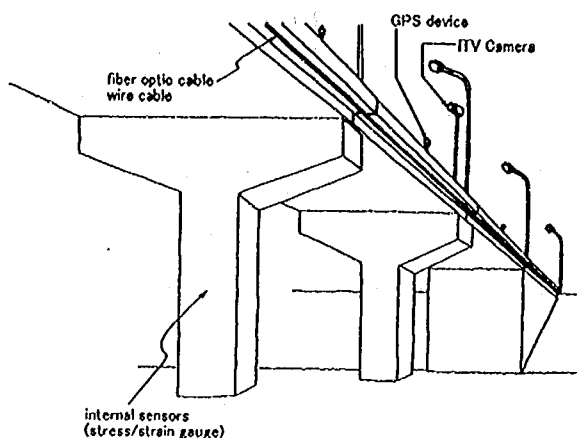


Fig. 3.4 Sensors for WAM

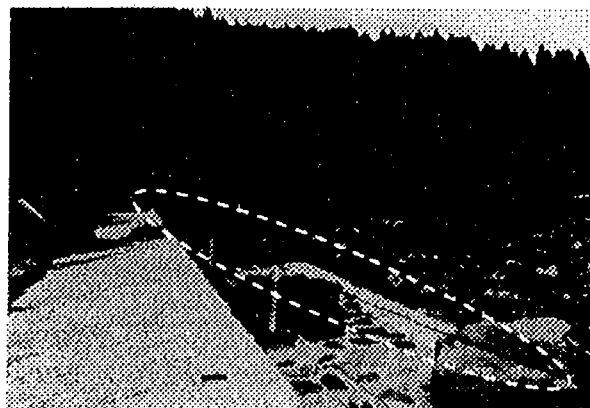


Fig. 3.5 Wire sensors installed at Sabo dam to detect debris flow (Erosion and Sediment Control Division, PWRI)

landslides and other earth disasters. Thus, GPS can be applied both for accurate risk monitoring before the earthquake and for the real-time detection of large deformation for the crisis management.

(b) Fiber optic cable

The fiber optic cable also can be used as the sensor to detect the unusual displacement/deformation of the facilities. While GPS can monitor the positions of the dispersed points, the cable sensor can provide the location along the cable where the deformation exists.

(c) Accelerograph

(a) and (b) are the sensors to monitor the time dependent phenomena or to detect the unusual

events. However, installing sensors to all the facilities will not be economically efficient. MOC has installed the accelerograph network with about 700 accelerographs so that the numerical data such as maximum accelerations are aggregated immediately after the earthquake and that they can help counter-earthquake response activities. The data cannot only be used for the reference, but also be used for other calculations such as the real-time damage estimation.

The image of the sensors installed at the bridge site is shown on Fig. 3.4. Such sensors are

Table 3.1 WAM technologies

	geostationary satellite	sub-recurrent satellite	GPS	fiber optic cable	accelerograph
risk assessment					
active fault	X	O	X	X	Δ
crustal movement	X	Δ	O	Δ	X
landslide risk	X	Δ	X	X	X
social state	O	O	X	X	X
crisis management					
earthquake occurrence	X	X	X	X	O
facility damage	X	Δ	O	O	Δ

O : level of practical use

D : potentially practical with R/D

X : not level of practical use/ no relation

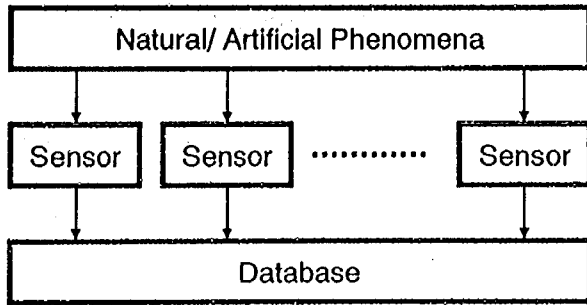


Fig. 3.6 WAM subsystems

already utilized for the response to other disasters including erosion and sediment control²⁾³⁾. Fig. 3.5 shows an example of the wire sensor installation to detect the debris flow.

The input of WAM system is various phenomena and they are transformed to the electromagnetic signals by the sensors, and stored to the database with certain format. The data are stored to the database system to be shared by the subsystems of SIS (Fig. 3.6). Also, efficiency of WAM technologies to the earthquake risk/crisis management is summarized on Table 3.1.

4. DATA COLLECTION TECHNOLOGY

While the data are required before or immediately after the earthquake with WAM, more detailed information of the facilities' damage is quite useful to manage the efficient counter-earthquake response. Also the information about the state of response activities is necessary once it starts.

The data sent from investigation teams may take various forms: e.g., text, photograph, image and numerical data. They are categorized to two groups: that is, the investigation information and the support information. Here, the system to collect these kinds of data is called the data collection (DAC) system.

The investigation information includes the damage data of facilities, and is directly used for the following earthquake response such as immediate restoration and rehabilitation. On the other hand, the supporting information is used to know the state of response activities, which includes the position of investigation teams and helicopters.

The technologies used for the data collection include the mobile terminal to input the text and numeric data, digital still camera, camcorder and the GPS device. Recent progress of the market of mobile gears may have installation of this type equipment easier (Fig. 4.1). As for the GPS, because the point positioning has more than several tenth meters, the relative positioning technologies that need the extra communication system will be appropriate (Fig. 4.2).

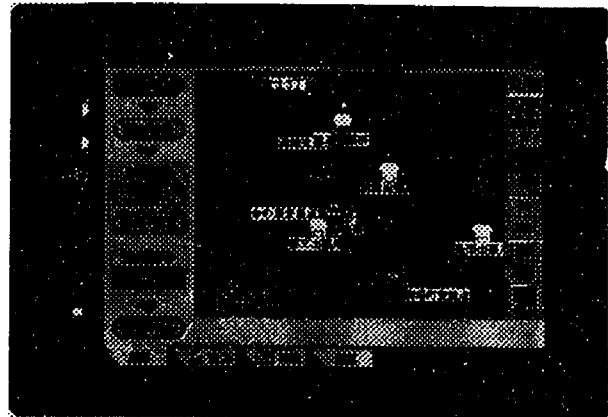


Fig. 4.1 Mobile terminal for investigation (Chubu Construction Bureau)

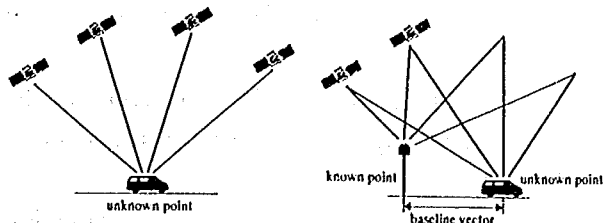


Fig. 4.2 GPS positioning: point positioning/relative positioning

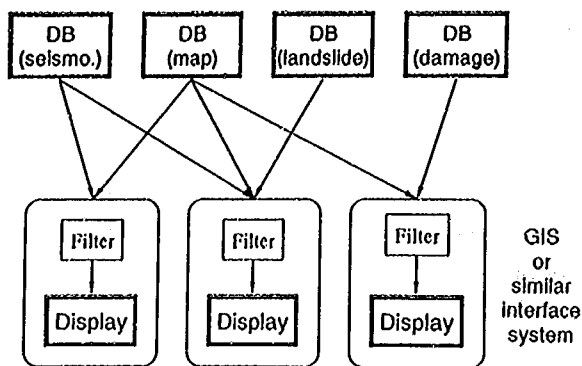


Fig. 4.3 DAN subsystems

The collected data are stored to the database just as same manner as the wide area monitoring (Fig. 4.3).

5. ANALYSING DISASTER CONDITION

As the data collected by DAC system are of the objects that have their own positions, attributes and the times of incidents, they are best to be treated on GIS system. With its ready-to-use functions such as route searching and buffering functions, GIS can be a good interface not only for the display but also for the analyzing equipment for investigation data and the investigation supporting.

The data that monitored, stored and collected are not very much useful until they are processed and combined together. Followings are the several examples of such data analyze.

- to analyze the image data: for example, survey active faults by emphasizing lineament with image filtering
- to clarify the seismic risk by overlaying the hazard data and the socioeconomic data to clarify the risk
- to check the emergency investigation activities by overlaying the damage map and the investigation teams' GPS data
- to search, sort and filter the facilities with

specific keys such as types, routes and design conditions

Those data processing with general algorithms are defined as the data analyze (DAN) here, which can be realized with the stored data monitored or collected and with the general GIS or similar interface system. Here, such function that just displays the aggregated data on the CRT or other devices is included in this data analyze function. Fig. 5.1 shows the image of the data analyze (and display). Based on the databases of accelerograph observation, maps, landslide risk and facility damage, each terminal with filtering and displaying function can aggregate, filter, compose and display that each user wants to know.

6. DECISION MAKING SUPPORT

(1) Decision Making for Risk/Crisis Management

To support the decision making regarding the earthquake risk/ crisis management, more specific functions than simple data processing techniques are required²⁾. Examples of such function, decision making support (DMS), are

- earthquake disaster loss estimation including

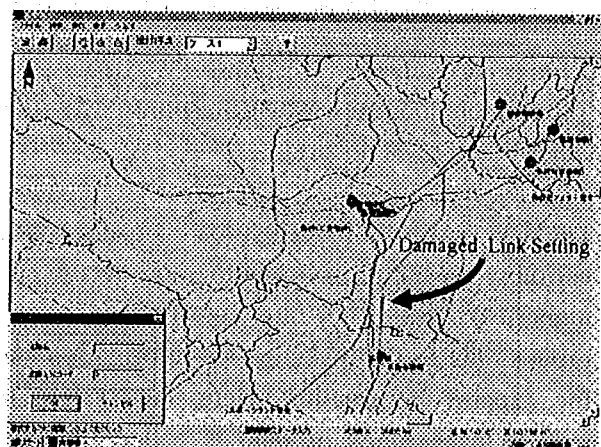


Fig. 6.1 Example of socioeconomic effect loss estimation system (PWRI)

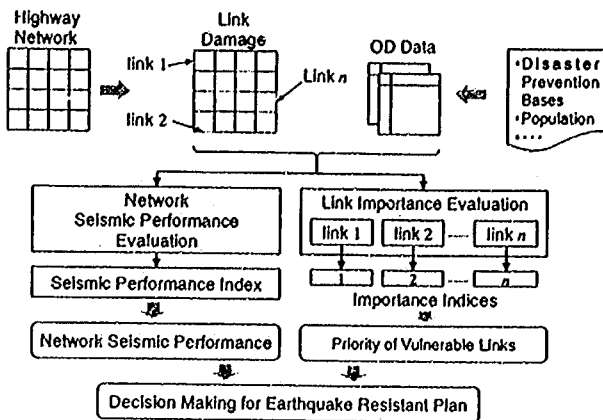


Fig. 6.2 Example of retrofit prioritizing

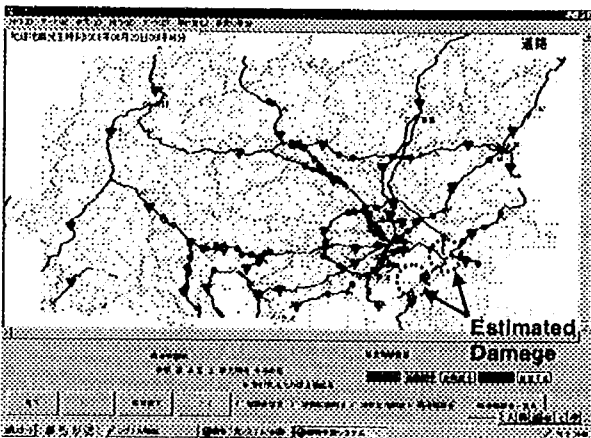


Fig. 6.3 Example of real-time damage estimation (PWRI)

direct/ indirect economic losses and other effects⁴⁾ (Fig. 6.1)

- prioritization for the earthquake resistant measures such as retrofit especially regarding the civil infrastructure as a total system such as network (Fig. 6.2)
- real-time damage estimation for the rough understanding of the severe damage possibility⁵⁾⁶⁾ (Fig. 6.3)
- route-searching for determining detours and emergency transport routes
- optimization of dispatching personnel, distributing machines and materials for the restoration and rehabilitation

The main bodies of those technologies are the

execution modules with input data given by the databases. The calculated results are stored to the databases and referred and analyzed by each terminal. Each subsystem uses the input data, and stores its results to the database to be referred by DAN subsystems.

(2) Decision Making for Contingency Planning

Besides the application of SIS to the risk/ crisis management, examining if the SIS and the counter-earthquake system including its work correctly under contingent circumstances is important for the efficiency of SIS. First, as SIS in reality is operated by personnel, the counter-earthquake activity training is useful to know potential problems. In addition, examining the performance of the responding action by simulating various contingent state is important to compensate the limited chance of real training. Such simulation function is also included in SIS²⁾.

7. DATA SHARING AND EXTENSIBILITY

Even though there are many useful elemental technologies, the efficiency of the system varies depending on how it is organized. Followings are possible problems.

- if each subsystem is isolated, there are duplication of the data (*data duplication problem*)
- if SIS is developed as the single and huge system, maintenance of the data and the subsystems is complex (*maintenance problem*), and it is difficult to revise the subsystems when new technologies are obtained (*extensibility problem*).

One of the solutions to avoid those problems is to clarify the structures and the formats of the data dealt with in SIS so that each subsystem

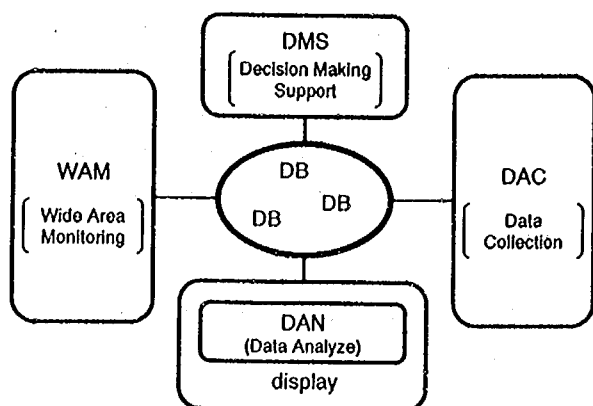


Fig. 7.1 Data sharing architecture

can understand how they are treated²⁾. Once the data are shared in SIS, the former problems are solved and it acquires the important advantages.

- the system can increase its functions satisfying the new demand.
- the system can utilize the newest technologies at each time.

To obtain these advantages, first one must examine the activities and clarify the information dealt with in the system. Next, the structure of the information needs to be organized so that each subsystem can share the data (Fig. 7.1).

Recent movements in the information technology area coincide the concept proposed here. One is the 'unified modeling language' (UML) for the object oriented analyze and design. As it is for the programmers', the personnel of earthquake response system do not necessarily use it. However, it suggest that analyzing and designing the complex system needs to clarify the information structures and share them. The other example is 'extensible markup language' (XML) which is the unified method to share the data on the network regardless of the kind of hardware and software. This technology will be a candidate to develop an extensible, data-shared SIS.

8. MANUAL

As a guideline for the construction of efficient SISs, PWRI is developing the 'Construction Manual for Seismic Information System (draft)'. Instead that the conventional manuals of this kind usually focus on the elemental technologies, this manual also emphasizes the system architecture for extensible and data-shared system. The contents are shown below.

1. General
 - 1.1 Objective
 - 1.2 Structure of this Manual
 - 1.3 Terminology
2. Fundamental Philosophy of SIS Construction
3. Requirements of SIS in Terms of Counter-earthquake Activities
 - 3.1 Stages of Counter-earthquake Activities
 - 3.2 Information and Technologies for Counter-earthquake Activities
 - 3.3 Information and Technologies to Maintain Counter-earthquake System
4. Technologies of SIS
 - 4.1 Common Base Technologies
 - 4.2 Detection Technologies
 - 4.3 Communication Technologies
 - 4.4 Technologies for Display and Analysis
 - 4.5 Decision Making Support Technologies
5. Safety of SIS
 - 5.1 Reliability of SIS
 - 5.2 Security of SIS
6. Preliminary Design Example of SIS
 - 6.1 Target Determination
 - 6.2 Framework Design
 - 6.3 Design of Common Parts
 - 6.4 Design of Individual System
 - 6.5 Schedule to Improve SIS

9. CONCLUSIONS

- (1) In this paper, first the concept of NLM is

reviewed, and the NLM for disaster prevention is carefully analyzed focusing on the tasks: i.e., observation, analyze, planning and operation. Then, focusing on the earthquake disaster prevention the methods to accomplish the tasks are examined.

- (2) SIS is defined as the information/communication systems that applies and supports earthquake disaster prevention related methods,

- wide area monitoring
- data collection
- analyze
- decision making

Also the state-of-the-art of its technological developments and their trends are examined. The points of technological developments of SIS are summarized as follows.

- Utilization of the data from satellites and GPS positioning for the wide area monitoring (WAM)
- Installation of fiber optic cables and GPS devices for the data collection (DAC)
- Application of GIS for the data analyze (DAN)
- Subsystem technologies including loss estimation, prioritization and optimization for the decision making support (DMS)
- Securing the data sharing and extensibility

- (3) After the Hyogo-ken Nanbu earthquake, many public bodies and private sectors have developed the seismic information system. However, many of them are isolated in planning and development with each other. The SISs do not fully operate and support the earthquake response system until they and their subsystems are connected efficiently with each other. Thus, SISs need

to be developed with common concept to share the information and to operate cooperatively.

REFERENCES

- 1) KAWASHIMA Kazuhiko, TOKIDA Kenichi, SUGITA Hideki, NAKAJIMA Tomoru and MATSUMOTO Hideo: Guidelines for Disaster Information Systems for Important Infra-structures, Proceedings of the 25th Joint Meeting of the U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, pp. 475-486, 1993.5
- 2) SUGITA Hideki, NOZAKI Tomofumi: Seismic Information System for Civil Infrastructures, Proceedings of the 30th Joint Meeting of the U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, pp. 306-318, 1998.5
- 3) YAMADA Takashi, MINSMI Noriyuki, MIZUNO Hideaki: Developing of Debris Flows Predictions and Detection Technology - Their Future Issues, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 50, No. 5
- 4) 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, 1997.11
- 5) ODAGIRI Shun-etsu, SUGITA Hideki, KANEKO Masahiro, NOZAKI Tomofumi and HAMADA Tadashi: Development of Real-time Information System for M.O.C, Proceedings of the 30th Joint Meeting of the U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, pp. 425-435, 1997.5
- 6) 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, 1997.11

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

...the ...
...the ...
...the ...

第12回地震工学世界会議 (2000. 1. 30～2. 4、Auckland, New Zealand)

**DEVELOPMENT OF URGENT EARTHQUAKE
DAMAGE ESTIMATION SYSTEM
FOR ROAD FACILITIES**

DEVELOPMENT OF URGENT EARTHQUAKE DAMAGE ESTIMATION SYSTEM FOR ROAD FACILITIES

Hideki SUGITA¹, Masahiro KANEKO² and Tadashi HAMADA³

ABSTRACT

Earthquake damage of highway facilities does not only reduce their functions but affects the socioeconomic 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. Many systems have been implemented for the emergency response activities while they give only the earthquake ground motion data. Such information is useful to grasp the facilities' damage, however still they are indirect information from the viewpoint of facilities' damage and their estimates are dependent on individual's intuition. Given their direct information, the areas and facilities to which investigation teams should be concentrated and the response activities can be planned more efficiently based on the objective data.

This paper presents a system to estimate the damage on highway facilities immediately after an earthquake (SATURN: Seismic Assessment Tool for Urgent Response and Notification). The system receives the earthquake ground motion data from the accelerographs, and calculates the estimations of ground motion distribution and the facility damage. The plural methods are implemented intensively for the systematic execution in a short time immediately after an earthquake, and their logic are explained here. The characteristic of the system is that it does not only give the ground motion information such as maximum acceleration A_{max} and the spectrum intensity SI but also the estimated risk of facility damage: i.e., possibilities of ground liquefaction and possibilities of highway bridge damage. Although the estimates are rough due to the limit of execution time, such spontaneous overall information is quite useful for the personnel in charge of emergency response.

The seismographs network for emergency response activity and the prototype SATURN have been implemented in the area including Metropolitan Tokyo, whose example of past execution is also introduced in this paper.

Keywords; *damage estimation, ground liquefaction, highway bridge, accelerographs network, emergency activity*

¹ *Earthquake Disaster Prevention Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan*
Email: sugita@pwri.go.jp

² Email: kaneko@pwri.go.jp

³ Email: tadashi-hamada@hs.moc.go.jp

DEVELOPMENT OF URGENT EARTHQUAKE DAMAGE ESTIMATION SYSTEM FOR ROAD FACILITIES

Hideki SUGITA¹, Masahiro KANEKO² and Tadashi HAMADA³

SUMMARY

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

This paper presents an Urgent 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.

1. 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 early as possible.

1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake was a first destructive earthquake attacked a highly integrated urban area in Japan [2] . Based on that 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 Grasping Damage Outline at Headquarter

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

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

¹ Earthquake Disaster Prevention Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan
Email: sugita@pwri.go.jp

² Email: kaneko@pwri.go.jp

³ Email: tadashi-hamada@hs.moc.go.jp

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.

2. URGENT DAMAGE ESTIMATION SYSTEM (SATURN)

Based on the past disaster experiences, development of information systems to support emergency activities has been conducted in PWRI [3] [4]. The Urgent Damage Estimation System (SATURN: Seismic Assessment Tool for Urgent Response and Notification) is developed as an essential tool for grasping damage outline automatically immediately after an earthquake by providing rough estimations on damage states and damage distributions of road facilities.

Fundamental functions of SATURN are as follows;

- 1) The system estimates possibilities of ground liquefaction and highway bridge damage
- 2) Damage estimation is carried out using the pre-stored ground/ structural condition data and earthquake ground motion data monitored by the accelerographs network
- 3) Damage estimation is completed within 15 min., by that time emergency investigation team can be set-up
- 4) Estimated information is visually displayed on the CRT using digital map

Implementation of SATURN 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 back-up organization and stuffs/ devices management can be initiated from the early period of emergency responses.

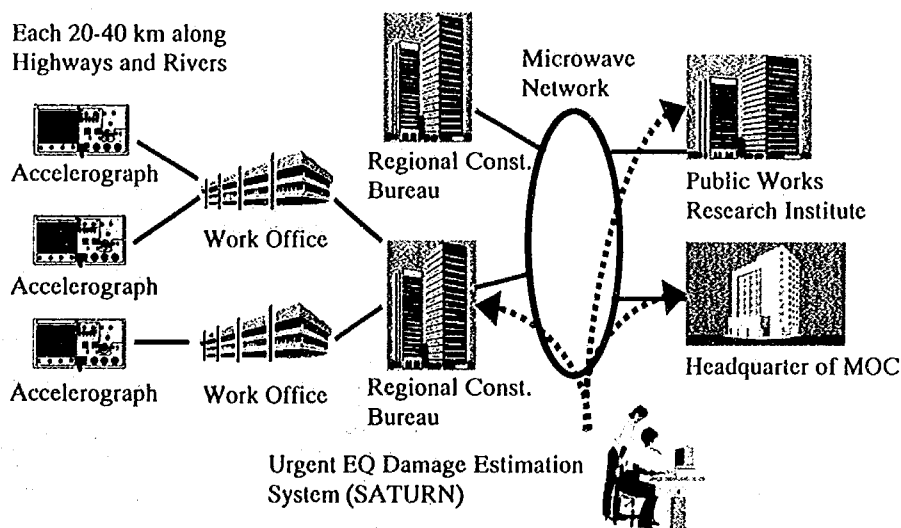
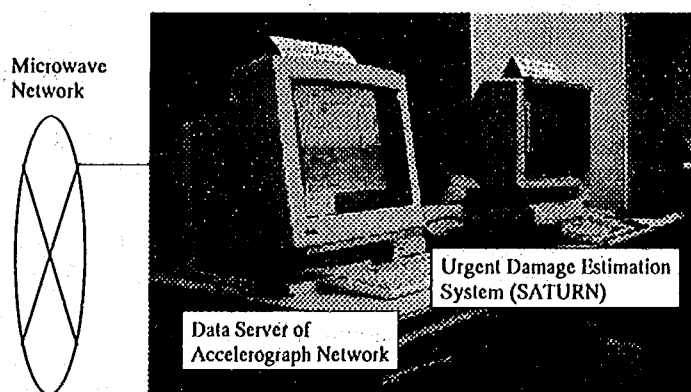


Fig.1 Accelerographs Network operated by MOC



- Covers Tokyo Area (Tokyo and 8 Other Prefectures)
- Possibility of Ground Liquefaction (6,028 Highway Sites)
- Possibility of Highway Bridge Damage (368 Bridges)

Photo 1 Prototype System (under operation)

Fig.1 show a configuration of the accelerographs network operated by the Ministry of Construction. Approximately 700 strong motion accelerographs are installed along highways and rivers with an interval of 20-40 km. Ground motion data (maximum acceleration Amax and spectrum intensity SI) are transmitted real-timely to the headquarter and sectors in charge of emergency activities.

Photo 1 shows a prototype system installed at the regional construction bureau of MOC. The prototype system, which does not cover whole Japan but Kantô region (Tokyo and other 8 prefectures), has been under operation since 1997.4.

Fig.2 Shows the estimated information 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 Amax and spectrum intensity SI (designated hereinafter as ground motion characteristic values) monitored by 100 seismographs installed at ground surface in Kantô region is adopted for the calculation.

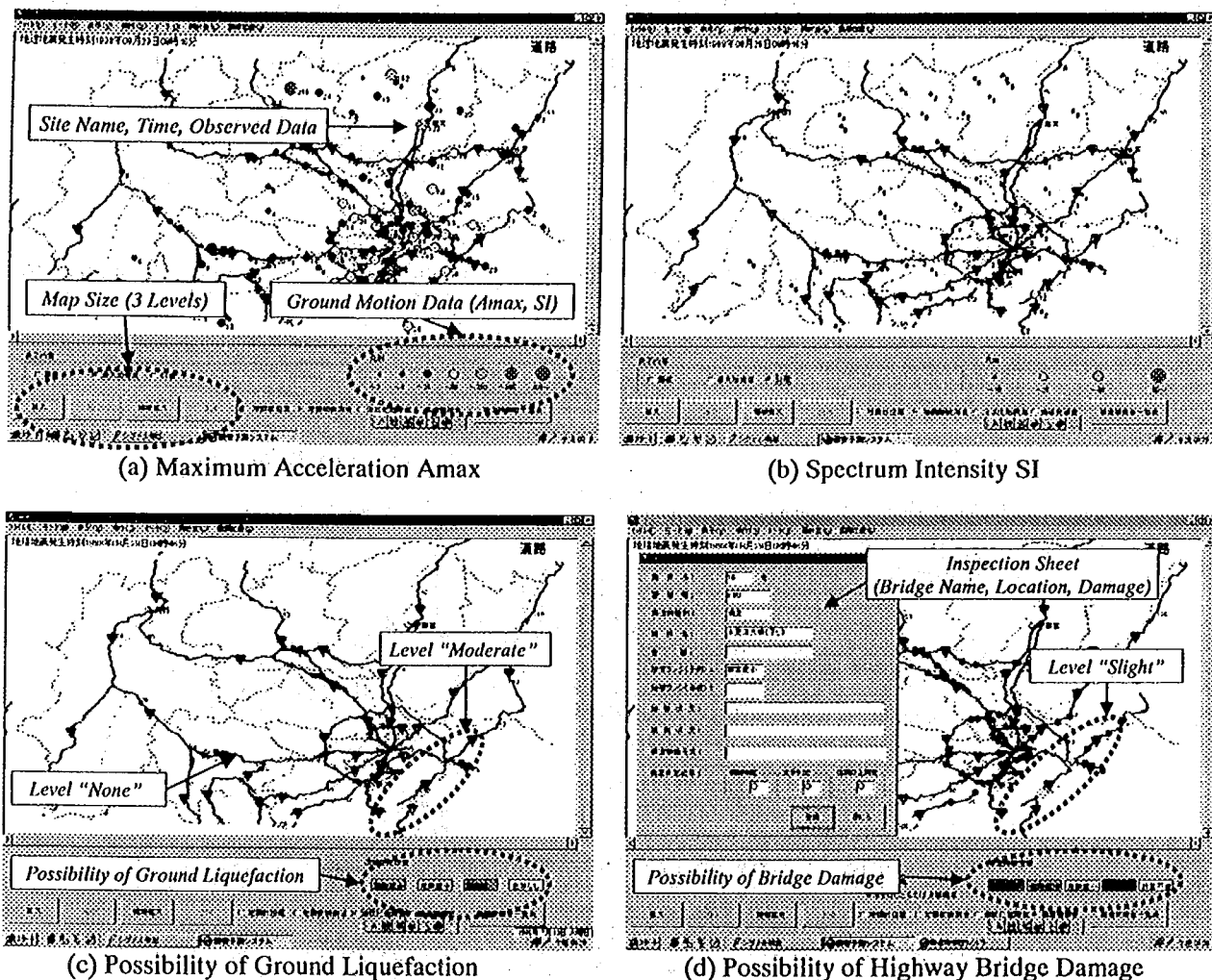


Fig.2 Estimated Damage by Prototype System (1998.8.29, M5.4)

3. DAMAGE ESTIMATION METHODOLOGY

3.1 Three Steps of Estimation

SATURN performs damage estimation by three steps as shown in Fig.3.

1) Estimation of Ground Motion Characteristic Values

For the judgement of ground liquefaction and bridge damage, ground motion characteristic values at the very site where the judgement is to be performed (designated hereinafter as a judgement site) are needed. 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 Possibility along Highways

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

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

$$F_L = R / L$$

where,

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

3) Estimation of Bridge Damage Possibility

Possibility of bridge damage is judged 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 is judged by comparing damage states of major bridge components. Damage states of major bridge components is judged by the SI value estimated at the judgement site. By using a SI value, it is possible to consider the cyclic effect of ground motion. The SI value is evaluated by eq.(2), where S_{vi} means the i (sec) component of velocity response spectrum.

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

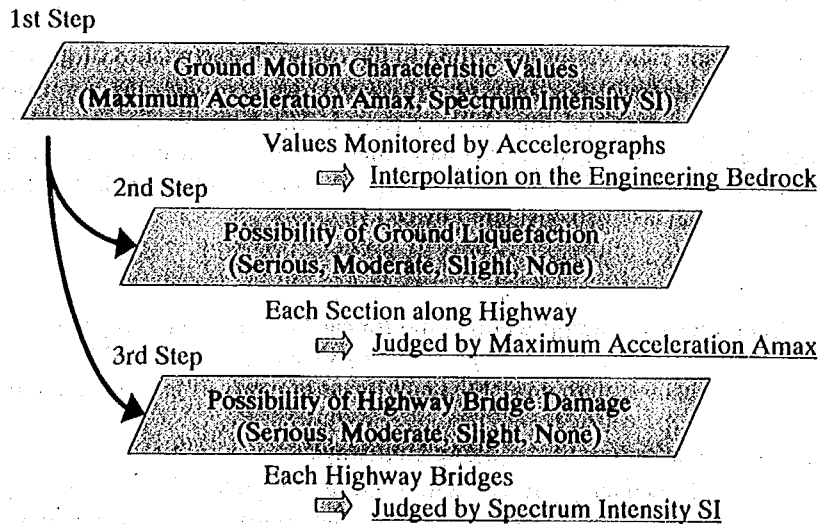


Fig.3 Flowchart of Damage Estimation

3.2 Classification of Damage States

Estimated ground liquefaction states and bridge damage states are displayed in four categories, i.e. "Serious", "Moderate", "Slight" and "None". As shown in Table 2, categories were defined as a combination of an assumed loss of transportation functions and a necessity of emergency repair works.

3.3 Estimation of ground motion Characteristic Values

Fig.4 shows the estimation steps of ground motion characteristic values at judgement sites. Following procedure is adopted in this system for minimizing the estimation time with enough accuracy.

1) Evaluating ground motion characteristic values right under each observation site by assuming a ground response amplification ratio.

- 2) Evaluating a characteristic value right under a judgement site by an interpolation.
- 3) Evaluating a characteristic value at a judgement site by assuming a ground response amplification ratio.

Table 2 Categories of Damage States

Classification	Influence to Transportation	Required Works
"Serious"	Interruption for Weeks	Demolition/ Reconstruction
"Moderate"	Interruption/ Restriction for Days	Temporary Repair
"Slight"	Restriction for Hours	Temporary Repair
"None"	No Restriction	None

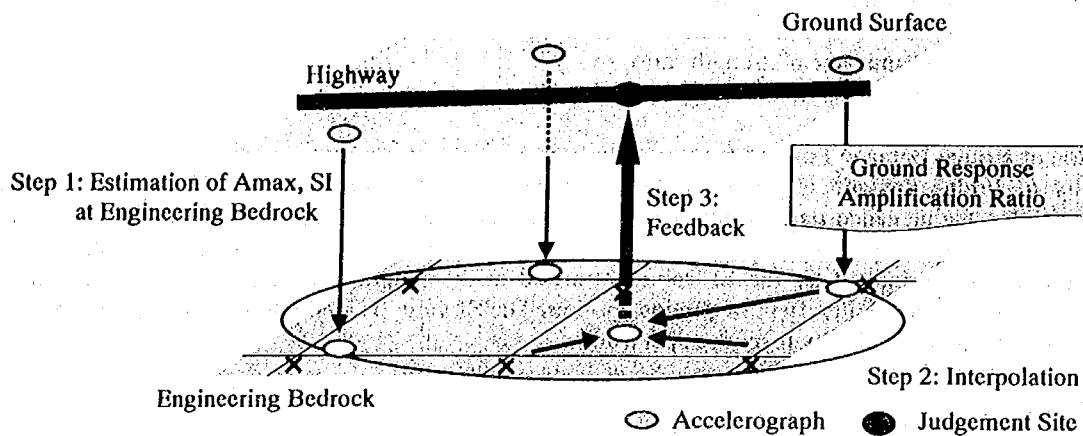


Fig.4 Estimation Steps of Ground Motion Characteristic Values

A ground response amplification ratio varies according to the cyclic characteristics of ground motions and non-linear property of ground soil deposit. For each observation/ judgement site, the amplification ratio α was calculated by "SHAKE" using a standard time history record. 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).

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

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

3.4 Estimation of Ground Liquefaction States along Highways

Table 3 shows a P_L ~Ground Liquefaction States Matrix. Ground liquefaction states is 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 at PWRI. By modifying the matrix in accordance with the future research development, accuracy of ground liquefaction states can be easily upgraded. Here, the P_L value for the damage state "Serious" was not defined in the matrix. This is because the ground liquefaction is hardly considered to induce serious damages to road facilities that would interrupt the transportation for a long time period.

Table 3 P_L ~Ground Liquefaction States Matrix

Classification of Ground Liquefaction State	Serious	Moderate	Slight	None
P_L value	-----	$P_L > 15$	$15 \geq P_L > 5$	$5 \geq P_L$

3.5 Estimation of Bridge Damage States

Table 4 shows the SI Value~Bridge Component Damage Matrix. Damage states of the major bridge components is judged with the matrix by the SI value that is estimated for each highway section including a bridge site. As for the damage states of major bridge components, following five failure mechanisms were considered 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 (Bending Failure of RC Column)

Design Code	Yield Seismic Coefficient	Damage State 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} ≥0.6	SI>100	SI>50	-----	50≥SI

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

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

- Damage state of bridge is evaluated by comparing estimated component damage.
- *Italic case*: Bridge damage is judged as "Serious".

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

- 1) Bending failure of RC column: Relationships between SI values and damage states were studied 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 were classified 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 were classified 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 were classified experimentally by the SI value.
- 4) Failure of bearing: A possibility of failure was classified 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 were classified

by a combination of a distance and a ground liquefaction state.

Table 5 shows a Bridge Component Damage States~Bridge Damage States Matrix. The damage state of a whole bridge system is 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.

4. CONCLUSIONS

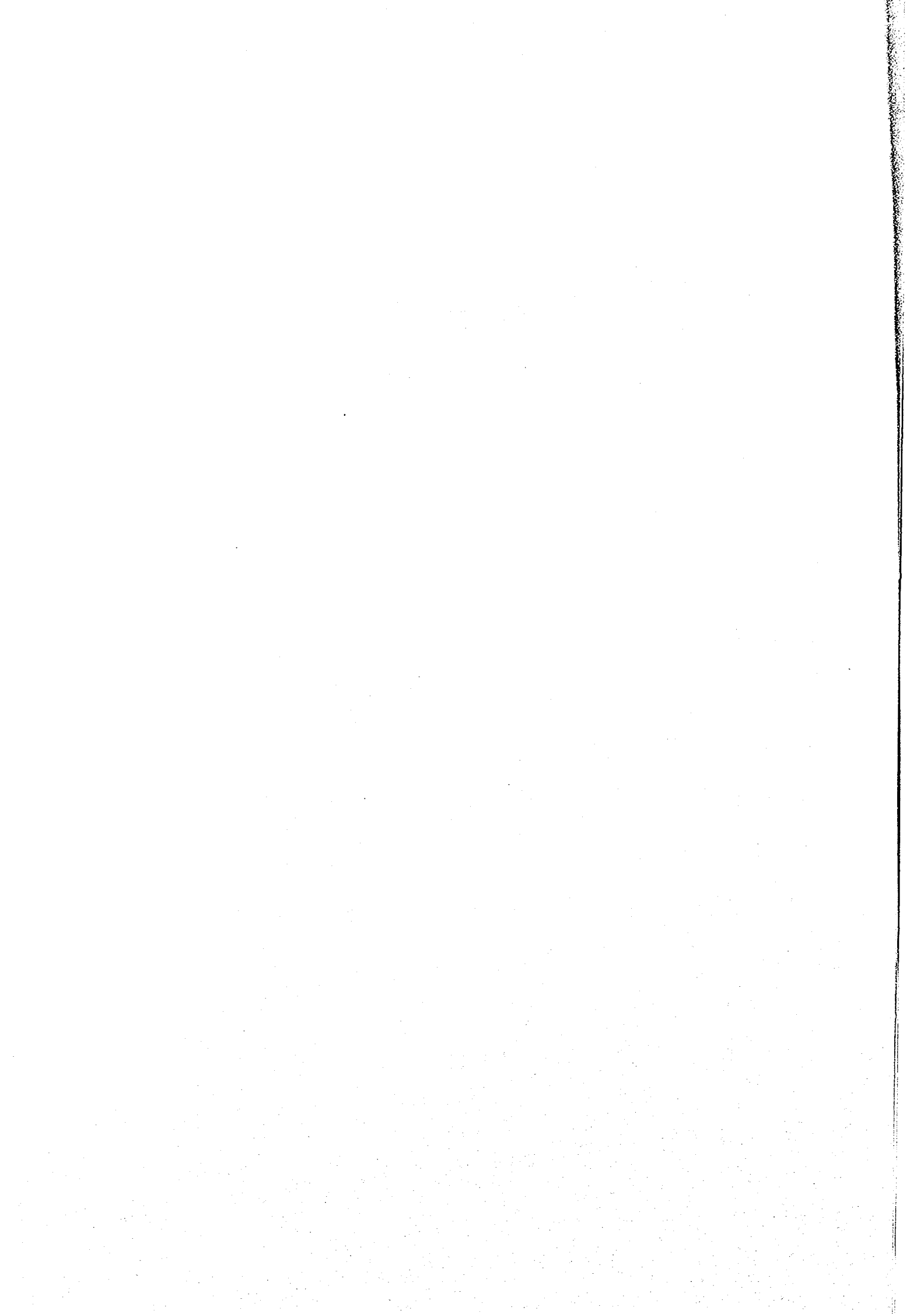
1. The Urgent Earthquake Damage Estimation System for Road Facilities (SATURN) was introduced. By providing rough estimation on the damage states and damage distributions of road facilities immediately after an earthquake, the system will support decision-makers to facilitate emergency works, i.e. damage inspections with restricted amount of inspectors, management of buck-up organization, and management of construction stuffs/ machinery.
2. SATURN estimates possibilities of ground liquefaction and highway bridge damage within 15 minutes. Damage estimation is carried out using pre-stored ground/ structural condition data and earthquake ground motion data monitored by the accelerographs network. Evaluation of damage states is made by the maximum acceleration A_{max} and spectrum intensity SI as judgement indexes.
3. Prototype system that covers Tokyo area is under operation at the regional construction bureau of MOC. For activating this system to the disaster prevention practice, further research will be required on the following subjects;
 - 1) Verification of damage estimation methodologies with use of the prototype system.
 - 2) Developments of damage estimation methodologies on the other road facilities, such as the slope failure, embankment sinking and damage of underground lifelines.
 - 3) Clarifying the seismic information system architecture including SATURN and other advanced information technologies, such as the wide area monitoring technology, data collecting technology, data analyzing technology using GIS, and decision-making support tools.

REFERENCES

1. Public Works Research Institute (1986), "Manual for Repair Methods of Civil Engineering Structures Damaged by Earthquakes", Technical Note of PWRI, Vol. 45
2. Public Works Research Institute (1996), "Report on the Disaster caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake", Report of PWRI (Japanese), Vol. 196
3. H. Sugita, S. Odagiri and M. Kaneko (1997), "Development of Real-time Seismic Information System for MOC", 29th UJNR Joint Panel on Wind and Seismic Effects
4. H. Sugita and T. Nozaki, "Seismic Information System for Civil Infrastructures", 30th UJNR Joint Panel on Wind and Seismic Effects
5. Japan Road Association (1996), "Design Specification of Highway Bridges; Part V Seismic Design"

第12回地震工学世界会議 (2000. 1. 30~2. 4, Auckland, New Zealand)

A METHOD TO DETERMINE SEISMIC PERFORMANCE OF HIGHWAY NETWORK SYSTEM



A METHOD TO DETERMINE SEISMIC PERFORMANCE OF HIGHWAY NETWORK SYSTEM

Tomofumi NOZAKI¹, Hideki SUGITA²

ABSTRACT

Highway networks play a very important roll immediately after an earthquake as a transportation backbone. The efforts to improve portions of the network systems have been <<made>> through the aseismic design for facilities such as bridges and earth structures. However, the functionality of a network must be determined as a system which is constructed from many facilities having effects to the overall performance.

This paper aims to propose a method and indexes to determine the seismic performance of a highway network for emergency disaster prevention activities immediately after an earthquake. Two indexes are introduced: i.e., *SP*, seismic performance of the network system and *LI_l*, link importance of individual link *l* on which the damage is supposed by planners or decision makers. Those indexes are calculated based on each link's assumed damage, and by referring *SP*, they can quantitatively grasp the overall functionality of highway network for emergency activities such as rescue and fire fighting. In addition, *LI* gives quantitative importance level of each link that is designated to have a risk. It helps them to plan the priority of the retrofit program of each facility to reduce the risk of the link. The method here is distinct taking the effect of background traffic to the disaster prevention activities into account. Thus the indexes do not only represent the topological performance of the highway network but also include the effect of the traffic congestion and the detour due to the damage on the links.

To investigate the adequacy of the proposed indexes, they are calculated for three simple model networks by using the test application program. The model networks are set up to have the idealized topology: i.e., web shape, ladder shape and grid shape. By assuming the damage of the links and the traffic control pattern, *SP* and *LIs* are calculated, and they are concluded that they do not have conflicts with the intuitive consequence. Thus, the method proposed here is promising for more complicated actual highway networks.

Keywords; *highway network, seismic performance, traffic analysis, emergency transportation, project assessment*

¹ Earthquake Disaster Prevention Division, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan
Email: sugita@pwri.go.jp

² Email: kaneko@pwri.go.jp

A METHOD TO DETERMINE SEISMIC PERFORMANCE OF HIGHWAY NETWORK SYSTEM

Tomofumi NOZAKI¹, Hideki SUGITA²

SUMMARY

Highway networks play an important roll immediately after an earthquake as transportation backbone. To secure the earthquake standing highways, it has been intended to improve individual facilities in the networks through aseismic design and retrofit. However, the functionality of the highway must be improved as a network system which is constructed from many facilities having effects to the overall network performance [1].

This paper aims to propose a method and indexes to evaluate the seismic performance of the highway network for emergency disaster prevention activities immediately after an earthquake. The index introduced here is *SP*, seismic performance of the network system, which is calculated based on supposed damage patterns of the network. By referring *SP*, planners can quantitatively understand the functionality of highway network for emergency activities such as rescue and fire fighting. In addition, importance level of each link and the efficiency of earthquake countermeasures including the retrofit patterns and the traffic control patterns can be evaluated quantitatively by using *SP*. The method here is distinct from preceding researches as it is taking the effect of background traffic to the disaster prevention activities into account [2]. Thus the index do not only represent the topological performance of the highway network but also include the effect of the traffic congestion.

To investigate the adequacy of the proposed indexes, they are calculated for a simple model network. By assuming the damage of the links and the traffic control pattern, *SPs* are calculated. Through the test, it was concluded that they do not have conflicts with the intuitive consequence, and it can be applied to more complicated actual networks. Also, it was clarified that they are useful to plan the structural/ nonstructural earthquake countermeasure for the highway networks.

1. INTRODUCTION

To secure the functionality of highway networks, two types of countermeasures are considered, that is, the pre-earthquake structural measures such as retrofitting and the post-earthquake nonstructural measures such as traffic control. Usually, those earthquake countermeasures are performed individually: e.g., the improvement of the facilities on the portions of the network. However, planners and decision makers are required to compare, select and combine those programs efficiently so that the highway systems provide sufficient functionality immediately after the earthquake. To do so, they must evaluate the performance and the risk of the highway system against the earthquake quantitatively [4].

This paper introduces the method to calculate the seismic performance index of highway network: *SP*. It is calculated based on the topological network data, supposed link damage patterns and other data regarding the traffic source. By referring *SP*, the planners and the decision makers can evaluate the seismic risk and performance of the highway network system and examine the alternative counter-earthquake programs quantitatively.

¹ Earthquake Disaster Prevention Research Center, Public Works Research Institute, Tsukuba, Japan,
Email: nozaki@pwri.go.jp

² ditto., Email: lsugita@pwri.go.jp

To be utilized at the actual highway administrative occasions, the method consists of general techniques including traffic assignments. The models and the procedure are described in the section two. The simple case study to check the validity of the method is shown in the section three. To illustrate the utility of the method to actual planning, quantitative comparison of structural and non-structural aseismic countermeasure by using *SP* is explained in the section four.

2. SEISMIC PERFORMANCE INDEX OF HIGHWAY NETWORK

2.1 Fundamentals:

Instead of several preceding researches in which the economic loss is calculated caused by the damage on highway network [2][3], the effect to the emergency activities such as rescue and fire fighting immediately after the earthquake is considered in this research. The seismic performance index, *SP*, is determined based on the travel time of emergency traffic from origin zones to destination zones and on the 'unit degree of efficiency' defined for respective emergency activity.

$$SP^k = \frac{E_{EM-TOT}^k}{T_{EM-TOT}^k} = \frac{\int_0^\infty E^k(t) T_{EM}^k(t) dt}{\int_0^\infty T_{EM}^k(t) dt} \quad (1)$$

Where, SP^k : network seismic performance in terms of emergency objective k , E_{EM-TOT}^k : total efficiency of emergency objective k , T_{EM-TOT}^k : total emergency traffic volume of objective k , $T_{EM}^k(t)$: emergency traffic volume with the travel time t , $E^k(t)$: unit efficiency function in terms of travel time t . The image is shown on Figure 1.

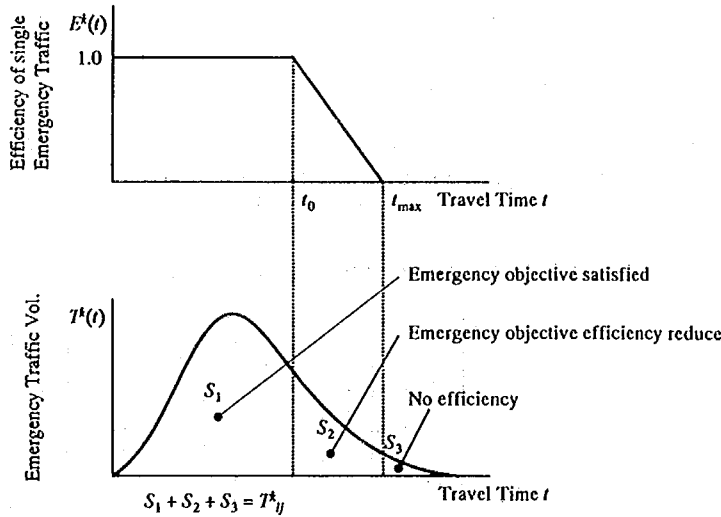


Figure 1: Efficiency Function

Eq. (1) also can be expressed as eq. (2) for the OD (origin-destination) matrix data.

$$SP^k = \frac{\sum_{i,j,r} E^k(t_r) T_{EMijr}^k}{\sum_{i,j,r} T_{EMijr}^k} \quad (2)$$

Where, i, j : indicators of origin zone (i) and destination zone (j), r : indicator of route from zone i to j , t_r : travel time along route r , T_{EMijr}^k : emergency traffic volume (objective k) along route r from zone i to j .

2.2 Procedure:

The procedure to obtain *SP* given a network damage pattern is shown on Figure 2. Topic is that the travel time (thus *SP*) is effected by the background traffic condition of each link. Therefore this method is capable of taking the traffic congestion caused by such non-emergency activities such as returning to home and evacuation.

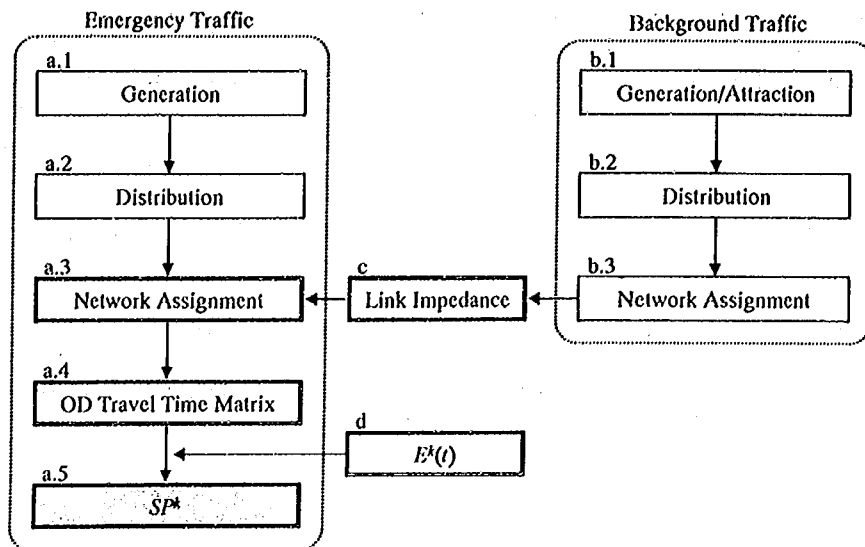


Figure 2: Procedure to Calculate SP

Here, the emergency traffic is assigned to each link in the network by referring the link impedance: i.e., travel time for each link (a.3, c). The link impedance is set by the background traffic assignment (b.1~b.3, c), however, the impedance is not effected by the emergency traffic condition once it is set. Thus the emergency traffic is assigned by simple all-or-nothing method searching the shortest paths under given link impedance. SP^* is determined by using the travel time OD matrix of the emergency traffic and the efficiency function (d).

Procedures of step a.1 and a.2 require the demand relation matrix exemplified in Table 1. In the table, disaster prevention bases and damaged areas between which the transportation is required are marked as 'X'. However, its detail varies depending on the emergency activity objective k . For the procedures regarding background traffic estimation (b.1~b.3), any traffic analysis methods ranging from general ones to much sophisticated ones can be utilized. Detailed procedures for the case studies are described in the sections three and four.

Table 1: Example of Demand Relation Matrix

	....	Regional Hospitals	Large Hospitals	Public Health Office	Police Office	Fire Station	....	Evacuation Area	Damaged Area
....									
Regional Hospitals	....	X	X	X		X	....	X	X
Large Hospitals	....		X	X		X	....	X	X
Public Health Office	....			X		X	....	X	X
Police Office	....				X		....		X
Fire Station	....					X	....		X
....									
Evacuation Area	....						....	X	X
Damaged Area	....						....		X

3. SIMPLE CASE STUDY

3.1 Model Network Settings:

To verify the validity of the method, a case study was performed for a simple model network of web shape shown as Figure 3. All the zone have equal population as the centroids. Also, each zone has certain number of disaster prevention bases regarding the emergency activity. The total area is assumed as that of average regional core cities. For simplicity, only one kind of emergency objective, the suffers-based type such as first aid activity is considered. Population is distributed equally for each node; thus the population is denser in the central area than the outer area. Disaster prevention bases are distributed in two patterns: namely, concentrated pattern and

dispersed pattern (Figure 4). The population pattern is used both for the estimation of the background traffic and the emergency traffic, and the disaster prevention pattern is used for the emergency traffic estimation.

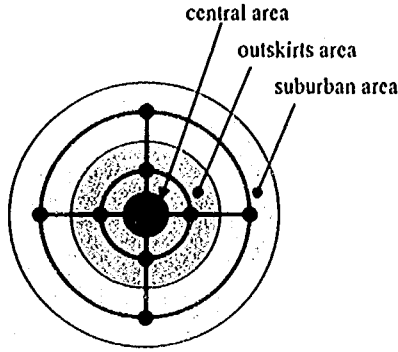


Figure 3: Simple Model Network

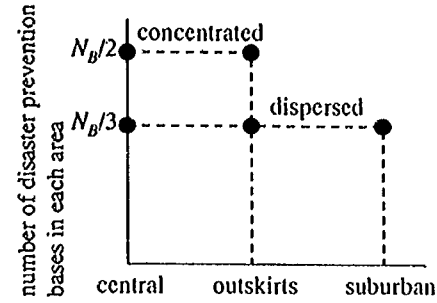


Figure 4: Disaster Prevention Base Distribution Pattern

3.2 Background Traffic Assignment

Background traffic assignment is necessary to determine the impedance of each link. In the case study, the control total of the background traffic is determined from the total traffic generation of the certain region. They are distributed in terms of the ratio based on the population in each zone (eq. (3)).

$$T_{BKij} = \frac{\hat{T}_{BKij}}{\sum_{i,j} \hat{T}_{BKij}}, \quad \hat{T}_{BKij} = (N_{pi})^\alpha (N_{pj})^\beta (d_{ij})^\gamma \quad (3)$$

Where, T_{BKij} : background traffic volume between zone i and j , N_{pi} : population of zone i , d_{ij} : distance along the shortest route between zone i and j . The background traffic volume is assigned on the network by the heuristic method by assuming user equilibrium. After the background traffic is assigned, the travel time of each link is determined to be used for the emergency traffic assignment.

3.3 Emergency Traffic Assignment

The emergency traffic generation is calculated by the unit ratio in terms of population of each zone as eq. (4).

$$G_{EMI} = g_{EM} N_{POPI} \quad (4)$$

Where, G_{EMI} : emergency traffic generation from zone i , g_{EM} : unit coefficient, N_{POPI} : population of zone i . g_{EM} is assumed based on the casualties and the population of Hyogo-ken in the Hyogo-ken Nanbu Earthquake.

The generated traffic is distributed to the limited destination zones. In this case study, the traffic starting from a zone is assumed to choose the nearest and the second nearest zones as the destinations (Figure 5). Here, the two patterns for destination choice are assumed. One is fixed pattern in which the destination choice does not change from the usual network state instead of the link damages. The other is altered pattern in which the destination zone can be changed given the damaged network condition. Those patterns correspond to the situation whether the emergency traffic drivers are given the network state information or not. After the destination zone of each origin zone is determined, the emergency traffic generation is distributed based on the number of the disaster prevention bases at the destination zones and the distance between origin/ destination zones (eq. (5), Figure 6).

$$T_{EMij_1} = G_{EMI} \frac{\hat{T}_{EMij_1}}{\hat{T}_{EMij_1} + \hat{T}_{EMij_2}}, \quad T_{EMij_2} = G_{EMI} \frac{\hat{T}_{EMij_2}}{\hat{T}_{EMij_1} + \hat{T}_{EMij_2}} \quad (5)$$

$$\hat{T}_{EMij_1} = (N_{DPBj_1})^\beta (\hat{d}_{ij_1})^\gamma, \quad \hat{T}_{EMij_2} = (N_{DPBj_2})^\beta (\hat{d}_{ij_2})^\gamma$$

Where, N_{DPBj} : number of disaster prevention base in zone j , d_{ij} : distance along the shortest route between zone i and j . In other words, an emergency traffic is assumed to choose one from the nearest two zones (j_1, j_2), and the ratio between the zones are estimated based on the number of the disaster prevention.

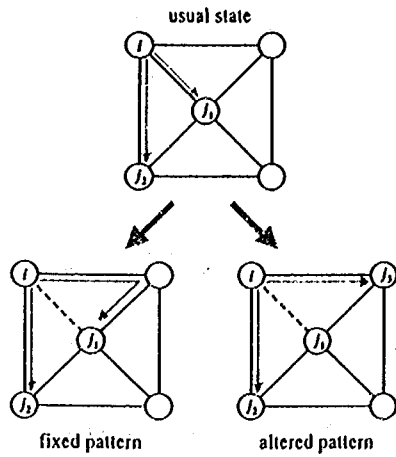


Figure 5: Destination Choice Pattern

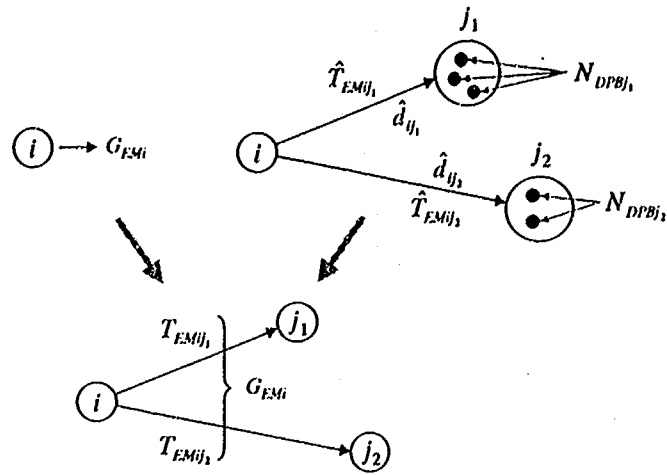


Figure 6: Emergency Traffic Distribution

Once the emergency traffic is distributed for each zone pair, it is assigned on the network by all-or-nothing method in which all the emergency traffic is assigned on the shortest path with the fixed link impedance. Here, the emergency traffic is assumed not to affect the link impedance because it is less in volume than the background traffic.

3.4 Seismic Performance and Link Importance

In this case study, SP s are calculated and compared for the cases with different combinations of damaged links, destination choice patterns and disaster prevention base distribution patterns. In addition, quantitative importance degree of links are evaluated for several cases. The link importance (LI) is defined as the difference of SP s, one for the network with damaged links and the other for the same pattern in which one of the damaged link is reconnected supposing it is retrofitted before the earthquake.

$$LI_i = SP - SP_i \quad (6)$$

Where, LI_i : link importance of link i , SP : seismic performance of network with initially supposed damage, SP_i : seismic performance of network in which the state of a damaged link i is changed to not-damaged. Therefore LI_i represents the effect of the link i to SP ; that is link importance.

3.5 Cases and Results

Variations of the study cases are shown on Table 2 and 3. For the cases regarding SP , four links are cut to represent the damage, and damage pattern, disaster prevention distribution pattern and destination choice are altered. For the damage pattern, three types are defined, namely, 'Radial Only', 'Loop Only' and 'Radial & Loop'. By considering the symmetry, there are fourteen patterns of damage for Radial Only case and Loop Only case, and 41 patterns for Radial & Loop case. Variation of disaster prevention base distribution pattern is 'Concentrated' and 'Dispersed', and destination choice patterns are 'Fixed' and 'Altered' as described in 3.1. For the cases regarding LI , typical six damage pattern are considered, and each link of damaged four links are reconnected to express the retrofit before the earthquake.

Table 2: Cases for SP

	Concentrated		Dispersed		Total
	Fixed	Altered	Fixed	Altered	
Radial Only	14	14	14	14	56
Loop Only	14	14	14	14	56
Radial & Loop	41	41	41	41	164

Table 3: Cases for LI

	Number of Damaged Links			
	Outer Radial	Inner Radial	Outer Loop	Inner Loop
Outer Radial + Inner Radial	2	2		
Outer Loop + Inner Loop			2	2
Outer Radial + Outer Loop	2		2	
Inner Radial + Inner Loop		2		2
Outer Radial + Inner Loop	2			2
Inner Radial + Outer Loop		2	2	

3.6 Results

The distribution of the emergency traffic volume by their travel time is shown on Figure 7 for three cases. It can be noted that the travel time is comparatively low for the altered destination case and the dispersed base case.

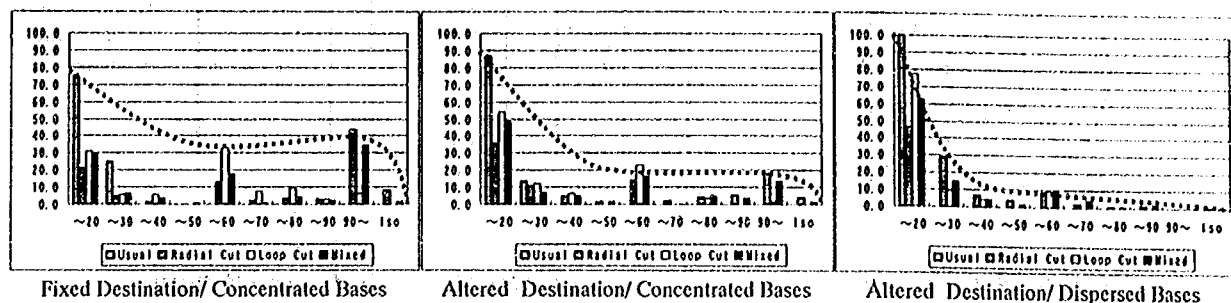


Figure 7: Results of Simple Case Study

SP for all the initial simple cases are shown on Figure 8. In contrast to Figure 7, the quantitative comparison between the cases is possible. It is natural that the seismic performance is better for the altered destination than fixed because the emergency traffic can change the destination depending on the damaged network situation. Also, the *SP* is greater for the dispersed base cases than the concentrated cases, and the results do not have conflict with inferred consequences.

As for *LI*, one can investigate the importance of each link under the given damage patterns from the Table 4. For example, *LI* of the outer radial road is 11.97 with the damage on outer loop while it reduces to 6.82 with the damage on inner loop. Thus, the importance of the highway portion changes depending on the damage pattern. Also, the table depicts overall tendency that radial roads are more important than loop roads.

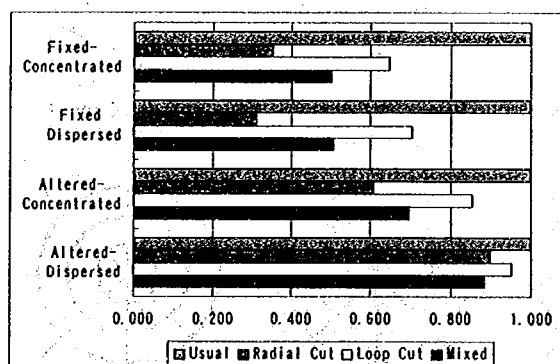


Figure 8: Results of SP

Table 4: Results of *LI*

Damage	Retrofitted	Fixed		Altered	
		Concentrated	Dispersed	Concentrated	Dispersed
Outer Radial +	Outer Radial	9.79	12.01	18.95	4.64
Inner Radial	Inner Radial	28.77	26.32	3.78	4.05
Outer Loop +	Outer Loop	0.62	0.62	0.55	0.00
Inner Loop	Inner Loop	0.00	0.00	0.23	0.00
Outer Radial +	Outer Radial	11.97	13.53	11.89	16.18
Outer Loop	Outer Loop	28.42	32.94	17.50	13.92
Inner Radial +	Inner Radial	13.33	9.67	20.00	4.44
Inner Loop	Inner Loop	22.14	19.34	19.57	4.44
Outer Radial +	Outer Radial	6.82	12.55	18.17	1.05
Inner Loop	Inner Loop	7.64	5.54	2.88	1.09
Inner Radial +	Inner Radial	1.40	0.39	0.97	1.05
Outer Loop	Outer Loop	14.74	8.69	4.02	1.05
Average for Categories	for Radial	12.01	12.41	12.29	5.24
	for Loop	12.26	11.19	7.46	3.42
	for Outer	12.06	13.39	11.85	6.14
	for Inner	12.22	10.21	7.91	2.51
	for All	12.14	11.80	9.88	4.33

4. CASE STUDY FOR STRUCTURAL/ NON-STRUCTURAL COUNTERMEASURES

4.1 Model Network and Traffic Control Pattern

The network seismic performance index *SP* does not only give the performance of a given network, but also helps planners to determine the retrofit priority through the link importance *LI*. This idea can be extended to the comparison of alternatives including structural/ non-structural countermeasures. This section describes an example of such application of this method. The model network for this case study is slightly more complex than that of simple case study, and has external centroids to consider the background traffic as shown in Figure 9. Three traffic control methods considered in this research is shown in Figure 10. In the 'uncontrolled' pattern both the emergency traffic and the background traffic use the same lanes. In the 'directional control' pattern, all the lanes of a specified direction are open only to the emergency traffic while other lanes are used by both kinds of traffic. 'Exclusive lane' is limited for emergency traffic as is named. Other settings such as cover area are similar to the simple case study. The population is distributed uniformly to each zone, and the disaster prevention bases distribution is dispersed pattern.

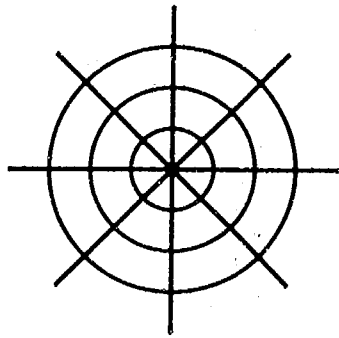


Figure 9: Model Network

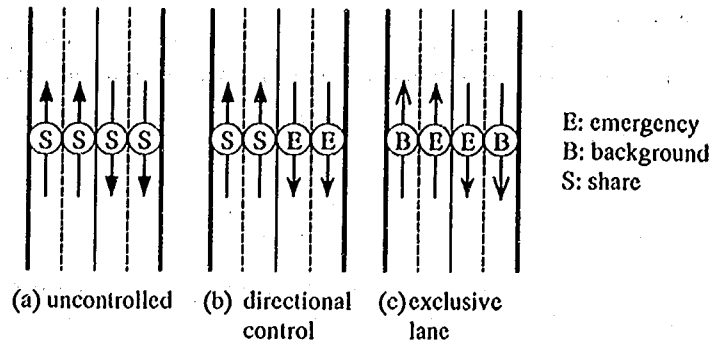


Figure 10: Traffic Control Pattern

4.2 Structural/ Non-structural Countermeasures Settings

Figure 11 shows the examples of structural and non-structural countermeasures. Number of damaged links is four, and eight patterns of countermeasures including structural retrofit are set up. Among them, 'Inflow Control' pattern is to restrict the background traffic coming into the damaged area while those going out are fully permitted.

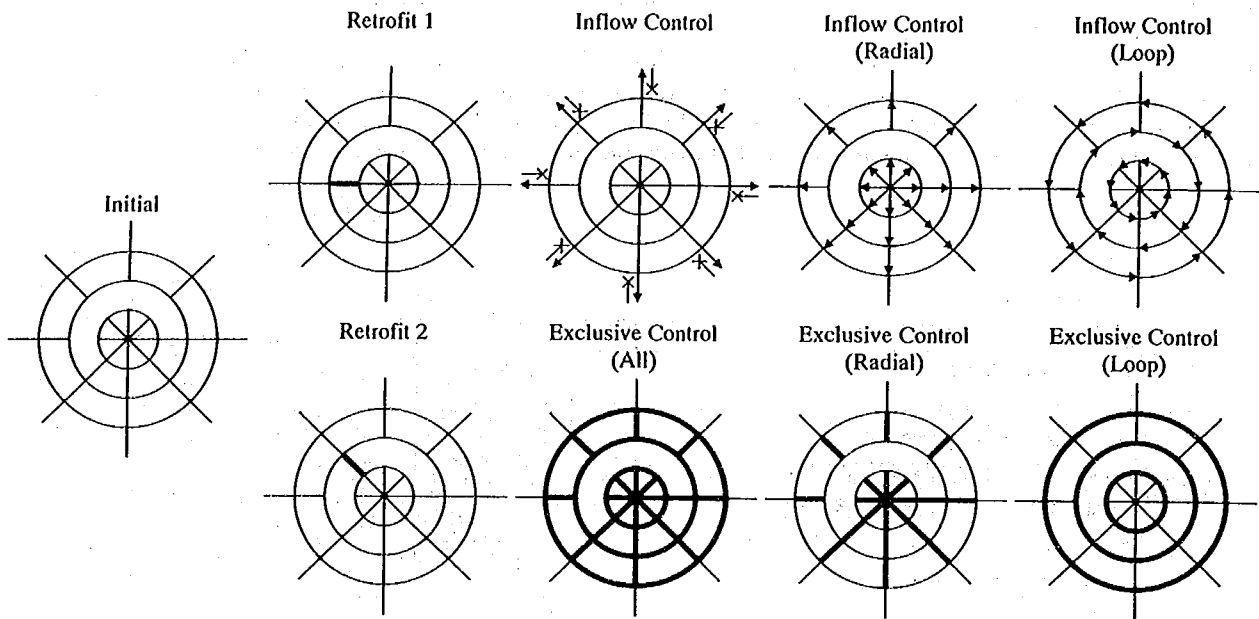


Figure 11: Countermeasure Pattern

4.3 Results

SP for the patterns are displayed on Figure 11. The new index $TTPV$ is shown additionally. $TTPV$ means the travel time per vehicle which is calculated by eq. (7).

$$TTPV = \frac{TSTT}{\sum_{i,j} T_{ij}} = \frac{\sum_{i,j,r} T_{ij,r} t_{ij,r}}{\sum_{i,j} T_{ij}} \quad (7)$$

Where, $TSTT$: total system travel time, T_{ij} : valid background traffic volume between zone i and j , $T_{ij,r}$: valid background traffic volume on route r between zone i and j . Here the valid traffic exclude the isolated traffic demand. By referring $TTPV$, one can quantitatively know the effect of the countermeasure to the background traffic as well as the effect to the emergency traffic. The results of SPs and $TTPV$ for the cases above are shown on Figure 12.

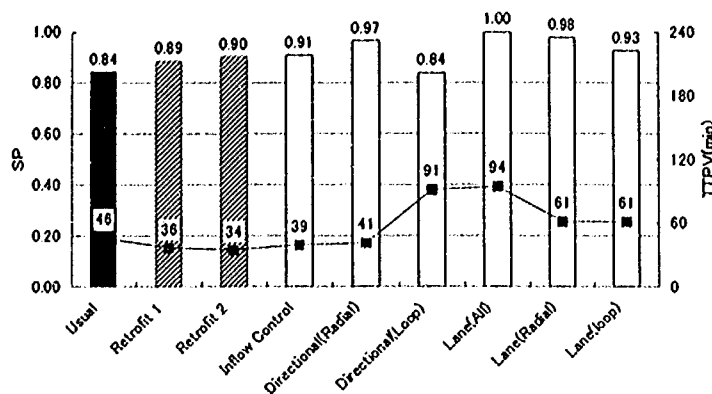


Figure 12: Results of Case Study

First, it is clear that the structural retrofit countermeasures satisfy both conditions, the improvement of *SP* in terms of the emergency traffic and the reduction *TTPV* regarding the background traffic. Second, the non-structural traffic control countermeasures usually improve *SP* more than the retrofit countermeasures. However, they may affect the background traffic seriously as seen in exclusive lane pattern. On the other hand, some non-structural countermeasures improve both performances for the emergency traffic and the background traffic (directional control for radial roads).

Thus, the structural and non-structural countermeasure for the earthquake standing highway network must be compared taking their effects and costs into account by quantitative assessment method like as the method introduced here.

5. CONCLUSIONS

1. A method to calculate the index to assess the quantitative seismic performance of a highway network (*SP*) is introduced.
2. The indexes for a simple model network with several damage patterns do not have conflict with inferred consequences. Thus, the method is thought to be able to be applied to more complex practical cases.
3. Several structural/ non-structural earthquake countermeasures are compared by using the method. The method is capable of showing the quantitative comparison between many types of countermeasures such as retrofit and traffic control.
4. The traffic control countermeasures immediately after the earthquake show better result than the structural retrofit, however, trade-off between the efficiency for the emergency traffic and the effect to the background traffic must be considered.

6. REFERENCES

1. *Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, May 1995
2. Stephanie E. Chang and Nobuoto Nojima, "Highway System Performance Measures and Economic Impact", *Proc. th 7th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems*, pp 183-197, November 1998
3. Tomofumi Nozaki and Hideki Sugita "System to Assess Socio-economic Effect of Earthquake Disaster", *Proc. th 7th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems*, pp 199-211, November 1998
4. Hideki Sugita, Tomofumi Nozaki and Tadashi Hamada, "Seismic Information System for Civil Infrastructures", *Proc. the 30th Joint Meeting, Wind and Seismic Effects, UJNR*, pp306-318, August 1998