

土木研究所資料

平成8年度防災技術課調査研究成果 概要報告書

平成9年6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© (1997) 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8年度防災技術課調査研究成果 概要報告書

防災技術課	課長	杉田秀樹
	主任研究員	金子正洋*
	主任研究員	野崎智文
	研究員	遠藤和重
	管理係長	田島明
	研究員	濱田禎

要旨

平成8年度に防災技術課が実施した調査研究の成果をまとめたものである。防災投資の効果、被災予測、総合防災システム、地盤の地震動特性に関する調査研究成果のほか、付属資料として学会等での口頭発表論文を含んでいる。

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

*現耐震技術研究センター振動研究室主任研究員



目 次

1. 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……………1 (行政部費)	
2. 震災対策の高度化に関する研究……………7 (行政部費)	
3. 強震計管理費……………13 (行政部費)	
4. 都市震災の社会経済的影響評価システムに関する研究……………19 (科学技術振興調整費)	
5. 地震時早期被害予測・情報伝達システムに関する試験調査……………25 (道路事業調査費<一般調査>)	
6. 道路ネットワークの耐震性向上技術に関する試験調査……………27 (道路事業調査費<一般調査>)	
7. 占用施設・沿道施設を含めた道路の耐震性向上技術に関する試験調査……………29 (道路事業調査費<一般調査>)	
8. 河川施設の耐震強化事業に関する試験調査……………31 (河川事業調査費)	
9. 河川施設の強震計の点検調査……………37 (地建依頼)	
10. ダムの強震計の点検調査……………39 (地建依頼)	
11. 道路施設の震害予測システム……………41 (地建依頼)	

(付属資料 口頭発表論文)

1. 土木学会第52回年次学術講演会

交通基盤施設の地震被害による社会経済的影響評価システムの開発	45
地震被害の初動検知体制パフォーマンスの評価に関する研究	47
堤防の地震被害の影響の推定法	49

2. 第24回地震工学研究発表会

震災による交通ネットワーク被害の生産活動への影響評価について	51
都市基盤施設の被害検知体制に関する研究	55
地震動特性値分布の即時予測手法に関する研究	59

3. 天然資源の開発利用に関する日米会議 耐風・耐震構造部会、第25回合同部会

Development of Real-time Seismic Information System for M.O.C.	63
--	----

4. 第1回日米地震政策シンポジウム

ASSESSMENT, REPAIR AND REHABILITATION OF LIFELINES

-Highway, Sewage, Pipeline and Common Utility Duct-	74
---	----

1. 国土の保全及び防災に関する研究

1. 1 被災予測に関する研究

1. 1. 2 都市型震災における土木構造物の社会的影響評価手法に関する研究

防災技術課 課 長 杉田秀樹

主任研究員 野崎智文

研究員 遠藤和重

1 まえがき

大都市地域において規模の大きな地震が発生し道路等交通施設を含む基幹的な土木構造物が被災した場合、その被害は施設そのものの被害にとどまらず、被災地域内外の社会経済活動に深刻な影響を及ぼす。したがってこのような施設の計画・管理にあたっては、仮に地震によって当該施設が被災したとしてもその影響ができる限り小さくなるように、震前の計画、震後の復旧を行わなければならない。ここでは、震災によって道路・鉄道等の交通施設が被災した場合、その被害が被災地域内外に及ぼす経済的影響を評価する手法を研究する。前年度の研究では、地震後の道路交通施設被害の経済への波及構造を検討した。本年度は、それらの構造を交通推計、交通データの経済推計入力への変換、経済推計の三つの手法として表現し、その内容について検討した。

2 研究目的

本研究の目的は、震災による交通施設の被災の経済波及効果を推計する手法を開発することにある。具体的には、被災地域の各ゾーンにおける生産施設・交通施設の被害を設定し、これに対する域内・全国の総生産額の時間的な推移をとらえることが目的である。なおこの推計手法においては、被災後1週間～数年程度の期間を対象としている。

これまでも地震後の被害額推計に関する研究、推計は行われているが、その結果は試算項目の差異や各種の仮定によって大きな開きがある。したがって手法開発にあたっては、手法中のモデル設定・仮定を明確にし、手法自体の問題を明確にするとともに、既存の方法によるものであっても矛盾を孕んでいるものは新たな方法を導入していかなければならない。

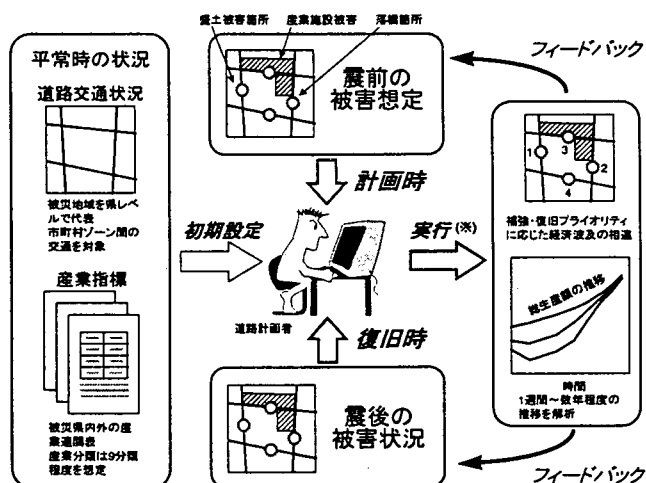
また、本研究で開発する手法は、最終的にはコンピューターによる評価システムに利用され、道路等交通施設を計画・管理する者がユーザーとして施設被害の想定（あるいは地震後の被害実績と復旧状況）を入力しながら、経済被害を最小とするような施設計画・復旧戦略に関する意思決定を支援するためのものである（図1）。このことから、手法は任意の地震災害に対して適用可能であるとともに、推計にあたって膨大なデータが必要とならないよう配慮する必要がある。

上記のような目的を満足するように研究した手法を次章以降で説明する。

3 研究方法

3.1 全体方針

震災による交通施設の被災の経済的影響を推計するにあ



※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大、輸送コストの増加等の影響を受ける

図1 手法の活用イメージ

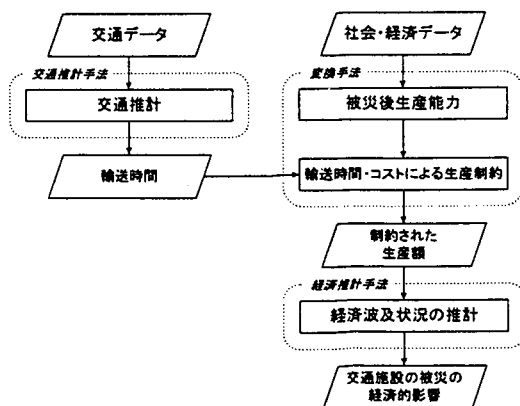


図2 手法の全体構成

たっては、三つの手法を組み合わせる（図2）。まず震災後の交通状況を交通推計手法により推計し、被災地域（都道府県レベル）におけるゾーン間の輸送時間を算出する。次に、生産施設等の被害によって低下した生産能力に輸送時間・コストによる制約を加味した被災後の生産額を、変換手法を用いて推計する。この後、この生産額の変化が被災地域内外に波及する状況を経済推計手法により推計する。以下、三つの手法について説明を加える。

3.2 震災後の交通推計手法

交通推計モジュールでは、各ゾーンの被災による発生集中量の変化、鉄道被災の道路交通への影響などを考慮した四段階推計法を実行する（図3）。

(1) OD 発生集中量の推計

このパートでは、各ゾーン間の人流トリップに関する発生集中量を推計する。手法としては、パーソントリップ調査（PT 調査）のデータに基づいた発生集中量の推計式および被災県内各ゾーンにおける人口等のデータを用い、目的別のトリップ発生・集中量を推計することとした。

$$\begin{aligned} G_{ik} &= a_k x_{ik} && \text{ゾーン} i \text{の発生量} \\ A_{ik} &= b_k y_{ik} && \text{ゾーン} i \text{の集中量} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし k はトリップの目的

x, y は発生集中量の説明変数

ここで、ゾーンは被災地域内では市町村～地方生活圏レベル、それ以外の地域では都道府県レベルとした（図2）。このゾーン区分にはいくつかの考え方がありそれらの違いが計算の精度や速度に影響を与えるが、今回は表中のCASE-B で試算した。なおトリップの目的としては、出勤、登校、自由、業務、帰宅の五つの目的を考慮した。

本システムの推計は被災後1週間程度以降を対象としているため、被災直後の緊急車輛、避難車輛は考慮していない。復旧資材や救援・復興物資の輸送車輛、見舞い目的の車輛については無視できないと考えられるが、系統的な推計手法・基礎データがないため今回は算入していない。なお港湾施設の被災については、港湾を含むゾーンの発生集中量を変化させることにより表現が可能である。

(2) トリップ分布の推計

OD 間のトリップ分布の推計にあたっては、グラビティモデルを用いた。具体的には、以下の式によりゾーン i の発生量 G_i とゾーン j の集中量 A_j およびゾーン $i \sim j$ 間の抵抗 t_{ij} よりゾーン間のトリップ T_{ij} を計算する。ここでモデル式の分母は、自由走行状態における各OD間の走行時間とした。また、実際にはトリップの目的ごとに異なる発生・集中量を用いて計算し、目的別トリップを計算した後合計している。

$$T_{ij} = \kappa \frac{G_i^\alpha A_j^\beta}{t_{ij}^\gamma} \quad (2)$$

上式において、モデル式の係数 κ 、指数 α, β, γ については、パーソントリップ調査のデータに基づき、回帰することにより決定した。震災時の状態に対してグラビティモデルを適用することの適否には論議があるが、震災直後の混乱期以降は平常時のゾーンポテンシャルに対応した分布となるという仮定には致命的な欠陥はない。ただし今後緊急輸送道路ネットワーク計画が整備され震災時の状況に関する研究が進んだ場合、新たな手法を適用することもできる。

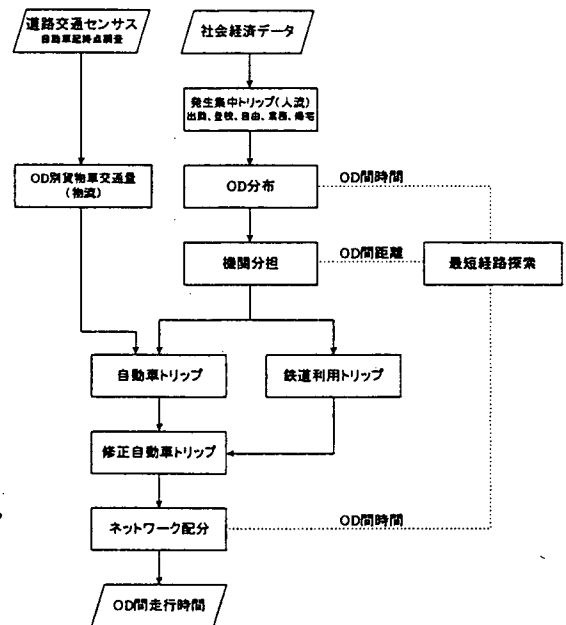


図3 交通推計の流れ

表1 ゾーン区分の考え方

被災県	被災地方生活圏	被災市区町村 その他の市区町村	Case-A	Case-B	Case-C
			市区町村	市区町村	市区町村
	被災地方生活圏に隣接する地方生活圏	その他の地方生活圏		地方生活圏	地方生活圏
被災県に隣接する都道府県			都道府県	都道府県	都道府県
その他の都道府県					

(3) 機関分担の推計

人流トリップを、以下の段階で分離する(図4)。

- ① 全トリップ T_{ij} を、徒歩等分担率 r_1 を用いて自動車・鉄道トリップと徒歩・二輪等のトリップに分離。
- ② 自動車・鉄道トリップを、鉄道分担率 r_2 を用いて自動車トリップと鉄道トリップに分離。
- ③ 自動車トリップを、自家用車分担率 r_3 自家用車トリップとバstriップに分離。

さらにこの後、鉄道施設の被災に応じて鉄道トリップをバstriップに転換させ、算入する。なお、トリップ分担率を算出する式はPT調査結果に基づき推計する。

(4) 物流トリップの算入

物流トリップは、道路交通センサスの自動車起終点調査より直接OD別貨物車交通量を求め、自動車トリップに加える。

(5) 配分交通量の推計

OD間トリップの道路ネットワークへの配分については、走行時間に関するユーザー均衡状態を仮定し、多段階配分を行う。

以上の推計により、各OD間の走行時間が推計される。

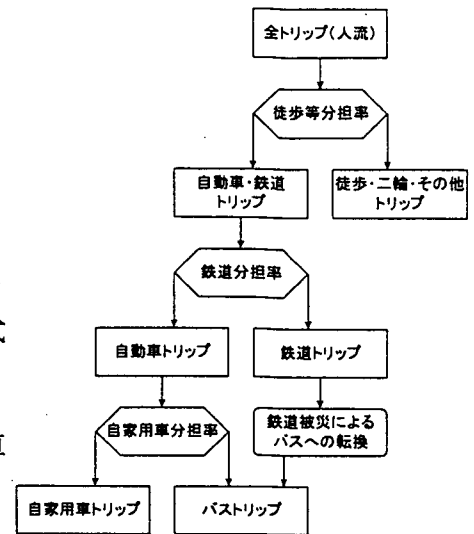


図4 機関分担推計の流れ

3.3 交通推計結果の経済推計への変換手法

本モジュールでは、初期設定・入力された各ゾーンの生産施設被害、OD間の所要時間に基づき、各ゾーンにおける生産部門ごとの生産額を推計する(図5)。生産施設被害に対しては、道路等交通施設の被害が全くなかった場合の生産額の復旧率曲線を仮定し、これに対して所用時間の増加に伴う生産額の減少、輸送費用の増加に伴う生産取り止めを考慮し、被災後の復旧状態に応じた部門別生産額を算出する。復旧率、生産額減少率、生産取り止め率の関数形については、以下の方法により特定した。

①復旧率

阪神淡路大震災における企業アンケート¹に基づき、被災レベル(大破・中破等)別に復旧率曲線を仮定し、これを別途行ったアンケートに基づいて、交通施設被災の影響を除いたものとして補正。各産業部門ごとに被災レベルが異なる場合は、部門別の復旧率曲線が得られる。

②走行貨物量の低下に伴う回転率の低下による生産額減少率

推計時点における走行時間の、平常時の走行時間に対する比の関数として定義。関数形は様々なものが想定できるが、ここでは反比例関数(平常時走行時間/推計時走行時間)で仮定。

③生産取り止め率

各産業部門の走行時間に対応した時間費用額の営業余剰に対する率を生産影響係数と定義し、これを独立変数とする生産意志(1-生産取り止め率)の関数形を仮定した。ここでは試みとして、線形関数とステップ関数を仮定している。

3.4 経済推計手法

本モジュールにおいては、変換モジュールで推計された生産各部門の生産額減少の影響を部門間の連関・波及状況を考慮して推計する。たとえば兵庫県南部地震の直後には各所で震災の直接被害額およびその波及等による間接被害額が算定されており、一般家屋等の被害も含めた直接被害額は6兆円~最大10兆円程度、直接被害に起因する間接的な影響は2兆円程度と試算されているものが多い²。ただしこれらの試算において

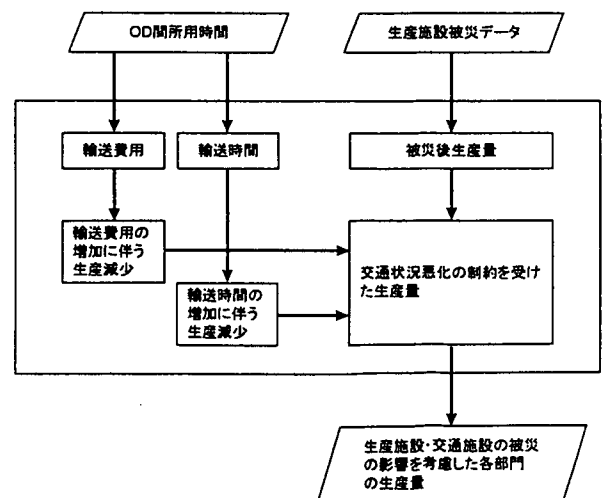


図5 交通推計結果の変換手法の流れ

は、直接被害の額に大きな開きが見られるほか、間接的な影響の算出方法については、被災地域の固定資産税評価額に想定被害率を乗じるものや、各企業の取り引き減少等の機会損失額に基づくなど、様々な簡略化された方法が適用されている。一方、産業連関分析の手法を用いて震災による経済的な被害を算定している例もあるが、それらは震災による生産額の直接的な減少分、復興需要による生産額の直接的な増加分を加味した上で、レオンチェフモデルを適用するのが一般的である。

さて、震災の影響といった問題にレオンチェフモデルを用いる場合には、以下三点に注意しなければならない。まず第一に、このモデルは与えられた最終需要額を満足するための各部門の生産額を求めるものである(demand-pull)ということである。震災による影響にはもちろん最終需要の減少(あるいは場合によっては増加)といったものもありうるが、入力として波及状況を制約するのは、むしろ被災により制約される生産額である。第二に、一般のレオンチェフモデルにおいては、各部門は任意の波及時点で必要とされる生産額を必ず生産できると仮定している点である。

$$x = f + Af + A^2f + \dots = (I - A)^{-1}f$$

ただし $x = \{X_1, \dots, X_N\}$: 生産額ベクトル
 $f = \{F_1, \dots, F_N\}$: 最終需要額ベクトル
 A : 投入係数行列
 I : 単位行列

(3)

すなわち上式において A^N の項は最終需要額 f による N 次の波及時点において各部門で誘発される生産額を表すが、これらの生産額は必ず満足されるものとしている。一方、震災により各生産部門に施設等の被災が生じた場合、必ずしも生産額が満足されるとは限らず、制約条件が課される。第三の留意点として、本システムでは、各部門の被災・復旧に伴って変化する経済状況を一定の期間ごとにダイナミックに再現する必要があるため、動学的な取り扱いが必要となる。以上のことより、本システムにおいて要求される経済波及モデルの特徴を整理すると以下のようになる。

- ① 1週間、1ヶ月といった時間間隔での推移を追跡できる動学モデルであること。
- ② 各部門の生産額を入力とするモデルであること。
- ③ 生産額の制約が他部門へ波及する状況を再現できるモデルであること。

以上のような条件を満足するモデルとして、著者らは複数のモデルについて検討し三つのモデルを選定している(basic approach, primitive approach, possible-required approach)。これらの方法の要点は以下のようである。まず basic approach は、レオンチェフ行列の行和、列和が任意の時刻で成り立つ保存式であるという考えに立ち、未知数を消去するために中間投入額行列と生産額ベクトルを投入係数行列により関連づけた式を導入し、これを順次時間軸に沿って解いている。

$$f' = f^{t-1} + (I - A)(x' - x^{t-1})$$

$$v' = v^{t-1} + \left\{ 1 - \sum_i a_{ij} \right\} \cdot (x' - x^{t-1})$$
(4)

また primitive approach については、供給パターン係数 w_i および生産額と在庫額を加えた供給額 sup に対する必要投入係数 a_{ij} 、可能投入係数 b_{ij} を定義し、各期において供給パターン上でネックとなる産業部門(規定部門 : i^*)にすべての産業が制約を受けるとして方程式を動的に解いてゆく。

$$x_{i^*j} = b_{i^*j} sup_{i^*}^t, \quad x_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{i^*}} b_{i^*j} sup_{i^*}^t$$

$$\text{ここに、 } w_i = \frac{sup_i^{t=0}}{\sum_j sup_j^{t=0}}, \quad a_{ij} = \frac{x_{ij}^{t=0}}{sup_j^{t=0}}, \quad b_{ij} = \frac{x_{ij}^{t=0}}{sup_i^{t=0}}$$
(5)

possible-required approach では、上記の手法と同様生産額ベクトル $prod_i$ に在庫総額 $stock_i$ を加えた供給額 sup_i を定義し、生産額に対する必要投入係数 a_{ij} 、供給額に対する可能投入係数 b_{ij} を求めておき、各期においてこれらの係数を用いた必要投入額 $xReq_{ij}$ が可能投入額 $xPot_{ij}$ を上回らないように生産額を変更・収束させて計算を進める。

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}^{t=0}}{prod_j^{t=0}}, \quad b_{ij} = \frac{x_{ij}^{t=0}}{sup_i^{t=0}} \quad (6)$$

$$xReq_{ij}^t = a_{ij} prod_j^t, \quad xPot_{ij}^t = b_{ij} sup_i^t$$

4 研究結果

4.1 試算方法

本研究で提案した手法の妥当性を検討するため、兵庫県南部地震の被災地域において次のようなケーススタディを行った。すなわち、交通推計手法においては阪神高速道路3号神戸線を中心とした区間を図6、表2に示す方法でリンクカットし、走行時間等の状況を検討した。ただし被災直後には、実情に合わせて阪神高速道路神戸線以外にも多数の区間が被災すると仮定している。また、この交通推計結果に基づき震災による生産施設被害、道路施設被害が兵庫県の生産額に与える影響（減少率）を算定した。一方経済推計については、一定率で生産額を減少させた場合の状況を検討し、問題点を明確にした。

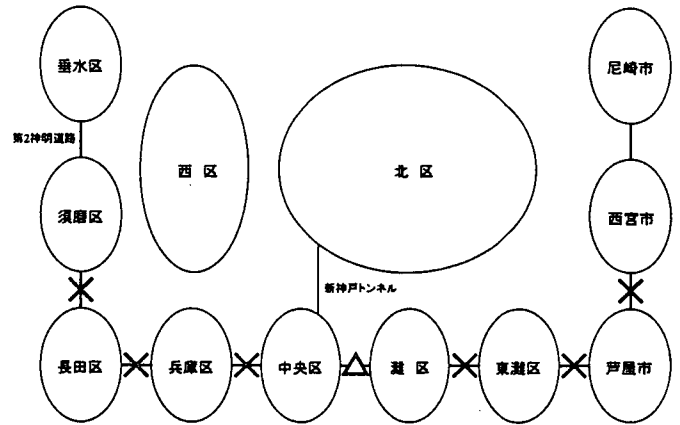


図6 試算における区間設定

4.2 交通推計の試算結果

阪神高速道路3号神戸線の相当部分が地震直後に被災したと想定した場合、各市区町村間の走行所用時間は増加する。被災後の走行時間の増加が最も長くなる例として尼崎市～須磨区間の走行時間の変化を表に示しており、被災区間を含む尼崎市～須磨区で被災直後に所用時間が1時間06分長くなるなど（平常時の2.6倍）、東西方向の交通が大きなダメージを受けることがわかる。今回の手法においては、実際には大量に発生した避難・救急・見舞い・物資の輸送といった震災に特有の交通需要を見込んでいないが、今後はこれら特殊な交通需要についてさらに検討する必要がある。

表2 被災区間の復旧によって変化する交通状況

		平常時	被災直後	50週間後	80週間後
ゾーン間 開通状況	西宮市～灘区	○	×	×	○
	灘区～中央区	○	×	○	○
	中央区～須磨区	○	×	×	○
走行時間（尼崎市～須磨区）		0:41	1:47	0:59	0:41

4.3 生産額変化の試算結果

兵庫県南部地震における生産施設の想定被害と上記の交通推計の影響が生産額に与える影響の推計結果を表3に示す。被災対象地域は神戸市を含む兵庫県内の15市21町であり、推計したのは①道路被災の影響を含まない生産施設被害のみの影響、②走行時間の増加による回転率低下の影響および③走行時間増加による物流費用の増加に起因する生産取りやめの影響である。この結果、兵庫県南部地震においては、走行時間の増加が生産に与える影響が生産施設の直接の被害を上回るものであったと推計されるこのうち80週間後については、平常時よりも生産が増加しているが、これは前項の交通推計の影響によるものと考えられる。一方、物流コストが増加することによる生産の取りやめの影響はほとんどなく、システムを構築するにあたっては、これを除いて考えるかもしくは生産取り止め率を表す関数を変更することが必要になる。

表 3 生産額の推移

	平常時	被災直後	50 週間後	80 週間後
生産施設被害のみ	100%	91.2%	97.4%	98.1%
回転率低下の影響のみ	100%	83.9%	86.9%	106.5%
物流費用の影響のみ	100%	100%	100%	100%

4.4 経済波及の試算結果

3.4で説明した手法の妥当性については下記のような結果が得られた。

- ① basic approach においては、生産額の減少率と同程度の率で最終需要額合計が減少する。ただし部門によっては負の最終需要が生じており、これを域外からの移出入を通して接続するモデルへと拡張する必要がある。
- ② primitive approach では、最終需要額が被災前に比べて増大するという結果が出た。これは、一定の率で設定される在庫の上限を超えた場合はすべてそれが最終需要に足し込まれるためである。
- ③ possible-required approach については、一度生産額が減少した後に生産額が回復したとしても、生産パターンが元に戻らず、縮小された安定解に落ち着いてしまう。これを解決できる方法を検討する必要がある。

以上の三つの手法に関してはまだ解決すべき問題が残されているが、本研究においてそれらの問題点が明らかになっており、次年度以降でこれらを解決しつつ最善のモデルを選択し、システムに組み込んでいく。

5 今後の問題点

今回検討した手法においては、たとえば変換手法における復旧曲線の仮定などのモデル化が行われている。これまで大都市地域における震災に関する交通・経済に関する系統的なデータが整理されていないため、これらのモデル化は簡易なものが多いが、今後、理論・計測の両面からこれらのモデルをさらに正確なものとし、社会経済的影響評価システムとして統合する。また、生産が制約を受けた場合の動的な経済波及状況を再現するモデルについては、今回判明した問題を解決するモデルを完成させる必要がある。

¹ 神戸商工会議所：阪神大震災による経営への影響および神戸の復興に関する調査結果、1996. 3

² 産業復興会議：産業復興計画、1995. 6

1. 国土の保全及び防災に関する研究

1. 1 被災予測に関する研究

1. 1. 1 震災対策計画の高度化に関する研究

防災技術課 課 長 杉田秀樹
主任研究員 野崎智文
研 究 員 遠藤和重

1 まえがき

本研究の目的は、地方建設局、地方公共団体等における震災対策計画において、災害情報収集システムを整備する際の留意点、知見について検討し、効率的に災害情報を収集・分析するシステムのあり方、それらを有効に活用し、震後の被害を最小限に食い止めるための震災対策体制のあり方等について研究するものである。初年度は道路等の基幹施設における地震直後の被害状況の有効に検知し集約するシステムのあり方について検討し、2年目には被害状況の予測、分析等の意思決定支援などを行うサブシステムについて検討する。これらの研究結果に基づき、最終年度には高度情報機器を含めた震災対策システムのあり方、それらを活用するための計画の策定に関する留意事項などについてまとめるものとする。

初年度にあたる本年度は、地方建設局、地方公共団体等で整備されている各種災害情報システムの現状をまとめるとともに、兵庫県南部地震における施設の被害状況を検討し、震災対策を高度化するために必要なシステムの条件を抽出した。また、被害の検知に関する技術について、将来的に適用の可能性のあるものについてまとめた。

2 研究目的

大規模な地震が発生した場合、道路・河川管理施設等の基幹的な施設には広域にわたって被害が発生するおそれがある。これらの基幹的施設は、例えば緊急輸送道路ネットワークなど連続的に機能してはじめて全体系としての機能を発揮するものが多い。したがって、地震発生直後に施設の管理者は全体系に大きな影響を与える箇所の被災を知り、迅速に対応しなければならない。このことから本年度は、地震発生直後の初動期に震災対策体制を迅速に立ち上げるために有効なシステムのあり方を研究する。

3 研究方法

3.1 地方建設局、地方公共団体等における災害情報システムの整備状況の調査

地方建設局や地方公共団体等の公的な役割を負う組織においては災害対策基本法等に基づき災害対策時の体制が定められるとともに、その活動を支援する様々なシステムが導入されている。このようなシステムは、①被害の情報を収集するシステム、②被害の状況を予測するシステム、③分析等意思決定を支援するためのシステム、④情報伝達・共有化のためのシステムに分けられる。このうち震災対策の初動機に活用され体制の迅速な確立に必要なものは、①および②である。②については、平常時に被災の予測を行うためのものと地震発生直後に短時間で被害を推定するものがあるが特に震後の体制に重要なのは後者のシステム（いわゆるリアルタイム被害予測システム）である。したがって本年度においては、①の情報収集システムと②のうちのリアルタイム被害予測システムに関して考察を進める。

最近になって、国・地方の機関において、地震波の到達や地震直後の人的被害、施設被害の程度をいち早く推計する「リアルタイム地震防災」の気運が高まりつつある（表 1）。

表 1 地震防災に関するリアルタイムシステムの例

システム	開発・管理者	目的	計測・推計等の内容
UrEDAS	JR総研	地震動記録に基づく車輛の緊急停止・点検	JR新幹線・在来線の軌道沿いの地震動（P波）を検知し、4秒以内に
SIGNAL	東京ガス	地震動の強さを高密度で計測し、ガス管路の被害を即時推定	331個所のSIセンサー、20個所の液化化センサーで地震動を検知 SI値に基づく被害率の算出
地震被害予測システム	東京都	地震直後の消火・救急活動のための即時被害予測	人的被害、出火件数・延焼状況、液化化等の予測
震災対策支援システム	川崎市	地震発生時の応急対策のための、地震動の把握、地震被害の即時予測、意思決定支援	市内全域の震度分布 人的被害、構造物被害等の予測 災害対策本部設置状況等の災害応急対策指針項目の集計・表示
横浜市高密度強震計ネットワーク	横浜市	地震発生時の応急対策のための、地震動の把握、地震被害の即時予測、意思決定支援	MICOSからの気象・地震情報 市内150個所の地震動及びこれに基づく警報の発令 市内各区の被害集計
即時震害予測システム	建設省	地震発生時の緊急点検のための公共土木施設被害の即時予測	地震動分布の推定、道路・河川管理施設の被災度予測、液化化危険度の分布
CUBE	カリフォルニア工科大等	地震の位置・マグニチュード等の即時配信・警告	カリフォルニア州における地震計の計測データ

ただし、これらのシステムに用いられている手法は、①災害のメカニズムが複雑であり、また②短時間で計算を行う必要があることなどから、簡便なモデルが用いられていることが多く、被災判定の結果は市区町村等のゾーンレベル程度の表示となり、また安全側のものとならざるをえない。

一方、地震発生直後に、地震情報のほか、施設の被災を直接検知するシステムが整備されれば、点検箇所等戦力を集中する対象を絞り込むことができ、直後の調査・緊急対応のために非常に役立つ。特に緊急輸送道路ネットワークや河川管理施設等の被害については広範なエリアにわたる基幹的な施設の被災を効率的に把握することが、震後の混乱を軽減するためにも大切なこととなる。したがって本年度の研究においては、地震直後に道路・河川等の基幹施設の被災を迅速に検知し、点検・緊急対応活動に資するシステムのあり方などについてまとめることとする。

3.2 兵庫県南部地震の被災事例に基づく考察

兵庫県南部における道路、河川堤防の被害の実態に基づき、検知の対称となる物理現象、その規模などについて調査し、被災を検知する技術の対象を明確にした。道路については道路施設の被害（路面の被害、橋梁の被害、盛土・切土のような土構造物の被害など）に加えて占用物件や沿道建築物の被災も道路交通に支障を与え、河川管理施設については堤防において被害が生じている。一方道路に関しては、施設の被災のみではなく、緊急車両の円滑な通行に影響を与える被災後の交通流の状況についても監視する必要がある。

3.3 既存の技術及び最新・将来の技術の適用性の検討

基幹施設の地震による被害を検知する方法として、現位置にセンサー等を設置する方法（現位置検知）と、離れた位置から被害の状況を把握する方法（リモートセンシング）が考えられる。原則として前者は局所的な被害を把握するものであり、後者は被害の全般を把握したり特に規模の大きな被害を知るのに有用である。もちろんセンサーの種類によっては、現位置における計測で連続する区間の被害を計測することも可能である。本研究においては、現位置検知、リモートセンシングの各々について現時点で適用可能な技術、最新の技術で今後震災対策への適用が考えられるものについて調査した調査にあたっては、国・地方などの基幹施設を管理する機関が実際にこのような機器システムを取り入れる際に有用な情報となるよう、下記の方針でまとめた。

- ① 現位置のセンサー等については、センサーの種類・機能のほか、これらを用いて計測する際の設置状況、測定の範囲や精度、センサーの寸法・重量などの代表値をまとめた。

- ② リモートセンシングに関するものについては、人工衛星技術など最新の技術に関するものが多いため、これらを理解するために必要な基本的な事項についても含めてまとめた。

3.4 検知システムの迅速性および被害把握の効率性の評価手法の検討

調査された検知技術を活用し、地震発生直後から被災情報を収集し緊急対応を完了するまでの状況をシミュレートする方法を提案した。具体的には、ある工事事務所管内で地震による被害が発生した場合に、その検知結果がセンサー、ITV など複数の方法（検知ルート）に沿って伝えられたのち、復旧活動が開始できるまでの時間を計測する。このために、検知・対策における主要なイベントにかかる時間に対して確率分布を仮定し、モンテカルロ法により最速の対策を可能とする検知ルートを集計した。

このほか、震災対策体制の被害把握にかかる効率性を評価する手法についても提案した。すなわち、地震被害の箇所数、点検班の数および情報を処理する窓口の数を変化させたときの、情報収集完了に要する時間を、待ち行列を加味したモンテカルロ法により計測した。

4 研究結果

4.1 震災による被害を検知する技術について

(1) 現位置における検知技術

たとえば橋梁等の被災を検知するためには、地震計の情報をを用いるなどの推定的方法、ひずみ計や変位計など被災を一定の物理量に変換する変換的方法、ITV カメラなどによる直接把握方法がある。例として橋梁にこれらの技術を適用する場合のイメージを示す（図 1）。もちろんこれらのセンサーをすべて設置する必要はなく、構造物の重要度・規模等に応じたものを設置してよい。また、即時検知の考え方から、各センサーの出力は有線・無線の回線により施設を管理する事務所等に伝送され、出力・表示はできる限り自動的に行われるべきである。

ここで、被害の即時検知に関するシステムのあり方について、センサー設置の方針、検知信号の伝送、検知結果の伝達・表示の三点に関して以下の事項が大切である。

① センサー設置の方針

基幹施設の被害を即時に検知するセンサーは、施設の広域性に配慮するとともに、構造物の重要度に応じて設置の密度・検知項目を吟味するべきである。

たとえば非常に重要性が高い大規模な構造物については、図 1 のように各種のセンサーにより詳細な観測を行い、構造物被害、交通機能などを監視する必要がある。一方、都市内における連続高架構造の道路など広域にわたる構造物については、すべての区間において多数のセンサーを設置することは困難なことから、変位計、ワイヤーの断続、光ファイバーなどの簡便なセンサーを連続的に配置し、交通機能に障害がある箇所、特に大規模な被害が発生した箇所を検知することも検討するべきである。場合によっては、シンプルモデルにより誤差を含む被害予測を行うよりは、簡便・安価な方法で即時検知を行う方が、精度・コストの面から有利となることも考えられる。

② 検知信号伝送の方針

検知信号を伝送する場合、伝送される信号の量、回線容量、伝送時点での回線の混雑・切断などのリスクを考慮して計画すべきである。

たとえば多数の地震計の波形データを伝送するためには、大容量の回線が必要となるが、このようなデータは地震直後の初動期には特に必要ない。ITV カメラの画像データは、たとえば渋滞状況なども監視す

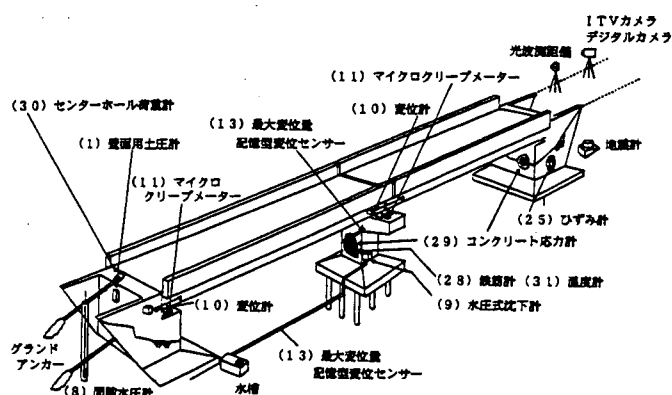


図 1 橋梁における検知センサーのイメージ

るとすれば地震発生後継続的に伝送する必要があるが、準動画レベルの伝送で差し支えない、一方、地震直後の被害発生の有無を検知する程度であれば、一定のパルス信号を送れば十分である。また地震後に回線が混雑するのは、発生後数分経ってからと想定されるから、それまでの時間の隙間で伝送を完了させる程度の信号であれば回線の混雑の影響を受けない。もちろんこれらの回線は、ルートの二重化、専用回線・一般回線の併用によってリダンダンシーを確保するべきであることはいうまでもない。

③検知結果の伝達・表示

伝送された検知結果を震災対策要員に伝達する方法は、地震発生時の勤務状況等を考慮して検討すべきである。また検知結果の表示は、GIS等の技術を取り入れ、要員が容易に被害の概況を把握するべきである。また、遠隔地において要員が検知情報を受信した場合には、必要に応じて要員からの対応、情報をフィードバックすることも考える必要がある。

地震は必ずしも要員の勤務時間内に起こるとは限らないので、被害の発生を要員に伝達する方法には留意が必要である。合衆国カリフォルニア州のCUBEシステムでは、地震計によって検知された地震情報をポケットベルにより関係者に自動的に伝達しているが、このような例を参考に、「要員がどこにいても、被害の程度を即座に」知ることができるようにするべきである。また要員の参集後に、彼らが被害の概要を即座に把握できるように、検知結果を表示する方法にも配慮が必要である。たとえば、地図データなど必要な情報を持ったコンピューターを災害対策室等に設置し、検知結果を地図上に自動的に表示するシステムを構築することは、技術的にはさほど困難ではないがその効果は大きい。

(2) リモートセンシングによる検知技術

現位置で直接被害を検知するほかに、ある程度離れたところから被災状況を監視する方法がある。このような方法は一般にリモートセンシングと呼ばれ、例えばヘリコプターや人工衛星からの映像撮影などがある。これらの方法は、可視光・電磁波を現場から離れた位置で受け、場合によっては情報処理を行い、それを画像として得るものが多い。リモートセンシングの技術は、地上からの光波・電磁波を受け、信号を記録するカメラなどのセンサーと、それらセンサーを搭載する人工衛星などのプラットフォームの組み合わせからなる。

現在のところ、震災対策時に活用できるリモートセンシング技術としては、航空機・ヘリコプターに搭載されたテレビカメラ、熱ビデオカメラなどによる画像データであり、これらは広域にわたる施設の被害の概況を把握するのに役立つ。一方、人工衛星から撮影される画像データの活用も考えられるが、近く打ち上げられる予定の高分解衛星においても地上における分解能は1～数mのオーダーであること、また周回衛星の場合は同じ地点に戻ってくるまでに10日から数十日の日数を要することから、現在のところ、地震直後にある程度の精度で被災を検知するのは困難である。

4.2 震災対策体制を評価する手法について

(1) 各種検知システムの迅速性の評価手法

ある工事事務所において地震による施設被害が発生したと仮定し、その被害を以下の五つの方法で検知するとした場合に、緊急対応が開始できるまでの所用時間を数値計算により計測した。

- ①各種センサーによる方法
- ②ITVによる視認
- ③ヘリコプターからの画像伝送による方法
- ④職員の点検による方法
- ⑤モニター制度による方法

地震によって施設に被害が発生してから被害の概況を検知し復旧活動が始めるまでに必要な時間を、上記五つの検知方法について図2に示す方法で検討した。たとえば、被害がセンサーによって検知された場合に、情報の集約や伝送にかかる時間を加え、さらに職員が参集してその状況を把握した後に、復旧準備・資機材の輸送を経て復旧作業が開始される。これら「センサーによる検知」などの部分はある長さの時間を持つイベントとして考えられるが、実際には、各イベントの中にはさらに細かいイベントに分けられている。これらのイベントの所用時間は、あるものは決定論的に、またあるものは確率分布（今回の場合は正規分布として仮定）として与えられている。また、

一定の確率で故障、渋滞など異なる事象に分岐する場合も考慮されており、その事象ごとに異なる時間値が設定されている。一方、ヘリコプターの飛行可能時間帯、昼夜間の違いによる職員参集時間の違いなど、地震発生時間帯によっても、これらの属性値は分けられている。このようなモデルに対して数多くの地震を発生させ、各ルートのうち最速のものを集計した結果が図3である。これより、ヘリコプター、可視光映像を想定した ITV は夜間には使えないこと、全体として現位置に取り付けたセンサーが有利であることがわかる。センサーが必ずしも最速とならないのは、地震による故障、回線のリスクを考えているためである。また、各時間帯ごとに全試行の所用時間平均を示したのが図4である。

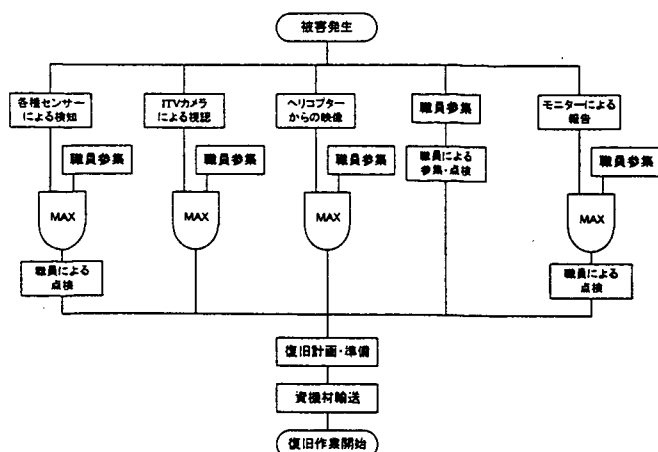


図2 被害検知システムの評価手法

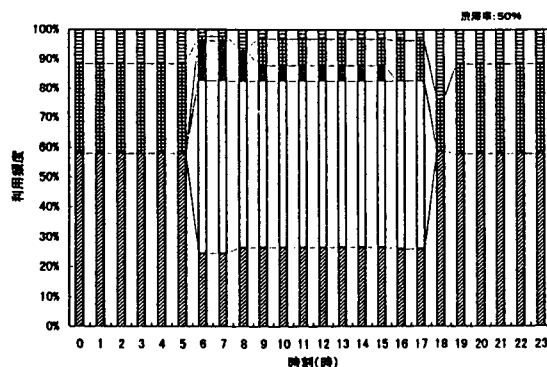


図3 復旧活動開始までに利用されるシステム

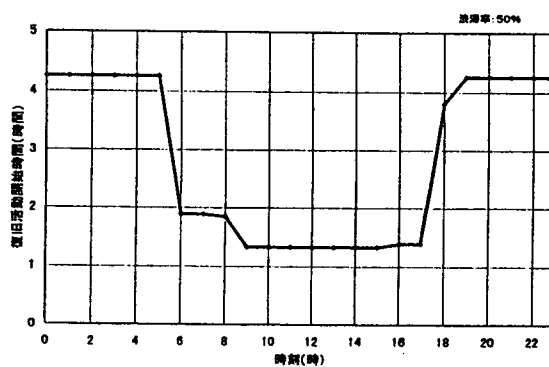


図4 復旧活動までの所用時間

(2) 被害把握体制の効率性評価手法

前項では事務所等が被災を検知し・点検した後に復旧活動を開始するまでの流れを検討した。ここでは、多数の被災箇所を複数の点検班によって移動・点検を繰り返し、報告を行う場合について、事務所がすべての箇所の被害状況を把握しおわるまでの時間を評価する。具体的には以下の手順により状況をシミュレートする。

- ① 事務所管内で M_0 箇所の対象箇所のうち M 箇所が被災したとし、 N 班で点検を行う。
- ② 各点検班は、移動・点検・報告を繰り返し、一つの被災箇所を点検し終わるごとにその箇所を点検済みとする。
- ③ 各班の行動において時間を要するイベントは、点検箇所への移動、調査活動、報告時間の三つで、各々確率分布を与える。
- ④ 被災箇所において点検終了後、各班は事務所へ報告を行うが、その際窓口数 K の数に応じて待ち行列が形成される。

⑤ 各班は未点検の箇所について点検を行い、未点検の箇所がなくなったら点検終了。

各班の行動を示したのが図5である。図中、網掛けの部分には定められた確率分布あるいはその時に応じた待ち行列の状態による所用時間を持つイベントである。

この手順で、1500 箇所の点検対象箇所のうち 10% が被災、連絡待機班の数が 2 版であると仮定して、調査班の数を 1～50 と変化させ、すべての箇所の点検が終わるまでの時間をシミュレートした結果が(図 6) である。班の数が 1 班から数班の範囲で増やしてゆく過程では点検終了までに要する時間が大きく減少するが、10 班程度以上では班の数を増やしても点検所用時間は大きく変化しないことがわかる。ここで調査班の数について論じておく。たとえば実際の工事事務所等において、3 箇所程度の出張所から計 3 班、事務所から初動期において 2～3 班出動したとすれば、その数は 5 班程度である。このほかに、協定等に基づき出動する業者班も考えれば、10 班という数は出動する数としても、また連絡を受ける事態を想定しても、ほぼ上限の値であると考えられる。

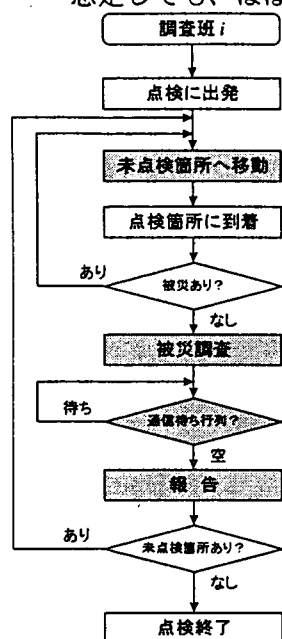


図5 点検手順

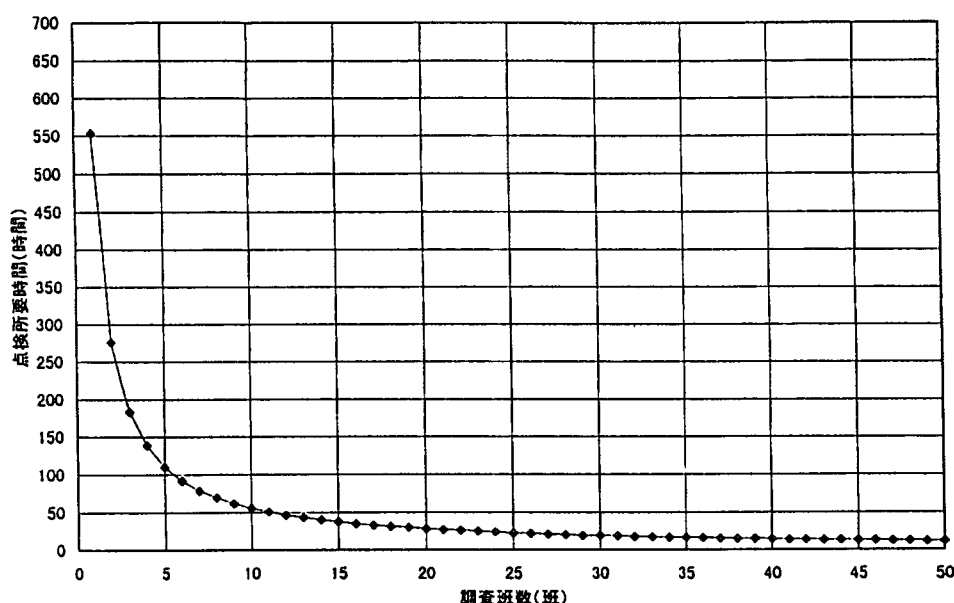


図6 点検班の数と点検所用時間の関係

5 今後の問題点

今回の調査において、地震直後の即時予測とならんで即時検知が重要であることがわかった。また、施設の重要度・検知が必要な事項に応じたセンサーおよび伝送系により被害の全容を把握するための配慮事項を検討した。これらのシステムを震災対策体制に応用した際の体制パフォーマンスを評価する手法を提案したが、今後は①被害状況の予測、分析等の意思決定支援などを行うサブシステムのあり方、②それらのシステムを活用するための震災対策体制の在り方を検討し、震災対策計画の策定に関して留意すべき事項をまとめてゆく。

筑波研究学園都市関連経費
強震計管理費

防災技術課 課 長 杉田 秀樹
管理係長 田島 明

1. まえがき

土木構造物の合理的な耐震設計を行うためには、地震動の特性や地震時の構造物の挙動を把握することが必要である。しかし、地震の発生メカニズム、地盤条件等による地震動増幅については未解明な点も多く、数値解析等の理論的なアプローチだけでは不十分である。したがって、地盤及び構造物の強震時の挙動を観測する強震観測を実施し、得られた強震記録に基づき地震動特性を把握する必要がある。

このための強震観測として、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明を目的として特定地域に多数の強震計を系統的に配置する高密度強震観測と、構造物及び周辺地盤上に強震計を設置して地震時の構造物及び地盤の振動特性を観測する一般強震観測を実施している。高密度強震観測は、平成7年度補正予算により、静岡県 of 相良・焼津・沼津・松崎・兵庫県南部の神戸・六甲道、東京湾岸の浦安の7地区及び土木研究所構内に拡充されている。また、一般強震観測については、全国361箇所（平成8年9月現在）の公共土木施設で観測を実施している。

平成8年度は、高密度強震観測施設と一般強震観測施設の点検補正・観測記録回収・数値化を行うとともに、河川堤防における強震計配置計画（第3期）のとりまとめ、及び、高密度強震観測記録に基づく地震動特性の検討を行った。また本文では、拡充された高密度強震観測施設の概要も併せて示している。

2. 研究目的

土木構造物の耐震設計に資するための強震記録を蓄積していくためには、良好な記録を観測できる体制を維持し、それぞれの記録を解析に利用できるデジタルデータとして管理するとともに、各記録についての基本的なデータを把握しておく必要がある。これらの必要性を考慮し、本課題では、高密度強震観測施設及び一般強震観測施設の維持管理、データの数値化等を行うことを目的としている。

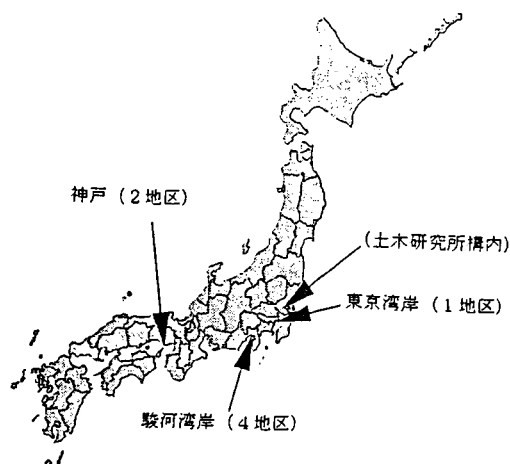
また、合理的な耐震設計には、地震動の、地形・地盤条件の影響による増幅、地盤中での伝播特性等を把握することが必要である。これらに関しては、数値解析による検討は数多く行われているが、観測記録に基づく検討は少ない。したがって、本研究では、高密度強震観測による強震記録に基づいて地震動の増幅、伝播等のメカニズム及び特性について検討することを目的としている。

3. 強震観測

3. 1 高密度強震観測

(1) 観測施設の拡充

観測地域を7地区に拡充（相良・焼津・沼津・松崎地区の更新及び六甲道、神戸、浦安地区の新設、図1参照）するとともに、土木研究所において観測データ収集装置を新設した。相良・焼津・沼津・松崎・六甲道・神戸・浦安の7地区では、それぞれ10～14箇所の観測点を設け、地表及び地中に12～20台のデジタル強震計を配置し、7地区合計で92台の強震計により観測を実施している。また、土木研究所構内については、A地区及びB地区の2地区で合計19台の強震計を配置して観測を実施している。



図－1 高密度強震観測地区

観測施設の拡充は、①地震動特性の検討に資する観測記録の充実、②通信回線を利用した記録収集及び施設点検の合理化、③ワークステーションを用いた記録蓄積の高度化を目指して実施したものであり、観測施設の概要は以下に示す通りである。

1) 観測システムの全体構成

システムの全体構成を図2に示す。土木研究所に設けられた情報処理施設と7地区の観測施設はNTTのISDN回線を用いて並列に接続されており、通信制御ユニット及びキーステーションを用いて全ての観測点を制御することができる。

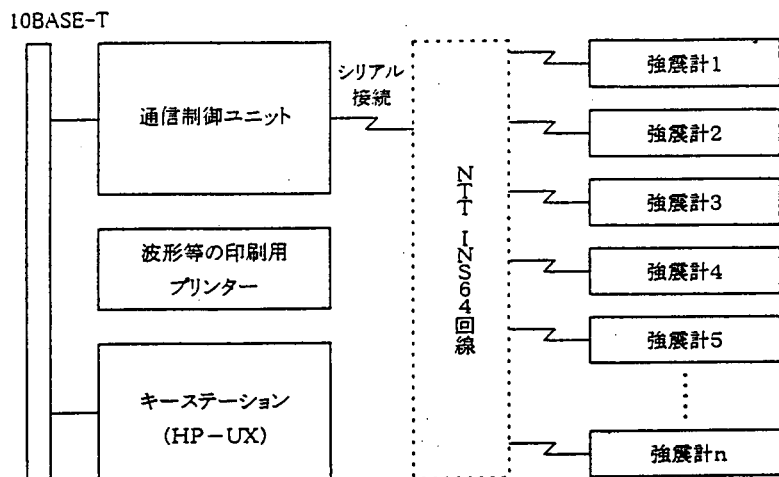


図2 観測システムの全体

2) 強震計

新規に設置した感振器及び処理機の仕様を表1に示す。駿河湾4地区における既存の観測施設（速度帰還式サーボ型加速度計）についても更新を行い、7地区全体で観測施設の整合を確保した。感振器及び処理機の選定に際しては、記録伝送や自己診断等のリモート管理が可能であること、及び、記録媒体は取扱が容易なメモリーカードであることに留意した。

表1 感振器及び処理機の仕様

(a) 処理部

記録範囲	± 2G 以上
サンプリング周波数	200Hz
分解能	15mgal 以下
遅延時間	0 ～ 30 秒で設定
起動レベル	0.1 ～ 30gal で設定

(b) 感振器

測定成分	水平2、上下1
検出機構	サーボ型加速度計
測定加速度範囲	± 2G 以上
測定周波数範囲	0.1 ～ 30Hz
分解能	5mgal 以下

3) 通信制御ユニット

観測点との通信を通じて、観測記録の確認・収集・消去、及び、強震計の機能診断・設定を行うことが

できる。遠隔操作で実施できる機能診断・設定は①サンプリング周波数・トリガーレベル・遅延時間、②時刻、③メモリ・バッテリー残量、④感振器動作である。

4) キーステーション (図3)

通信制御ユニットの動作をスケジュール管理する。また、通信制御ユニットに回収された観測記録の一次処理及びデータベースへの蓄積を行う。観測記録の一次処理としては①波形の図化、②最大加速度分布の表示 (図4)、③フーリエスペクトル及び地震応答スペクトルの計算・表示を行うことができる。

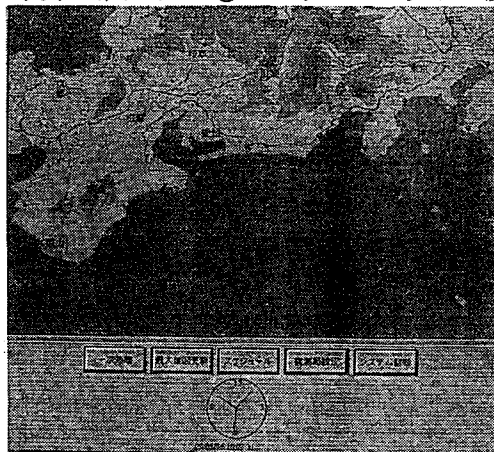


図3 キーステーションのメニュー画面

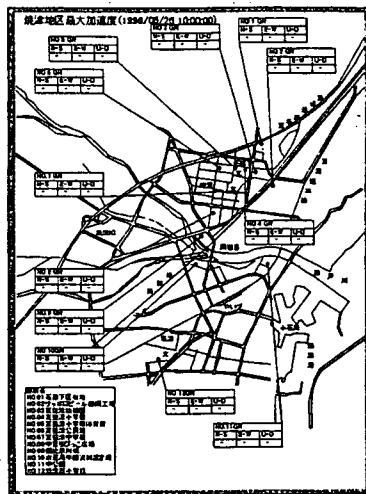


図4 焼津地区における最大加速度の表示

(2) 観測施設の維持点検

相良・焼津・沼津・松崎・六甲道・神戸・浦安の7地区について、正常な観測体制を維持するために年間1回の観測装置の現地点検を実施した。また、土木研究所からの遠隔操作により、全ての観測点の機能診断を実施した。

(3) 観測記録の回収

平成7年度には、駿河湾沿岸の4地区で6地震106記録が得られた。また、上述したキーステーションを用いて観測記録の一次処理及びデータベースへの蓄積を行った。

3.2 一般強震観測

(1) 観測施設

公共土木構造物の耐震設計基準の合理化を図るとともに、地震防災対策立案のための基礎資料として活用するために、土木構造物及びその周辺地盤上並びに地中における強震観測網を整備し、強震記録を蓄積するものである。

平成9年3月現在、全国361箇所の公共土木施設において強震観測が実施されている。強震計設置施設別・強震計型式別の設置箇所数及び台数を示すと表2の通りである。

表-2 公共土木施設への強震計設置状況

対象施設	箇所数	強 震 計 型 式		
		SMAC型 箇所数(台数)	電磁式 箇所数(成分数)	普及型 箇所数(台数)
道路施設	181	94(181)	22(189)	65(351)
河川施設	53	18(33)	9(63)	26(69)
ダム施設	121	15(30)	56(614)	50(129)
下水道施設	6	6(13)	0(0)	0(0)
合 計	361	133(257)	87(866)	141(549)

(2) 維持点検

土木研究所が設置したSMAC型強震計12箇所22台を含むSMAC型強震計79箇所163台、電

磁式強震計 28 箇所 303 成分、普及型強震計 40 箇所 104 台について定期点検補正を実施した。本年度の点検においても消耗箇所や腐食箇所等が発見されたが、適正な調整・修理を行うことにより強震観測網の維持を図ることができた。なお、これらの強震計の点検は道路事業費（道路施設関係の強震計点検）、河川事業費（河川施設関係の強震計点検）、河川総合開発事業費（ダム施設関係の強震計点検）と合わせて実施している。

（３）観測記録の回収・数値化

平成 8 年 4 月～平成 9 年 3 月の間に、SMAC 型強震計により 41 記録、普及型強震計により 84 記録、電磁式強震計により 242 記録、合計 367 記録が回収された。また平成 7 年に回収された記録のうち、デジタル値で記録されていない SMAC 型強震計の観測記録から 9 記録 27 成分（3 地震）の数値化を行った。平成 7 年 3 月 23 日に江戸川堤防近傍の地盤上で得られた強震記録波形を示すと図 5 の通りである。

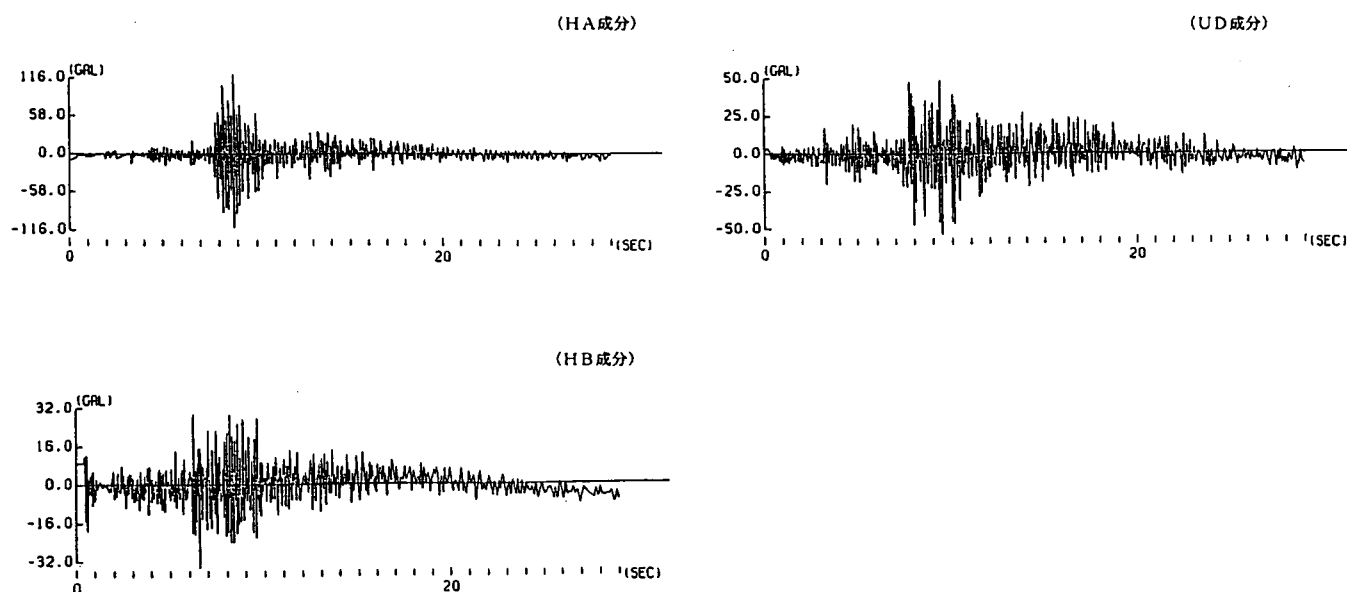


図 5 平成 7 年 3 月 23 日に江戸川堤防近傍の地盤上で観測された強震記録

（４）河川堤防における強震計配置計画（第 3 期）

兵庫県南部地震による土木施設の被害を背景に、河川堤防を中心とする河川管理施設についても強震観測施設の一層の拡充が求められている。本年度は、地建等との調整に基づいて「河川堤防における強震計配置計画（第 3 期）」を作成するとともに、これを土木研究所資料としてとりまとめた¹⁾。

河川堤防における強震計配置計画は昭和 53 年より開始され、第 1 期計画で 17 箇所、第 2 期計画で更に 21 箇所（一部未着手）、合計 38 箇所が強震観測が実施されている。第 3 期配置計画は、第 1・2 期計画で設置された観測施設の更新・増強等必要な見直しを行うとともに、多様な条件下での観測記録の拡充を図ることを目的として、平成 8～10 年度の 3 箇年間で合計 90 箇所に強震計を更新・増強するものである（表 3）。第 3 期配置計画の基本方針は以下の通りである。

- ①観測箇所数の少ないⅠ種・Ⅲ種地盤について観測施設を増設する。
- ②地域的な空白域について観測施設を増設する。
- ③特殊堤について新たに観測施設を設ける。
- ④地盤改良等の耐震化対策を施した箇所について、新たに観測施設を設ける。
- ⑤旧河道をはさんで微地形が異なる箇所について、新たに観測施設を設ける。

表3 河川堤防における強震計配置計画（第3期）

地域等名	既設継続箇所 箇所名	全国配置			個別配置※			3期計画	総箇所数
		SMAC型更新	既設増設	全国配置	特殊堤	耐震化地盤	微地形		
北海道開発局	石狩川 十勝川(7箇所) 網走川	釧路川 十勝川(大津) 沙流川		後志利別川 天塩川			後志利別川	6	15
東北地建	米代川 最上川 岩木川	吉田川	高瀬川 雄物川	阿武隈川(2箇所) 北上川(2箇所) 最上川	名取川(杭基礎)	鳴瀬川(締固め)	北上川	11	14
関東地建	荒川 久慈川	江戸川		荒川 利根川(2箇所) 那珂川 多摩川、相模川	利根川(杭基礎) 北利根川(直接基礎) (旧中川)(自立矢板) (隅田川)(杭基礎)	荒川(深層混合処理) 利根川(ドレーン) 江戸川(自立矢板)	利根川	15	17
北陸地建	信濃川(2箇所) 坂川			信濃川(千曲川) 神通川	阿賀野川(直接基礎)	信濃川(自立矢板)		4	7
中部地建	木曾川	安倍川		菊川、豊川 狩野川、鈴鹿川		庄内川(深層混合)	木曾川	7	8
近畿地建		淀川(2箇所) 大和川	紀ノ川	新宮川、淀川 加古川、九頭竜川	(寝屋川)(自立矢板)	淀川(ドレーン) 九頭竜川(自立矢板)		11	11
中国地建		太田川		旭川、天神川 斐伊川		佐波川(締固め)		5	5
四国地建	吉野川(石井)		吉野川(徳島) 瀬川	肱川				3	4
九州地建	川内川		大淀川	遠賀川、五ヶ瀬川 山国川、白川 筑後川		六角川(深層混合) 菊池川(自立矢板)		8	9
総箇所数		10	6	32	7	11	4	70	90

注※)通常の堤防位置だけでなく、特殊条件下での振動を観測する。特殊条件としては①特殊堤の振動、②改良地盤の振動、③旧河道などの微地形による振動の差違に着目

4. 高密度強震観測記録に基づく地震動特性の検討

高密度強震観測施設の拡充や河川堤防における強震計配置計画（第3期）をはじめとする研究目的の観測施設の充実に加えて、地建等の防災支援を目的とした地震計ネットワークの整備など、兵庫県南部地震を契機として、従来に比べてよりシステムティックな地震観測体制が実現されつつある。

以上の背景を踏まえ、これまでに高密度強震観測を通じて得られた研究成果を改めて整理するとともに、高密度強震観測をはじめとする各種地震観測記録の有効活用を進めるために今後検討が必要とされる課題と将来目標を検討した。

(1) 高密度強震観測に基づく研究成果の整理

表4 高密度強震観測記録に基づく既往の研究

土木研究所における高密度強震観測は昭和56年に開始され、年度ごとに観測施設の点検・観測記録の数値化・観測記録に基づく地震動特性の研究が実施されてきた。既往の主要な研究成果を整理すると表4の通りである。

地震動の増幅特性・伝播特性・空間的変動特性及び地震時の地盤ひずみの研究は、合理的な耐震設計に必要な地震動の3次元特性を解明することを目的としており、観測記録の蓄積にあわせて継続した検討が必要である。一方、観測記録の精度及び観測記録データベースの検討は観測記録の有効活用を進めることを目的

研究項目	主要な研究成果
地震動の増幅特性	①基盤地震動の推定法 ②地盤条件変化部における地震動の増幅特性 ③地形条件変化部における地震動の増幅特性 ④軟弱地盤における地震動の増幅特性
地震動の伝播特性	①地震動の伝播速度の推定法 ②地震動の3次元卓越方向の評価法 ③地震動強さS1の距離減衰特性 ④地震動の周波数成分毎の伝播特性
地震動の空間変動特性	①時間～空間変動を考慮した相対地震動の評価法
地震時の地盤ひずみ	①地震時地盤ひずみの距離減衰特性
観測記録の精度	①自動数値化装置の精度 ②デジタル強震計の記録精度
観測記録データベース	①強震観測情報検索図処理システム(SMDB)

としており、観測施設の拡充や観測機器の多様化を踏まえた検討が必要である。

(2) 観測記録の有効活用を図るために検討が必要な事項

高密度強震観測記録を研究に有効活用するためには、全ての観測記録が一定の精度を保障されていること、及び、データベース化により観測地点情報を含めて迅速な検索が可能であることが重要である。これらの検討に際しては、一般強震観測・地震計ネットワークとの横断的な整合を図ることは勿論、関連研究機関が行う地震観測の現状も考慮する必要がある。上記2点について、検討事項、現状の課題、望ましい方向をまとめると表5及び表6の通りである。

表5 観測記録の精度の確保

検討事項	現状の課題			望ましい方向
	高密度強震観測	一般強震観測	地震計ネットワーク	
観測機器	※更新時に機器仕様を統一	①アナログ式が混在 ②機器仕様が多種	※当初より機器仕様を統一	①デジタル式地震計への更新 ②機器仕様の統一1)
記録媒体	※更新時にICカードに統一	①アナログ式が混在 ②媒体が多種	※当初よりICカードに統一	ICカードを基本としたデジタル式媒体への統一2)
設置条件	①地中地震計の設置方向誤差の補正	①地中地震計の設置方向誤差の補正	※地表部のみのため随時方向補正が可能	①解析的な補正手法の開発 ②方向を検出可能な地震計3)

注1) 測定加速度範囲、測定周波数範囲、測定精度、サンプリング周波数、分解能、遅延時間等について統一が必要。
 2) 記録回収の簡便さ、記録処理の簡便さ、記録容量の大きさ等からICカードが望ましい。
 3) センサーにコンパスを内蔵し、パソコンを用いて随時方向の検出が可能な地震計も一部設置されている(写真1参照)

表6 観測記録のデータベース化

検討事項	現状の課題			望ましい方向
	高密度強震観測	一般強震観測	地震計ネットワーク	
蓄積情報	①観測記録 ②観測地点情報1)	①観測記録	①観測記録2) ②観測地点情報	①観測記録 ②観測地点情報
収集方法	※更新時にオンライン化	①地点ごとに回収	※当初よりオンライン化	オンライン化による自動収集4)
蓄積媒体	①EWS3)	①EWS	①EWS	PC上で統合化
操作画面	※更新時よりGUI	①CUI	①CUI	GUIへの統一

注1) 観測位置のみであり、地盤条件は台帳による。
 2) 最大加速度、SI値、計測周波数相当値のみであり、波形情報は一部地連のみ伝送される。
 3) 更新以前の観測記録は磁気テープにより蓄積。
 4) データ回収の省力化だけでなく、通信を利用したシステム診断により、点検の省力化を図ることが可能。

5. 今後の課題

今後も引き続き有効な観測記録の蓄積を図るとともに、公共土木施設の耐震設計の合理化及び高度化を図るために、一般強震観測及び高密度強震観測の整合に配慮した施設設備・高度化の推進が必要とされる。また、3次元入力～3次元出力系のコヒーレンスを用いた地中地震計の設置精度の検証手法について、地盤が軟弱な場合のコヒーレンスの評価方法や解析対象とする周波数領域に着目した検討が必要とされる。

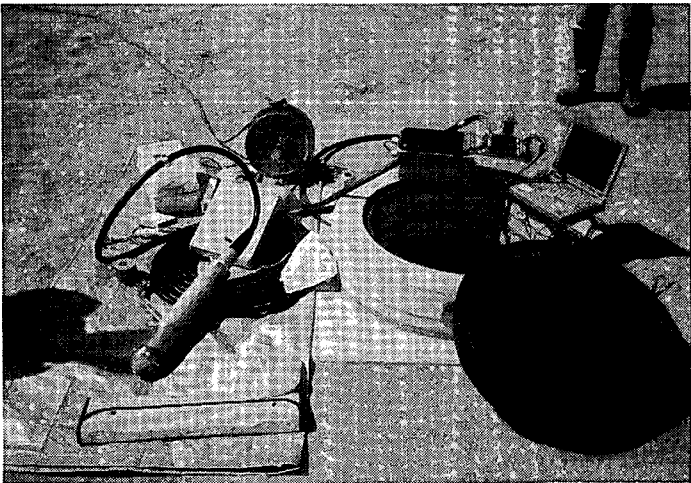


写真1 設置方向のパソコンによる調整

【参考資料】 1) 河川堤防における強震計配置計画(第3期)、土研資料、第3499号、平成9年3月

1. 都市震災の社会経済的影響評価システムに関する研究

防災技術課 課 長 杉田秀樹
主任研究員 野崎智文
研究員 遠藤和重

1 まえがき

大都市地域において規模の大きな地震が発生し道路等交通施設が被災した場合、その被害は施設そのもののダメージのみにとどまらず、被災地域内外の社会経済活動に深刻な影響を及ぼす。このような基幹的な施設の被災は、短期的には地震発生直後の救急・救援活動を困難にし、中長期的には経済活動を阻害する要因となる。したがって、このように基幹的な交通施設の計画・管理にあたっては、仮に地震によって当該施設が被災したとしてもその影響ができる限り小さくなるように震前の計画、震後の復旧を行わなければならない。ここでは、特に長期的な経済への影響を対象とし、道路等交通施設を管理する者がこのような影響を簡易に得ることができるシステム(EASSE: Earthquake Assessment System for Socio-economic Effect)を開発する。今年度は、システム開発にあたっての構成を明確にし、ユーザーの利用のインセンティブを高めるものとして、概略設計を行った。

2 研究目的

本研究の目的は、震災による交通施設の被災の経済波及効果を推計するためのシステムの概略設計である。このようなシステムを設計するにあたっては、それが最終的に「誰によって」、「どのように」利用されるか明確にし、完成後のアプリケーションが利用しやすいものとなるよう留意しなければならない。本システムについてはそれらのイメージを下記のように設定した(図1)。

- 対象ユーザーは、都道府県単位で道路等交通施設を計画・管理する者を想定する。
- 本システムは、震前の計画策定時、震後の復旧計画策定時に活用される。
- システムの入力は、生産施設及び道路・鉄道・港湾といった交通施設の被害とする。
- システムの出力は、上記被害に起因する域内・域外の総生産変化率とする。
- 対象とする帰還は、地震発生後1週間～数年程度とする。
- ユーザーはこれらの被害条件を変更しながら出力を確認し、経済的影響が最も小さくなるような震前の補強計画・震後の復旧戦略を検討する。
- 経済推計の想定範囲は都道府県レベルおよび全国レベルとし、都道府県内の被災設定は市区町村単位で行うものとする。ただし道路被災については道路ネットワーク上の個々の箇所を設定する。
- 道路被災のほか、鉄道、港湾の被災に起因する影響も算定可能とする。

本システムは複雑な社会経済現象をシミュレートするものであり、システム中の手法においては各種の仮

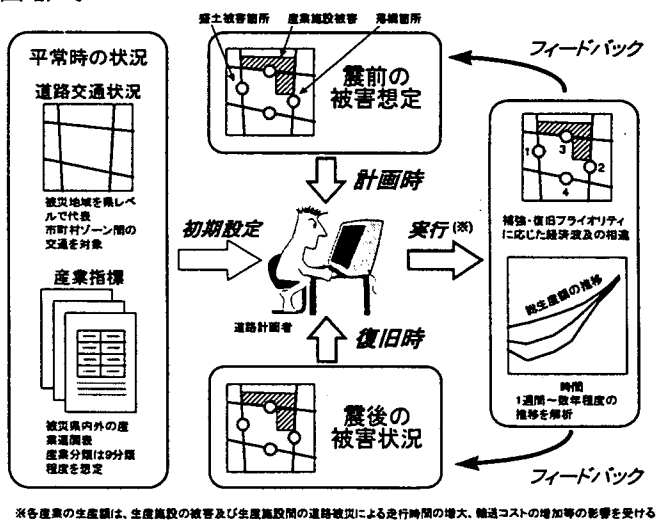


図1 EASSEのイメージ

定・モデルが導入されている。これらのモデルや手法は今後の研究の発展に伴って随時改良されてゆくものであることを考えると、システムはその都度改善された手法を取り入れ、精度・速度を高めてゆくべきものである。そこで本システムの設計にあたっては、主要な推計部分をモジュール化し、これらの改良が大きな抵抗なく可能となるように留意した。

また、道路ネットワークデータや社会経済指標などあらかじめ準備しておくデータについてはできるだけ自動的に取り込むことができるようにするとともに、被災箇所を入力など活用時に設定するものについては、地図画面・スプレッドシートなどを活用してユーザーの負担を軽減することを目標とする。

3 研究方法

3.1 システムの全体構成の検討

前章で述べたように、システムの設計にあたってはモジュール設計の方針を基本とする。これによりEASSEの全体構成を図2のように決定した。全体システムは、メインフレーム、交通推計モジュール、変換モジュール、経済推計モジュールの四つのモジュールに分けられる。

①メインフレーム

システム全体のメニューを司るとともに、各種データの取り込み・設定、地図画面の表示、推計結果等の表示を行う。

②交通推計モジュール

平常時及び地震後の交通推計計算を実行し、ゾーン間の走行時間を出力する。

③変換モジュール

ゾーン間の走行時間の増加に起因する各ゾーンの生産活動の変化を推計し、経済部門別の生産額を出力する。

④経済推計モジュール

経済各部門の生産額の変化が部門間の経済連関を通して波及する状況を推計し、域内・全国総生産の変化を出力する。

なお、各モジュールの設計にあたっては入出力を明確にし、将来より高度な手法が適用可能となったときのシステムの柔軟性を確保する。

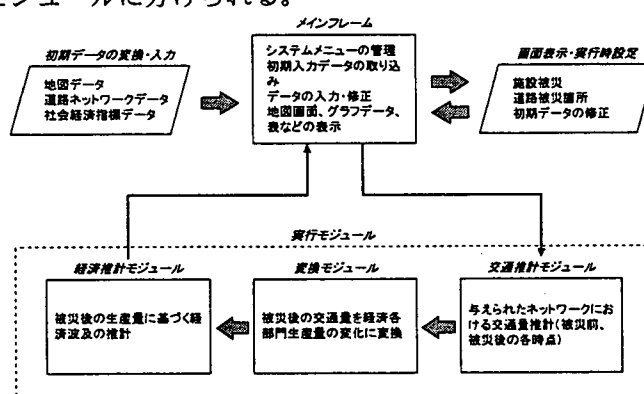


図2 システム全体の構成

3.2 必要なデータ

本システムを利用するにあたっては、道路ネットワークデータ、社会経済指標に関するデータのようにあらかじめ準備しておくデータが多い。ユーザーの負担を軽減するためには極力データの取り込みを自動的に行うことができるのが望ましいが、場合によってはデータ自体が印刷物でしか提供されておらず手入力が必要なものもあり、また処理の自動化が困難な場合にはデータ取り込み後にユーザーがデータを修正しなければならないものもある。活用時のユーザーの負担をあらかじめ把握し今後改善してゆくために、取り込みデータ、設定情報などについて表1のようにまとめた。

また設定が必要なデータについても、すべてユーザーが入力するのではなく、概略値や推奨値をデフォルトで示し、必要に応じてユーザーがそれらを変更可能なようにし、システムの扱いやすさと柔軟性を両立させることとした。

表 1 EASSE に必要なデータ

被災県内	地図情報 (図形情報・ 基本属性)	行政区界	市区町村界	自動設定			マニュアル修正・入力		データソース	備考
				内蔵	インポート	自動生成	地図画面	表画面		
被災県内	地図情報 (追加属性)	道路ネットワーク	ゾーン集約		○	○	△		GISデータ	—
			道路ネットワーク		○		△		GISデータ	—
			ネットワーク再構成		○	○	△		GISデータ	—
			リンク属性		○		△		GISデータ	—
			ノード属性		○		△		GISデータ	—
			ゾーン代表ノード		○	○	△		—	—
		鉄道ネットワーク			○		△		GISデータ	—
			港湾所在地		○		△		GISデータ	—
		被災情報	被災エリア				○		各県地震被害想定等	—
			建物被害率				○		—	—
			最大水平加速度				○		—	建物被害率が無い場合
			道路被災				○		—	—
			鉄道被災				○		—	—
			港湾被災				○		—	—
	表形式データ	社会データ	市区町村別人口		○		○		国勢調査報告	—
			生産施設構造構成				○		各市町村統計等	建物被害率が無い場合
		経済データ	市区町村部門別生産額			○	○		—	県民生産額より自動算定
			市区町村産業別就業人数		○		○		国勢調査報告	—
			市区町村別小売販売額				○		商業統計	—
			部門別県民生産・営業余剰					○	県民経済年報	—
		交通推計	全県産業連関表					○	各県産業連関表	—
			各モデルパラメータ	○				○	本モデルのために作成	—
		パラメータ	道路復旧係数					○	—	—
			機能低下率	○(デフォルト)				○	—	—
被災県外(内外)	交通データ	交通データ	建物被害算定パラメータ	○				○	—	—
			時間評価値	○				○	—	—
			生産施設復旧係数	○(デフォルト)				○	—	—
			県間ネットワーク		○			○	GISデータ	—
			発生集中トリップ		○			○	パーソントリップ調査	—
			貨物車OD		○			○	自動車起終点調査	—
		経済データ	貨物車OD		○			○	物流センサス	—
			通勤・通学OD		○			○	国勢調査報告	—
			全国産業連関表		○			○	全国産業連関表	—
					○			○	—	—

○: 一次処理

△: 必要に応じた二次処理

4 研究結果

4.1 メインフレームの設計

メインフレームの役割は以下のとおりである。

- ① システム全体のメニューの制御
- ② 道路ネットワークデータ、社会経済指標などの初期データの取り込み
- ③ 生産施設・道路被害の地図上での設定
- ④ 推計結果の表示
- ⑤ その他システム全体に関わる設定・制御

これらの機能を実現するためのシステムの構成は図3のとおりである。初期データについては、取り込まれた後に本システムで扱うデータフォーマットへ変換され、内部のデータベースへ記録される。これらは地図画面、スプレッドシート画面などを活用したGUI(Graphical User Interface)によって表示され、必要に応じて更新することが可能である。また、たとえば市区町村単位等のゾーン内の生産施設被害、道路ネットワーク上の被害などは推計時の条件としてユーザーにより設定される。この設定もGUIにより行われる。その後メインフレームは、初期データ及び設定された条件を実行モジュールに引き渡し、推計された結果を表示する。

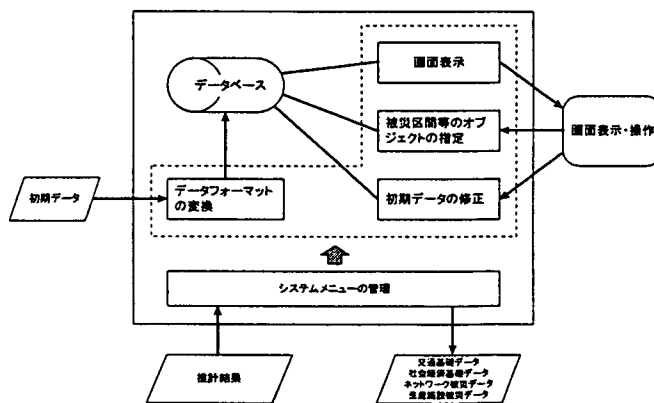


図3 メインフレームの構成

4.2 交通推計モジュール

交通推計モジュールでは、各ゾーンの被災による発生集中量の変化、鉄道被災の道路交通への影響などを考慮した四段階推計法を実行する(図4)。

(1) OD 発生集中量の推計

このパートでは、各ゾーン間の人流トリップに関する発生集中量を推計する。手法としては、パーソントリップ調査(PT調査)のデータに基づいた発生集中量の推計式および被災県内各ゾーンにおける人口等のデータを用い、目的別のトリップ発生・集中量を推計することとした。ここで、ゾーンは被災地域内では市町村～地方生活圈レベル、それ以外の地域では都道府県レベルとした(表2)。このゾーン区分にはいくつかの考え方がありそれらの違いが計算の精度や速度に影響を与えるが、今回は表中のCASE-Bで試算した。トリップの目的としては、出勤、登校、自由、業務、帰宅の五つの目的を考慮した。

本システムの推計は被災後1週間程度以降を対象としているため、被災直後の緊急車輛、避難のための車輛は考慮していない。復旧資材や救援・復興物資の輸送車輛、見舞い目的の車輛については無視できないと考えられるが、系統的な推計手法・基礎データがないため今回は算入していない。

なお港湾施設の被災は、港湾を含むゾーンの発生集中量を変化させることにより表現が可能である。

(2) トリップ分布の推計

OD間のトリップ分布の推計にあたっては、グラビティモデルを用いた。モデル式の分母は自由走行状態における各OD間の走行時間とした。モデル式の係数、指数については、パーソントリップ調査のデータに基づき、回帰することにより決定した。震災時の状態に対してグラビティモデルを適用することの適否には論議があるが、震災直後の混乱期以降は平常時のゾーンポテンシャルに対応した分布となるという仮定には致命的な欠陥はない。ただし今後緊急輸送道路ネットワーク計画が整備され震災時の交通状況に関する研究が進んだ場合、新たな手法を適用することもできる。

(3) 機関分担の推計

人流トリップを、以下の段階で分離する。

- ① 全トリップを、自動車・鉄道トリップと徒歩・二輪等のトリップに分離
- ② 自動車・鉄道トリップを、自動車トリップと鉄道トリップに分離
- ③ 自動車トリップを、自家用車トリップとバstriップに分離

さらにこの後、鉄道施設の被災に応じて鉄道トリップをバstriップに転換させ、算入する。なお、トリップ分担率を算出する式はPT調査結果に基づき推計する。

(4) 物流トリップの算入

物流トリップは、道路交通センサスの自動車起終点調査より直接OD別貨物車交通量を求め、自動車トリップに加える。

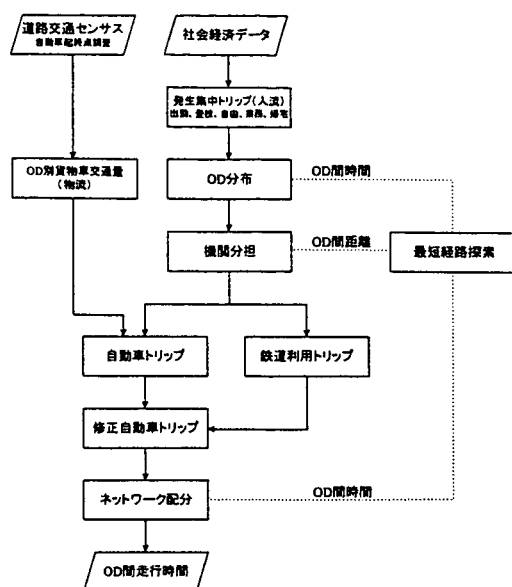


図4 交通推計モジュールの流れ

表2 ゾーン区分の考え方

		Case-A	Case-B	Case-C
被災県	被災地方生活圏	被災市区町村	市区町村	市区町村
	被災市区町村 その他の市区町村			
	被災地方生活圏に隣接する地方生活圏 その他の地方生活圏		地方生活圏	地方生活圏
被災県に隣接する都道府県 その他の都道府県		都道府県	都道府県	都道府県

(5) 配分交通量の推計

OD間トリップのネットワーク配分については、走行時間に関するユーザー均衡状態を仮定し、多段階配分を行う。

以上の推計により、各OD間の走行時間が推計される。

4.3 変換モジュール

本モジュールでは、初期設定・入力された各ゾーンの生産施設被害、OD間の所要時間に基づき、各ゾーンにおける生産部門ごとの生産額を推計する(図5)。生産施設被害に対しては、道路等交通施設の被害が全くなかった場合の生産額の復旧曲線を仮定し、これに対して所用時間の増加に伴う生産額の減少、輸送費用の増加に伴う生産取り止めを考慮し、被災後の復旧状態に応じた部門別生産額を算出する。復旧率、生産額減少率、生産取り止め率の関数形については、以下の方法により特定した。

①復旧率

阪神淡路大震災における企業アンケートに基づき、被災レベル(大破・中破等)別に復旧率曲線を仮定し、これを別途行ったアンケート¹⁾に基づいて、交通施設被災の影響を除いたものとして補正。各産業部門ごとに被災レベルが異なる場合は、部門別の復旧率曲線が得られる。

②走行貨物量の低下に伴う回転率の低下による生産額減少率

推計時点における走行時間の、平常時の走行時間に対する比の関数として定義。関数形は様々なものが想定できるが、ここでは反比例関数(平常時走行時間/推計時走行時間)で仮定。

③生産取り止め率

各産業部門の走行時間に対応した時間費用額の営業余剰に対する率を生産影響係数と定義しこれを独立変数とする生産意志(1-生産取り止め率)の関数形を定義した。ここでは試みとして、線形関数とステップ関数を定義している。

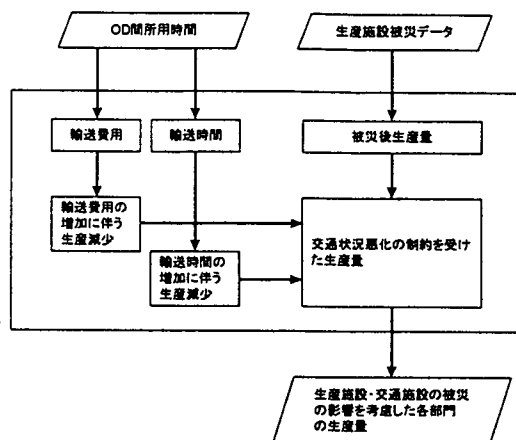


図5 変換モジュールの流れ

4.4 経済推計モジュール

本モジュールにおいては、変換モジュールで推計された生産各部門の生産額減少の影響を部門間の連関・波及状況を考慮して推計する。たとえば兵庫県南部地震の直後には各所で震災の直接被害額およびその波及等による間接被害額が算定されており、一般家屋等の被害も含めた直接被害額は6兆円～最大10兆円程度、直接被害に起因する間接的な影響は2兆円程度と試算されているものが多い²⁾。ただしこれらの試算においては、直接被害に大きな開きが見られるほか、間接的な影響の算出方法については、被災地域の固定資産税評価額に想定被害率を乗じるものや、各企業の取り引き減少等の機会損失額に基づくなど、様々な簡略化された方法が適用されている。一方、産業連関分析の手法を用いて震災による経済的な被害を算定している例もあるが、それらは震災による生産額の直接的な減少分、復興需要による生産額の直接的な増加分を加味した上で、レオンチェフモデルを適用するのが一般的である。

さて、震災の影響といった問題にレオンチェフモデルを用いる場合には、以下の三点に注意しなければならない。まず第一に、このモデルは与えられた最終需要額を満足するための各部門の生産額を求めるも

のである(demand-pull)ということである。震災による影響にはもちろん最終需要の減少(あるいは場合によっては増加)といったものもありうるが、入力として波及状況を制約するのは、むしろ被災により制約される生産額である。第二に、一般のレオンチェフモデルにおいては、各部門は任意の波及時点で必要とされる生産額を必ず生産できると仮定している点である。

$$x = f + Af + A^2f + \dots = (I - A)^{-1}f$$

ただし $x = \{X_1, \dots, X_N\}$: 生産額ベクトル

$f = \{F_1, \dots, F_N\}$: 最終需要額ベクトル

A : 投入係数行列

I : 単位行列

すなわち上式において A^N の項は最終需要額 f による N 次の波及時点において各部門で誘発される生産額を表すが、これらの生産額は必ず満足されるものとしている。一方、震災により各生産部門に施設等の被災が生じた場合、必ずしも生産額が満足されるとは限らず、制約条件が課される。第三の留意点として、本システムでは、各部門の被災・復旧に伴って変化する経済状況を一定の期間ごとにダイナミックに再現する必要があるため、動学的な取り扱いが必要となる。以上のことより、本システムにおいて要求される経済波及モデルの特徴を整理すると以下のようになる。

- ① 1週間、1ヶ月といった時間間隔での推移を追跡できる動学モデルであること。
- ② 各部門の生産額を入力とするモデルであること。
- ③ 生産額の制約が他部門へ波及する状況を再現できるモデルであること。

以上のような条件を満足するモデルとして、著者らは複数のモデルについて検討し、三つのモデルを選定している(basic approach, primitive approach, possible-required approach)。このうち basic approach ではレオンチェフモデルの行列を行和、列和が任意の時刻で成り立つ保存式と考え、これと投入産出行列と生産額ベクトルの関係式を連立させて順次時間軸に沿って解いていく。また primitive approach では、初期定常状態での供給パターン、投入産出行列の要素を列の供給額で割った必要投入係数および行の供給額で割った可能投入係数が一定であるとして、ある期における供給パターンを制約する部門(規定部門)をサーチして比例案分してゆく。最後の possible-required approach では、primitive approach と同様に必要投入係数と可能投入係数を導入し、各期においてこれらの係数から算定された必要投入額が可能投入額を超えないように生産額を調整し、収束させる。この考え方は、震災後のある部門から各部門への投入パターンが不変とし、もっともクリティカルな被害があった部門の影響を各部門が被るという考え方に基づいている。

5 今後の問題点

本研究で概略設計に基づき、今後実際のシステムを構築する。具体的には、地図データ・アプリケーションの絞り込み、各モジュールのプログラムコーディングを行っていく。

今回の概略設計に際しては、現時点でシステムに適用可能であり、かつあまりに高度な入力データを必要としないことに配慮しながらモジュールを設計した。ただし、各手法は随時改良が加えられるべきものであり、今後詳細設計と平行して試算を繰り返し、より妥当なモデルに改良していく。

¹ 神戸商工会議所：阪神大震災による経営への影響および神戸の復興に関する調査結果、1996. 3

² たとえば、産業復興会議：産業復興計画、1995. 6

3. 道路交通管理に関する試験調査

3. 1 道路交通情報の収集処理・伝達に関する試験調査

3. 1. 1 地震時早期被害予測・情報伝達システムに関する試験調査

防災技術課 課 長 杉田 秀樹

主任研究員 金子 正洋

研究員 濱田 禎

1. まえがき

地震後に道路管理者が、円滑かつ迅速な震災対策活動を行うためには、発生した地震の規模、地震動の分布、道路施設の被害状況の分布等について把握した上で復旧活動を開始することが望ましい。このためには、道路施設のある管内に配置した強震計からオンラインで地震動情報を収集し、あらかじめ整備した地盤条件、構造物条件のデータベース（以下DB）とあわせて即時に道路施設の被害分布を予測し、これらの情報を道路管理者に震後点検の出動前に提供するシステムが極めて有効である。このようなシステムを導入することにより、事務所・出張所においては管理している道路施設について重点箇所を絞った上で、震後点検を効率的に実施することができ、地方建設局本局においては局内全体の道路施設の被害分布を把握し、事務所間の役割分担、応援等、局全体としての震災復旧活動を迅速に立ち上げることが可能となる。

2. 目的

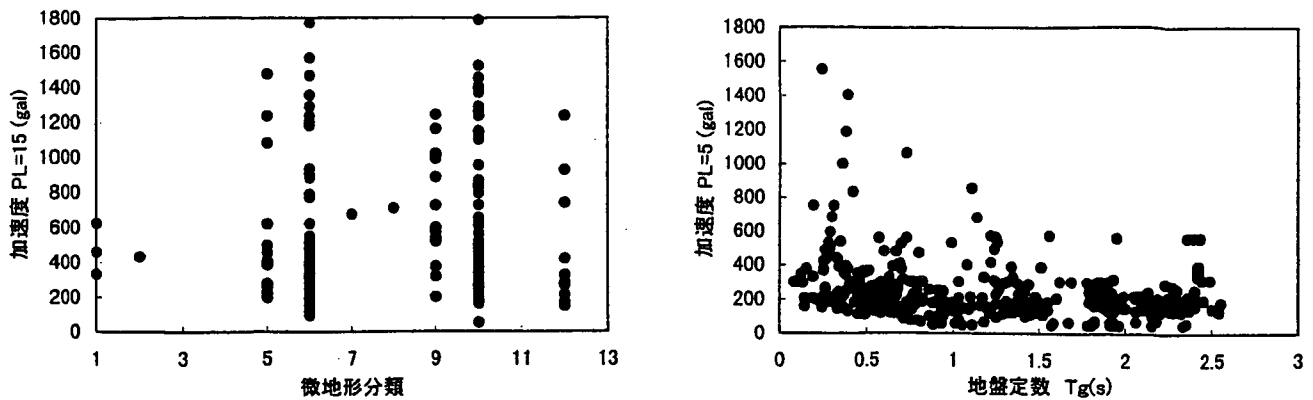
本調査においては、震災箇所・震災程度を予測する手法を提案し、震後即時に地震情報、震害情報を道路管理者のみならず道路利用者に伝送するシステムを構築することを目的としている。本年度は、微地形分類による地盤情報から液状化危険度を判定する方法、盛土の被害予測法及び地方建設局本局～土木研究所における情報伝送システムについて検討した。

3. 調査内容

（1）液状化危険度の判定法：液状化危険度の判定に必要な液状化指数PL値の算出には、ボーリング柱状図等の詳細な地盤条件が必要であるが、これらの情報は、液状化危険度の判定を行う箇所において常に入手できるとは限らない。このため、比較的容易に入手できる情報（微地形分類、地盤定数）を用いて、液状化危険度の判定を行う手法について検討した。具体的には、詳細な地盤条件が入手できる箇所について、液状化危険度の判定指標を算出し、判定指標とこの箇所における微地形分類、地盤定数との関係について整理した。ここで、液状化危険度の判定指標は、PL値が、5.0、15.0となる加速度の値とした。検討対象とした箇所は、関東地建管内の直轄国道沿いの約500箇所である。また、微地形分類については、これまでの液状化の発生事例等から判断して、液状化危険度への影響度合いにより、表-1のように分類した。

表-1 微地形分類の区分

	地盤区分
1	埋立地
2	干拓地
3	自然堤防
4	砂丘末端緩斜面
5	砂丘間低地
6	砂丘（最大標高7m以上）
7	砂丘（最大標高7m未満）
8	後背湿地
9	デルタ
10	谷底平野
11	砂州
12	緩扇状地
13	扇状地、丘陵、山地など

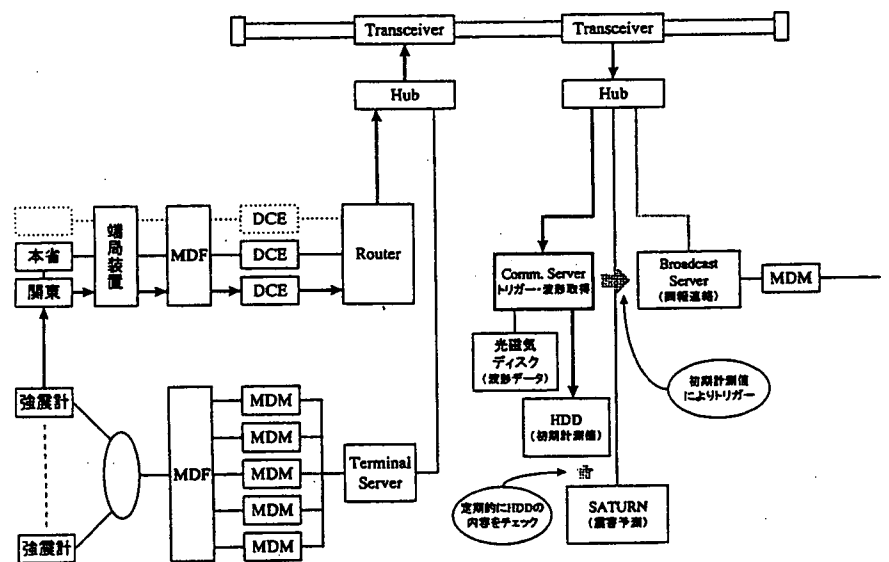


図一 1 微地形分類、地盤定数とPL値が5.0となる加速度の値

図一 1 に、微地形分類、地盤定数とPL値が5.0となる加速度の値との関係を示す。図から、地盤定数が0.8 s以下で加速度が100gal以下の場合、PL=5.0とはなっていないことなどが読みとれるが、全体として、微地形分類、地盤定数とPL値が5.0、15.0となる加速度の値との間に明瞭な傾向は見いだせなかった。今後は、地下水位の深さを、海岸、河川との距離から推定するなど、液状化危険度との関連が想定される情報を簡易に得る方法を検討し、新たに得られた情報と微地形分類、地盤定数を合わせて、液状化危険度との関係について整理を進めたい。

(2) 盛土の被害予測手法：既往の被害事例によれば、液状化がによる地盤の沈下に起因する場合は多いことから、盛土位置での液状化危険度を指標として、盛土の被害度を予測することとした。盛土本体の振動による崩壊については、土構造物の変形予測に関する研究の進展を待って、別途検討が必要である。

(3) 地建本局～土研間の情報伝送システム：建設省地震計ネットワーク計画との整合に配慮して、



図一 2 に、土研～関東地建の情報伝送装置の構成図

土木研究所と関東地方建設局間における情報伝送仕様を定めた。また、両者間で接続試験を実施し、事務所より本局に収集された地震動情報（最大加速度、S I 値、加速度応答値、速度応答値等）の伝送状況を確認した。図一 2 に、土研～関東地建の情報伝送装置の構成図を示す。

4. 今後の課題

液状化危険度の予測精度を向上させるとともに、地中構造物等の他の種類の構造物について地震後の即時被害予測手法を検討する。また、情報伝送システムについては、予測結果の事務所へのフィードバックを含めて、工事事務所～地方建設局本局～土木研究所間における情報伝送の効率化を検討する。

3. 道路交通管理に関する試験調査

(1) 道路交通情報の収集処理・伝達に関する試験調査

道路ネットワークの耐震性向上技術に関する試験調査

防災技術課 課 長 杉田 秀樹

主任研究員 金子 正洋

主任研究員 野崎 智文

1. まえがき

道路管理者は、地震発生後の復旧活動及び地震発生前の事前補修において、迅速かつ効率的に業務を遂行する必要があるが、これらの遂行にあたっては、地震発生時に道路に求められる機能及び確保される機能について、道路を個別の箇所ごとではなくネットワークとしてとらえて把握しておく必要がある。このために、地方公共団体等の地震防災計画等から地震時の道路に求められる機能を整理するとともに、道路管理者の点検から震災情報を収集し、これらの情報とGISを用いて地震時の道路ネットワークを評価するシステムを構築することが重要である。

2. 研究目的

本研究は、道路管理者の迅速かつ効率的な震後復旧活動及び震前補修活動に資することを目的として、地震時の道路の機能を、道路ネットワークとして評価する手法について提案するものである。本研究の成果により、道路ネットワークの耐震性について客観的に数値で評価でき、また、道路区間の復旧工事・補修工事を行う優先順位を決定することができることを目的とする。

3. 研究内容

本研究においては、対象地域を、兵庫県南部地震のような非常に強い地震が発生した場合に道路構造物等に被害が発生すると考えられる範囲として、都道府県程度の広さとしている。また、対象とする道路については、地方公共団体等で計画されている緊急輸送道路ネットワークにおける道路とした。

対象とする地域と道路について、地震時の道路ネットワーク評価手法を、図－1に示すフロー図の手順で検討している。平成8年度は初年度であり、全体フロー図を提示するとともに、図－1の点線で囲まれた部分について詳細な検討を進めた。

3.1 地震時の交通需要（OD）の整理

地方公共団体等の地域防災計画等から、地震時に想定される交通需要の起終点の種類について整理した。例えば、交通需要が「救急救命活動」の場合、起終点は、警察署、消防署、病院、血液センター、避難場所（学校、公民館等）等となる。次に、整理した起終点の全ての組み合わせについてマトリックスを作成し、時間経過とともに、交通需要の有無を判断した。ここで、時間経過は、交通需要を内容によりまとめ、①地震発生直後（救急救命、救助、避難、消火等）、②2～3日後（救援物資の運送等）、③1週間後（復旧活動、生活必需品の輸送等）の3段階とした。

3. 2 地震時の通行可能道路ネットワーク

また、一方、平成8年度全国道路防災総点検等から地震時の道路構造物等の被災状況を評価し、この結果をもとに道路ネットワークのリンク毎の通行機能についてA～Cの3つのランクで評価する。「地震に強いみちづくりへの提言、H8.5」を参考に、ランクの内容は以下のとおりとする。

A：発生直後に車両の通行等が可能

B：2～5日後に車両の通行が可能

C：1週間以上後に車両の通行が可能

このため、交通需要の各時間経過における通行可能道路ネットワークは、発生直後はランクAのリンクによるもの、2～3日後は、やはり、ランクAのリンクによるもの、1週間後以降は、ランクA+Bのリンクによるものとなる。図-2に通行可能道路ネットワークの例を示す。

3. 3 地震時ODに対する道路機能の評価

本研究では、3. 1の各段階における交通需要のODに対して、3. 2の道路ネットワークにより、どの程度、必要な道路機能が確保されているか、連結性、確実性、大量性、迅速性の観点から評価している。例えば、確実性は、地震時に「通常時の最短経路×2≧地震時の最短経路」となる経路が存在するか否かで判定している(図-2)。

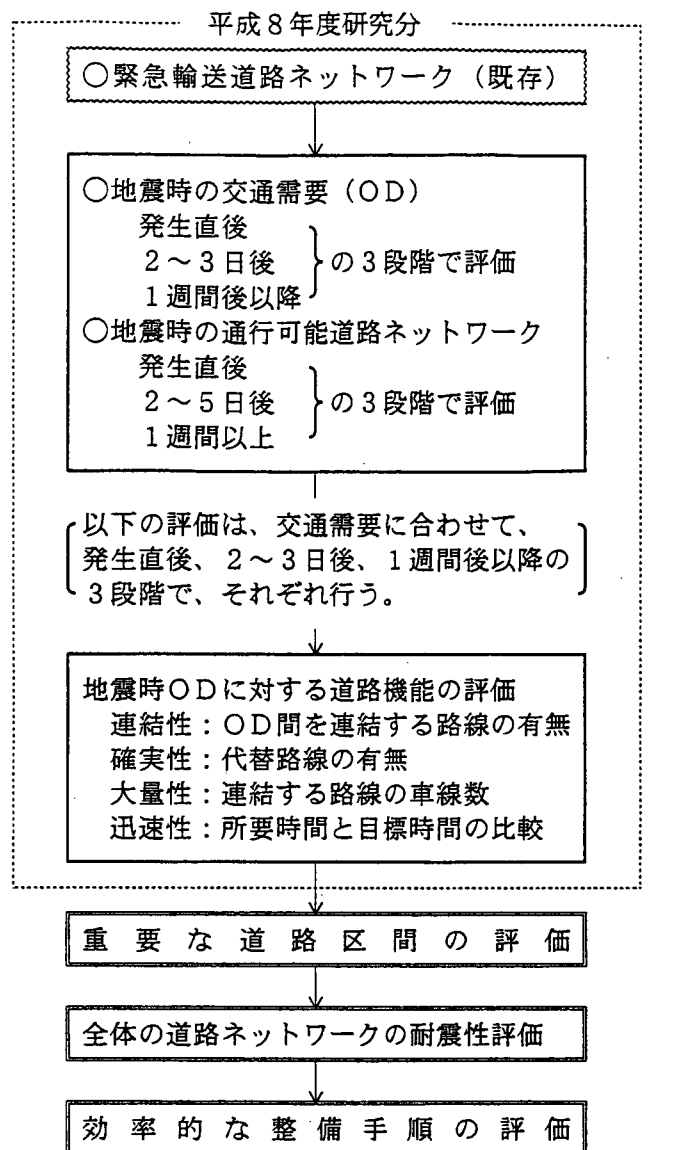
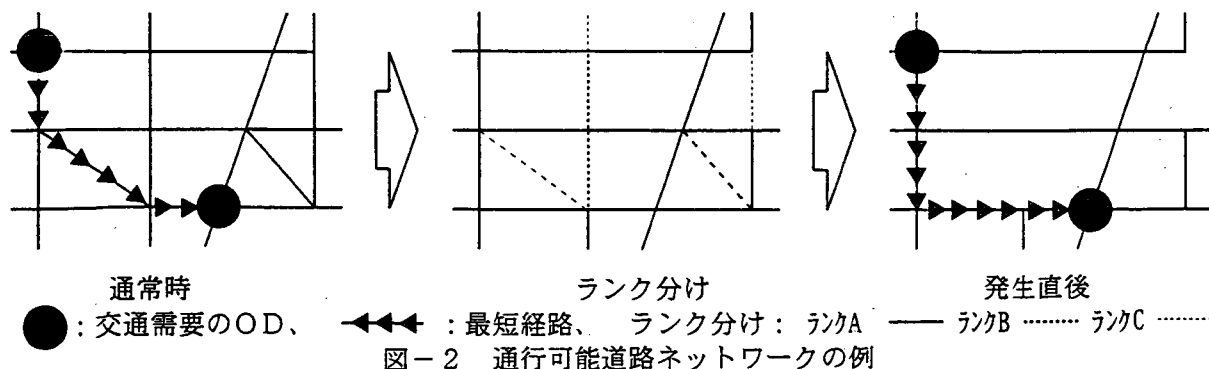


図-1 地震時道路ネットワーク評価手法の全体フロー

4. 今後の課題

重要な道路区間の評価手法、全体の道路ネットワークの耐震性評価手法について検討するとともに、特定の地域を対象としたモデルを作成してケーススタディを行い、現場への導入について検討する。

1. 道路交通調査及び計画に関する試験調査

1. 1 道路整備と地域計画に関する試験調査

1. 1. 1 占用施設・沿道施設を含めた道路の耐震性向上技術に関する試験調査

防災技術課 課 長 杉田秀樹
研究員 濱田 禎

1. まえがき

兵庫県南部地震では道路占用物や沿道建築物等の被害により道路交通が著しく妨げられ、救助・医療・消火・震後復旧活動に大きな支障が生じた。人口や産業が集積した大都市圏では、占用・沿道施設の被害が道路交通、さらには社会経済に大きな影響を及ぼす恐れがあるため、道路管理者は道路施設の耐震性だけでなく占用・沿道施設を含めた道路空間としての耐震性を予め把握し、適切な震災対策を講じる必要がある。

2. 調査目的

7年度までに、占用・沿道施設の震災点検（平成5年度）結果、兵庫県南部地震の概略調査結果に基づき、点検結果をデータベースとして活用するという観点から点検対象の見直しを実施している。最終年度である8年度は、被災事例の統計的な分析に基づく点検法の具体化・点検要領案の作成、スーパー道路防災空間の構造の検討、および3年間の成果のとりまとめを行う。

3. 調査方法

道路管理者が個々の占用・沿道施設の耐震性を判定し、一律に耐震性を向上することは、現実的には極めて困難である。このため本課題では、①区間単位での地震危険度を評価するための点検法、②各種施設の更新時に備えた道路防災空間の理想像の提案に重点をおく。ここでは兵庫県南部地震における被災事例の統計的な分析に基づき、上記①に用いる点検要領、および上記②に対するスーパー道路防災空間の構造案を検討した。

4. 調査結果

4.1 兵庫県南部地震における被災事例の統計的分析

兵庫国道、兵庫県、神戸市の管理する道路（街路を除く）のうち震災時に規制を行った区間全 241 箇所を抽出し、規制の原因となった被災形態の内訳、復旧期間等について統計的な分析を行った。規制箇所数の時間変化を要因別に示すと図1の通りである。これによれば件数・規制期間ともに橋梁・路面損傷といった道路施設の影響が大きく、占用・沿道施設の被害が要因となった件数は全体の約30%である。占用・沿道施設の被害件数は、①家屋倒壊、②桁落下の順で大きい。規制のほとんどは1～2週間程度で解除されているが、地下鉄、桁落下の一部については最大1年程度の影響を及ぼしている。なお、本調査では規制箇所と車線数の関係、規制箇所と最大加速度の関係等についても整理している。

4.2 点検要領案の作成

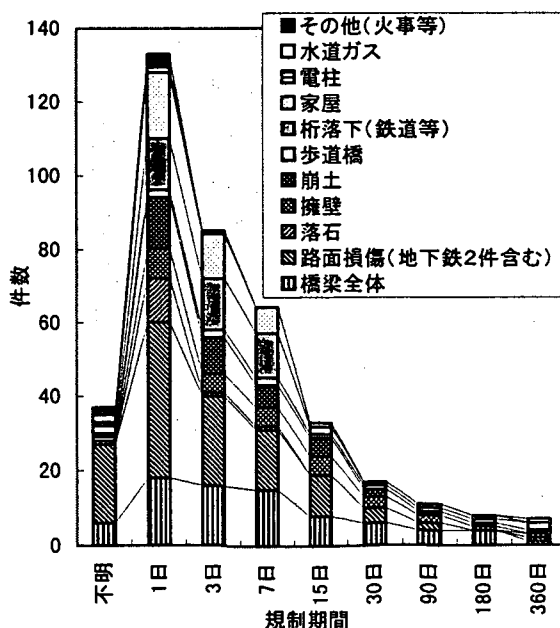


図1 規制箇所数の時間変化

統計分析結果等に基づき、点検要領案を作成した。点検対象施設と点検項目を示すと表1の通りである。点検対象施設の選定は、これまでに道路を阻害した事例があるもののうち、①被害を受けやすいもの、または②影響を及ぼす期間が中・長期化するものを全て対象とすることとした。また点検項目については、①区間の耐震性の評価を目標とし、②点検の量・手間を考慮して実現可能性の低いものは含めないことを基本方針とした。本検討の結果、7年度までの検討結果から電柱、水管（地上）、石油管が外れ、街路樹が加えられた。電柱については、撤去が容易なこと、また建物倒壊に伴う被災がほとんどのため除外した。ブロック塀・石塀も撤去は容易であるが、地震時に歩行者が塀を頼ろうと近づいたところに倒れて多数の死者を出した例が宮城県沖地震で報告されていることから残した。水管、石油管は被災事例がないことと件数が少ないことから除外した。街路樹を加えたのは、倒壊家屋を支える等のプラス要因を評価するためである。また、地中埋設管の被害の受けやすさは、街路等支線の通る箇所における被害が事業者により多数報告されているため大とした。

表1 点検対象施設および点検項目

	点検対象施設	被害の受けやすさ	影響を及ぼす期間 ¹	プラスの有無	点検項目
占用施設	跨道橋	大	長	—	落橋防止構造、道路との位置関係、設置年等
	新交通・モノレール	小	長	—	落橋防止構造、道路との位置関係、設置年等
	地中埋設管	大	中	—	種別、位置、管径、管種、液状化、設置年等
	鉄道（地中）	小	長	—	工法、深度、地盤種別、設置年等
	道路情報管理施設	—	—	有	電源、形式、設置年
沿道施設	植樹帯幅	—	—	有	高さ、間隔、植樹帯幅
	建築物	大	中	—	木造・非木造の区分、階数、ピロティー、用途、道路との位置関係、設置年
	ブロック塀・石塀	大	短	—	道路境界からの距離、種別、高さ、設置年等

注 1) 影響を及ぼす期間の基準：短→3日以内（消防・救急車両の通行可）、中→14日以内（緊急輸送可）、長→14日以上

針とした。本検討の結果、7年度までの検討結果から電柱、水管（地上）、石油管が外れ、街路樹が加えられた。電柱については、撤去が容易なこと、また建物倒壊に伴う被災がほとんどのため除外した。ブロック塀・石塀も撤去は容易であるが、地震時に歩行者が塀を頼ろうと近づいたところに倒れて多数の死者を出した例が宮城県沖地震で報告されていることから残した。水管、石油管は被災事例がないことと件数が少ないことから除外した。街路樹を加えたのは、倒壊家屋を支える等のプラス要因を評価するためである。また、地中埋設管の被害の受けやすさは、街路等支線の通る箇所における被害が事業者により多数報告されているため大とした。

過去の被災事例における加速度と被災率の関係を、表1の点検項目をパラメーターにして調査しておけば、ある区間における占用・沿道施設の地震危険度がある程度の精度で推定できると考えられる。

4.3 スーパー道路防災空間の構造案

地震に強い道路空間に必要な要素を有効な順に列挙すると①道路自体のリダンダンシー（幅員）②セットバック、③沿道施設の耐震化、④埋設物の共同溝化・耐震化ようになる。また、情報伝達による適切な交通誘導も地震時には欠かせない。制約条件がないとしてこれらを反映した理想の道路空間の構造案を図2に示す。

5. 今後の問題点

地震時に安全な道路空間を確保するため、震前対策については①点検実施によるデータベースの構築、②データベースによる耐震性判定法の高度化を行う必要がある。また、震後対策については①データベースによる即時被害予測技術、②実被害の早期把握技術、③道路空間の早期啓開技術を検討する必要がある。

参考文献：杉田秀樹、濱田禎、占用施設・沿道施設の耐震性評価に関する調査、土木研究所資料（作成中）

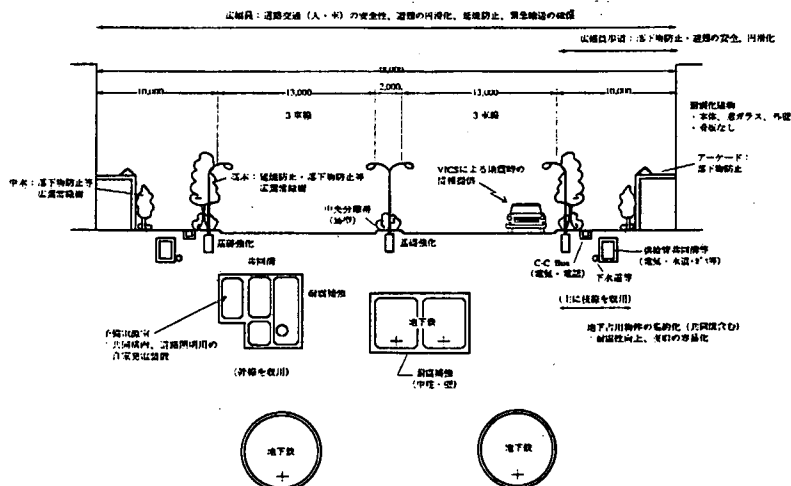


図2 理想の道路空間の構造案

3. 河川構造物調査

3. 8 河川施設の耐震強化事業に関する試験調査

防災技術課 課長 杉田秀樹
研究員 濱田 禎

1. まえがき

兵庫県南部地震においては多くの公共土木施設が被災し、堤防を始めとする河川施設も淀川河口付近等で被災した（写真1）。淀川の事例では堤防が最大で3m程度沈下し、高水が同時生起すれば流域に浸水による被害が及ぶ恐れもあった。実際には、雨の少ない時期であったことおよび早期に復旧工事が行われたことから浸水による被害は発生しなかったが、1948年6月28日に発生した福井地震では九頭竜川の堤防が被災し、約1000町歩（約10km²）の田畑と300町歩（約3km²）の宅地が浸水した事例が記録されている¹⁾。

このような背景から、兵庫県南部地震を契機に堤防を始めとする河川施設の耐震強化事業が7年度より本格的に開始された。その基本方針として、地震により壊れない堤防とするのではなく、ある程度の被害を生じても越水が生じない堤防とすることを耐震強化の目標としている。ここに、耐震強化の水準としてどの程度の地震力を設定するのが妥当か、また、耐震強化事業をどのような河川あるいは流域に対して優先的に進めるのがよいかについては必ずしも確立されておらず、耐震強化水準としての設計地震外力を定めることは将来計画を策定する上で重要である。

本課題は、耐震強化による被害軽減効果（以下、投資効果という）、および、耐震強化に要する費用の算定手法を提案し、費用便益的な観点から耐震強化水準としての設計地震外力を検討するものである。



写真1 兵庫県南部地震における堤防の被災事例

2. 調査目的

（提供：淀川工事事務所）

高規格堤防の耐震性向上に関する調査（動土質研究室、H7～10）において、堤防の地震被害と高水の同時生起による越水の発生確率の算定手法が提案されている。耐震強化水準の評価を行うには、確率の算定だけでは不十分で、確率の算定法を便益の算定法に発展させて投資効果を貨幣換算し、投資に要する費用との比較を行う必要がある。このような背景から、初年度である8年度は、地震による越水の発生確率と越水による被害額の算定法を検討し、鶴見川を対象とした試算と併せて投資効果の算定法を提案した。9年度には、耐震強化の費用面の検討および代表的な堤防モデルに関するケーススタディを、また、10年度には費用便益分析に基づく設計地震外力の設定法を検討する。

3. 研究方法

3.1 被害額の期待値を算定するに際しての基本方針

河川施設の耐震強化によって得られる便益は、耐震強化によって回避できる被害額に等しい。被害額を評価するためには、地震及び高水が自然現象であるため、それぞれの現象に確率論的手法を取り入れて段階的に期待値を算定する必要がある。基本的な考え方は図1に示すとおりである。

(手順1) 地震のマグニチュード M と対象地点から震源までの距離 Δ から、対象地点において発生する最大水平加速度 a_{max} とその発生確率 λ_M を与える関数を設定する。

(手順2) 最大水平加速度 a_{max} から沈下後の堤防高（以下堤防高という）を与える関数 $h(a_{max})$ を設定する。

(手順3) 堤防高 h と流量規模の超過確率 P_f から越水による被害額を与える関数 $D_{damage}(P_f, h)$ を設定する。

(手順4) $D_{damage}(P_f, h)$ にその発生確率を乗じたものを流量規模および堤防高さを積分変数として積分し、被害額の期待値を評価する。

3.2 モデル河川による試計算

提案手法を用いてモデル河川を対象とした試計算を行った。モデル河川としては被害額の期待値の上限を概略把握するため、鶴見川を選定した。鶴見川の流域は都市化が進んでおり、流域の資産価値が高かつ同一雨量に対してピーク時の流量が大きいことから、一般の河川と比較した場合に越水による被害額が大きくなりやすいと考えられる。また、越水箇所についても、浸水面積が最も大きくなると予想される箇所（下流より 6.2km の左岸、図6参照）を選定した。

3.3 (手順1) 地震動に関する関数の設定¹⁾

任意の堤防箇所における地震動の大きさとその発生確率を与える関数を設定する。すなわち、マグニチュードが M で対象地点から震央までの距離が Δ (km) の場合、対象地点における最大加速度 $a_{max}(\text{gal})$ を(1)式により与える。このとき、ある領域内でマグニチュード M 以上の地震が発生する確率 λ_M を(3)式で、また震央距離が Δ 以内である確率 P_Δ をそれぞれ(4)式により与える。

$$a_{max} = a_1 \cdot 10^{a_2 \cdot M} \cdot f(\Delta) \cdots (1)$$

$$f(\Delta) = (\Delta + 30)^{-1.218} \cdots (2)$$

$$\lambda_M = 10^{b_1 - b_2 \cdot M} \cdots (3)$$

$$P_\Delta = \pi \cdot \Delta^2 / \pi \cdot r^2 = \Delta^2 / r^2 \cdots (4)$$

ここで、(1)式は最大加速度の距離減衰式であり、幾何減衰 $f(\Delta)$ は(2)式で与える。 a_1 、 a_2 は地盤条件による係数で、Ⅲ種地盤を想定して $a_1=403.8$ 、 $a_2=0.265$ とする²⁾。(3)式における b_1 、 b_2 は対象地震の平均発生率を表す係数で、比較的発生頻度の高い地域を対象として $b_1=4.53$ 、 $b_2=0.808$ を用いる³⁾。(4)式は、震源は対象地

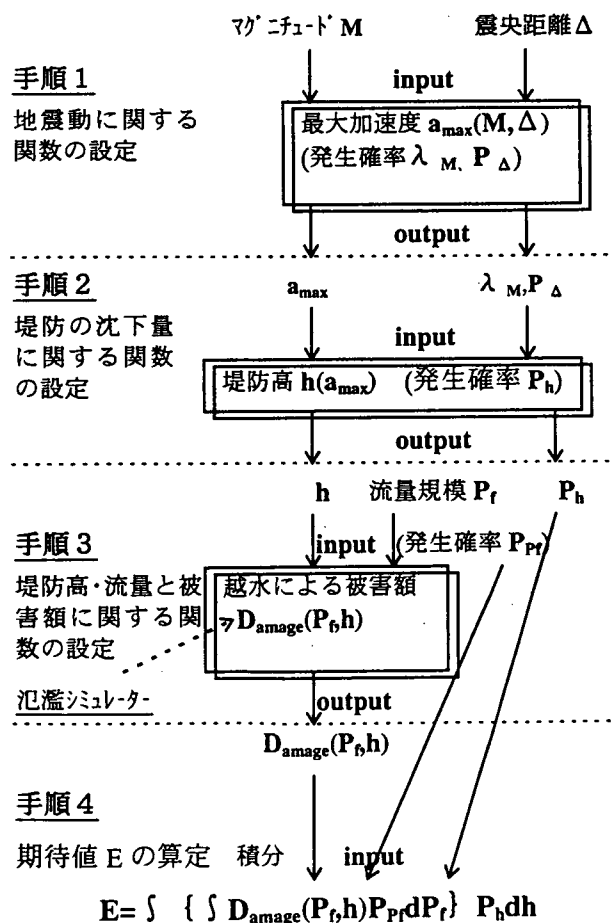


図1 期待値計算の手順

点を中心とする半径 r の円内に均一に分布すると仮定して導かれる式であり、 r は円の面積が(3)式で対象とする地域の面積と等しくなるよう $r=100\text{km}$ とした。

3.4 (手順2) 堤防の沈下量に関する関数の設定¹⁾

最大加速度 $a_{\max}(\text{gal})$ の地震動により沈下した後の堤防高 $h(a_{\max})(\text{m})$ を(5)式により与える。ここで h_0 はもとの堤防高である。図2は(5)式の関数形である。

$$h(a_{\max}) = \begin{cases} h_0 - 3.0 & (a_{\max} \geq 300) \\ h_0 - 0.015(a_{\max} - 100) & (300 \geq a_{\max} \geq 100) \\ h_0 & (a_{\max} \leq 100) \end{cases} \dots (5)$$

最大加速度と沈下量の関係は明らかにされていないため、既往の災害事例に基づいて定めた。すなわち、新潟、宮城県沖、日本海中部、釧路沖、北海道南西沖の各地震においては、推定最大加速度が100gal以上の箇所から被害が生じはじめていること³⁾、また、兵庫県南部地震において推定最大加速度が200～300galの箇所において最大3mの沈下が生じたこと¹⁾に基づいて定めた。

被災事例は地盤や堤体の脆弱な部分に生じたもので、同一規模の地震動が生じたすべての地点で同様の被害が生じているわけではない。したがって(5)式は沈下量の上限を与えるものであり、被害額を大きめに推定することになる点に注意を要する。

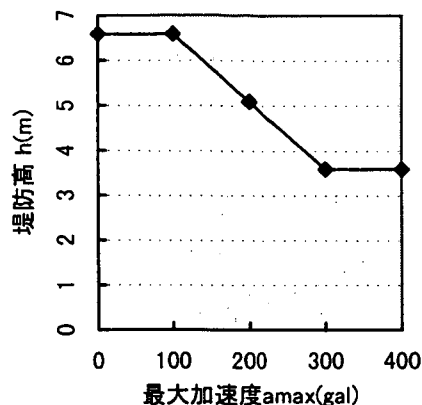


図2 最大加速度と沈下量の関数

3.4 越水の発生確率の評価

河道断面(堤防)は、ある再現期間の流量を流下させるよう設計されているため、地震が発生するしないに関わらず越水が発生する確率 P_{f0} が存在する。一方、地震動により堤防高が h_0 から h に沈下すれば、越水が発生する確率は P_h に増加する。したがって、地震に起因して越水が発生する確率 P_{FE} は、確率の増加分($P_h - P_{f0}$)に堤防高が h となる確率 P_h を乗じ、堤防高の最小値 $h_{\min}$ から h_0 まで積分することにより(6)式で与えられる。

$$P_{FE} = \int_{h_{\min}}^{h_0} (P_h - P_{f0}) P_h dh \dots (6)$$

3.5 (手順3) 越水による被害額の関数の設定

(1) 流域モデルの設定

越水による被害額は、堤防高 h と流量規模の超過確率 P_f を想定した上で、土木研究所において別途開発された氾濫シミュレーター⁵⁾により行う。

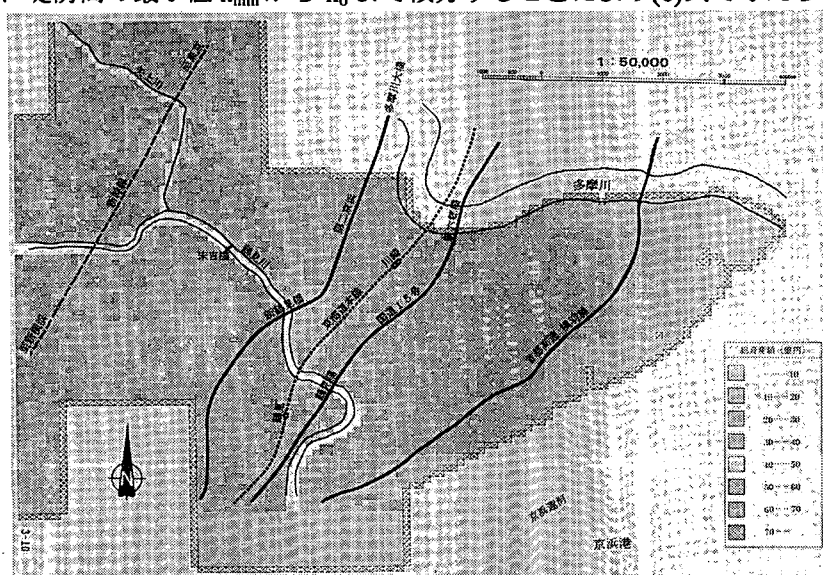


図3 流域資産の分布図

これはモデル河川の流域をメッシュ分割（1メッシュ 100m×100m）し、河道洪水流、氾濫流、破堤流の時間変化を2次元不定流解析によって追跡して浸水域の大きさを計算するとともに、メッシュのうち浸水したものごとの資産価値と被災度の積の総和をとることで被害額を算定するものである。ここで、資産として含まれるものは家屋・家庭用品・事業所等の一般資産、農作物、公共土木施設（河川分を除く）、営業停止損失の4項目であり、人命は含まない。資産および被害額の算定法は治水経済調査要綱⁶⁾に従い、資産の基礎数量は実際の鶴見川流域を対象とした平成2年国勢調査、平成3年事業所統計調査による地域メッシュ統計を用いている。モデル河川について集計された流域資産の分布を示すと図3の通りである。

(2)堤防高と流量規模の設定

越水による被害額の算定において、想定したケースと計算結果を併せて表1に示す。4種類ずつの堤防高と流量規模を組み合わせた合計10ケースについて計算を行った。流量規模は、図4に示す4種類の洪水波形によって設定した。これらは昭和41年6月に観測された波形を基本とし、それぞれ流量規模が再現期間にして150年、50年、30年、10年となるように時間領域で流量調整したものである。

堤防高としては、図5に示す4段階に設定した。これらは4種類の波形により2次元不定流計算の結果得られる最大水位である5.59m、5.6m、5.19m、4.28mに対応している。モデル河川の計画高水の再現期間は150年とし、この場合の最大水位である6.59mをモデル河川の堤防高 h_0 とした。モデル河川には、通常の河川において見込まれる若干の余裕高は見込まないこととした。

ケース4について氾濫計算の結果得られ、注) 〇内は堤防高に相当する最高水位を与える洪水波形の再現期間

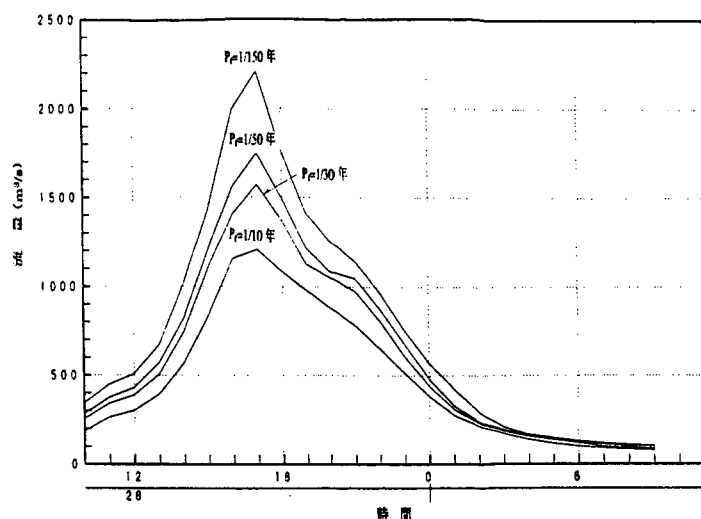


図4 想定した洪水波形

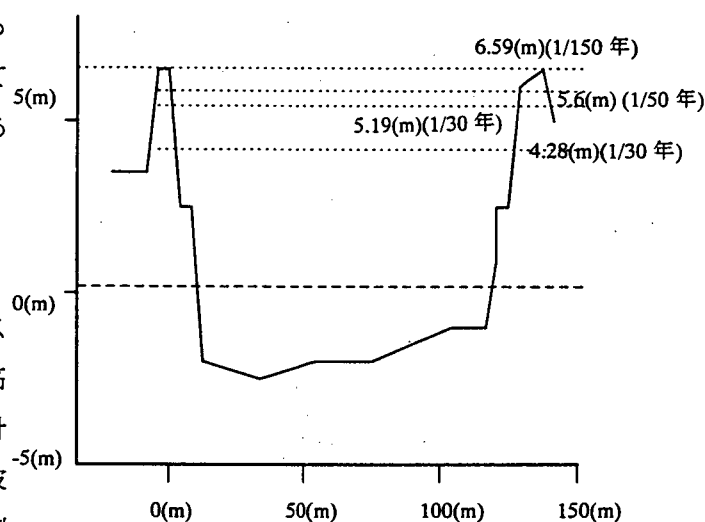


図5 4種類の堤防高

表1 計算ケースおよび被害額の計算結果

Case	流量規模の 再現期間	堤防高(m) ^{注)}		浸水面積 (ha)	被害額 (億円)
		h_0 現況	h 沈下後		
1	150年	6.59	6.59(150年)	693	2,286
2	150年	6.59	5.60(50年)	881	3,319
3	150年	6.59	5.19(30年)	893	3,418
4	150年	6.59	4.28(10年)	917	3,637
5	50年	6.59	5.60(50年)	463	1,443
6	50年	6.59	5.19(30年)	577	1,759
7	50年	6.59	4.28(10年)	675	2,210
8	30年	6.59	5.19(50年)	385	1,089
9	30年	6.59	4.28(10年)	515	1,563
10	10年	6.59	4.28(10年)	227	420

た最大水位の分布をメッシュ分割した地図に示すと図6の通りである。

流量規模の再現期間、堤防高および被害額の関係を図7に示す。図7に基づいて、堤防高が h のときに P_f の流量規模によって越水が発生した場合の被害額を与える関数 $D_{\text{amage}}(P_f, h)$ を設定する。例えば、 h が5.6m、 P_f が1/(100年)の場合被害額 $D_{\text{amage}}(P_f, h)$ は2550(億円)と算定される。

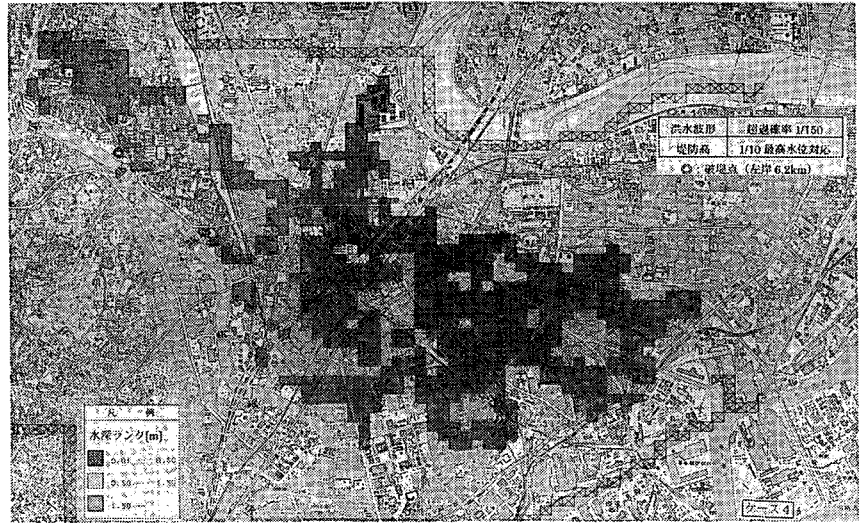


図6 最大水位の分布図

堤防高が h (発生確率 P_h) の場合に、超過確率 P_f の流量規模 (発生確率 P_{Pf}) によって発生する被害額の期待値は、被害額 $D_{\text{amage}}(P_f, h)$ に P_h および P_{Pf} を乗じることにより算定される。ある堤防箇所における被害額の期待値 E は、これを P_f について P_{fh} から P_{f0} まで積分し、さらに h について $h_{\min}$ から h_0 まで積分することにより式(7)で算定できる。

$$E = \int_{h_{\min}}^{h_0} \left\{ \int_{P_{fh}}^{P_{f0}} D_{\text{amage}}(P_f, h(M, \Delta)) \times P_{Pf} dP_f \right\} P_h dh$$

$$= \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \int_0^r \text{DAMAGE}(h(M, \Delta)) \frac{dP_{\Delta}}{dr} dr \frac{d\lambda_M}{dM} dM$$

(1)~(4)式を用いて

$$E = \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \int_0^r \text{DAMAGE}(h(M, \Delta)) \times 2 \frac{\Delta}{r^2} \times b_2 10^{b_1 - b_2 M} \times \ln 10 dr dM \cdots (7)$$

ここで、

$$\text{DAMAGE}(h(M, \Delta)) = \int_{P_{fh}}^{P_{f0}} D_{\text{amage}}(P_f, h(M, \Delta)) \times P_{Pf} dP_f \cdots (8)$$

(7)式により地震に起因する越水による被害額の期待値をモデル河川について計算すると1300万円/年となる。

なお、本手法により算定された被害額の期待値を評価するに際しては、以下の2点に留意する必要がある。(1)堤防の復旧期間

本算定法では流量規模の発生確率と堤防被害の発生する確率をともに年単位で評価している。これは地震による堤防被害と大きな流量規模の発生年が同じであれば越水が発生することを意味するものである。実際に堤防被害のリスクが生じるのは、被害発生から復旧完了までの限られた期間であるため、厳密には本算定法で算出される被害額の期待値を復旧日数に応じて減ずる必要がある。しかし、被災形態、被災程度、周辺地域の被災状況等により堤防被害の復旧期間は変化し、定量化が

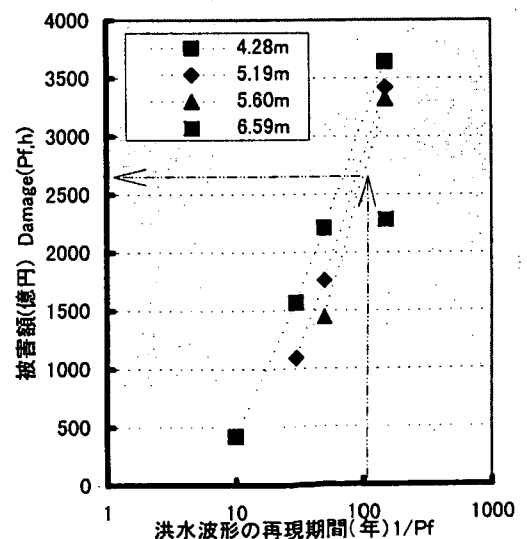


図7 洪水波形、堤防高、被害額の関係

難しいため、本算定法においては堤防の復旧期間の影響を計算に含めないこととした。

(2)計画高水を上回る流量に対するリスク

本算定法では、計画高水を上回る流量に対するリスクを考慮しない。これは、堤防被害が生じるか否かに関わらず越水が生じる状況であること、および、一旦越水が生じれば堤防の破壊が進行して地震被害の影響は打ち消されてしまうことを考慮したためである。

4. 試算結果の評価

(1)耐震強化の費用と便益の概略比較

試算結果を用いて耐震強化の費用と便益の概略比較を行うと以下ようになる。すなわち、耐震強化の方法として CDM（深層混合処理工法）を選択し、その耐用年数を 150 年、1 地点の改良範囲および改良率をそれぞれ $200\text{m} \times 50\text{m} \times \text{厚さ } 5\text{m}$ および 50% と仮定すると、耐震強化に要する費用は $25000\text{m}^3 \times 8000 \text{ 円}/\text{m}^3$ で約 2 億円となる⁷⁾。一方、便益は $1300 \text{ 万円}/\text{年} \times 150 \text{ 年}$ で約 20 億円であるため、便益が費用を上回る。

ここで、仮に 2 週間で復旧が完了するとすれば、便益は 20 億円に $14(\text{日})/365(\text{日})$ を乗じたものと概ね等しくなるため、便益は約 0.8 億円となり、この場合には便益は費用を下回る。

(2)通常の治水対策による投資効果との比較

通常の治水対策による投資効果と耐震強化に関する投資効果を比較することにより、耐震強化事業の相対的な重要性を概略検討すると以下ようになる。通常の治水対策に関する投資効果は、表 1 より超過確率 $1/(150 \text{ 年})$ の洪水による被害額は 2286 億円と計算されるので、通常の越水による被害額の期待値は少なくとも約 15 億円/年と計算される。一方、耐震強化の投資効果は 0.13 億円/年（復旧期間を考慮しない）であり、治水対策に関する投資効果の 1% 以下となる。このため洪水に対する治水安全度の向上を図りつつ、併せて耐震対策を実施することが効率的である。耐震強化にも有効な対策としては、高水敷の造成や堤防の緩傾斜化等が挙げられる。

5. 今後の問題点

8 年度は、投資効果の算定法について検討を行い、地震に起因する越水の発生確率および被害額の期待値の算定法を提案するとともに、モデル河川を対象に本算定法による被害額の期待値に関する試算を行った。

被害額の算定は様々な地震の影響のうち比較的計量化が容易な流域資産に着目したものであり、厳密には①地域住民の民生、②冠水した地域の機能低下から波及する社会経済的影響、③堤防が点ではなく線的構造物であることの影響等も評価に加えていくことが望ましい。しかし、限定的ではあるが、本算定法を用いれば従来漠然と捉えられていた耐震対策の効果を定量的に評価することができ、次年度以降に検討を予定している耐震強化の費用やケーススタディと併せて、費用便益的な観点から①治水対策に比較した耐震強化の重要性、②流域における耐震強化の優先箇所、③合理的な耐震強化基準等の検討が可能になると考えられる。

参考文献：1)古関潤一：河川堤防の地震被災と高水の同時生起確率に関する検討、土木研究所資料部内資料第 127 号、1995、2)佐々木康、田村敏一他：確率論的手法に基づく地震動強度の再現期待値の試算、土木研究所資料第 2419 号、1986、3)宇田高明、松尾修他：平成 5 年北海道南西沖地震災害調査報告、土木研究所報告、第 194 号、第 7 編 4)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、pp.135-141、1990、5)栗城稔、末次忠司他：氾濫シミュレーション・マニュアル(案)、土木研究所資料第 3400 号、1996、6)河川局河川計画課：治水経済調査要綱、1986、7)CDM 研究会：CDM 設計施工マニュアル(積算・施工実績編)、1996

1. 河川施設の強震計の点検調査

防災技術課 課 長 杉田 秀樹
管理係長 田島 明

1. まえがき

平成8年9月現在、建設省、公団、自治体等が所掌する52箇所の河川施設で強震観測が実施されている。表-1には、設置機関別、強震計型式別の強震計設置箇所数、台数（成分数）を示す。河川施設に設置されているSMAC型強震計、電磁式強震計及び普及型強震計により得られた強震記録は、平成8年度末までに738記録であり、最大加速度の大きい142記録が数値化されている。¹⁾

2. 調査目的

河川施設及びその周辺地盤上に設置された強震計の正常な観測体制を維持するため、建設省が設置するSMAC型強震計14箇所31台、電磁式強震計1箇所9成分、普及型強震計13箇所34台の定期点検補正及び得られた強震記録について数値化等の一次解析を行うものである。

3. 調査方法及び結果

3. 1 定期点検補正

SMAC型強震計及び電磁式強震計は10～3月、普及型強震計は8～1月にかけて点検補正を実施した。点検補正結果を表-2に示す。SMAC型強震計では31台中5台(16%)に刻時動作の不良、線間絶縁不良及び電池不良などが認められた。電磁式強震計は利根川堤防1箇所に設置されているが、記録器及び巻取り器の動作不良が見られた。また、普及型強震計については34台中5台(15%)で換振器の動作不良及び絶縁抵抗値低下などが見られた。これらの不良箇所については部品交換、修理調整を行っている。

3. 2 記録の収集、数値化、とりまとめ

平成8年度には、河川施設関係の強震計により43記録が得られた。数値化は、平成7年に得られた記録のうち、地盤上30gal以上、構造物100gal以上を記録した6記録(3地震)について行った。図-1は平成7年3月23日の地震時に江戸川堤防の周辺地盤上及び堤体に設置されたSMAC型強震計で得られた強震記録の数値化、計器補正後の加速度時刻歴波形を示している。

4. 河川施設における強震計配置計画（第3期）

兵庫県南部地震による土木施設の被害を背景に、河川堤防を中心とする河川管理施設についても強震観測施設の一層の拡充が求められている。本年度は地建等との調整に基づいて「河川堤防における強震計配置計画（第3期）を作成するとともに、これを土木研究所資料²⁾としてとりまとめた。河川

堤防における強震計配置計画は昭和53年より開始され、第1期計画で17箇所、第2期計画で更に21箇所（一部未着手）、合計38箇所強震観測が実施されている。第3期配置計画は、第1・2期計画で配置された観測施設の更新・増強等必要な見直しを行うとともに、耐震化地盤、旧河道など多様な条件下での観測記録の拡充を図ることを目的として、平成8～10年度の3箇年間で合計90箇所に強震計を整備するものである。

表-1 河川施設への強震計設置状況（機関別）

平成8年9月1日現在

設置機関	箇所数	強震計型式		
		SMAC型 箇所数（台数）	電磁式 箇所数（成分数）	普及型 箇所数（台数）
建設省	28	14（31）	1（9）	13（34）
北海道開発局	12	4（8）	7（45）	1（3）
水資源開発公団	5	0（0）	0（0）	5（13）
都道府県	7	6（12）	1（9）	0（0）
合計	52	24（51）	9（63）	19（50）

表-2 強震計点検補正結果

観測所名	機種	故障内容	対策
安部川堤防	SMAC型	時刻基板不良	交換要
紀ノ川堤防	SMAC型	線間絶縁不良	調査要
雄物川堤防	SMAC型	X Z成分不良	修理要
最上川堤防	SMAC型	本体電源故障	修理中
岩木川堤防	SMAC型	CPU基板不良	修理要

観測所名	機種	故障内容	対策
荒川堤防	普及型	堤体上、地中：感震器故障	更新予定
久慈川堤防	普及型	地中：感震器動作不安定	再設置要
大淀川堤防	普及型	堤体上：感震器動作不安定	再設置要
六角川河口堰	普及型	堰柱上：記録部不良	修理済み
利根川堤防	電磁式	記録器、巻き取り器の動作不良	交換要

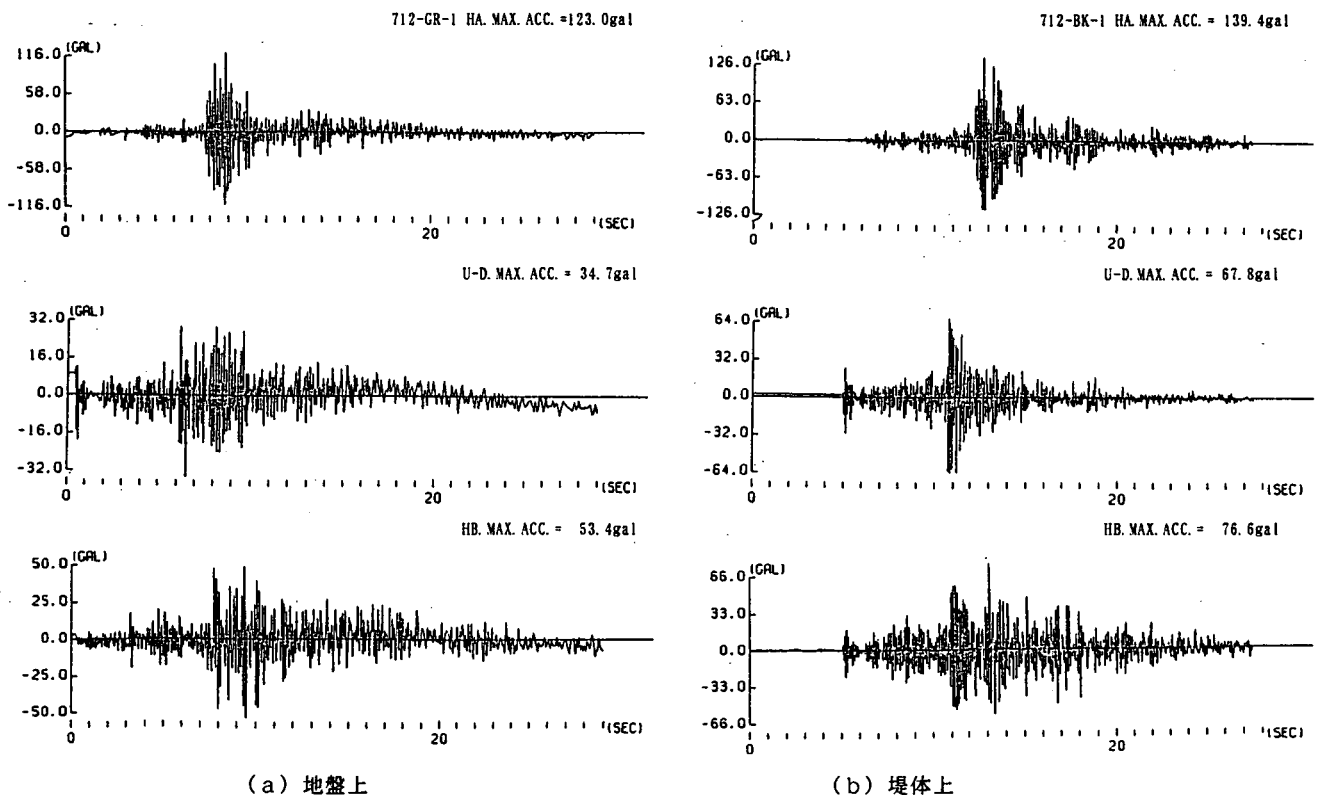


図-1 平成7年3月23日の地震による江戸川堤防の強震記録

- 〔参考文献〕 1) 土木研究所における加速度強震記録（No. 1～No. 21），土木研究所彙報
 2) 河川堤防における強震計配置計画（第3期），土研資料，第3499号，1997. 3

1. ダムの強震計の点検調査

防災技術課 課 長 杉田 秀樹
管理係長 田島 明

1. まえがき

平成8年9月現在、建設省、公団、自治体等が所掌する121箇所のダム施設で強震観測が実施されている。表-1には、設置機関別、強震計型式別の強震計設置箇所数、台数（成分数）を示す。ダム施設に設置されている SMAC型強震計、電磁式強震計及び普及型強震計により得られた強震記録は、平成8年度末までに828記録であり、最大加速度の大きい71記録が数値化されている。¹⁾

2. 調査目的

ダム本体及びその周辺地盤上に設置された強震計の正常な観測体制を維持するため、建設省が設置するSMAC型強震計12箇所24台、電磁式強震計27箇所294成分、普及型強震計22箇所55台の定期点検補正を実施するとともに、得られた強震記録について数値化等の一次解析を行うものである。

3. 調査方法及び結果

3. 1 定期点検補正

SMAC型強震計及び電磁式強震計は10～3月、普及型強震計は8～1月にかけて点検補正を実施した。点検補正結果を表-2に示す。SMAC型強震計では24台中2台(8%)に電装部不良が認められた。電磁式強震計については、27箇所中7箇所(26%)でケーブルの異常、時刻校正の動作不良等が認められた。また、普及型強震計については55台中5台(9%)で老朽化及び連動機能の故障や記録部不良が見られた。これらの不良箇所については部品交換、修理調整を行っている。

3. 2 記録の収集、数値化、とりまとめ

平成8年度には、ダム施設関係の強震計により295記録の強震記録が得られた。また、平成8年度に数値化を行うべき記録は、平成7年に得られた得られた地盤上30gal以上、またはダム堤体上100gal以上の記録であり、兵庫県南部地震で観測された9記録が対象になる。このうち2記録については昨年度数値化を行っているため、残りの7記録の数値化を行った。図-1に天ヶ瀬ダムのダム堤体底部及びダム堤体頂部に設置された強震計で得られた強震記録の数値化、計器補正後の加速度時刻歴波形を示している。

4. ダムにおける強震計設置状況

兵庫県南部地震を契機にダム施設の強震観測施設の拡充が図られている。直轄管理ダムにおいてはSMAC型強震計の更新が、また、直轄以外では強震計の新設・更新が進められているところである。今後は既設・新設観測施設の整合に十分留意し、観測記録を含めて効率的な施設管理を進める必要がある。

表-1 ダム施設への強震計設置状況(機関別)

平成8年9月1日現在

設置機関	箇所数	強震計型式		
		SMAC型 箇所数(台数)	電磁式 箇所数(成分数)	普及型 箇所数(台数)
建設省	58	9(18)	27(294)	22(55)
北海道開発局	10	0(0)	7(79)	3(3)
沖縄総合事務局	3	0(0)	0(0)	3(5)
水資源開発公団	20	0(0)	8(117)	12(41)
都道府県	30	6(12)	14(124)	10(25)
合計	121	15(30)	56(614)	50(129)

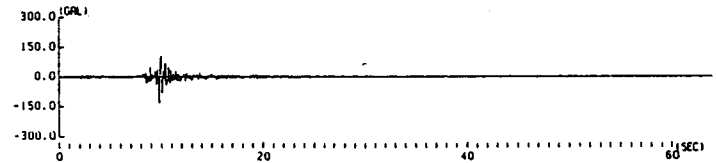
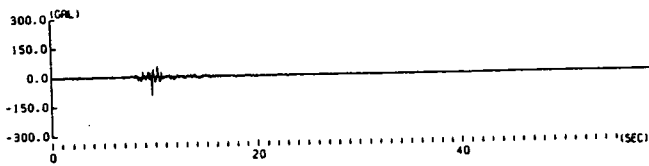
表-2 強震計点検補正結果

観測所名	機種	故障内容	対策
鶴田ダム	SMAC型	電装部不良	交換要
漆沢ダム	SMAC型	電装部不良	交換要
湯田ダム	電磁式	検出器の導通なし	ケーブル変更
四十四ダム	電磁式	時刻校正動作不良	外部アンテナ設置
矢作ダム	電磁式	時刻校正動作不良	外部アンテナ接続
白川ダム	電磁式	ケーブル絶縁抵抗値低下	ケーブル調査改善
御所ダム	電磁式	ケーブル絶縁抵抗値低下	ケーブル調査改善
		振子動作不良	交換要

観測所名	機種	故障内容	対策
川治ダム	電磁式	デコーダ動作不良	修理要
浅瀬石川ダム	電磁式	プリンタの印字不良	交換修理
五十里ダム	普及型	動作せず	修理要
荻原ダム	普及型	カセット故障	修理要
相模ダム	普及型	雷雨時に誤起動多い	雷/IX防止策必要
猿谷ダム	普及型	テープ終了まで停止せず	修理済み
		雷雨時に誤起動多い	雷/IX防止策必要

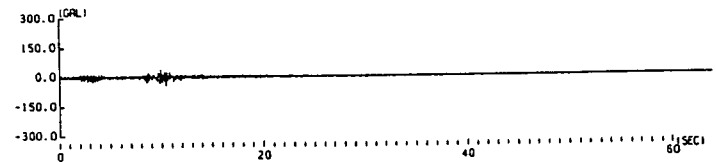
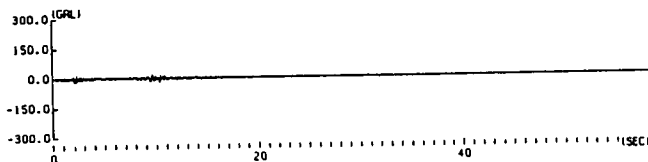
S607-DA-1 HA. MAX. ACC. = -95.1gal

S607-DA-2 HA. MAX. ACC. = -133.8gal



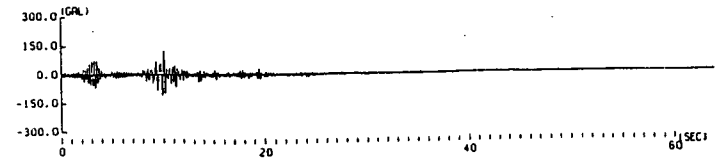
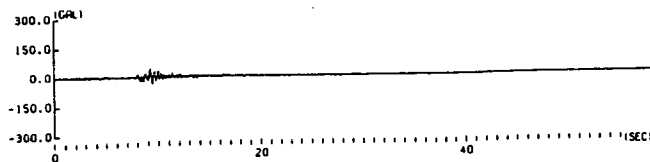
U-D. MAX. ACC. = -24.5gal

U-D. MAX. ACC. = -44.8gal



HB. MAX. ACC. = -43.2gal

HB. MAX. ACC. = 122.4gal



(a) 堤体底部

(b) 堤体堤頂部

図-1 平成7年1月17日兵庫県南部地震(M7.2)による天ヶ瀬ダムの強震記録

[参考文献] 1) 土木研究所における加速度強震記録 (No.1~No.21), 土木研究所彙報

防災技術課 課 長 杉田 秀樹
主任研究員 金子 正洋
研 究 員 濱田 禎

1. まえがき

関東地方建設局では、管内の管理施設に沿って20～40km間隔で離散的に配置した約100箇所の強震計をマイクロ回線でネットワーク化しており、リアルタイムで最大加速度、S I 値等の地震動特性値を収集することが可能となっている。ここで、これらの地震動情報から、震後即時に、液状化の危険度、構造物の被害等を予測することは、震後の円滑かつ効率的な点検活動・復旧活動のために有効であると考えられる。液状化の危険度、構造物の被害等の予測にあたっては、予測箇所での地震動を観測地点の地震動から推定することが必要である。

2. 研究目的

本調査は、離散的に配置された強震計ネットワークの観測記録から、震後即時に地震動特性値（最大加速度及びS I 値）分布を予測する簡易な手法について検討することを目的としている。

3. 研究方法

地震動特性値の予測は、まず、地表面で観測された値から地盤の増幅特性を考慮して工学的基盤における値を算出し、次に構造物位置の工学的基盤における値を空間補間により求め、この値を地盤の応答特性を考慮して地表に戻す手順により行う。地盤の増幅特性は、SHAKEによる計算を基本とし、空間補間は推定値の空間分布のなめらかさに配慮した手法を用いている。図-1に地震動特性値の予測手法のイメージ図を示す。

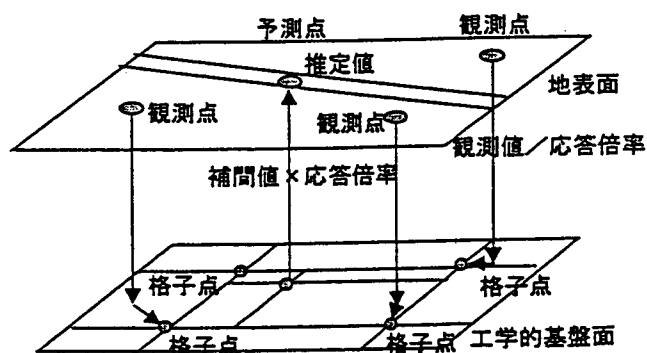


図-1 地震動特性値の予測手法のイメージ図

SHAKEによる応答計算に用いた入力波形は、日向灘地震板島橋、宮城県沖地震開北橋、日本海中部地震七峰橋、釧路沖地震広尾橋、兵庫県南部地震猪名川の5記録の最大加速度を50、100、200、500galに調整した計20波形を基盤2Eとして用いた。

空間補間は、①関東地方建設局管内の対象地域（約300×250km）を10km四方の格子に分割し、②観測地点の値より格子点の値を空間補間による方法で補間し、③予測点の近隣の4格子点の値から予測点の値を距離を重みとして推定した。ここで、②の空間補間の方法は、隣り合う格子点の推定値の差の総和と差の差の総和が最小となるように、格子点の推定値を定めている。これは、隣り合う予測地点の推定値をできるだけなめらかに含む曲線を求めていることに等しい。

4. 研究結果

図-2、3にある地点で計算された最大加速度及びS I値の応答倍率をそれぞれ示す。図-3に見られるように最大加速度の応答倍率は、波形の繰り返し特性によって大きくばらつく。S I値も最大加速度ほどではないが、ある程度のばらつきを有している。本調査では、5地震のうち平均的と考えられる宮城県沖地震開北橋記録を用いて、観測地点、予測地点の地盤の応答倍率を計算し、式(1)のかたちにまとめた。

$$\alpha = a \times b^{-x}$$

α : 応答倍率、 x : 基盤(入力)最大加速度またはS I値、 a, b : 観測地点及び予測地点ごとに定める係数

本調査で設定した推定法について、観測地点のうち最大地表面加速度と地表面S I値を想定し、想定値自身と他の箇所の想定値群から推定した値とを比較することにより精度の検討を行った。ここで、観測地点数は47地点とし、最大加速度の想定は道路橋示方書V・耐震設計編の距離減衰式、またS I値は、吉見らの距離減衰式によって、それぞれ2種類行った。一方は、震央を伊豆(観測網外、 $M=7$)と埼玉(観測網内、 $M=6$)に想定した。推定結果を想定値との相関図として示したものを、図-4、5に示す。相関係数は、それぞれ0.957・0.953及び0.907・0.947である。

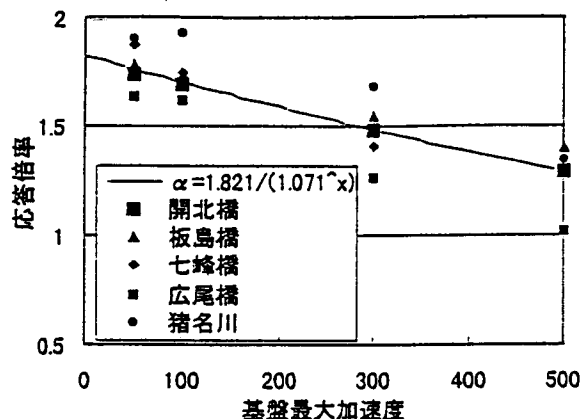


図-2 最大加速度の応答倍率

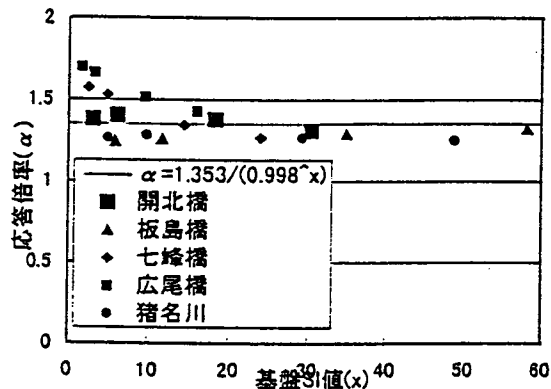


図-3 S I値の応答倍率

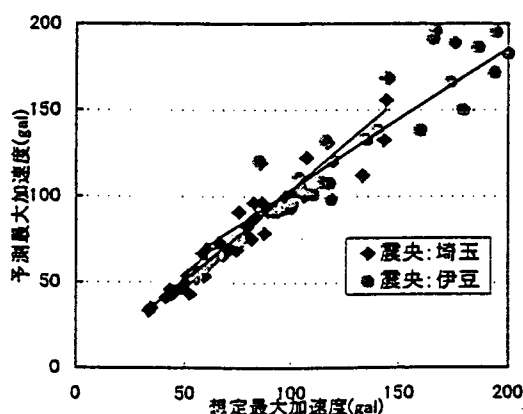


図-4 距離減衰式との比較(最大加速度)

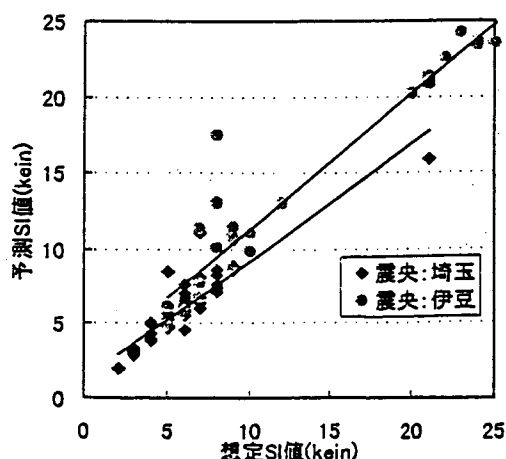


図-5 距離減衰式との比較(S I値)

5. 今後の課題

今後は、観測記録をもとに本手法を検証し、精度の向上に努める必要がある。

付 属 資 料 口 頭 発 表 論 文

1. 土木学会第52回年次学術講演会

交通基盤施設の地震被害による社会経済的影響評価システムの開発	45
地震被害の初動検知体制パフォーマンスの評価に関する研究	47
堤防の地震被害の影響の推定法	49

2. 第24回地震工学研究発表会

震災による交通ネットワーク被害の生産活動への影響評価について	51
都市基盤施設の被害検知体制に関する研究	55
地震動特性値分布の即時予測手法に関する研究	59

3. 天然資源の開発利用に関する日米会議 耐風・耐震構造部会、第25回合同部会

Development of Real-time Seismic Information System for M.O.C.	63
--	----

4. 第1回日米地震政策シンポジウム

ASSESSMENT, REPAIR AND REHABILITATION OF LIFELINES

-Highway, Sewage, Pipeline and Common Utility Duct-	74
---	----

建設省土木研究所 正会員 杉田 秀樹
同 上 正会員 野崎 智文

1. まえがき

道路施設など交通基盤施設の地震被害は、当該施設の機能低下だけに留まらず、被災地域の緊急活動や周辺地域を含めた社会経済活動に深刻な影響をもたらす^{1),2)}。このため交通基盤施設の計画・管理に際しては、当該施設の耐震安全性の向上（ハード的対応）はもとより、被災した場合の影響を最小化するための震前・震後対策（ソフト的対応）が重要である。本文は、施設管理者のソフト的対応を支援するために開発を進めている、交通基盤施設の被害が地域の中長期的な経済活動に与える影響を定量的に評価するシステム（EASSE: Earthquake Assessment System for Socio-economic Effect）の全体像を報告するものである。

2. システムの基本理念～誰が・いつ・どのように使うか？

システムの運用イメージを図1に示す。都道府県単位で道路等交通基盤施設の計画・管理に携わる者が、震前の耐震補強計画及び震後の復興計画の意志決定に際して、アプリケーションとして活用することを想定し、5つの基本コンセプトを設定した。すなわち、①入力には生産施設及び交通基盤施設（道路、鉄道、港湾）の被害とする、②出力は被災地域内・外の総生産額の変化とする、③経済推計の対象期間は地震発生後1週間～数年程度とする、④経済推計の対象範囲は都道府県レベル及び全国レベルとする、⑤道路被害は道路ネットワーク上で設定する、である。施設管理者は被害の分布・程度を様々に変化させることで、中長期的な経済的影響を最小化する補強・復旧戦略を検討することが可能となる。

3. システムの特徴～交通推計と経済推計をいかに結合するか？

システムの全体構成を図2に示す。メインフレーム・交通推計・交通～経済変換・経済推計の4つのモジュールから構成しており、各モジュールの特徴は以下の通りである。

1) メインフレーム：メニュー・地図画面・推計結果の表示・制御及び施設・経済データの取込を行う。主要なデータは表1に示す通りであり、自動取込によりユーザーの負担軽減に配慮する。

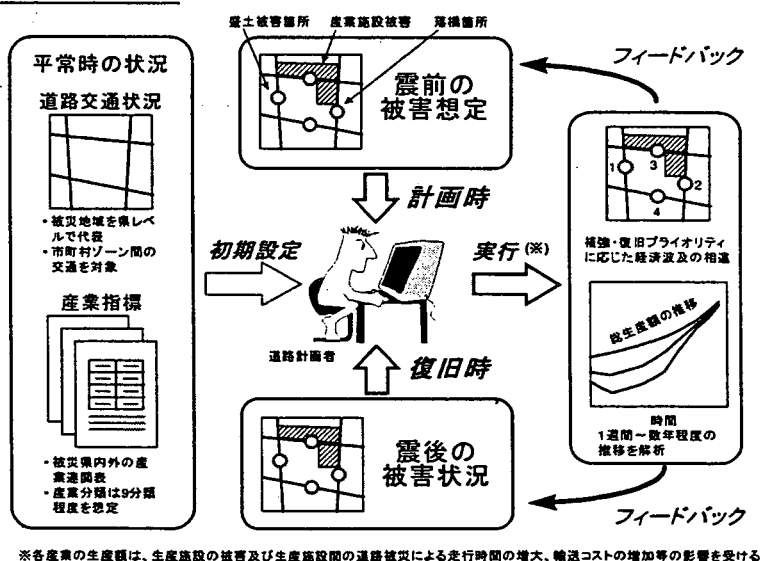


図1 システムの運用イメージ

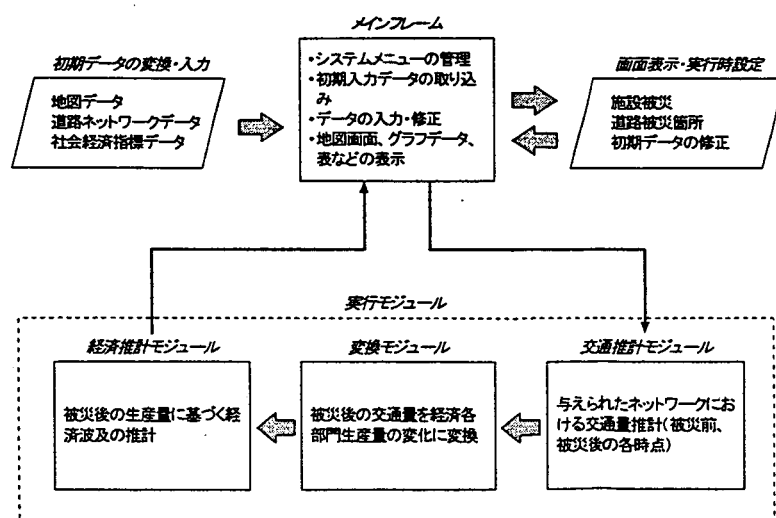


図2 システムの全体構成

キーワード：地震災害、交通基盤施設、震前対策、震災復旧、交通推計、経済推計

〒305 茨城県つくば市旭1番地 TEL: 0298-64-3244

2) 交通推計 (図3) : 平常時及び地震後の交通推計計算を実行し、ゾーン間の走行時間を出力する。交通推計計算は、各ゾーンの被災による発生集中量の変化、鉄道被害の道路交通への影響、港湾施設被害による発生集中量の変化を考慮した四段階推計法により行う。発生集中量の推計は出勤・登校・業務・帰宅・自由を目的とした人流トリップに基づいて行うものとし、地震発生直後に特徴的な緊急車両等は考慮しない。

表1 システムに用いる主要データ

データ内容		データソース
被災県内	地図情報 (図形情報・基本属性)	行政界
		市区町村界
		ゾーン集約
		道路ネットワーク
		リンク属性
	地図情報 (追加属性)	ゾーン代表ノード
		鉄道・港湾
		社会データ
		経済データ
		表型式データ
被災県外(内外)	交通データ	発生集中トリップ
		貨物車OD
		貨物量OD
		通勤・通学OD
		経済データ
	経済データ	全国産業連関表
		国勢調査報告
		物流センサス
		自動車起終点調査
		自動車起終点調査

3) 交通～経済変換 (図4) : 走行時間の増加に起因する各ゾーンの生産活動の変化を推計し、経済部門別の生産額を出力する。走行時間の増加は①輸送時間の増加に伴う生産額の減少、②輸送費用の増加による生産取り止めを通じて生産活動を変化させると考え、阪神淡路大震災の事例を踏まえた生産額減少率及び生産取り止め率の関数形を仮定することで経済部門別生産額に変換する。各ゾーンの生産施設には復旧曲線を与え、被災後の復旧過程を生産活動の変化に反映する。

4) 経済推計 : 経済部門別の生産額の変化が部門間で波及する様子を産業連関分析により推計し、域内総生産及び全国総生産の変化を出力する。産業連関分析では①1週間間隔での推移を追跡できる動学モデルであること、②経済部門ごとの生産額を入力とすること、③生産額の制約が他部門に波及する状況を表現できることを条件に、従来のレオンチェフモデルを拡張した新しい経済波及モデルを構築した。

4. まとめ

交通基盤施設の地震被害による社会経済的影響評価システムについて、システムの全体像及び基本的な考え方を報告した。本システムの開発は概略設計が終了した段階であり、システムに用いる各種手法は地震災害に関する現在までの知見や現段階で利用可能な施設・経済データに基づいている。今後、震災事例の詳細な分析に基づいて手法の精度・妥当性を向上するとともに、施設管理者への積極的な導入を通じてソフト的地震対策の高度化を図ることが重要である。

【参考文献】1)川島, 杉田, 加納:地震による間接的な経済被害に関する研究, 土木研究所報告, No.186, 1991.12
2)川島, 杉田, 中島:大都市圏における震災波及と構造に関する研究, 土木研究所資料, No.3199, No.3206, 1994.7

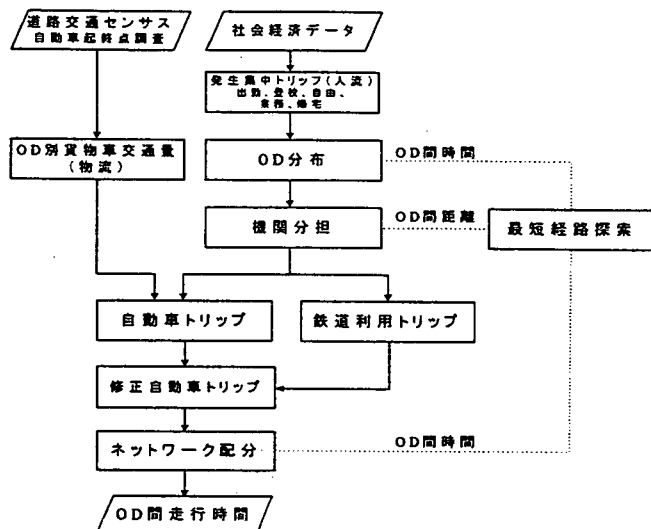


図3 交通推計の流れ

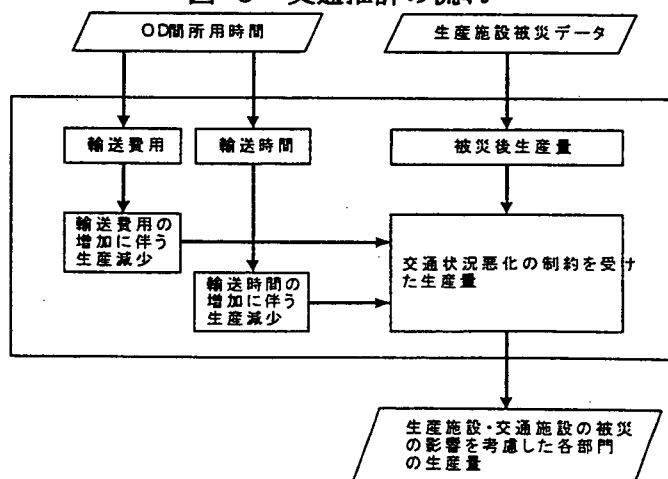


図4 交通～経済変換の流れ

地震被害の初動検知体制パフォーマンスの評価に関する研究

建土研 耐震技術研究センター 防災技術課 正会員 野崎智文
同上 正会員 杉田秀樹

1. 序 論

本研究では、公共土木施設における地震被害の検知技術・体制のパフォーマンスを全体的な視点から数量的に評価する手法について検討した。大規模な地震が発生し、河川管理施設・道路等、広範に分布する基幹的な施設が被災した場合、地震直後の初動期に施設を管理する事務所等が迅速に効率よく被害の状況を把握するか否かがその後の混乱、二次災害を軽減するための鍵となる。本研究では、①施設の被災を検知する各種の技術を組み合わせて用いる場合の迅速性、②複数の班により多数の被災現場を調査・点検する場合の体制のパフォーマンスを定量的に把握する手法を提案し、試算を行った。

2. アプローチ

3.1 検知システムの迅速性に対する評価手法

地震により被害が発生した場合には、各種の検知手法を用いて被害の全容、急所となるポイントの被害程度を把握する必要がある。ここで検知手法としては以下の3種類を想定している。

- ① 現位置に敷設されたセンサー、テレメーターシステムなどにより特定の形態の被災を検知する方法（現位置検知）
- ② ヘリコプターからの動画像などにより離れた位置から対象施設の被災状況を把握する方法（リモートセンシング）
- ③ 職員その他により実際の被災現場を調査し被災状況を把握する方法（調査・点検）

これらを各々の「検知ルート」と呼ぶことにする（図1）。実際は、各ルートの中は検知、伝送、移動といったさらに細かなイベントに分けられている。さて、各検知ルートによる被害検知結果に基づき、あるいはその後の調査・点検を踏まえて、復旧計画・準備がなされ、復旧作業が行われる。この時、時間帯によっては使用不可能な検知ルートがあり、また各ルートのイベントに要する時間も状況に応じて異なる。本手法においては、これらのイベントの所用時間を確率変数として与え、多数の試行を繰り返すことによって、最短時間の検知に使われる検知ルートの頻度を集計した。確率分布は正規分布を仮定し、各イベント所用時間の平均、分散については、妥当と考えられる値を設定した。

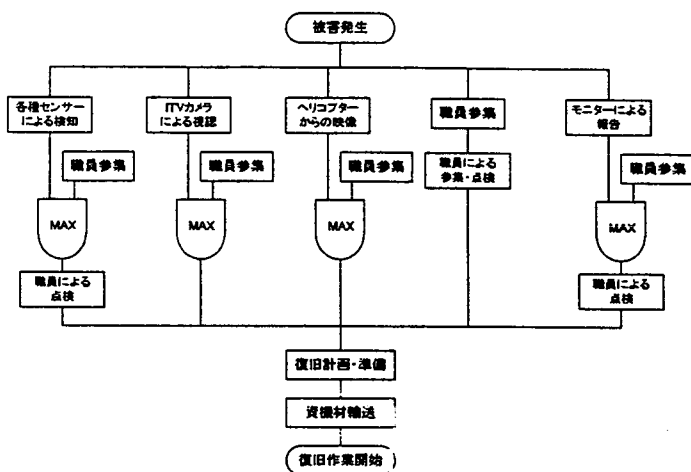


図1 検知ルートのモデル

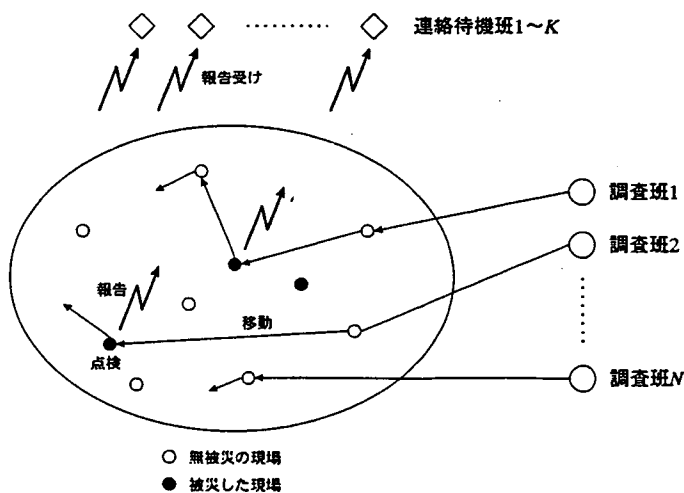


図2 複数班による点検のモデル化

キーワード：地震、被害検知、防災体制、評価、シミュレーション

〒305 茨城県つくば市旭 1 TEL0298-64-3245

3.2 被害点検体制の効率性に対する評価手法

被害検知の第一報の後、職員等によって施設の調査・点検が行われる。ここでは、多数の点検対象現場のうちある割合の施設が被災したとして、それらの現場に移動し、点検し、報告するために要する時間を計測した(図2)。具体的には、各班の現場間移動、点検、報告に要する時間を確率変数として与え、前節の方法と同じく多数の試行を繰り返すことによって、すべての箇所を調査・点検し終わるまでの時間を測定した。ただし、被災箇所の点検後被災状況を報告する際に事務所等の連絡待機班の窓口数が限られているとし、ここで待ち行列が形成されると仮定した。また、調査対象現場は抽象的に定義されており、現場の幾何学的位置、現場間の距離は想定せず、現場間の移動時間のみ同一の平均、分散によって規定した。

3. 計算結果

3.1 検知システムの迅速性に対する評価結果

2.1の手法の各試行において、被害が発生してから復旧活動が開始されるまでの時間が最短となるような検知ルートを集計したのが図3である。これより、ヘリコプター、可視光映像を想定したITVは夜間には使えないこと、全体として現位置に取り付けたセンサーが有利であることがわかる。センサーが必ずしも最速とならないのは、地震による故障、回線のリスクを考えているためである。また、各時間帯ごとに全試行の所用時間平均を示したものが図4である。

3.2 被害点検体制の効率性に対する評価結果

2.2の手法において、1500の点検箇所のうち10%が被災、連絡待機班の数が2班であると仮定して、調査班の数を1~50と変化させ、すべての箇所の点検が終わるまでの時間をシミュレートしたのが図5である。班の数が1班から数班の範囲で増えてゆく過程では、点検終了までに要する時間が大きく減少するが、10班程度以上では班の数を増やしても所用時間は大きく変化しないことが分かる。実際の工事事務所等における体制を想定した場合も、10班という数値は概ね実際上の上限の値と考えられる。

4. 結 論

本研究において、現位置検知センサー、リモートセンシングなどの各種技術を活用したシステムを震災対策体制に応用した際の体制パフォーマンスを評価する手法を提案した。研究は緒についたところであり、今回の試算においても現場の数の限定、現場配置の抽象化といった簡略化を行っている。今後は、これらの手法が現場にて簡易に適用できるよう、汎用性のあるモデルを検討していく。

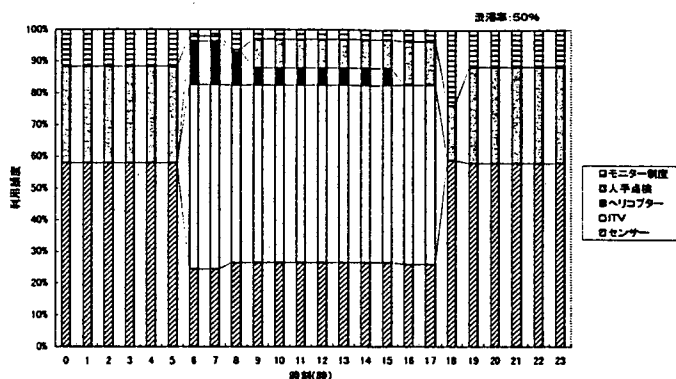


図3 復旧開始までに利用されるシステム

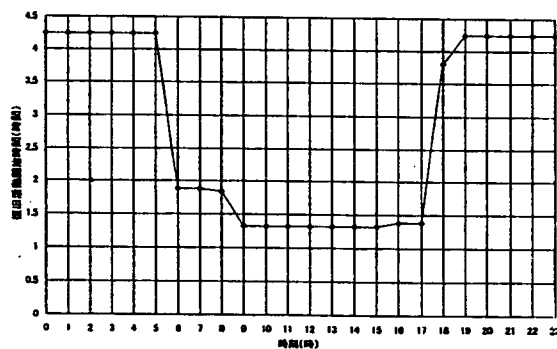


図4 復旧活動までの所用時間

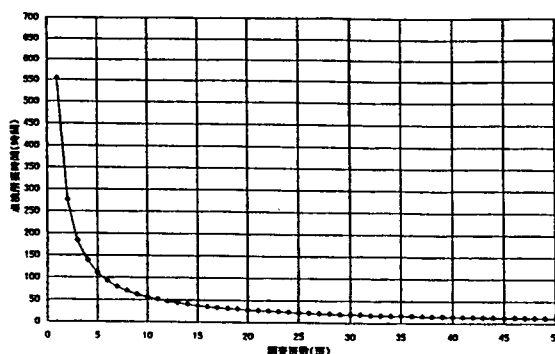


図5 点検班の数と点検所用時間の関係

1. まえがき

兵庫県南部地震では河川施設を含めて公共土木施設に甚大な被害が生じた。公共土木施設の震災対策を進めるためには、施設自体の耐震性を高めることはもちろん、大規模地震により被害を生じた場合の影響をできるだけ軽減することが重要である。本研究では、堤防被害の影響として越水による堤内地の浸水に着目し、地震による堤防の沈下起因して越水が発生した場合の被害額の期待値の推定手法を提案する。

2. 影響の推定

被害額の期待値の推定フローを図1に示す。個々の計算ステップについてモデル河川を対象とした試算結果を併せて以下に示す。

ステップ1. 地震動に関する関数の設定¹⁾

任意の堤防箇所における地震動の大きさと発生確率を評価するため、ある領域内におけるマグニチュード M 以上の地震の発生確率、震央距離が Δ 以内である確率、および最大加速度の距離減衰式³⁾をそれぞれ(1)~(3)式により与える。

$$\lambda_M = 10^{b_1 - b_2 \cdot M} \dots (1)$$

$$P_\Delta = \pi \cdot \Delta^2 / \pi \cdot r^2 = \Delta^2 / r^2 \dots (2)$$

$$a_{max} = a_1 \cdot 10^{a_2 \cdot M} \cdot f(\Delta)$$

$$(a_1 = 403.8, a_2 = 0.265, f(\Delta) = (\Delta + 30)^{-1.218}) \dots (3)$$

ここに、 b_1 、 b_2 は地震の平均発生率を表す係数で、比較的発生頻度の高い地域を対象として $b_1 = 4.53$ 、 $b_2 = 0.808$ を用いる²⁾。(2)式では、震源の位置が半径 r の円内に均一に分布すると仮定している。

ステップ2. 堤防の沈下量に関する関数の設定¹⁾

堤防高 h を(4)式により与える。(4)式は既往の地震による堤防の被害が最大加速度が概ね 100gal 以上で生じはじめてることと⁴⁾、兵庫県南部地震においては推定最大加速度が 200~300gal の箇所でも最大 3m の沈下が生じたことに基いて経験的に定めた。

$$h(a_{max}) = h_0 - 1.5(a_{max} - 100)(m); (a_{max} \geq 100), h(a_{max}) = h_0 (m); (a_{max} < 100) \dots (4)$$

ここで、 h_0 は地震前の堤防高で、6.59m (再現期間 150 年の流量が流れた際の最大水位) とした。

ステップ3. 越水の発生確率及び被害額の評価

河川堤防には、地震が発生するしないに関わらず、越水が発生する確率は存在する。仮に地震が発生して堤防が沈下すれば、越水が発生する確率は増加する。この増加分がここで求めるべき確率である。図2はモデル河川の計算対象地点における断面図である。二次元の不定流計算によれば、例えば、再現期間 50 年の流量がこの河川に流れた場合、堤防の高さが 5.6m 以下であれば越水が発生する。

越水による被害額は別途開発された氾濫シミュレーター⁵⁾によって求めた。これは流域をメッシュ分割し浸水域の大きさを計算するとともに、浸水したメッシュごとの資産価値 (人命は含まない) と被災度の積の総和をとることで被害額を評価するものである。

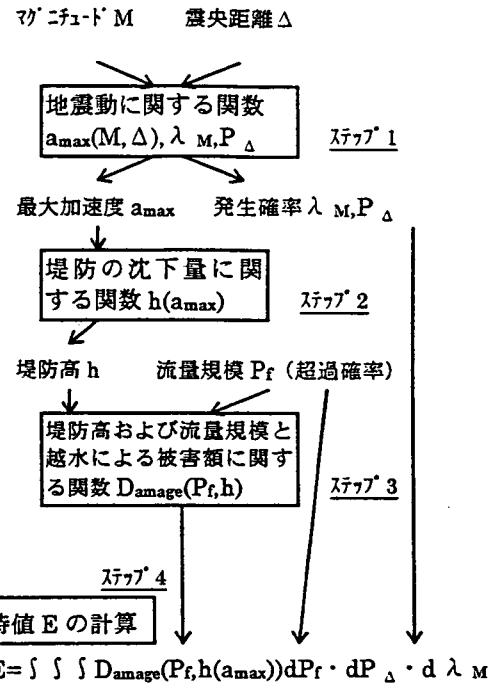


図1 期待値計算の手順

キーワード：河川堤防、洪水、地震防災、リスク評価

〒305 茨城県つくば市旭1 TEL0298-64-3245

モデル河川を対象に、流量と堤防高さを表1の10ケースに変化させた場合の被害額を図4に示す。

ステップ4. 被害額の期待値の評価

ステップ1～4を総合して、地震により越水が発生した場合の被害額の期待値Eを(5)式により算定する。

$$E = \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \int_{r_0}^{P_0} P_h D_{\text{Damage}}(P_f, h) \cdot 2 \Delta / r^2 \cdot \ln 10 \cdot b_2 \cdot 10^{b_1 - b_2 \cdot M} \cdot dP \cdot d\Delta \cdot dM \cdots (5)$$

ここに、 $D_{\text{Damage}}(P_f, h)$ は堤防高さhのときに超過確率 P_f の流量によって越水が発生した場合の被害額を表し、図4により与えられる。例えば、 P_f が1/(100年)、hが5.6mの場合には被害額 $D_{\text{Damage}}(P_f, h)$ は2550億円となる。また P_0 は現況の堤防高に対応する流量の超過確率を、さらに P_h はマグニチュードがM、震央距離が Δ の地震が発生した場合の堤防高に対応する流量の超過確率を表している。モデル河川の被害額の期待値は(5)式により1300万円/年と評価される。

3. まとめ

任意の地点において堤防の地震被害に起因して越水が発生した場合の被害額の期待値を評価する手法を提案するとともに、モデル河川を対象に試算を行った。従来漠然ととらえられていた地震被害の影響を定量的に把握するための手法として、各種地震対策への応用が期待される。地震対策の効果を評価するためには、本手法による被害の評価に加えて以下の要因の影響を考慮する必要がある。すなわち、①河川堤防の耐用年数、②流域の資産価値の将来予測、③流域全体の面的な評価（堤防沿いに線的な地震対策を行ってはいじめて地震対策の効果は発現される）、④波及効果発生（被害額が大きくなるにつれて復興に要する時間的・人的パワーは加速度的に増加する）、⑤流域の住民の安心感等の要因である。これらの要因の定量的な評価手法についてさらに研究が必要である。

参考文献：1)古関潤一：既往の液状化・非液状化事例に基づく地震時液状化確率の定式化、土木技術資料、第37巻、第31号、pp.44-49、1995、2)佐々木康、田村敬一他：確率論的手法に基づく地震動強度の再現期待値の試算、土木研究所資料第2419号、1986、3)宇田高明、松尾修他：平成5年釧路沖地震災害調査報告、土木研究所報告、第193号、第6編4)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、pp.135-141、1990、5)栗城稔、末次忠司他：氾濫シミュレーション・マニュアル(案)、土木研究所資料第3400号、1996

表1 氾濫計算の条件及び結果

No.	洪水波形 (再現期間)	堤防高 (m)	浸水面積 (ha)	被害額 (億円)	人口 (千人)
1	150年	6.59	693	2286	113
2	150年	5.60	881	3319	149
3	150年	5.19	893	3418	152
4	150年	4.28	917	3637	156
5	50年	5.60	463	1443	71
6	50年	5.19	577	1759	92
7	50年	4.28	675	2210	110
8	30年	5.19	385	1089	57
9	30年	4.28	515	1563	81
10	10年	4.28	227	420	31

注)堤防高の6.59,5.60,5.19,4.28mはそれぞれ再現期間150,50,30,10年の洪水波形による最大水位に相当する。

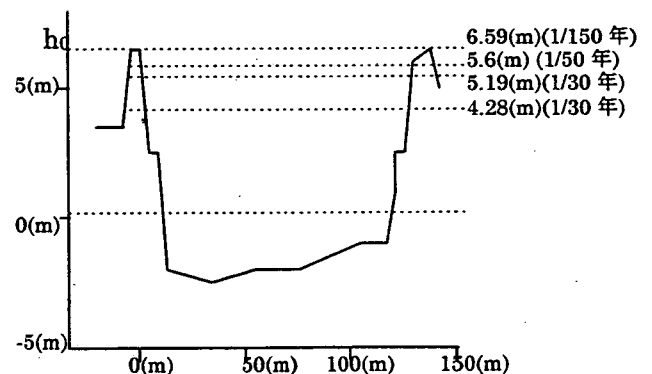


図2 計算対象地点の断面図

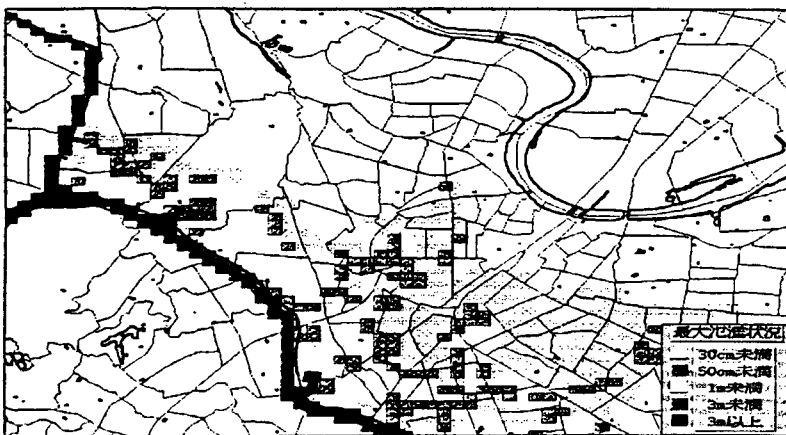


図3 氾濫シミュレーション

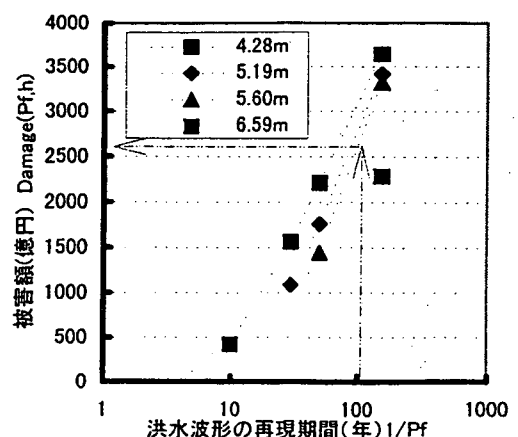


図4 洪水波形、堤防高、被害額の関係

震災による交通ネットワーク被害の 生産活動への影響評価について

杉田秀樹¹・野崎智文²・遠藤和重³

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 (〒305茨城県つくば市旭1番)

³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 研究員 (〒305茨城県つくば市旭1番)

都市地域において大規模な地震が発生し道路等の交通施設が被災した場合に、これらの被害が地域の生産活動に与える影響を評価する手法を紹介する。本手法は①地震後の道路交通状況を推計する手法、②走行時間の増大が生産活動に影響する程度を推計する手法、③生産活動の低下が経済的に波及する状況を推計する手法からなっており、都道府県単位で必要なデータに基づいて推計を行うことによって、地震後における被災地域内における生産部門ごとの生産低下率を推計することができる。これらの手法は、最終的には一つの推計システムとしてまとめられ、道路等の交通施設を計画・管理するものがこれを利用し、震前の補強戦略、震後の復旧戦略の検討に活用することを目的とする。

Key Words : Earthquake, disaster prevention, loss estimation, socio-economic effect

1 緒 論

大都市地域において規模の大きな地震が発生し、道路などの交通基盤施設が被災した場合、通行不能・渋滞による走行時間の低下等によって地域内外の経済が大きな影響を受けると考えられる。このように震災の影響が大きい基幹的な交通施設を計画・管理する者は、施設の被災が地域内外に与える影響に配慮しながら、震前の補強計画・震後の復旧戦略を策定しなければならない。

本稿では、地震によって道路・鉄道等の交通施設が被災した場合に、その影響が地域内外の経済に波及する状況を推計する手法を提案する。ここで紹介する手法群は独立したモジュールとしてコード化され、最終的には一つのシステムとしてまとめられる。交通施設の計画者は、このようなシステムを用いて交通ネットワークの被災パターンを変更しながら推計を繰り返し、最適な震前の補強計画、震後の復旧戦略を策定することができる。

2 基本方針

本稿で提案する手法は一つのシステムとしてまとめられ、都道府県・地方建設局ブロック等の規模で道路等交

通ネットワークを計画管理するユーザーが推計操作を行うことを想定する。この時ユーザーは、生産施設および道路等交通施設の被災状況を、震前の想定や震後の調査結果に基づいて入力し、地域内外の経済の変動を出力として得る。ただし推計の対象期間は、地震直後の混乱期を除き、発生後1週間～数年程度の期間とする。また手法の検討にあたっては、問題点・発展性を明確にし、個別のモジュールの変更によってシステムを容易に更新できるようにする。

3 評価手法について

(1) 評価の流れ

本稿の目的を達成するために、以下の三つの手法を組み合わせて推計を行う(図1)。

a) 交通推計手法

震災後の交通状況を推計し、被災地(都道府県エリア)におけるゾーン(市区町村)間の輸送時間を算出する。

b) 交通推計結果の変換手法

生産施設等の被害に輸送時間・コストの増加による制約を加味し、被災後の産業各部門の生産額を推計する。

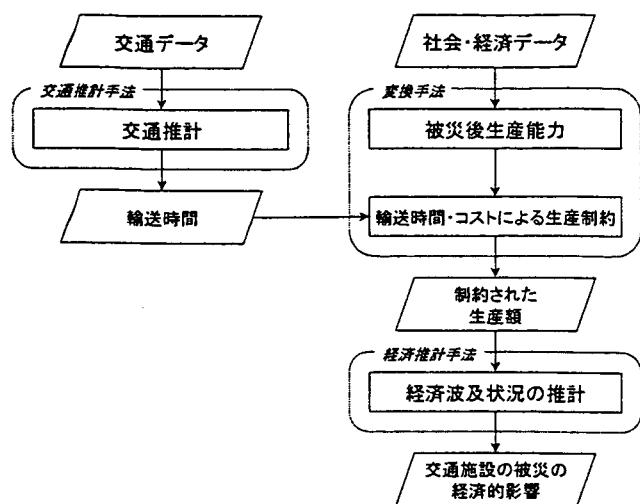


図 1 手法の全体構成

c) 経済推計手法

産業各部門の生産額の変化が被災地域内外に波及する状況を推計する。

次節以降においてこれらの手法の概要を説明する。

(2) 震災後の交通推計手法

交通推計手法では、一般的に交通量推計で用いられる四段階推計法を用いるが、生産施設の被災による各ゾーンの発生集中量の変化、鉄道施設の被災の道路交通への影響などを考慮する(図2)。

ここで発生集中量、機関分担については推計式の形式を仮定し、OD配分については重力モデルとして考え、パーソントリップ調査のデータに基づいて推計式を決定した。また交通量配分については、ユーザー均衡の概念により、多段階配分を行っている。

今回の手法の特徴は以下のとおりである。

- ① 生産施設の被害により発生集中量を変化させている。
- ② 鉄道施設の被害については、鉄道リンクを設定し、このリンクがカットされた場合にはバスによる道路交通へ転換させる。

また、港湾施設については、大規模港湾のあるゾーンにおける貨物量ODを変化させることで推計に組み入れることが可能である。

(3) 交通推計結果の変換手法

変換手法においては、各ゾーンの生産施設被害に加えて、交通推計の結果から得られるゾーン間の走行時間による生産額の制限を推計する。その手順は以下の通りである。

まず、生産施設の被災に対して交通施設の被害が全くなかった場合の生産額の復旧曲線を仮定する。この曲線は阪神淡路大震災における企業アンケート³⁾に基づき、被災レベル(大破・中破等)の別に復旧曲線を仮定し、

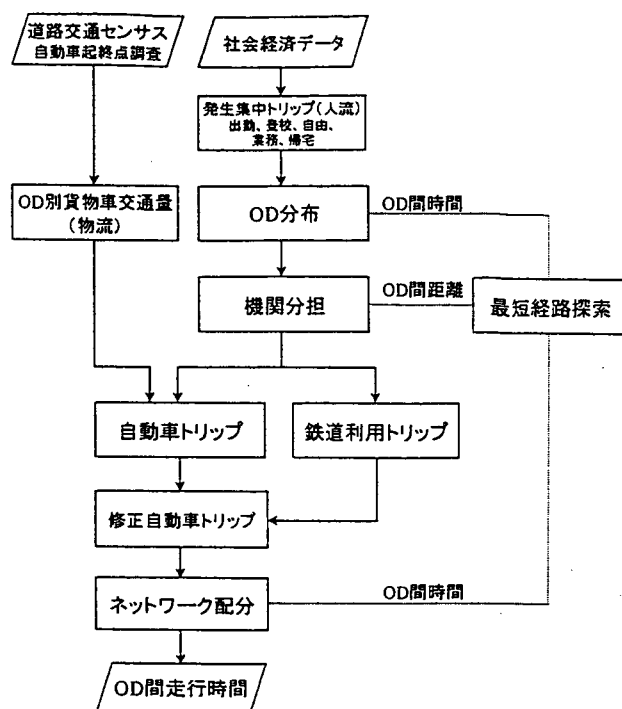


図 2 交通推計の流れ

これから交通施設被災の影響を除いたものを、別途行ったアンケートに基づいて設定した。

これに対して交通施設被災の影響を加味するため、①走行貨物量の低下に伴う回転率の低下による生産額減少率、②輸送コストの増加に伴う生産取り止め率を設定した。今回は、前者については「平常時のゾーン間走行時間」/「推計時点でのゾーン間走行時間」として定義し、後者は走行時間に対応した時間費用額の営業余剰に対する率を生産影響係数と定義しこれを独立変数とする生産取り止め率の関数形を設定した。

(4) 経済推計手法

本手法では、前項までで推計された生産各部門の生産額現象の影響を、部門間の連関・波及状況を考慮して推計する。

震災による経済的な影響についてはこれまでも同種の推計は多く行われており、たとえば兵庫県南部地震の直後には各所で震災の直接被害額およびその波及等による間接被害額が算定され、一般家屋等の被害も含めた直接被害額は6兆円～最大10兆円程度、直接被害に起因する間接的な影響は2兆円程度と試算されているものが多い²⁾。ただしこれらの試算においては、直接被害の額に大きな開きが見られるほか、間接的な影響の算出方法については、被災地域の固定資産税評価額に想定被害率を乗じるもの、各企業の取り引き減少等の機会損失額に基づくもの、これらと産業連関分析の手法を組み合わせたものなど、様々な方法が適用されている³⁾。

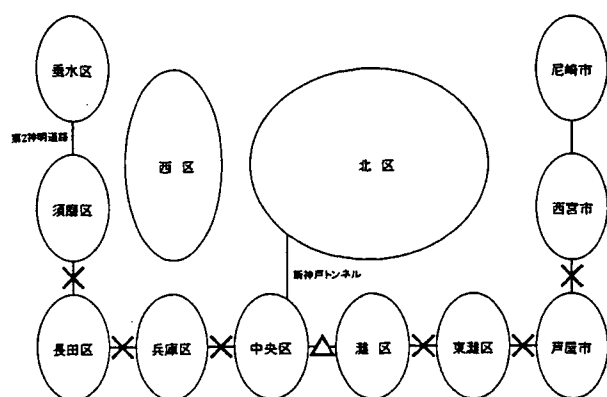


図3 試算における区間設定

今回の手法を提案するにあたって、これらの手法を参考にしつつ、最終的なシステムに必要な条件を以下のように定めた。すなわちそれらは①1週間、1ヶ月といった時間間隔での推移を追跡できる動的なモデルであること、②生産各部門の生産額を入力するモデルであること、③生産額の制約が他部門へ波及する状況を再現できるモデルであること、という条件である。これらの条件を満足するものとして、本研究では産業連関分析(Reontief Model)を応用した複数のアプローチを提案し、各々の推計結果の妥当性および特徴について整理した。

各手法に共通する考え方は次のとおりである。すなわち t 期、 $t-1$ 期における生産額ベクトル x 、最終需要額ベクトル f の差分関係式を動的に解くとして、

$$f' = f^{t-1} + \text{func}(x', x^{t-1}; \text{parameters}) \quad (1)$$

式(1)中の関数 $\text{func}()$ の考え方によって、次のような三つのアプローチを提案した。それらの概要は以下のとおりである。

- ① 基本的な Reontief 行列の行和・列和の保存式を適用した basic approach。
- ② 生産額 x に在庫学を加えた供給額 sup を定義し、各部門の中でもっとも被害が大きい部門の供給額によって、他の部門の生産額・供給額が平常時と同じパターンで規定されとする primitive approach。
- ③ 供給額 sup と生産額 x より、ある部門の生産を行うために必要な各部門の投入量、ある部門から各部門への可能な投入量を計算し、すべての部門間で可能投入量が必要投入量を上回るように収束させる possible-required balance approach。

一方全国への波及については、被災地域の最終需要額の変化が全国の最終需要額の変化に等しいと置き、これによる全国への生産額への波及を、逆行列を用いて推計する。

4 兵庫県南部地震に対するケーススタディ

表1 被災区間の復旧によって変化する交通状況

		平常時	被災直後	50週間後	80週間後
ゾーン間	西宮市～灘区	○	×	×	○
開通状況	灘区～中央区	○	×	○	○
	中央区～須磨区	○	×	×	○
走行時間	(尼崎市～須磨区, h)	0:41	1:47	0:59	0:41
旅行速度	(尼崎市～須磨区, km/h)	48.9	17.2	29.6	71.4
最短距離	(尼崎市～須磨区, km)	33.4	30.7	29.1	48.8

表2 被災県内の生産額の推移

	平常時	被災直後	50週間後	80週間後
生産施設被害のみ	100%	91%	97%	98%
生産施設被害と物流回転率低下の影響	100%	73%	93%	98%
生産施設被害と物流費用増加の影響	100%	91%	97%	98%

(1) 被災条件の設定

本研究で提案した手法の妥当性を検討するため、兵庫県南部地震の被災地域において次のようなケーススタディを行った。すなわち、交通推計手法においては阪神高速道路3号神戸線を中心とした区間が被災したとして図3に示す方法でリンクカットし、走行時間等の状況を検討した。ただし被災直後には、実情に合わせて3号神戸線以外にも多数の区間が被災すると仮定している。また生産施設の被害については、兵庫県南部地震における最大加速度の概ねの分布より大破・中破した施設の割合を想定した。これらの条件設定に基づき、震災後の道路交通状況、直接的な被害および交通状況の悪化に起因する生産額の変化について試算・検討した。また経済波及推計については、一定率で生産額を減少させたケースより問題点を明確にした。

(2) 交通推計の結果

阪神高速道路3号神戸線の相当部部分が地震直後に被災したと想定した場合、各市町村間の走行所用時間は増加する。たとえば表1に、神戸線の被災区間を含む尼崎市～須磨区間の走行時間、旅行時間等の変化を示す、被災直後には平常時より1時間06分走行時間が長くなり(平常時の2.6倍)、東西方向の交通が大きなダメージを受けることがわかる。表1には各時点における平均旅行速度も示しているが、これらは既往の調査による兵庫県南部地震以後の速度よりも大きくなっている⁹⁾。この原因としては、今回の手法においては実際には大量に発生した避難・救急・見舞い・物資の輸送といった震災後に特有の交通需要を見込んでいないためと考えられる。今後は、これら特殊な交通需要についてさらに検討する必要がある。

(3) 生産額への変換の結果

兵庫県南部地震における生産施設の想定被害と上記の交通推計の影響が生産額に与える影響の推計結果を表2に示す。被災対象地域は神戸市を含む兵庫県内の15市

表3 経済波及の推計結果

		平常時	-5%	-10%	-20%
兵庫県	生産額	0	-1858	-3715	-7431
	最終需要額	0	-923	-1845	-3691
全 国	最終需要額	0	-923	-1845	-3691
	生産額	0	-1885	-3770	-7540

(千億円)

21 町であり、推計したのは①道路被災の影響を含まない生産施設被害のみの影響、②生産施設被害に加えて走行時間の増加による回転率低下の影響を考慮した場合および③生産施設被害に加えて走行時間増加による物流費用の増加に起因する生産取りやめの影響を考慮した場合である。この結果、兵庫県南部地震においては、走行時間の増加が生産に与える影響が生産施設の直接の被害を上回るものであったと推計される。一方、物流コストが増加することによる生産の取りやめの影響は非常に小さく、システムを構築するにあたっては、これを除いて考えるかもしくは生産取り止め率を表す関数を変更することが必要になる。

(4) 経済推計の結果

3.4で提案した経済推計手法のうち basic approach を用いて、兵庫県の産業の全部門の生産額を一律に低減させた場合の推計結果を表3に示す。これは兵庫県における全部門の生産額を一律に減少させた場合の最終需要額およびこれを通じた全国の生産額への波及額である。4.3の推計結果にほぼ等しいオーダーの変化に対して、県内の最終需要額は1~3兆円、全国の生産額は2~7兆円程度減少し、各種の既往の調査結果と比較しても妥当な値といえる。

また試算の過程で、三つの手法に関して以下のような知見が得られた。

- ① basic approach においては、生産額の減少率と同程度の率で最終需要額合計が減少する。ただし部門によっては負の最終需要が生じており、これを域外からの最終需要等を通して接続するモデルへと拡張する必要がある。
- ② primitive approach では、最終需要額が被災前に比べて増大するという結果が出た。これは、一定の率で設定される在庫の上限を超えた場合はすべてそれが最終需要に足し込まれるためである。
- ③ possible-required approach については、一度生産額が減少した後に生産額が回復したとしても、生産パターンが元に戻らず、縮小された安定解に落ち着いてしまう。これを解決できる方法を検討する必要がある。

5 結論

本研究により得られた結論をまとめると以下のとおりである。

- ① 交通推計、交通推計結果から経済推計入力への変換、経済推計の三つの手法を組み合わせることにより、交通基盤施設の地震災害による経済的影響を評価する手法を提案した。
- ② 兵庫県南部地震の被害状況を簡略化したモデルにより、各推計手法の妥当性を吟味した。その結果、以下の点が指摘された。
 - － 交通推計手法については、発生集中量に救急・避難といった震後特有の目的の交通需要を加味する必要がある。
 - － 震災後の交通施設の被害の影響を産業部門の生産額に変換する場合、走行時間の増加による回転率の低下の影響は大きいですが、物流費用の増加による生産取りやめの影響は小さいことがわかった。
 - － 震災後に生産額が低下した場合の経済的な波及を推計する手法については、複数の手法に関して推計値の妥当性が確認されるとともに、各手法の特徴が明らかにされた。

今回提案した手法では、たとえば変換手法における復旧曲線の仮定などのモデル化が行われている。これまで大都市地域における震災に関する交通・経済に関する系統的なデータが十分に整理されていないため、これらのモデル化は簡易なものが多いが、今後、理論・計測の両面からモデルの精度をさらに向上させる必要がある。

謝辞：本研究に際しては、「市民の安心を確保し安全な市街地を創出するための総合的な地震防災に関する研究：総合推進委員会（委員長：防災科学技術研究所 片山恒雄所長）」の下で、数々の有益なご意見を賜った、ここに記して厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 神戸商工会議所：阪神大震災による経営への影響および神戸の復興に関する調査結果、1996.3
- 2) 産業復興会議：産業復興計画、1995.6
- 3) たとえば川島一彦、杉田秀樹、加納尚史：地震による間接的な経済被害に関する研究、土木研究所報告第186号、pp.1-58、1991.12
- 4) たとえば中下光治、小谷通泰、長岡数朗：震災時における避難所への救援物資輸送の実態について、土木計画学研究・講演集 No.19(2)、pp.335-338、1996.11

都市基盤施設の被害検知体制に関する研究

野崎智文¹・杉田秀樹²・遠藤和重³

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茨城県つくば市旭1番)

³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 研究員(〒305茨城県つくば市旭1番)

大規模な地震が発生した場合、道路・河川等の都市基盤施設には広域にわたって被害が発生する可能性がある。これらの都市基盤施設は、例えば緊急輸送道路ネットワークなど、連続性が確保されてはじめて全体系としての機能を発揮するものが多い。このため基盤施設の管理者は、地震発生直後に管理施設全体の被災規模や被災分布を迅速に把握し、緊急対応に向けた初動体制を確立することが特に重要となる。本文は、地震直後の初動体制整備に有効な都市基盤施設の被害検知技術および被害検知から復旧開始までの人間行動を含めた作業の流れを被害検知システムとして捉え、確率論的手法により被害検知の迅速性を評価する手法を検討した結果を報告するものである。

Key Words : Earthquake, disaster prevention, disaster prevention system, simulation

1 序 論

地震が発生し、道路施設等地域の緊急活動を支える都市基盤施設が被災した場合、避難・救急・救援といった地域の緊急活動に大きな影響が生じる。したがってこれら基盤施設の被害を把握し、必要に応じて震後対応を行うことはきわめて重要である。本稿では、これらの震後対応を迅速に行うための施設・設備・技術・人などを含めた震災対策システムの効率性を評価する方法を提案する。

一般に地震発生以降のこのような対策は、地震の検知→被害の予測・被害の検知→応急対策活動の順で行われるが、阪神淡路大震災の経験からリアルタイム地震防災の気運が高まり、地震発生の検知と即時の被害予測を支援する情報システム等の技術開発が各方面で進行中である。一方被害検知についてはヘリコプターやセンサー等を用いた検知システムの技術開発が進められている¹⁾。

ところがこれら各種のセンサーや即時予測のシステムには各々の処理・伝達に関する遅延時間があり、またその結果を結果を受けて人・組織が情報の解釈、意思決定を行ってから活動に入るまでにも遅延時間がある。時間のみならず、これらの各々の段階において機器の故障、参集・出勤の可能性に関するリスクが存在し、場合によっては一個所の問題が全体的な活動に影響を及ぼすこと

もありうるほか、各種の技術を導入するためにはそれぞれにコストが生じる。したがって、震後対応を効率的に行うための設備・人のありかたについては、個々の技術のパフォーマンスのみならず、それらが全体の体制の中に位置づけられた状態での有効性、影響の度合いなどが十分検討されなければならない。

本稿では、上記のような観点から、①各種の被害検知システムを活用した場合の震後対応にいたるまでの迅速性、②体制によって変化する震後点検の効率性について、簡単な確率モデルにより定量的に評価する手法を紹介する。

なお本稿では、地震・被害を検知する設備や情報を伝達する設備のみならず、これらによる情報を活用して震後対応を行う人・組織・活動方針を含めた総体を「震災対策システム」として捉える。また、今回の手法は主として被害を検知する技術・体制について検討しているが、被害の即時予測に関する技術・体制も同じ形で含め、その全体的な効率性を評価することが可能である。

2 検知システムによる被害検知の迅速性評価

(1) 被害検知システムの特徴

地震による都市施設の被災状況を把握する方法には、被害を現位置で検知するのか離れた地点から把握するの

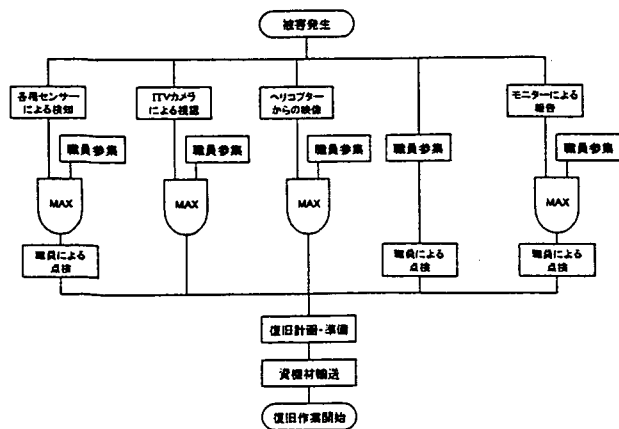


図 1 被災検知から震後対応までのモデル化

か、あるいは受動的に検知情報が取得されるのか検知を行うための能動的な活動が必要なのか、といった条件によって様々な種類のものが考えられる。これらの中には、施設に直接取り付けられその変状を計るデバイス、遠隔より施設の変状を検知するリモートセンシングのほか職員や一般のモニター等により実際に変状が確認され連絡される方法などが含まれるが、ここではそれらの方法を一括して施設被害の「検知方法」と呼ぶことにする。本章では、施設に取り付けられたセンサーやヘリコプターによる被害状況把握などの検知方法によって被害を検知し、震後の活動が開始されるまでの時間を計測する手法を提案する。

(2) 評価モデルの設定

評価モデルに関する設定を説明する。基盤施設を管理する機関（工事事務所等）を考え、地震発生直後に複数の検知方法が並行して活動を開始すると仮定する（図 1）。ここでは検知方法として次の五つを選んだ。それらは①施設に直接、あるいは施設の付近に設置されたセンサー・デバイスにより施設の変状を検知し、管理機関にその情報を伝送するもの（センサー）、②施設の状況を画像により撮影・伝送するもの（ITV カメラ）、③ヘリコプターにより上空から施設の被災状況を撮影・伝送するもの、④施設を管理する機関の職員による点検・報告、⑤あらかじめ依頼しておいたモニターによる報告である。

各々の検知方法は、その活動内容によってその内容が更に分けられている。たとえばヘリコプターによる上空からの被害把握を例示すると図 2 のとおりである。図中、出動の意思決定、現場上空での撮影や職員の参集といった一定の時間を要する単位を「処理ノード(execution node)」、施設や機器が仕様不能になる場合の分岐点を「分岐ノード(branch node)」そして前段のすべての条件がそろった場合に始めて後段の処理が開始されることを表す

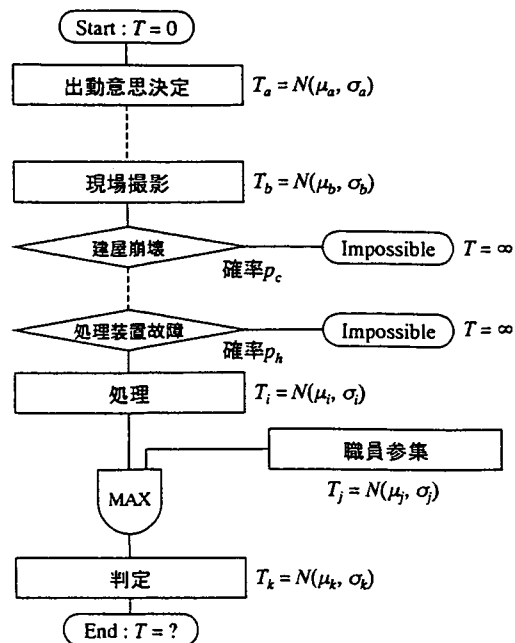


図 2 ヘリコプターによる上空からの被害把握

ゲート（最遅ゲート）を用いて処理を記述している。

処理ノードにはその処理に必要な時間が確率分布によって与えられ、分岐ノードには分岐が発生する確率値が与えられている。ここで仮にこれらの分布、確率がすべて与えられているとすれば、多数の乱数を発生させて試行を重ねることにより（モンテカルロ法）、処理全体に要する時間の確率分布を得ることができる。なお異なる時間帯に地震が発生した場合を表現するには、これらの確率分布や確率値を変化させて対応できる。

本研究の目的はこのような形でシステムを記述するための枠組みを検討するものであるため、個々の処理ノードの確率分布、分岐ノードの確率値については、経験上非現実でない値を任意に設定した。

(3) 迅速性評価の例

上記のようなモデル設定に基づき、シミュレーションを行った結果の一例を示す（図 3）。前節の方針でモデル化した体制に対して 1,000 回の乱数を発生させ、五つの検知方法のうち最も早く被害を把握できたルート of 検知時間を被害把握に要する時間とし、その後復旧活動が開始可能となるまでに要した時間を表している。時間帯によってセンサーの利用できる確率、参集等に要する時間が異なるため、所用時間は夜間で長く、中間で短くなっている。

上記のように、時間帯によって被害把握に要する時間が異なるが、各時間帯ごとに利用される検知方法の割合を示したものが図 4 である。各段階で必ずしも現位置のセンサーのみが有利とはならず、ヘリコプター、人手による点検・報告も含まれるが、これは確率的に施設・機

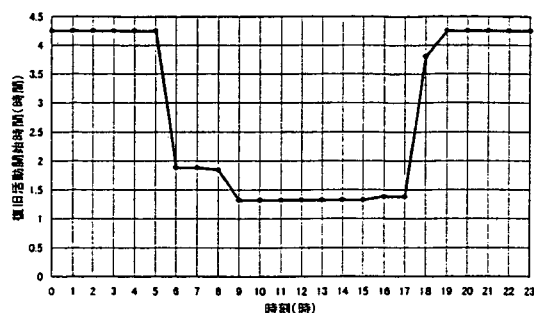


図 3 時間帯別、被災状況把握時間

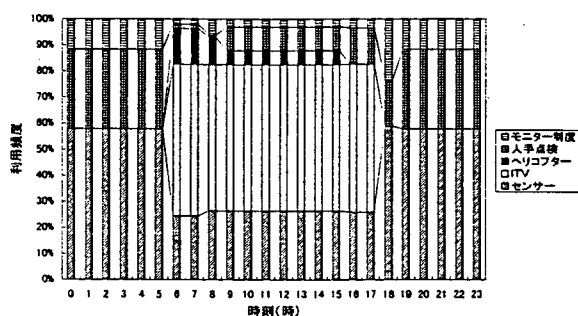


図 4 時間帯別、最速検知方法

器等が地震により使用不可能となる場合もあるからである。当然のことながら、ITV は夜間は使えないが、昼間におけるその割合は高い。また、夜間は現位置のセンサーおよび職員やモニターによる点検のみが可能となるが、図 3 からわかるように被害把握に要する平均的な時間は長くなる。

(4) 今後の課題

これらの結果は直感的な予測と変わらないが、実際の震災対策体制を考えると、異なる箇所にある複数の現場、それらの被害把握に対応する複数の部署・担当が存在し、また情報集約、意思決定に際しても、関係する部署や機器が前後してつながっており、それらには固有の処理時間がある。したがって本手法は、実際の複雑な問題をモデルとして記述するための一つの有効な方法を与えるものである。

また今回のシミュレーションにおいては、各処理ノードの処理時間に関する確率分布、分岐ノードにおける分岐確率を任意に設定したが、今後これらを実際の問題について計測する方法を開発する必要がある。この場合の「計測」とは、必ずしも機器等を用いたものとは限らず、ヒアリング、アンケートなどの主観的な情報を得てそれらを適切に処理することで各パラメータを設定すること

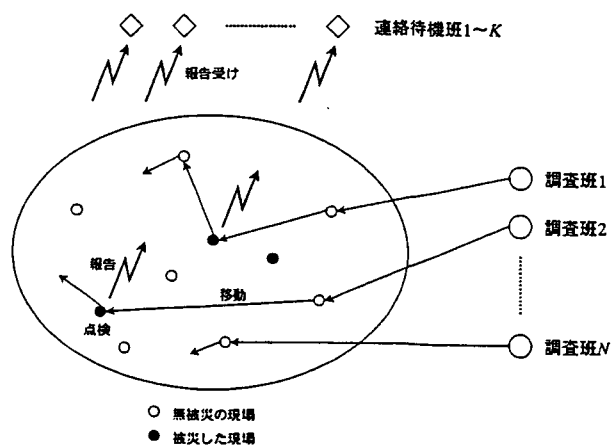


図 5 震後対応における調査・点検のモデル化

も含まれる。

3 震後点検による被害把握の効率性評価

(1) 被害把握の効率性

前章では、複数の検知方法の間で地震発生後の被害把握の迅速性を、一つの箇所について複数の検知方法を適用したモデルでシミュレートした。ここでは、ある事務所管内に複数の調査対象箇所があり、それらの箇所を複数の調査班によって調査する場合の効率性について評価する手法を提案する。

一般に震災調査の体制としては、調査班およびそれらの連絡を受ける連絡窓口の数が多いほど早期に被害を把握できるが、必ずしもその関係は線形ではなく、調査班の数の増加に対して被害把握に要する時間の低減率は減少することが推察される。本章で提案する手法では、調査班と連絡窓口の数を変化させた場合の被害把握に要する時間をモデルにより計測し、震災対策体制の効率性として評価する。

(2) 評価モデルの設定

ある区域内の施設を管理する一つの事務所を考える。地震発生により区域内の施設のいくつかが被災し、事務所においては、被災箇所を調査点検するための調査班および調査班から連絡を受けその情報を集約する連絡待機班が複数組織される(図 5)。ただし本モデルでは区域内の現場の空間的な位置を仮定しておらず、抽象的に表現されている。

調査班は区域内の施設を点検し、施設に被害がなければそのまま次の現場へ移動し、被害が発見された場合にはその箇所を調査・報告した後に次の未調査の現場へと移動する(図 6)。報告にあたって、すべての連絡窓口が他の調査班と交信中で連絡が取れない場合、ここでは窓口空きが出るまで待つこととしている。またエリア

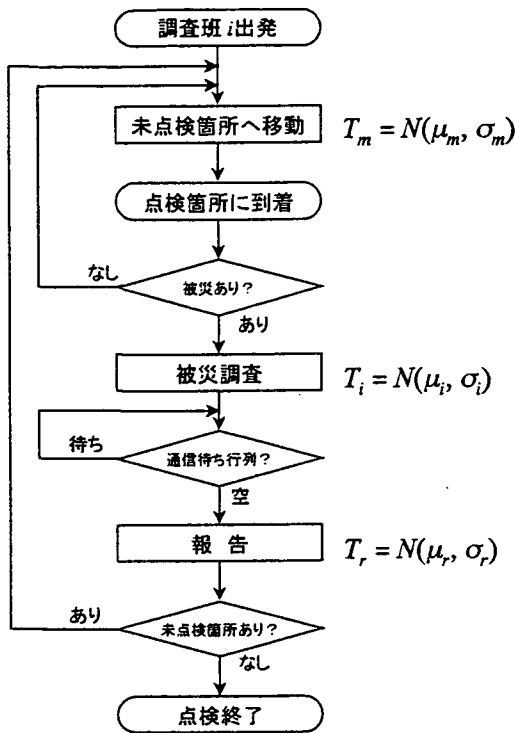


図 6 連絡窓口数の変化と点検所用時間

内の被災箇所は、あらかじめ設定された被災率に基づき乱数を発生させて定めておくとともに、各調査班の処理のうち所用時間を持つノードの処理時間については正規乱数を発生させて時間を経過させる。

(3) 効率性評価の例

活動開始からすべての箇所の調査・点検が終了した時点までの時間を点検の所用時間として、調査班数などのパラメータを変更してシミュレートした。

たとえば1,500の調査対象箇所のうち20%が被災し、調査班からの報告を2組の連絡待機班で受けるとして、調査する班の数を変化させていった場合の全体調査の所用時間を示したものが図7である。箇所数を大きく設定したため全体的に所用時間が長いですが、それでも班数が15付近からは班数を増加させても所用時間はあまり低下しない。また調査班数を一定として連絡待機班の数を変化させた場合の所用時間の例を図8に示す。先のシミュレーションの設定に比べてここでは報告に要する時間を長めに取っているが、それでも連絡待機班の数が5班程度以上では所用時間にあまり大きな変化はない。

(4) 今後の課題

今回のシミュレーションでは、調査対象箇所に関する空間的な区別は考えず、調査班の移動時間を確率的に変動させたのみであったが、調査箇所間のネットワーク・トポロジーを導入することで、実際の問題に対応することができる。

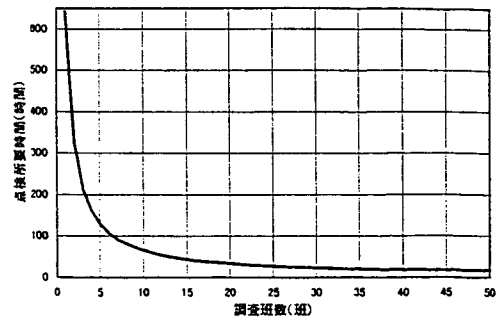


図 7 震後点検の移動・調査の流れ

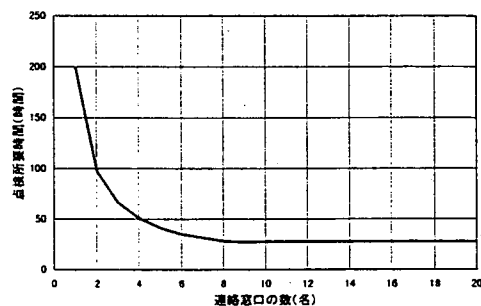


図 8 調査班数の変化と点検所用時間

また前章の迅速性に関するモデル同様、ここでも移動、調査、報告の所用時間については任意に設定しているが、これらを実在の現場において計測・特定する方法を今後開発する必要がある。

4 結論

本稿においては、地震発生直後における基盤施設の被災情報の収集・把握における震災対策システム（機器・人・行動様式）のパフォーマンスを定量的に評価する手法の枠組みについて紹介した。今回のシミュレーションの過程で得られた結果は直感的な予測と大きくは変わらないが、実在の現場においてより複雑な構造を持つ震災対策システムを評価する場合に、今回の手法を拡張することによって有効な指標が得られる。

最終的には、このような手法をインタラクティブなアプリケーションとして開発することにより、現場における震災対策システムの評価・向上に資するものである。

¹⁾ 川島一彦、杉田秀樹、加納尚史ら、ヘリコプター等を用いた上空からの即時・広域震災情報の収集技術の開発に関する研究、土木研究所報告第192号、pp.1-76、1994.1

地震動特性値分布の即時予測手法に関する研究

濱田 禎¹⁾・杉田 秀樹²⁾・金子 正洋³⁾

1)正会員 建設省土木研究所防災技術課研究員 (〒305 つくば市旭 1)

2)正会員 工博 建設省土木研究所防災技術課長 (同上)

3)正会員 工修 建設省土木研究所振動研究室主任研究員 (同上)

離散的に配置された強震計ネットワークの観測記録から、震後即時に地震動特性値(最大加速度及び SI 値)の分布を予測する簡易な手法について紹介する。本手法は、構造物の被害を予測するために必要な構造物位置での地震動特性値を、構造物位置以外で観測された地震動特性値から予測するために用いられる。地震動特性値の予測は、まず地表面で観測された値から地盤の増幅特性を考慮して工学的基盤における値を算出し、次に構造物位置の工学的基盤における値を空間補間により求め、この値を地盤の応答特性を考慮して地表の値に戻す手順により行う。地盤の増幅特性は SHAKE による計算を基本とし、空間補間は推定値の空間分布のなめらかさに配慮した手法を用いている。

Key Words : Seismograph Network ,Ground Motion Characteristic ,Ground Motion Estimation ,Maximum Acceleration ,Seismic Intensity Value

1. はじめに

兵庫県南部地震において、地震直後の初動体制の重要性が再認識された。これをうけ、建設省では震災直後の情報の少ない段階において管理施設の被災状況を大まかに予測し、管理者の意志決定をサポートする即時震害予測システム (SATURN-Seismic Assessment Tool for Urgent Response and Notification) の開発を実施している。本文では、本システムの役割・機能を簡単に紹介するとともに、被害予測の重要なモジュールである地震動予測を報告する。

2. 即時震害予測システムの概要

即時震害予測システムのシステム構成を図 1 に示す。本システムは関東地域を対象に研究開発を進めているもので、東京、神奈川、千葉、埼玉、茨城、栃木、群馬、山梨、長野の 1 都 8 県を対象としている。本システムのベースとなる地震計ネットワークは、管理施設に沿って 20~40km 間隔で離散的に配置した約 100 箇所の強震計をマイクロ回線でネットワーク化するものであり、平成 7 年より整備が進められている。本システムでは、地震計ネットワークから得られる最大加速度及び SI 値(以下、地震動特性値と呼ぶ)に基づき、橋梁等の構造物位置の地震動強度を推定し、さらに構造物の被災危険度を概略予測する。地震発生から全ての予測計算終了までの

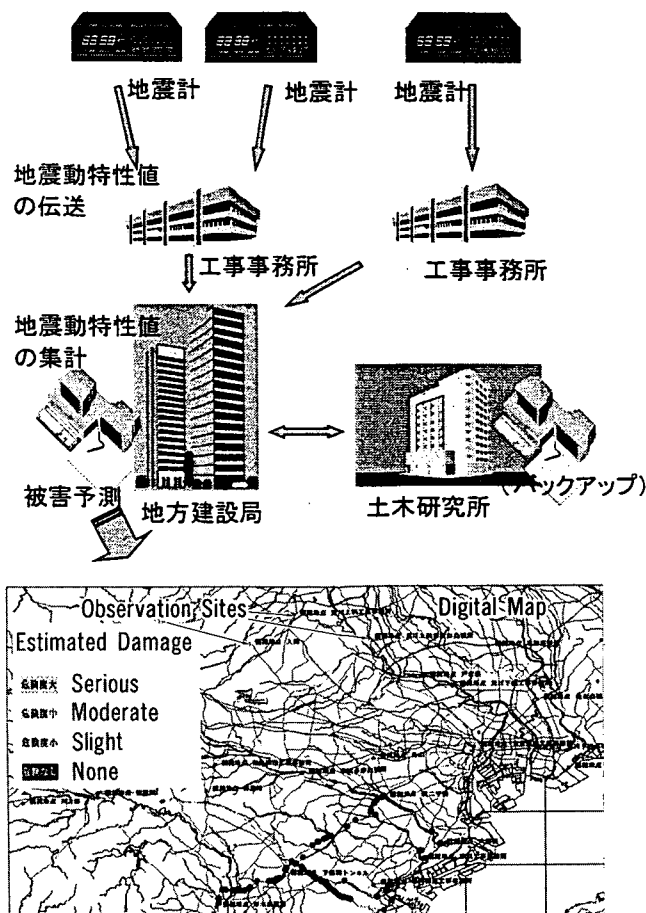


図1 即時被害予測システムの構成

目標時間は 15 分である。予測計算はワークステーションで行われ、予測結果の表示には JIS ソフト Genasys を使用している。

3. 地震動特性値の予測手法

(1) 即時震害予測に必要な地震動特性値

本システムでは、路線沿いの液状化危険度、路線外の面的な液状化危険度、及び、橋梁被害の 3 項目について危険度の予測を行う。ここに、路線液状化危険度は、管理道路を地盤構成が同一とみなされる区間（約 500m 平均）に、また面的液状化危険度は関東地方を 1km 四方のメッシュに細分化して、それぞれの区間及びメッシュの液状化危険度を予測するものである。また、橋梁被害予測では、管理道路にある全ての橋梁を対象としている。

危険度予測の基本的な考え方と、予測に必要な地震動特性値は以下の通りである。

- ①路線沿いの液状化危険度予測は FL 法によって行う。これは、橋梁等土木施設の多くは、液状化に関して FL 法に基づいて耐震設計がなされており、地盤データの収集が他の方法と比較して容易であるためである。
- ②面的な液状化危険度の予測では、微地形分類により地盤の応答倍率や液状化抵抗率を考慮する松岡ら¹⁾の方法によることとした。
- ③橋梁被害予測には SI 値を用いる。これは構造物に及ぼす地震動の繰返し特性の影響を考慮するためである。なお、本文における SI 値は、式 (3. 1) により独自に定義したものである。

$$SI = \frac{1}{2.5} \sum_{i=0.1}^{2.5} S_{vi} \dots (3.1)$$

ここに、 S_{vi} は最大速度応答スペクトルの i 秒成分の値である。

(2) 予測手法の基本方針

予測地点における地震動特性値の予測は、図 2 に示すように、以下の手順で行う。

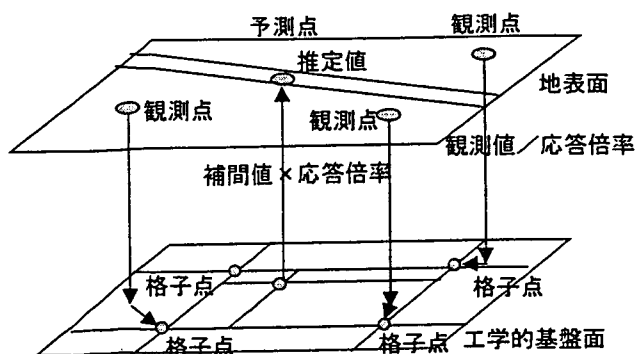


図2 地震動特性値の予測

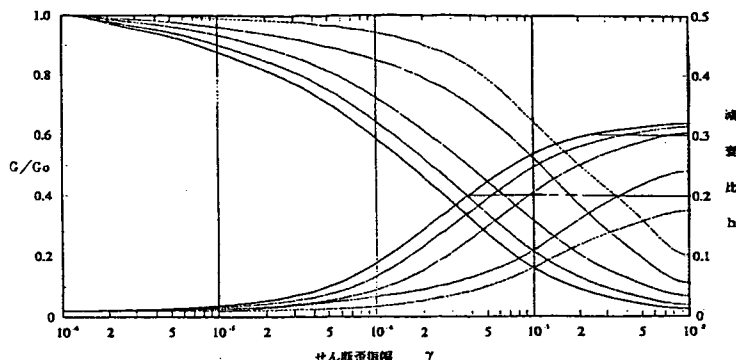


図3 土の動的変形特性

①観測地点（約 100 箇所）の地盤データに基づき、工学的基盤位置での地震動特性値を予測する。

②予測地点下の地震動特性値を空間補間により予測する。

③予測地点の地表面位置における地震動特性値を予測地点の地盤データから予測する。

ただし、面的な液状化危険度の予測では、松岡らが提案する微地形分類によって応答倍率を設定する方法を用いるため、面的な液状化危険度の予測のために応答倍率を新たに設定する必要はない。また橋梁の被害予測には、その橋梁を含む区間に対して路線液状化危険度の予測用に推定された地震動特性値を用いる。

ここに、観測地点及び予測地点における地震動特性値の応答倍率は SHAKE の計算結果から設定する。本来、地震動特性値の応答倍率は地盤条件や地震動によって変化するため、観測された地震動に基づき地点ごとに計算するのが望ましい。しかし、本システムでは、地点ごとの標準的な応答倍率をあらかじめ計算しておき、被害予測の迅速化を図ることとした。

上記の方針で特性値を推定するには、基盤—地表面間の地震動特性値の応答倍率の設定、及び、工学的基盤位置における地震動特性値の補間方法の設定が必要となる。

4. 及び5. にこの2項目の設定方法について述べる。

4. 地震動特性値の応答倍率の設定

(1) 設定条件

応答倍率の設定法を検討するため、観測地点のうち 29 箇所を抽出して SHAKE による応答計算を行った。計算条件は、以下の通りである。

- ①入力波形…応答に及ぼす波形の繰返し特性及び地盤の非線形性を考慮するため、日向灘地震板島橋、宮城県沖地震開北橋、日本海中部地震七峰橋、釧路沖地震広尾橋、兵庫県南部地震猪名川の 5 記録の最大加速度を 50、100、200、500gal に調整した計 20 波形を基盤 2E として用いた。なお、猪名川の波形は地表で観測された記録を別途 SHAKE で基盤に引き戻したものである。

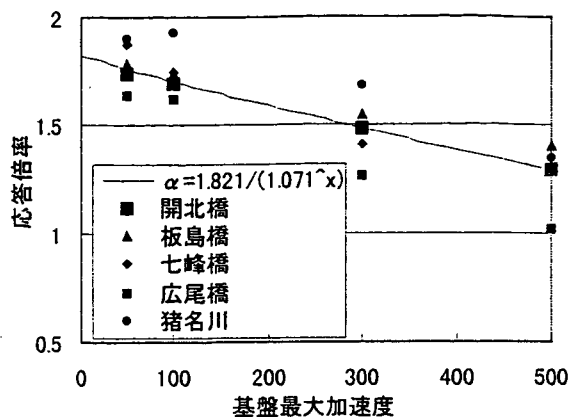


図4 最大加速度の応答倍率

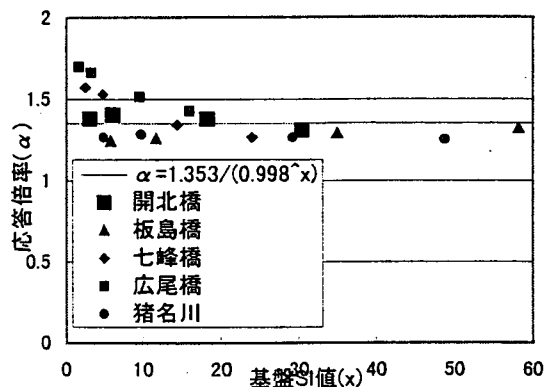


図5 SI 値の応答倍率

表1 各波形による応答加速度と平均値との差の自乗和

MaxAcc	板島	開北	七峰	広尾	猪名川
50gal	2289	2082	3354	3777	3329
100gal	7655	4242	8906	11475	10281
300gal	55936	34813	47063	112402	46874
500gal	14053	137157	181890	362636	103122

②土の動的変形特性…土研式²⁾を基本に図3のように設定した。ただし、減衰比が30%を超える領域においては、地盤の非線形性を過度に評価することを防ぐため、減衰比が30%のときの歪みを与えるせん断剛性比で頭打ちとすることにした。

(2) 計算結果

図4、5に、ある地点で計算された最大加速度及びSI値の応答倍率をそれぞれ示す。図4に見られるように、最大加速度の応答倍率は、波形の繰り返し特性によって大きくばらつく。SI値も最大加速度ほどではないが、ある程度のばらつきを有している。

また、表1は、各波形による最大応答加速度とその平均値との差の2乗を、全29地点分足し合わせたものである。これより、宮城県沖地震の開北橋記録が5波の中でもっとも平均的な結果を与えると言える。

(3) 応答倍率の設定法

計算結果を踏まえ、本システムでは地震動の繰り返し特性及び地盤の非線形性を以下のように取り扱うこととした。

①地震動の繰り返し特性…本システムでは地震動波形が即時には得られないため、繰り返し特性を地震ごとに評価することができない。よって、平均的と考えられる波形を入力とした場合の地震動特性値の応答倍率をあらかじめ計算しておき、これをその地盤の応答倍率とすることとした。入力波形としては(2)により、宮城県沖地震の開北橋記録を用いることとした。

②地盤の非線形性…これについては、式(4.1)により応答倍率を与える関数によって考慮する。

$$\alpha = a \times b^{-x} \dots (4.1)$$

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

5. 基盤面における地震動特性値の補間法の設定³⁾

観測地点数計100箇所に対して、予測地点数は路線液状化危険度が6028箇所、面的液状化危険度が75000箇所の計約80000箇所である(橋梁の被害予測には路線液状化危険度のために推定した特性値を用いる)。4.において提案された応答倍率関数によって基盤に引き戻された地震動特性値を用いて、80000箇所の基盤面における特性値を補間して推定を行うが、この際の補間方法を以下に述べる。

①対象地域(約300×250km)を10km四方の格子に分割する。

②観測点の値より格子点の値を空間補間による方法で

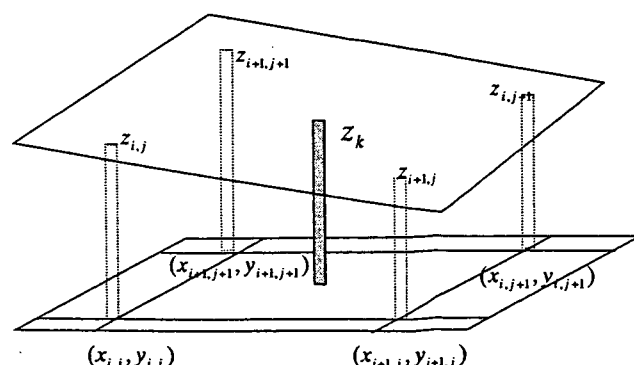


図6 空間補間のイメージ図

補間する。

③予測点の近隣の4格子点の値から予測点の値を距離を重みとして推定する。

本手法の利点をまとめると以下になる。

- ・傾きのなめらかさまで考慮しているので、距離のべき乗分の1を重みとする補間法と比較して精度が高い。
- ・格子点から予測点の特性値を推定するための重みが事前に計算されているため、観測値が欠測されても重みの再計算が不要。

③において4格子点の推定値から予測地点の値を推定する方法は式(5.1)による。

$$z_k = \frac{z_{i,j}(x_{i+1}-x)(y_{j+1}-y) - z_{i+1,j}(x_i-x)(y_{j+1}-y) - z_{i+1,j+1}(x_i-x)(y_j-y) + z_{i,j+1}(x_{i+1}-x)(y_j-y)}{(x_i - x_{i+1})(y_j - y_{j+1})} \dots (5.1)$$

ここに、4格子点の座標及び推定値をそれぞれ (x_1, y_1) 、 z_1 、 (x_2, y_2) 、 z_2 、 (x_3, y_3) 、 z_3 、 (x_4, y_4) 、 z_4 としている。

空間補間による方法とは、(5.2)式によって与えられる関数を(5.3)式の制約条件のもとで最小にする z (z_i , $i=1 \dots N_x$, $j=1 \dots N_y$)を求めることによって推定を行う方法である。

$$J(z) = \sum_{i=1}^{M_x-1} \sum_{j=1}^{M_y-1} (z_{i+1,j} - z_{i,j})^2 + \sum_{i=1}^{M_x-1} \sum_{j=1}^{M_y-1} (z_{i,j+1} - z_{i,j})^2 + \sum_{i=2}^{M_x-1} \sum_{j=1}^{M_y-1} (z_{i+1,j} - 2z_{i,j} + z_{i-1,j})^2 + \sum_{i=1}^{M_x-1} \sum_{j=2}^{M_y-1} (z_{i,j+1} - 2z_{i,j} + z_{i,j-1})^2$$

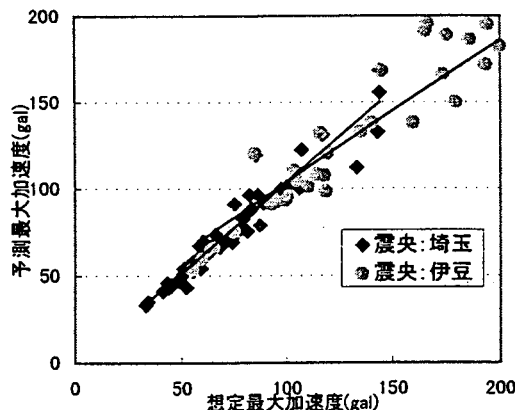


図7 距離減衰式との比較 (最大加速度)

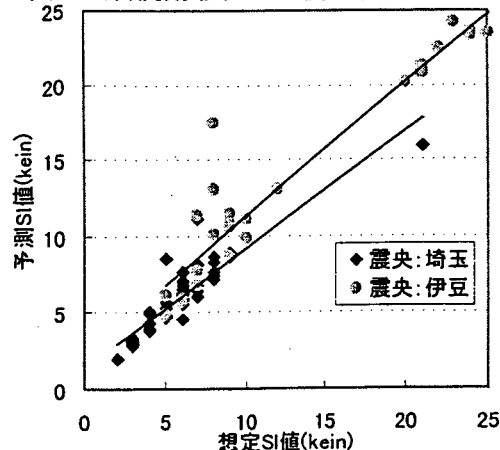


図8 距離減衰式との比較 (SI 値)

$$+ 2 \sum_{i=1}^{M_x-1} \sum_{j=1}^{M_y-1} (z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j} - z_{i,j+1} + z_{i,j})^2 \dots (5.2)$$

$$z_k = \frac{z_{i,j}(x_{i+1}-x)(y_{j+1}-y) - z_{i+1,j}(x_i-x)(y_{j+1}-y) - z_{i+1,j+1}(x_i-x)(y_j-y) + z_{i,j+1}(x_{i+1}-x)(y_j-y)}{(x_i - x_{i+1})(y_j - y_{j+1})} \dots (5.3)$$

ここで(5.3)式は制約条件で、観測点 k における観測値 z_k とそれを含む格子の4点における推定値 $z_{i,j}$ 、 $z_{i+1,j}$ 、 $z_{i,j+1}$ 、 $z_{i+1,j+1}$ は(5.1)式の関係を満たさなければならないことを意味している。(5.2)式の最初の2項は隣り合う格子点の推定値の差の総和を、また残りの項は隣り合う格子点の差の差の総和である。(5.2)式を最小化することは、隣り合う予測地点の推定値をできるだけなめらかに含む曲面を求めていることに等しい。

6. 予測精度に関するケーススタディ

4. 及び5. で設定した推定法により、地震動特性値の推定を行った。本来、実際に観測された地震動特性値を与えて、観測値と想定値との相関について検討するのが望ましいが、本システムは運用後まだまもなく、97年5月現在作動レベルを超えるような地震動を観測していない。そこで、観測地点のうち最大地表面加速度と地表面 SI 値を想定し、想定値自身を他の箇所の想定値群から推定して精度の検討を行った。ここで、観測値点数は47地点とし、最大加速度の想定は道路橋示方書V・耐震設計編の距離減衰式、また SI 値は吉見らの距離減衰式⁹⁾によって、それぞれに2種類ずつ行った。一方は震央を伊豆 (観測網外) に設定し、マグニチュードを7とした場合、もう一方は埼玉 (観測網内) に想定し、マグニチュードを6とした場合である。推定結果を想定値との相関図として示したものが図7及び8である。図7は最大加速度、図8は SI 値の相関図で、相関係数は、それぞれ0.957・0.953及び0.907・0.947である。図7では最大加速度が大きい領域で、ばらつきが大きくなっている。これは地盤の非線形性によるものである。

7. まとめ

本文では、強震観測記録から、震後即時に地震動特性値の分布を推定する簡易な手法について紹介した。今後、実地震観測記録の蓄積を通じて、予測精度の検証・高度化を図る予定である。

参考文献

- 1) 松岡昌志、翠川三郎：国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング、第22回地震動シンポジウム、pp.23-34、1994
- 2) 岩崎敏男、龍岡文夫他：地盤の動的変形特性に関する実験的研究(Ⅱ)、土木研究所報告、第153号の2、昭和55年3月
- 3) 塩野清治他：BASICによるコンターマップⅡ応用編、共立出版、1988、
- 4) 吉見精太郎他：地震動強さ SI の距離減衰特性に関する検討、第20回地震工学研究発表会、1989

Development of Real-time Seismic Information System for M.O.C.

by

Shun-etsu ODAGIRI¹⁾, Hideki SUGITA²⁾, Masahiro KANEKO³⁾, Tomofumi NOZAKI²⁾
and Tadashi HAMADA²⁾

ABSTRACT

This paper presents a research and development of "Real-time Seismic Information Systems for Ministry of Construction (MOC)" to support the emergency responses for civil infrastructure immediately after an earthquake. Emphases are placed on information systems for earthquake ground motion detection, structural damage and ground hazard estimation, structural damage detection and high-speed data communication using seismograph network and innovative multi-media technologies.

*Key Words: Earthquake Disaster,
Real-time Information System,
Seismograph Network,
Damage Estimation,
Damage Detection*

1. INTRODUCTION

Damage on civil infrastructures such as highways and river facilities due to an earthquake does not only reduce their functions but also affects the socio-economic activities in and around the damaged area¹⁾. Therefore, besides improving seismic performance of the civil infrastructures, pre-earthquake risk management to evaluate and mitigate their damage and post-earthquake emergency responses to reduce the effects caused by the destruction must be jointly promoted.

The MOC promoted a five-year comprehensive research project to develop disaster information systems from 1987, and

compiled a "Guideline for Disaster Information Systems (Draft)²⁾" which supports sectors responsible for the civil infrastructure respond emergency situations in terms of the disaster information. Taking possible techniques of information communication and processing into account, and based on the experiences of several past large natural disasters, the guideline deals with frameworks of the disaster information systems useful for acquisition, communication and analysis of the disaster information. Although seismic information systems at MOC have been developed based on the guideline, they are required to be more sophisticated in consideration of the experiences of serious disaster caused by 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, progress of information oriented lifestyle and of recent technology innovation, such as remote sensing and multi-media technologies.

1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake was the first destructive earthquake occurred right under a highly integrated urban area in Japan. Based on the experiences, the following information systems are pointed out to be urgently required for the real-time emergency activities immediately after an earthquake.

1) Real-time earthquake detection system to

- 1) Research Coordinator for Information Technology, Planning and Administration Dept., Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Tsukuba Science City, 305 Japan
- 2) Earthquake Disaster Prevention Technology Div., Earthquake Disaster Prevention Research Center, ditto
- 3) Ground Vibration Div., ditto

- know the earthquake scale
- 2) Real-time estimation system to give an outline of civil infrastructure damage
 - 3) Earthquake disaster detection system to grasp civil infrastructure damage which spreads over wide area.
 - 4) Multi-media communication systems to transmit various kinds and a large amount of disaster information to sections and organizations concerned.

This paper introduces current state of seismic information systems at MOC, and the required real-time seismic information system for earthquake detection, damage estimation, damage detection and high-speed data communication for the emergency responses on civil infrastructure.

2. CURRENT STATE OF SEISMIC INFORMATION SYSTEMS

2.1 Communication Network for Disaster Prevention at MOC

Based on the experiences of repeated typhoons in 1940s, MOC recognized the importance to secure the communication network during a disaster, and has developed its exclusive communication network for disaster prevention. Since Niigata earthquake in 1964 in Japan when the efficiency of the exclusive communication network for disaster prevention, development of the communication network has been promoted all the more. MOC has now its nationwide communication network with 1,300 stations and 600 million channel-km of communication lines, which is the next largest network to that of Nippon Telephone and Telegram (NTT).

The communication network for disaster prevention is one of the essential parts of the earthquake disaster prevention framework at MOC. It is now being sophisticated based on the experiences of 1995 Hyogo-ken Nanbu

earthquake and the revision of the National Disaster Prevention Plan (issued by the National Disaster Prevention Board, January 1996). The efforts includes revising the communication network from analogue to digital and linking it to the seismograph network and the disaster image transmission system.

Besides the communication network for disaster prevention, the optical communication network is under construction utilizing the public space such as highways and rivers. Focusing on the multi-media oriented lifestyle in coming 21 century, it is planned to complete 300 thousands kilometers of the optical communication line until 2010. As it focuses not only on the management of public facilities in usual time but also on the use for regional disaster countermeasures, it will be an essential data communication infrastructure to develop the real-time seismic information system.

2.2 Seismic Information Systems at other Organizations

At national and regional public bodies whose emergency response organizations are designated by laws, various information systems are applied to support the response actions. After Hyogo-ken Nanbu earthquake, "real-time earthquake disaster prevention" to cope with emergency response without conflicts is discussed actively, and information systems to

Table 1 Real-time Information Systems at Other Organizations

ORGANIZATIONS	EQ DETECTION (SEISMOGRAPH etc.)	DAMAGE ESTIMATION
CUBE	ABOUT 100 IN CALIFORNIA	- ALARM
JR (JEDAS)	EACH 20-80km ALONG MAJOR RAILWAY	- ALARM - EMERGENCY STOP
TOKYO GAS (SIGNAL)	ABOUT 300 IN KANTO AREA	- LIQUEFACTION RISK - DAMAGE DISTRIBUTION
TOKYO	ABOUT 50	- CASUALTY, FIRE SPREAD - DAMAGE DISTRIBUTION
KAWASAKI CITY	ABOUT	- DITTO
YOKOHAMA CITY	ABOUT 150	- DITTO

provide the prompt estimates of the damage on the residents and the facilities are being developed and applied. Table 1 shows examples of the real-time information systems at several organizations.

3. REAL-TIME INFORMATION SYSTEM FLAMEWORK

3.1 Information required for the emergency responses on civil infrastructure

Emergency response activities that is necessary for the management of the civil infrastructures vary depending on the time period after an earthquake. Therefore, it is important to treat necessary information with

Table 2 Fundamental Policies of Restoration

RESTORATION STAGES	TIME PERIOD	FUNDAMENTAL POLICIES
1ST STAGE	EQ OCCURRENCE ~ 1 HOUR	- GRASPING OUTLINE OF DISASTER - EMERGENCY ACTION
2ND STAGE	~ 1 DAY	- GRASPING TOTAL DAMAGE STATUS - TEMPORARY REPAIR
3RD STAGE	~ 1 WEEK	- GRASPING DETAILED DAMAGE STATUS - PERMANENT REPAIR

appropriate accuracy according to the response activities. The response activities can be classified into three restoration stages and the fundamental policies in each stage can be shown in Table 2³⁾. The information required in each restoration stage are summarized as follows.

- 1) In the first stage, the bi-value information if the areas are seriously affected and if the facilities have serious damage that may cause secondary disaster
- 2) In the second stage, the damaged parts and their damage seriousness to judge the necessity of the restoration.
- 3) In the third stage, the detailed information of the facilities for the complete restoration accounting the future plans of the region.

3.2 Configuration of Real-time Seismic Information System

The entire image of the real-time seismic information system is shown in Fig. 1. The system consists of four subsystems: i.e., an earthquake detection system, a damage estimation system, a damage detection system and a high-speed communication system. Function and configuration of each subsystems are as follows.

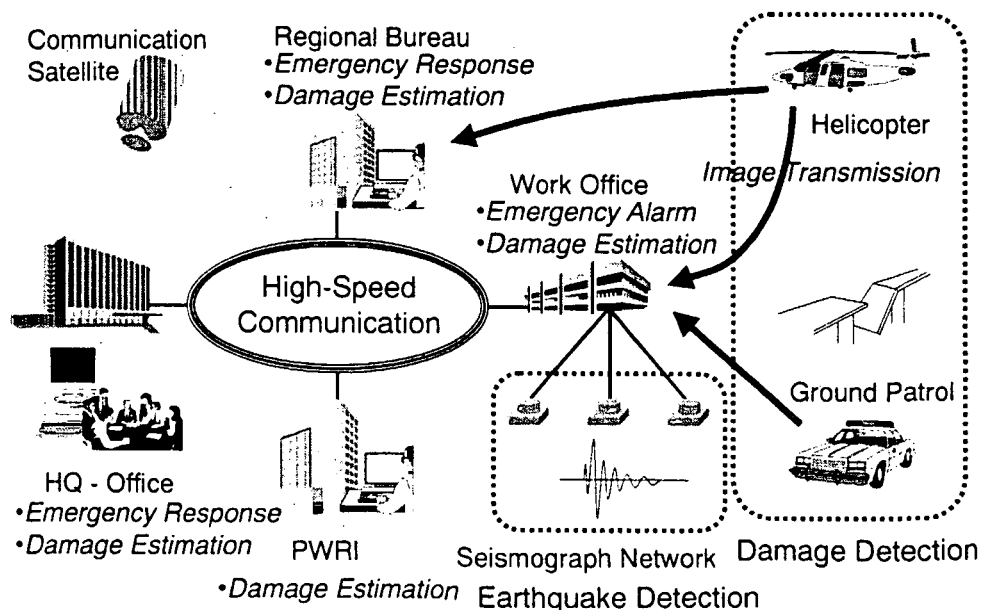


Fig.1 Real-time Seismic Information System

- 1) The earthquake detection system supports activating the emergency activities of the sectors in charge of the facilities by detecting the ground motion characteristics. The system mainly consists of the seismograph network.
- 2) The damage estimation system improves the emergency activities by roughly estimating the ground hazard and structural damage on facilities. The seismograph network and information processing devices are combined in this system.
- 3) The damage detection system improves the understanding of damage by combining images from a helicopter, images and data from the ground patrol.
- 4) The high-speed communication system transmits the data inside/ outside the organization by combining a optical communication network and innovative multi-media communication devices.

4. EARTHQUAKE DETECTION SYSTEM

It is of great importance to measure the seismic intensity at the facilities by densely placed seismographs for understanding the scale of an earthquake and possible damage on

facilities. Also, the initial activities of the sectors concerned can be improved in terms of its quickness if the seismic information can be aggregated to them instantly.

From the above point of view, MOC has started constructing a Seismograph Network in 1995. In the Seismograph Network, about 800 strong-motion seismographs are placed with the interval of 20 to 40km along highways and rivers, and their data are sent to the sectors responsible for the facilities through the communication network for disaster prevention.

Fig. 2 shows the structure of the Seismograph Network. Ground motion characteristics detected at each station is aggregated at each regional construction office, and the data array are sent to the headquarters office and also to PWRI. In order to perform rapid data transmission through the present communication lines with limited capacity, small number of data representing the ground motion characteristics, such as a maximum acceleration, a seismic intensity (SI) value and the equivalent JMA seismic intensity level are to be sent.

The Seismograph Network is a fundamental system for the real-time seismic information system. In combination with a damage estimation system described later, following advantages can be derived.

- 1) Possible areas seriously affected can be predicted based on the quantitative data such as the maximum acceleration and SI-value.
- 2) The initial response activities can be more efficient with the prioritized damage seriousness of inspection sites.

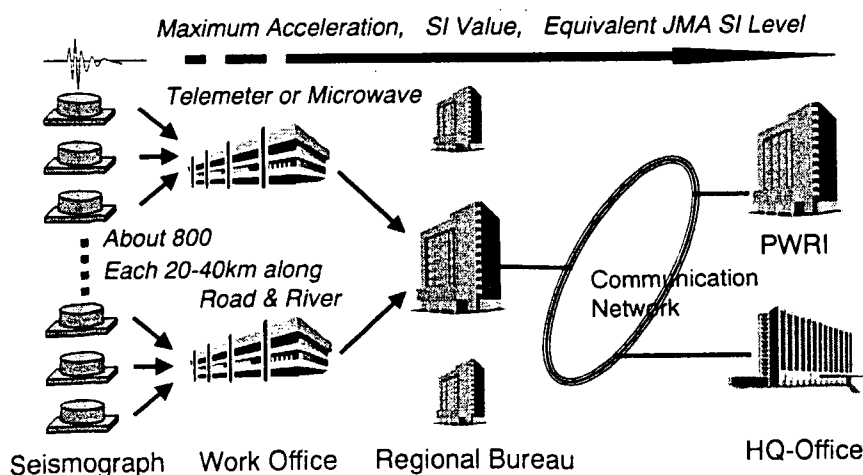


Fig.2 Structure of Seismograph Network

- 3) Support by the neighboring district without possible serious facility damage can be decided rapidly.

5. DAMAGE ESTIMATION SYSTEM

5.1 Structure of Damage Estimation System

The system can estimate possible ground hazard and possible structural damage on facilities by analyzing a large quantity of information regarding ground motion characteristics, ground conditions and structural



Photo.1 Prototype of Damage Estimation System: SATURN

conditions. This system will contribute to rationalize the initial response activities, i.e. understanding the outline of disaster and decision making on prioritized inspection area.

PWRI and Kanto Regional Construction Bureau has jointly developed a prototype system (SATURN: Seismic Assessment Tool for Urgent Response and Notification) which roughly estimates the liquefaction risk and possible damage on highway bridges using the ground motion characteristics acquired by the Seismograph Network and other databases. At this time, the prototype system can perform the estimation within 15 minutes immediately after an earthquake. As shown in Photo 1, the prototype system works in cooperation with the communication server that receives and stores the seismic information in it.

5.2 Damage Estimation Methodologies

Fig. 3 illustrates the execution flow of damage estimation by the system. The execution proceeds through three steps: i.e., estimation of ground motion characteristics at facility sites, estimation of liquefaction risk, and estimation

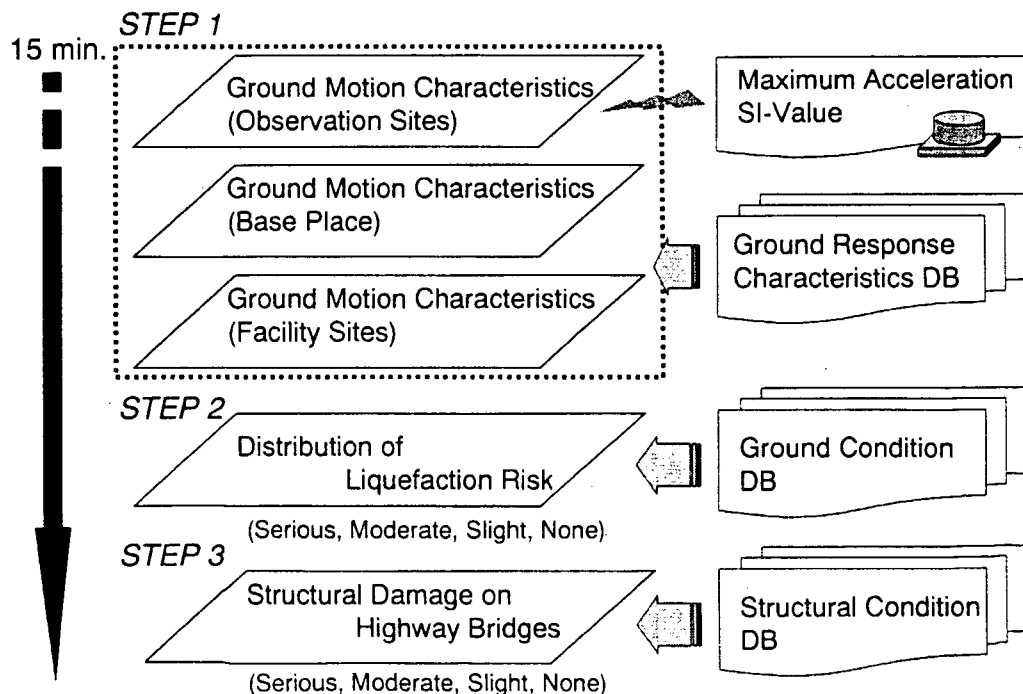


Fig.3 Flowchart of Damage Estimation

of the structural damage on highway bridges. Basic concepts of each steps are as follows.

(1) Ground Motion Characteristics at Facility Sites

Ground motion characteristics such as a maximum acceleration and a SI-value at a certain point can be estimated by interpolating them monitored at plural seismograph stations surrounding the point as shown in Fig 4. To avoid topographical influences on the estimation, ground motion characteristics are interpolated not at the ground surface but at the base place. Although the ground response characteristics must be known to estimate the ground motion characteristics at base place, immediately after an earthquake, it is quite difficult to calculate the response characteristics by the one-dimensional wave propagation method for all the points. Therefore ground response characteristics at station/ facility sites are calculated in advance and are stored in a database. It realizes the rapid information processing right after an earthquake.

(2) Distribution of Liquefaction Risk

The estimation of the liquefaction risk in the affected area is carried out by combining two kinds of estimation, i.e. estimation on a line along highway facilities, and estimation on areas besides highway

facilities. Estimation along highway facilities can be carried out with sufficient ground condition data by calculating the “resistance values against liquefaction: F_L ” and the “liquefaction index: P_L ” regulated in the [Specifications for Highway Bridges] revised in 1996. Estimation on areas besides highway facilities is performed by a simplified method based on the topographical micro-zoning due to the insufficiency of ground condition data.

Fig. 5 shows a example of the distribution

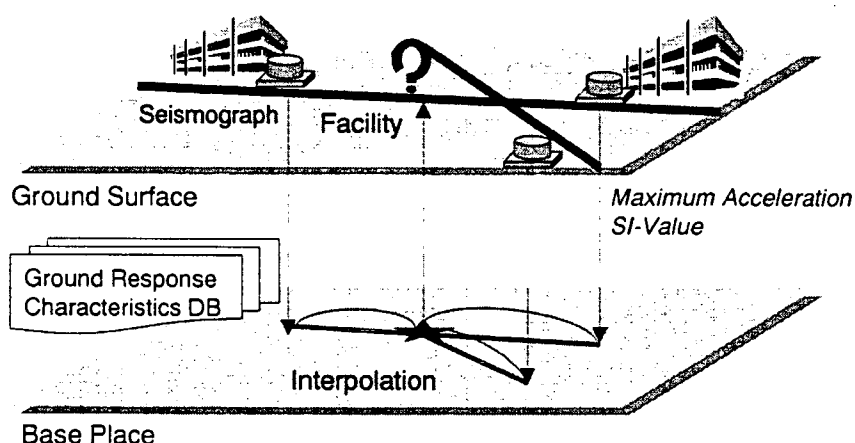


Fig.4 Estimation of Ground Motion Characteristics at Facility Site

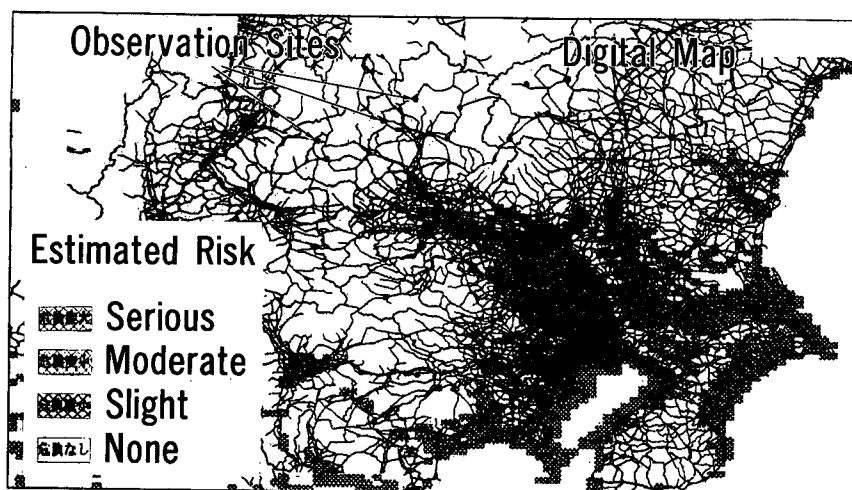


Fig.5 Estimated Liquefaction Risk distribution

of liquefaction risk. The liquefaction risk is displayed in four simplified categories of "serious, moderate, slight and no risk" as it is referred in an emergency situation immediately after the earthquake.

(3) Structural Damage on Highway Bridges

It is general to apply the response analysis

methodology with mathematical models to know the behavior of highway bridges during an earthquake. However, it is difficult to complete the calculation by the general methodology urgently after an earthquake. Also at present, the information of the structure condition is not sufficiently prepared for the computation.

From the emergency response's point of

view, the most important task is to know if each bridge is passable or not. Therefore, rough estimation on serious damage of bridges gives a effective information to decide the emergency inspection strategies. Fig. 6 shows an example of estimated structural damage in the affected area. Estimated damage is displayed in four simplified categories of "serious, moderate, slight and no damage".

The structural damage possibility of bridges is estimated by combining damage possibilities of bridge parts, such as columns, foundations and bearings. Damage possibilities of bridge parts are estimated by comparing their strength and ground motion characteristics such as maximum acceleration and SI-value. Here, the relationship between ground motion characteristics and occurrence of damage must be statistically studied in advance based on damage cases due to past

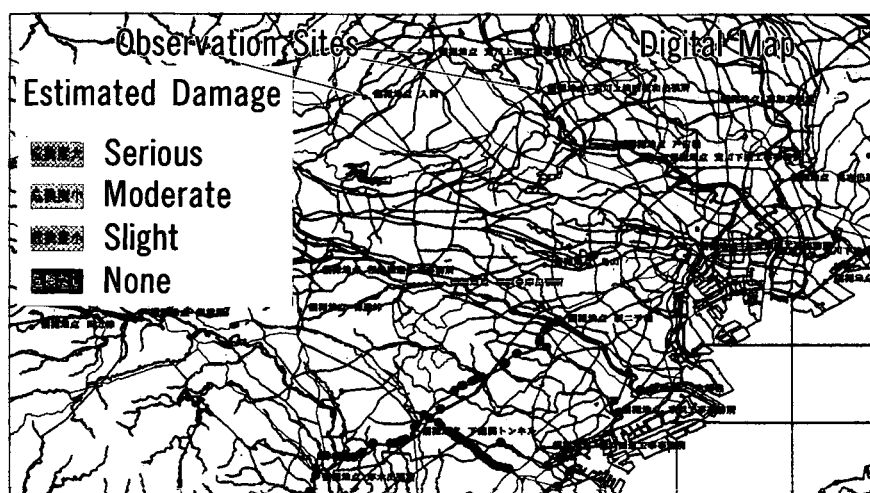


Fig.6 Estimated Structural Damage on Highway Bridges

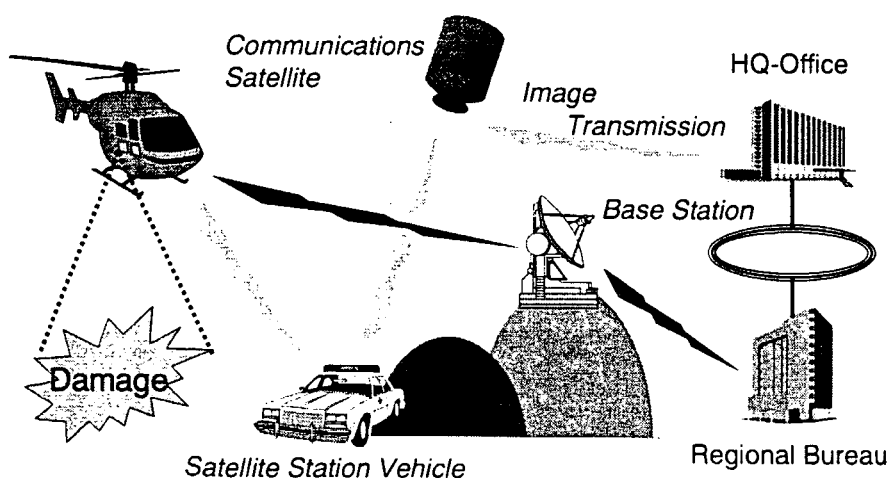


Fig.7 Helicopter Image Transmission System

earthquakes.

6. DAMAGE DETECTION SYSTEM

6.1 Remote Sensing by Image from Helicopter

Inspection by a helicopter from the air is quite efficient in terms of the damage detection after an earthquake⁴⁾ because it is not affected by the damage on the road or traffic congestion, and because it can collect the information of wide area in a short time. Also, visual images such as those taken by a video camera can provide desirable information in a short time. The structure of the helicopter image transmission system is shown in Fig. 7.

There are three helicopters administrated by MOC which are disposed at Tokyo, Osaka and Fukuoka. Among them, two of them are introduced after the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. They are equipped with various sophisticated information devices. Those include a video camera, a thermal image sensor, a GPS device to determine the position of the helicopter and other communication devices. Also the relay stations and the relay lines for the digital signals from helicopters are being improved.

It should be noted that the proper combination of flight rules of a helicopter and rules of taking images are important. For instance, overall images of the affected area and distribution of seriously damaged facilities, which are required on the first stage of restoration, are inspected by taking the images of panoramic view with much height in the sky. On the second stage, information for the emergency restoration such as damage on columns and cracks on embankments can be obtained by flying along the facilities with large magnification. An example image of a highway bridge taken from a helicopter is shown in Photo. 2.

6.2 Damage Detection by Ground Patrol

Although it takes time to reach the damaged site, the ground patrol can collect more detailed damage information than that by from the air. An efficient way of information collection is to combine the inspection from the

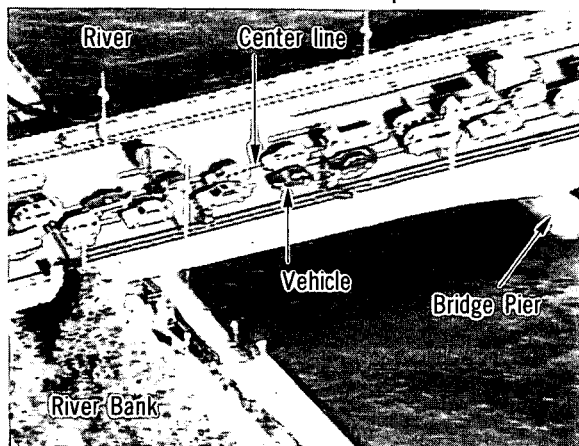


Photo. 2 Image of Highway Bridge Taken From Helicopter



Photo.3 Satellite Communication Vehicle

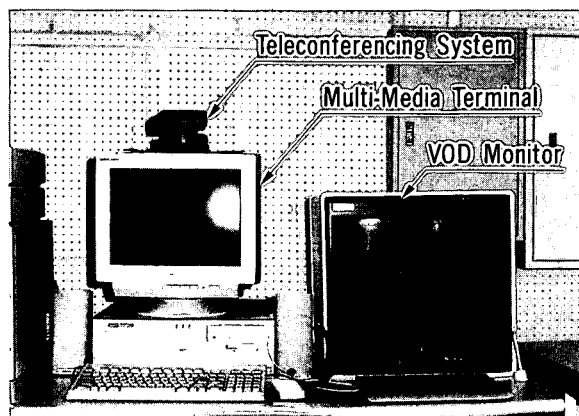


Photo.4 Prototype System for Damage Analysis
based on Visual Image

air and that by the ground patrol. For instance, after grasping damage distribution from the air, detailed damage conditions can be inspected smoothly by the ground patrol.

The detected information can be transmitted through a communications satellite by dispatching a satellite communications vehicle or by assembling the small relay station at the site. The transmitted image can be referred at plural sectors and it is easy to hold the information in common among the sectors. In addition, the cellular system exclusive for MOC (K-COSMOS) is being constructed to transmit the information of a handy computer terminal and a digital camera

6.3 Damage Analysis Based on Visual Images

Visual images collected in a damaged area are aggregated at the headquarters office through the communication network for disaster prevention. In the headquarters, therefore, an information system which enables to classify and store a large amount of data systematically and enables to analyze damage conditions promptly is essential. Photo. 4 shows a prototype system for damage analysis based on visual images. Using the system, adding up of damage and remote judging of damage seriousness can be carried out based on visual images.

(1) Adding up of Damage based on Helicopter Images

Based on the transmitted image shown in a VOD monitor, discerning and adding up damage conditions can be carried out by operating engineering workstation. Procedures are as follows.

- 1) Discerning damage conditions- posing, rewinding and slowly playing of image are available using VOD (video on demand) function of the system.

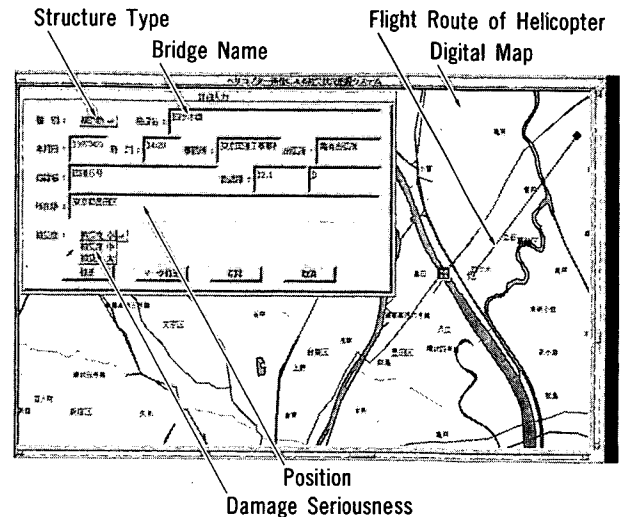


Fig.8 Adding Up Damage Conditions

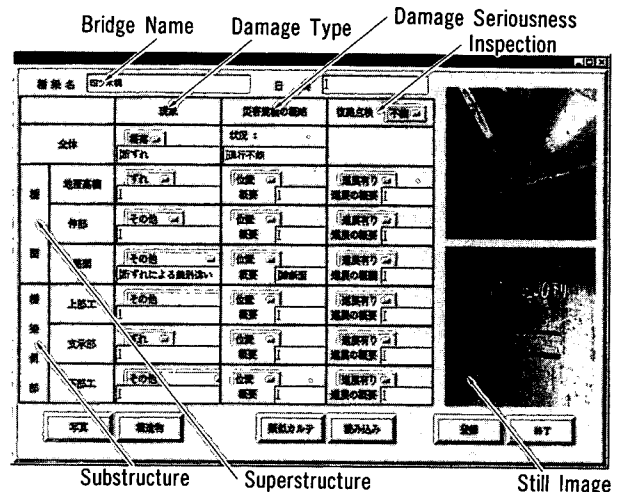


Fig.9 Remote Judging of Detailed Damage Conditions of a Highway Bridge

- 2) Marking damaged sites on a digital map- this operation is possible by referring the position of the helicopter displayed on the map automatically.
- 3) Typing structure type, structure name and damage seriousness in a worksheet on the display- attributes of the facility from the database is displayed on the worksheet automatically by cricking the proper position.
- 4) After completing the inputs of damage information, a damage record map and a table of the damaged sites are created and stored automatically by the system; the created data can be commonly referred by the sectors concerned.

Fig. 8 shows an image to adding up damage

conditions using the system.

(2) Remote Judging of Damage Seriousness based on Visual Image from Surface

Detailed damage records can be created by experts for each facility based on the detected information such as digital camera images and video images by the ground patrol. Based on the detailed damage information which can be referred commonly by the work office, PWRI and other supporting sectors through the disaster prevention communication network, the detailed damage record is created by plural sectors jointly through the TV conference. Fig 9 shows an example of the detailed damage record of a highway bridge.

To judge the damage seriousness of remote sites efficiently, it is desirable to apply the information regarding the ground condition and the structure condition by constructing their database during the usual situation and by linking them to the image data in the emergency situation.

7. HIGH-SPEED COMMUNICATION NETWORK USING MULTI-MEDIA TECHNOLOGIES

7.1 Fundamental Requirements for High-Speed Communication Network

As a major part of the real-time seismic information system, communication network for the disaster prevention is required to be sophisticated by applying innovative multi-media technologies. For activating above described information systems on earthquake detection, damage estimation and damage detection, issues to be required are as follows.

- 1) Transmission Capability- transmission of various media (numerical data, character data, voice data, still and animating image data) with required preciseness and speed
- 2) Common Utility- cooperative work (processing, exchanging and reference of data) by several sectors connected to the network
- 3) Seismic Safety- communication lines, devices and network redundancy

7.2 Experimental Study on High-speed Communication Network

As a high-speed communication network which satisfy several issues described above, communication system with Asynchronous Transfer Mode (ATM) was selected. And its possibility to the emergency response activities was studied through experiments. The structure of the high-speed communication network for the experiment is shown in Fig 10.

PWRI, Tokyo National Highway Work Office and Japan Construction Information Center (JACIC) were connected each other by the optical fiber cable. These three organizations were designated respectively as a supporting sector at remote site, a sector responsible for restoration activities and a headquarters office responsible for decision making. Different kinds of information devices were located in these three organizations corresponding to their roles. Devices are the VOD server to store and provide images, the database server to provide mapping/ structural data and the application server for the damage detection/ analyzing system.

Regarding the efficiency of high-speed communication network to the damage detection, following points were derived.

- 1) Helicopter images can be transmitted instantly to the HQ Office and the supporting sector. The most recent digital image compressing technology reduces the fail of the quality and enables discerning and aggregating damage information.
- 2) Judging damage seriousness at remote site can be realized with sufficient preciseness. However, the data transmission speed from

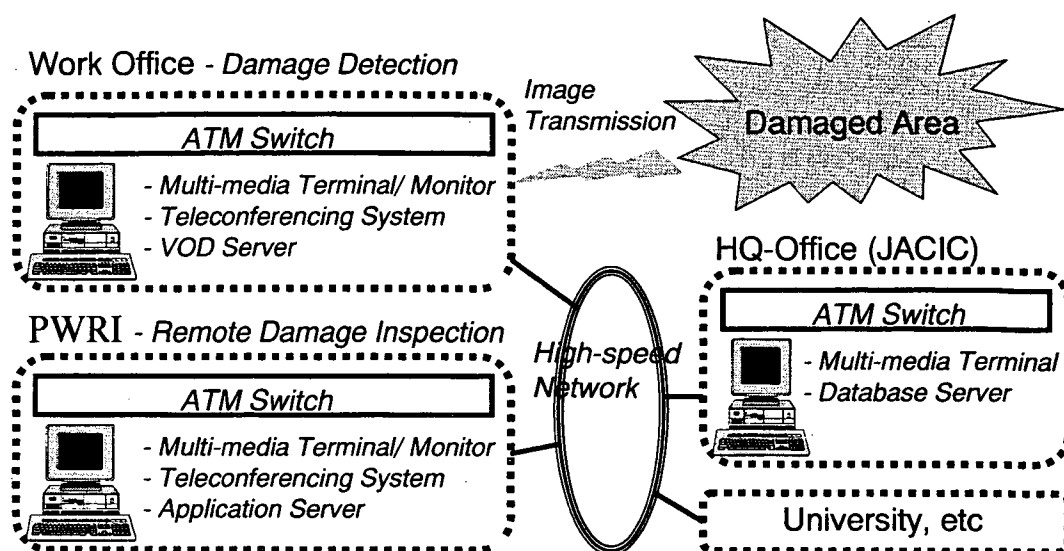


Fig.10 Experimental High-speed Communication Network

database servers and the workability of application shall be improved for smooth execution of cooperative works such as creating the detailed damage records.

8. CONCLUSIONS

Research and development of "Real-time Seismic Information System" was introduced focusing on a earthquake detection, damage estimation, damage detection and high-speed communication. By improving emergency response activities for civil infrastructures immediately after an earthquake, earthquake effects in and around the damaged area caused by structural destruction is anticipated to be much reduced.

For minimizing earthquake effects, pre-earthquake risk management and post-earthquake emergency response must be jointly promoted. Therefore, further study on "Comprehensive Seismic Information System" is required to be made for the pre-earthquake risk management including earthquake loss estimation methodologies and loss reduction strategies.

REFERENCES

- 1) K. KAWASHIMA, H. SUGITA and T. KANO: Estimation of Earthquake Induced Economic Damage, Report of Public Works Research Institute, Vol. 186, December 1991
- 2) Public Works Research Institute, MOC: Guideline of Disaster Information System for Civil Infrastructures, Technical Note of Public Works Research Institute, Vol. 58, March 1992
- 3) Public Works Research Institute, MOC: Manual For Repair Methods of Civil Engineering Structures Damaged by Earthquakes, Technical Note of Public Works Research Institute, Vol. 45, December 1986
- 4) K. KAWASHIMA, H. SUGITA, T. KANO, T. NAKAJIMA, S. UNJOH and H. IIDA: Development of Surveying Systems for Detecting Seismic Damage Using Helicopters, Report of Public Works Research Institute, Vol. 192, January 1994

ASSESSMENT, REPAIR AND REHABILITATION OF LIFELINES

- Highway, Sewage Pipeline and Common Utility Duct -

by

Koichi Yokoyama

Public Works Research Institute, Ministry of Construction

Tsukuba Science City, Ibaraki, 305 Japan

Abstract

Lifelines are one of the most important component in the urban area for supporting social/ economical activities during/ after an earthquake. Direct damage developed on lifelines would effect on not only regional living environment but also nationwide social/ economical activities. Highway facilities, sewage pipelines and common utility ducts which are administrated by Ministry of Construction are defined as lifelines in this manuscript.

In Japan and U.S., lifelines suffered direct/ indirect damage by recent major earthquakes such as 1983 Nihon-kai Chubu Earthquake, 1993 Kushiro-oki Earthquake, 1989 Loma Prieta Earthquake and 1994 Northridge Earthquake. Continuous efforts for upgrading the durability of lifelines have been conducted in both countries.

Especially in Japan, based on the catastrophic disaster caused by 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, seismic design standards for most urban facilities initiated to be revised and newly developed to improve the seismic performance. There are requirements for lifelines, as the important component in the urban area, to make technological/ political efforts on design standard, assessment and strengthening.

The U.S.-Japan partnership should conduct cooperative research activities on following subjects;

- (1) Earthquake ground motion for seismic engineering
- (2) Seismic design standards of lifelines
- (3) Seismic assessment and strengthening of lifelines
- (4) Disaster information systems for emergency response

Cooperative research activities on disaster prevention technologies for lifelines have been conducted under the auspices of the U.S.-Japan Joint Panel on Wind and Seismic Effects. Activities on these 4 subjects would be mainly conducted by above mentioned organization.

I. Topic Description and Policy Issues

Lifelines suffered damage by recent major earthquakes in Japan. 1983 Nihon-kai Chubu

Earthquake caused severe damage on sewerage pipelines. Interruption of highway networks developed by 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake caused difficulty of evacuation/ restoration in regional scale, and caused indirect damage of social/ economical activities in nationwide scale.

Lifelines are one of the most important component in the urban area for supporting social/ economical activities. Direct damage developed on lifelines would affect not only regional living environment but also nationwide social/ economical activities. Experiences in recent earthquakes show of great importance to maintain lifelines be functional during/ after earthquakes for minimizing earthquake losses.

Based on the catastrophic disaster caused by Hyogo-ken Nanbu Earthquake, reduction of vulnerability is urgently required on most facilities in the urban area. This would be achieved by upgrading seismic safety of facilities themselves and upgrading their emergency management. As one of the most important component in the urban facilities, technological and political efforts would be urgently required on lifelines.

Also in the U.S., continuous efforts for reduction of vulnerability have been conducted on lifelines based on the recent disaster caused by 1989 Loma Prieta Earthquake and 1994 Northridge Earthquake. To achieve the requirements efficiently and economically in both countries, collaborative activities would be effective on the following subjects.

- (1) Reduction of direct damage on lifelines is important for the reduction of vulnerability in the urban area. This requires technological research efforts on the earthquake ground motion for seismic engineering, seismic design standards and seismic assessment/ strengthening.
- (2) Reduction of indirect effects on social/ economical activities developed by direct damage on lifelines is important. This requires technological research efforts for administrators' emergency management on lifeline networks, such as upgrading of disaster information systems.
- (3) Accomplishments of above mentioned research efforts should be reflected on the regional planning and administrators' practices. This requires political encouragement including public policies, mechanisms and incentives to the private and public organizations.

II. Background

The technological/ political background on each research issues are as follows;

- (1) Earthquake ground motion for seismic engineering

The seismic design, which was for the first time implemented into the regulation of the design of highway bridges in 1926 after 1923 Kanto Earthquake ($M_J=7.9$), has been revised

many times based on research results of the seismic engineering and the investigation of damage caused by earthquakes.

The seismic coefficient kh , which was not defined specifically in 1926, was set $kh=0.2$ in 1939 and, in 1956, it was set within the range of 0.1 - 0.35 depending on the regions and ground conditions. It should be noted that between 1939 and 1956, several huge earthquakes such as 1942 Nankai Earthquake ($M_J=8.1$) and 1948 Fukui Earthquake ($M_J=7.1$) developed destructive damage. The investigation of severe damage caused by 1964 Niigata Earthquake ($M_J=7.5$) was taken into consideration, when, in 1971, the seismic coefficient was set $kh=0.05 - 0.3$ depending on the natural period of the structures, etc. Reinforced concrete bridges seriously damaged in 1978 Miyagiken-oki Earthquake ($M_J=7.5$) triggered various changes in the seismic design of the bridges and the seismic coefficient was raised to $kh=0.1 - 0.3$ in 1980. In the revision of the specifications in 1990, the check of ultimate strength of RC piers during earthquakes was adopted. In that check, the seismic coefficient was assumed $kh=0.7 - 1.0$.

1995 Hyogoken-nanbu Earthquake caused unprecedented damage to various structures. And now the drastic change in seismic design is expected, in which the seismic coefficient as high as 2.0 for the check of ultimate strength is employed as the seismic design force considering the near-field huge earthquake.

So far, the seismic design load for the highway bridge was briefly reviewed as the typical example of the lifelines. The underground structures, however, is also important as the lifelines and the seismic design force for them is also quite high. The ground motion considered in their seismic design, reaches 0.4g in peak horizontal acceleration.

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

(2) Seismic design standards of lifelines

1) Highway bridges

Some highway bridges suffered serious damage by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Many reinforced concrete columns suffered damage in shear at the terminated points of main reinforcement at the mid-height. They were designed by the pre-1980 design specifications. The anchorage length of main reinforcement at terminated points was inadequate at those days. Local buckling of web and flange plates progressed to result in rupture of welding at corners in rectangular steel columns.

Research subjects were pointed out to be conducted, such as evaluation of dynamic strength and ductility for structural members, application of dynamic response analysis, development of bearing systems which behave as a major segment of whole bridge, development of new devices to prevent falling-down, re-evaluation of a seat length, effects of liquefaction and lateral spreading on whole bridges, and evaluation of seismic safety of whole bridges.

For highway bridges, revision of seismic design specification is now conducting. In addition to the Seismic Coefficient Method, checking method of dynamic strength and ductility will be introduced for reinforced columns, steel columns and foundations so that seismic safety of whole bridges be increased.

2) Application of innovative technologies

For the reduction of seismic response, efforts have been made on the seismic isolation, active control and hybrid control technologies.

The high damping rubber bearing was developed for the seismic isolation design. The Menshin design method considering effects of the damping augmentation and the distribution of the lateral force of the superstructure was developed and it was compiled as the "Manual for Menshin Design of Highway Bridges (Draft)(1992)".

The R&D on the hybrid control technology which combined Menshin Design and active control design has been also conducted. The variable damper was developed as one of the hybrid control devices. The damping characteristics of the variable damper is variable depending on the seismic response of structures.

The R&D on intelligent seismic structures using new intelligent materials such as self-diagnosis-materials and self-repairable-materials has been conducted. The objectives are to develop the structure which has the function to correctly judge the damage and which is easy to repair.

(3) Seismic assessment and strengthening of lifelines

1) Highway bridges

Experiences in recent earthquakes show of great importance to increase the seismic strength and ductility of highway bridge system which is fabricated by superstructure and substructure. The seismic design concept should be introduced to the seismic retrofitting of existing highway bridges.

For enhancing the flexural strength and ductility of reinforced concrete columns, a reinforced concrete jacketing and a steel jacketing are effective. Research efforts have

been conducted on evaluating the flexural strength and ductility of retrofitted columns through loading tests. Application of a carbon fiber sheet has been also examined.

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

2) Underground utilities

In the 1993 Kushiro-oki Earthquake and 1994 Hokkaido Toho-oki Earthquake, sewage pipelines suffered severe damage by the liquefaction of backfilled and original soils. Manholes floated about 1.5m up to the ground surface and pipes distorted vertically and horizontally in the liquefied soils. These experiences show that liquefaction-induced damage could be catastrophic and is quite difficult to find and recover.

Common utility ducts are one of the most important utilities in the urban area, in which most supply systems are integrated. Nationwide-scale seismic assessment of existing common utility ducts have been conducted in 1991. The screening survey identified the sections considered vulnerable against liquefaction-induced damage. It has been followed by in-depth survey and strengthening planning.

Disaster caused by 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake lead public works related organization to increase the seismic performance level of most lifelines. However damage mechanisms, assessment and reinforcement techniques for underground utilities have been studied supposing moderate earthquake, much remains to be studied against more intense earthquake. Public sectors' commitment to improve seismic performance of underground utilities strongly depend on the development of practical/ economical technologies required to implement. The government organizations should conduct research efforts on identifying lifeline categories that require strengthening, providing assessment/ strengthening technologies against liquefaction, and providing cost-performance/ feasibility evaluation technology.

(4) Disaster information systems for emergency response

Reduction of direct and indirect earthquake effects requires that existing lifelines be functional following an earthquake. This requires both minimizing damage and planning/ implementing practices for localizing effects of damage on network performance.

Road facility is one of the most sensitive lifeline to the spread of indirect effects because damage on road facilities could directly cause the delay of evacuation, emergency response and social/ economical restoration. For the reduction of indirect effects in both regional and nationwide scale, upgrading of the road network performance is urgently required.

Experiences in recent earthquakes show the efficiency to develop/ implement disaster information systems for supporting administrators' road network management. These systems can realize appropriate risk assessment/ strengthening strategy as a pre-earthquake network management, expeditious damage detection/ restoration strategy as a post-earthquake network management.

Development/ implement of innovative information technologies represented by GIS and GPS are rapidly progressing in various industries. For upgrading road administrators' network management, technological research efforts should be conducted to apply the technologies to the disaster information systems.

III. Proposal

The U.S.-Japan Earthquake Disaster Mitigation Partnership provides an extraordinary opportunity to reduce both countries' vulnerability to catastrophic earthquake disaster. Moreover, by coordinating research efforts and continuing to learn together from earthquake experiences, Japan and the U.S. develop the required technologies and practices expeditiously and economically.

Cooperative research activities on the following four subjects are important for seismic assessment, repair and rehabilitation of lifelines.

- (1) Earthquake ground motion for seismic engineering
 - 1) Cooperative research with other technical fields such as seismology and geology
 - 2) Research based on large-size experiments
- (2) Seismic design standards of lifelines
 - 1) Seismic design of highway bridges
 - 2) Application of innovative technologies
- (3) Seismic assessment and strengthening of lifelines
 - 1) Retrofitting of highway bridges
 - 2) Countermeasure against soil liquefaction for underground utilities
- (4) Disaster information systems for emergency response
 - 1) Information systems for pre/ post earthquake road network management
 - 2) application of innovative information technologies

IV. Cooperative Mechanisms

Cooperative research activities on disaster prevention technologies for lifelines have been conducted under the auspices of the U.S.-Japan Joint Panel on Wind and Seismic Effects (WSE), and U.S.-Japan Cooperation in Research and Development in Science and Technology. Fundamental technologies required by both countries have been developed

effectively through professionally classified task committees established in WSE.

Four research activities proposed in this manuscript can be addressed by collaborative efforts of WSE. Enhanced implementation of cooperative research projects and personnel exchange based on public policies will strengthen these collaborations.

平成 8 年度防災技術課調査研究成果
概要報告書

ISSN 0386-5878
土研資料 第3509号
平成 9 年 6 月 (1997)

防災技術課 課長 杉田 秀樹
主任研究員 金子 正洋
主任研究員 野崎 智文
研究員 遠藤 和重
管理係長 田島 明
研究員 濱田 禎

要 旨

平成 8 年度に防災技術課が実施した調査研究の成果をまとめたものである。防災投資の効果, 被災予測, 総合防災システム, 地盤の地震動特性に関する調査研究成果のほか, 付属資料として学会等での口頭発表論文を含んでいる。

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

郵便はがき

3 0 5 - □ □

五十円切手
をはって下
さい。

建設省土木研究所

防災技術課 行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先住所

配布先氏名

土木研究所資料 第 3 5 0 9 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印