

地震時被害推定機能の開発

保全施設部 保全企画課 加賀山 泰 一
工務部付 澤 登 善 誠
京都建設事務所 桃山工事事務所 奥 西 史 伸

.....

要 旨

阪神高速道路公団では、1995年に発生した兵庫県南部地震以後、地震発生直後の構造物点検や応急対策のための初動体制の重要性が指摘されてきた。そこで、現在設置または今後設置が予定されている地震計の観測記録をもとに、地震発生直後の各路線の被害状況がリアルタイムに推定可能である地震時被害推定機能の開発を行った。

本機能は、これまで実施してきたRC橋脚の耐震補強データと過去の地震観測データをもとに、任意の地震に対する構造物の被害程度を推定するシステムと、各観測地点で得られた地震波形から各路線の評価地点における地震強度を推定するシステムの大きく2つのサブシステムから構成される。本稿は、これらのシステムの概要について述べるものである。

キーワード：地震，被害推定，リアルタイム，地震防災

はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、地震直後の被害情報の収集が非常に困難な状況にあり、必ずしも復旧活動が思うようになされたとは言えない。また、阪神高速道路網は関西圏の中核をなす重要幹線道路であり、地震時においても可能な限り早期の路線開放が要求される。

一方、こうした地震直後の被災状況に関する情報を提供するリアルタイム地震防災機能は、建設省や各地方自治体、その他ライフライン事業者においても順次開発されているところである。

当公団においても、地震直後の緊急点検等の初動体制を支援し、初期行動の効率化を図ることを目的として、リアルタイムに構造物被害の概略を把握する地震時被害推定機能の開発を行ったので、その概要を報告する。

1. 地震時被害推定機能の概要

本機能の大きな流れについて図-1に示す。地震計ネットワークで検知された地震観測記録は、地震発生後即座に総合防災センターに転送される。

その記録を、後述する評価ゾーンごとの代表地点に対して補間を行い、耐震補強後のコンクリート橋脚の応答塑性率をもとに、被害ランクごとに定めた地震強度指標値と比較することで、ゾーンごとの被害推定を行う。本被害推定機能は、地震発生直後の初動体制の支援を目的としていることから、各路線を数km～数十km(各路線2～3分割)程度の大まかなゾーンに分割し、各ゾーンごとの被害状況を5段階に分けて推定することとしている。

なお、各路線のゾーン分けに際しては活断層位置、地盤特性についても考慮した。

- 本被害推定機能は、
- A) 任意の地震強度から建造物の被害推定を行うサブシステム
 - B) 地震観測点における観測地震強度から、被害推定評価点での地震強度を推定するサブシステム

の、大きく2つのサブシステムから構成されており、本論文ではこれら2つのサブシステムの概要について報告する。

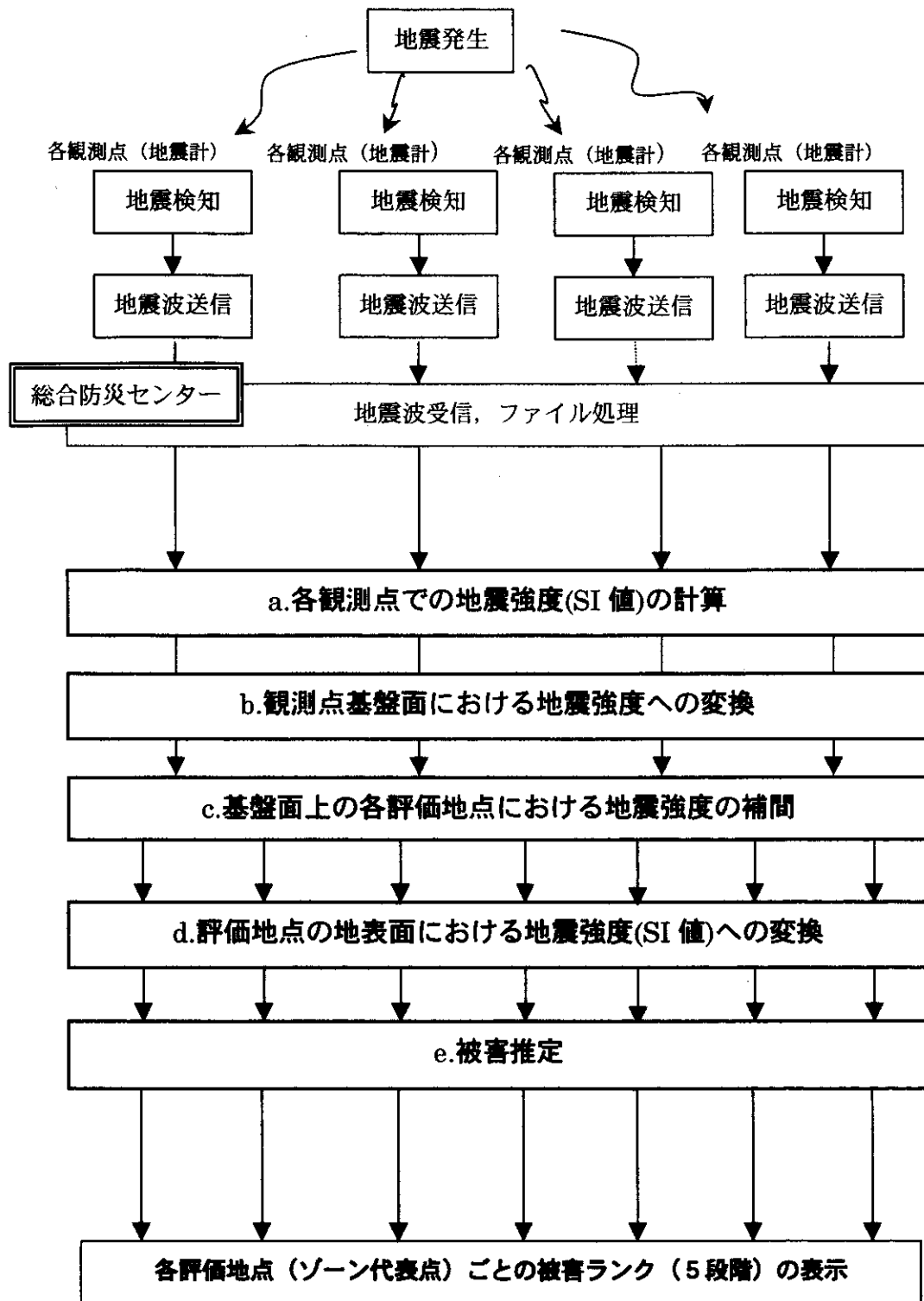


図-1 被害推定機能の概要

2. 構造物（橋脚）の被害推定

阪神高速道路公団においては、路線のほとんどが高架橋であり、またその80%以上の橋脚がコンクリート構造物である。そこで、コンクリート橋脚の設計諸元について整理したデータベースをもとに、あらかじめ多数の地震動に対する地震応答解析を実施しておくことにより、地震強度とコンクリート橋脚の損傷程度の間関係を解析的に求めるものとした。

2-1 地震波データベース

本サブシステムの構築にあたっては、想定される多数の地震動に対して検討しておく必要があり、既往の観測記録より32波収集した。さらにこれらの地震波を基準として0.5、1.5、2.0倍に振幅調整を施した地震波を用意し、計 $32 \times 4 = 128$ 波について検討を行うものとした。

2-2 橋脚データベース

橋脚データベースとして、当公団において実施されたRC橋脚の耐震補強後の設計諸元データ（総数1425基分）を用いた。図-2(a)、(b)にそれぞれ固有周期と降伏震度($k_{hy} = Pa/W$)の頻度分布を示す。固有周期は $T = 0.69$ secを中心に、0.2~1.2 secの間に97%もの橋脚が分布しているのがわかる。

2-3 応答解析

本サブシステムの構築にあたり、128波のそれぞれの地震波に対する、1425基分の橋脚個々の応答塑性率をあらかじめ求めておく必要がある。しかし、すべてに対して非線形時刻歴応答解析を実施するには膨大な計算時間を要し非合理的であることから、所要降伏震度スペクトルを用いて構造物の応答塑性率を推定することとした。所要降伏震度スペクトルは、一自由度系の非線形時刻歴解析に基づくもので、構造物の降伏震度と固有周期から応答塑性率を比較的精度よく推定することが可能である。

したがって、事前に128波の各地震波形に対する所要降伏震度スペクトルを計算しておくことで、直ちに橋脚の応答塑性率が得られることが可

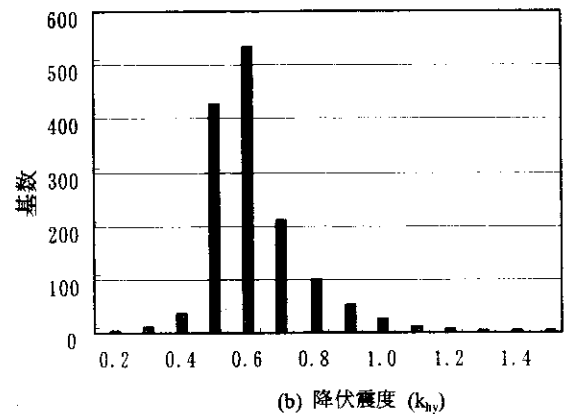
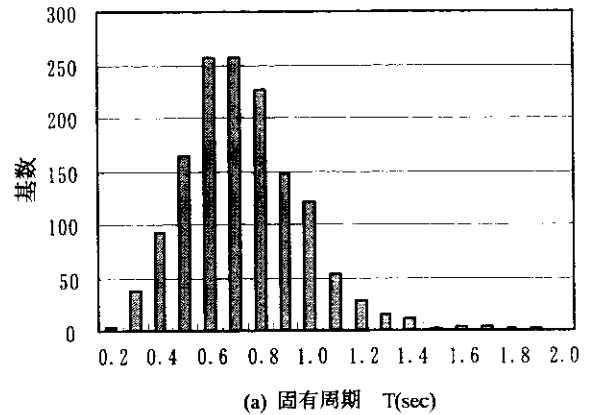


図-2 橋脚データベース諸元の例

能となる。

2-4 地震強度指標

構造物の損傷と相関のある地震強度指標については様々な提案があり、代表的なものとして、最大加速度、最大速度、スペクトル強度(SI値)、最大応答加速度等がある。ここでは、地震波データベースで用意した各地震波に対する地震強度指標（最大加速度、最大速度、SI値、最大応答加速度等）を事前に整理し、その結果と前項で求めた各橋脚の応答塑性率との相関について検討を行うことで、最も相関の高い地震強度指標を選定する。

図-3に地震強度と応答塑性率の関係を2次放物線で近似した結果の一例を示す。グラフ上の各点は、128波の地震波に対する橋脚1425基分の応答塑性率の平均値を示している。

表-1は各地震強度指標と橋脚の応答塑性率との相関について示しており、ここで、SI値が最も応答塑性率との相関が高いことがわかる。

SI値は、一般的な構造物の固有周期が

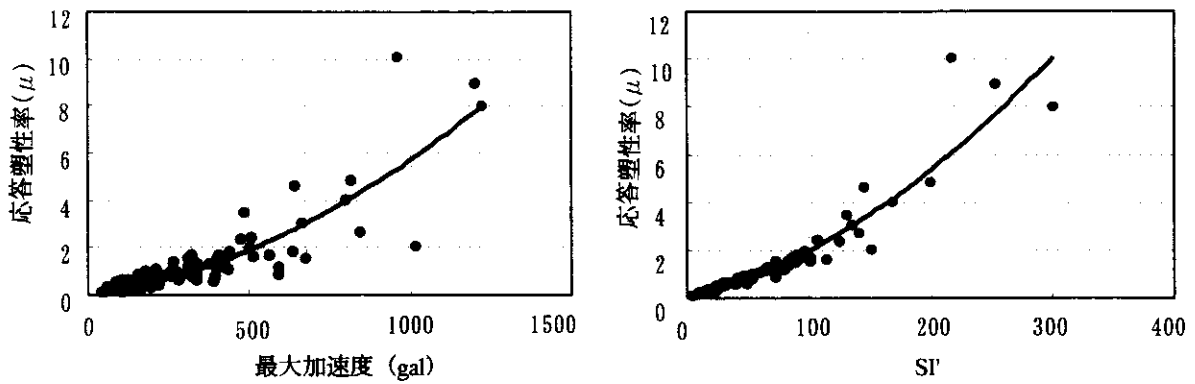


図-3 地震強度の指標と応答塑性率の関係例

表-1 地震強度指標と応答塑性率の相関

	最大加速度	最大速度	最大応答加速度	SI	SI'
変動係数	0.53	0.56	0.61	0.31	0.19

0.1~2.5 sec の間にあるとして、次式で与えられる。

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, h) dT$$

S_v : 速度スペクトル

T : 橋脚の固有周期

h : 橋脚の減衰定数 (0.05)

ここで、公団の橋脚に着目すると、図-2 に示したように、固有周期が0.2~1.2 sec の間に集中していることから、次式によるスペクトル強度をSI'値として新たに定義することで、応答塑性率との相関をより高くしている。

$$SI' = \int_{0.2}^{1.2} S_v(T, h) dT$$

2-5 地震強度と損傷度評価法

本節では、橋脚の応答塑性率と最も相関が高いスペクトル強度SI'値と具体的な被害程度との関連付けについて検討する。

一般的なRC橋脚の場合、応答塑性率と損傷状況は図-4 のようになるかとされている。そこで、同図をもとに、被害ランクと応答塑性率を表-2 のように関連付け、さらに下記の(1)、(2)の段階を踏まえて応答塑性率とスペクトル強度SI'値との関係の定義付けを行った。

- (1) ある地震波形に対し、1425基の橋脚のうち、損傷を受ける基数を各被害ランク(A

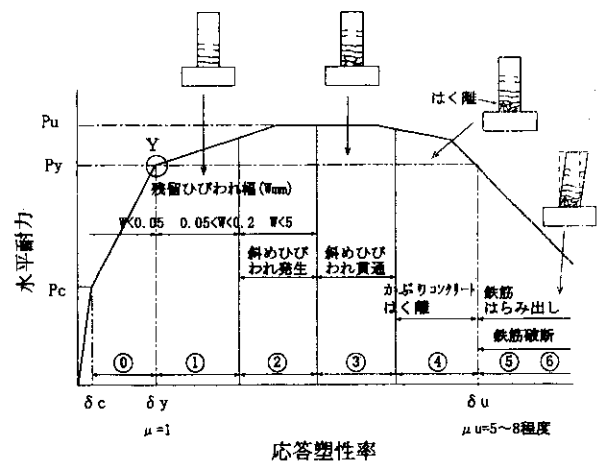


図-4 RC橋脚の応答塑性率と損傷状況の関係

表-2 被害ランクと応答塑性率(μ)の関係

被害ランク	損傷状況	判定基準
E	無被害	
D	伸縮装置、支承等の一部が損傷する可能性あり	応答加速度 Acc > 300 gal
C	構造物の損傷中	$\mu > 1.0$
B	構造物の損傷大(要補修)	$\mu > 2.0$
A	構造物の損傷大(要補修・補強)	$\mu > \mu_u$

～E)ごとに集計し、その地震波形のSI'値に対応する各被害ランク別の損傷発生確率を求める。

(2) 同様に128波分のSI'値に対する被害ランク(A～E)における損傷発生確率を求め、スペクトル強度SI'値と被害ランクとの関係について評価する。

一例として、スペクトル強度と被害ランクC以上となる橋脚の損傷確率との関係を図-5に示す。ここで、SI'=30程度から被害ランクCとなる

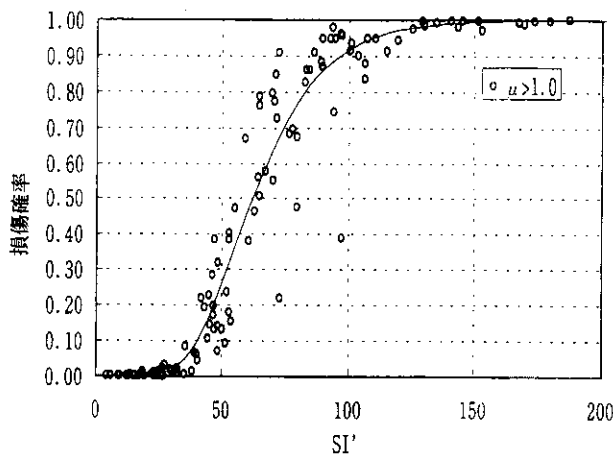


図-5 SI'と $\mu > 1.0$ となる確率の関係

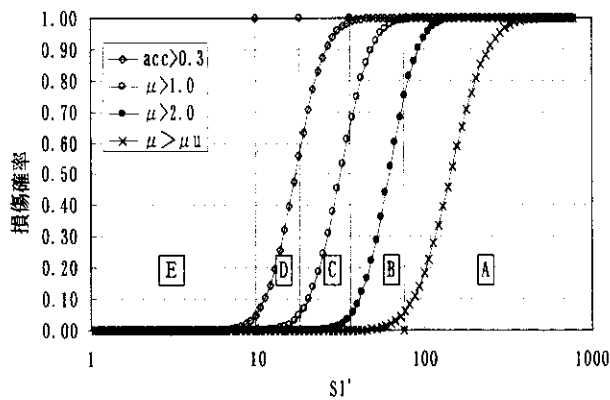


図-6 SI'と損傷確率の関係

橋脚が出現し、SI'=100程度となると、約90%の橋脚が被害ランクCとなることがわかる。

同様にして、被害ランク(A～E)ごとの各損傷確率を対数正規分布で近似したもの(累積被害曲線)を図-6に示す。同図より、任意のスペクトル強度SI'に対する橋脚の被害ランクごとの損傷確率が推定可能となる。

ここで、各被害ランクにおける損傷の非超過確率が95%以上となる場合のSI'値を、各被害ランクにおける判定基準値とする(表-3)。

この判定基準に従い、任意地震波のスペクトル強度に対して被害ランクを推定することが可能となる。

3. 地震強度の推定

これまでは、評価地点でのスペクトル強度SI'値が既知である場合の構造物の被害推定手法について検討を行ってきた。しかし、本被害推定機能では各路線を2～3のゾーンに区分し、そのゾーンの代表地点(評価点)を被害推定対象としているため、地震計の設置地点(観測点)は評価点と一致しない。そのため、観測点地表面におけるSI'値から評価点地表面のSI'値を推定する必要がある。

本章では、その推定法について述べる。

3-1 評価点での地震強度推定法

観測点から評価点のSI'値を推定する場合、表層の局所的な影響を排除した基盤面上での補間が望ましい。そこで、以下の手順により評価点におけるSI'値の推定を行うものとする(図-7)。

- ① 観測点地表面でのSI'値から観測点基盤面でのSI'値への変換

表-3 SI'値と被害ランクの対応

被害ランク	D	C	B	A
	応答加速度 Acc > 300 (gal)		$\mu > 1.0$	$\mu > 2.0$
判定基準 SI'値	9.7	17.8	35.5	74.7

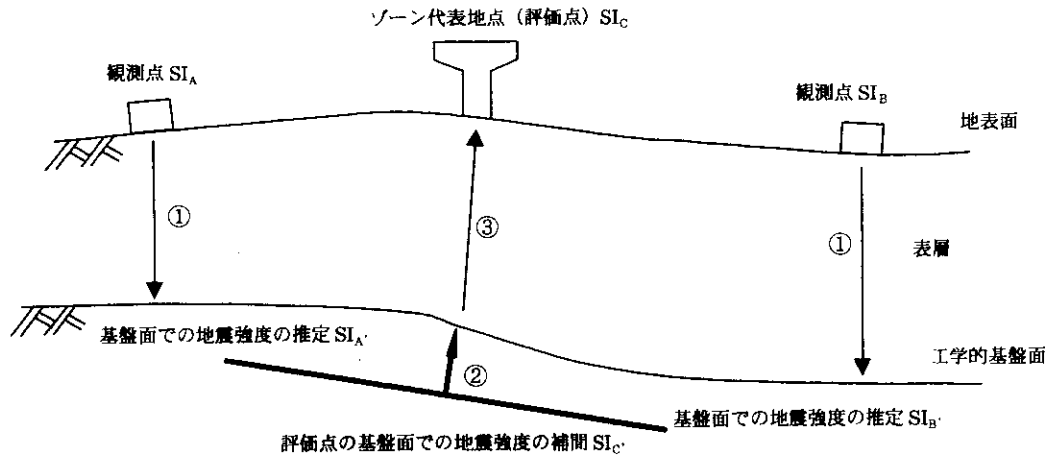


図-7 評価点での地震強度の推定の模式図

($SI_A \rightarrow SI_A'$, $SI_B \rightarrow SI_B'$)

② 観測点基盤面でのSI'値の補間により評価点基盤面でのSI'値の推定

(SI_A' , $SI_B' \rightarrow SI_C'$)

③ 評価点基盤面でのSI'値から評価点地表面でのSI'値への変換 ($SI_C' \rightarrow SI_C$)

上記の変換、並びに補間を行うには、

- a) 地表面SI'値と基盤面SI'値の変換法
- b) 基盤面上での面的な補間法

について検討を行う必要がある。

(1) 地表面SI'値と基盤面SI'値の変換手法

観測点において地表面でのSI'値から基盤面のSI'値を推定する場合や、評価点において基盤面から地表面のSI'値を推定するためには、重複反射解析等による地盤の応答解析が有効である。しかし、リアルタイムに各地点の応答解析を実施することは、多くの計算時間を要するため合理的ではない。そこで、あらかじめ観測点、ならびに評価点での土質柱状図をもとに、対象地点における地盤応答解析を実施しておき、地盤の増幅特性を3次の近似式により表現しておくものとする。図-8に、ある観測点における基盤-表層変換関数の一例を示す。

図-8では観測点における表層→基盤への変換関数が示されているが、評価点においては基盤→表層への逆変換を行うことで地表面でのSI'値が評価可能となる。

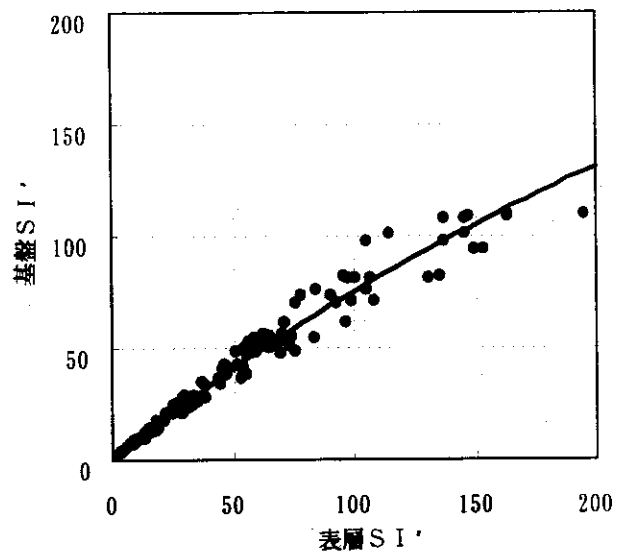


図-8 地表面SI'と基盤SI'の関係

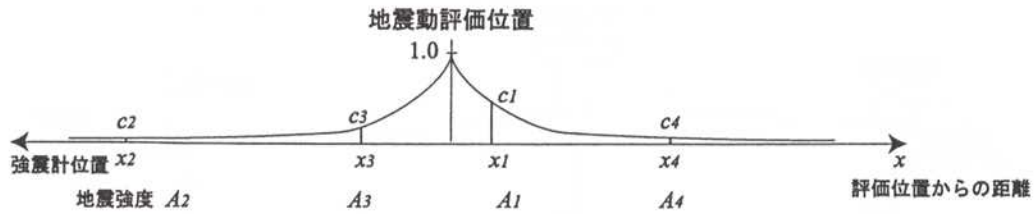
(2) 基盤面上での面的な補間方法

評価点における基盤面上のSI'値は、各観測点における基盤面上のSI'値を補間することにより推定する。補間法の概要は図-9のとおりである。

すなわち、ある評価点におけるSI'値は、全観測点でのSI'値の平均値とし、評価点からの距離に応じて重み付けを行うものとする。この重み付けは距離に応じて指数的に減少させることとした。

4. 被害推定の一例

本被害推定機能の、シュミレーション結果の一例を図-10に示す。ここでは、大阪市内に比較的大きな地震が発生した場合を仮定している。震源



$$At_j = \frac{\sum_{i=1}^n c_{i,j} \cdot A_{o_i}}{\sum_{i=1}^n c_{i,j}}$$

ここに

$x_{o_i}, y_{o_i}, A_{o_i}, i=1..n$: 観測点の座標, 地震強度

$x_{t_j}, y_{t_j}, A_{t_j}, j=1..m$: 観測点の座標, 地震強度

n : 観測点数

m : 評価点数

$l_{i,j}$: 観測点と評価点の距離

$$l_{i,j} = \sqrt{(x_{o_i} - x_{t_j})^2 + (y_{o_i} - y_{t_j})^2}$$

$c_{i,j}$: 評価点に対する各観測点の重み $c_{i,j} = 10^{-a \cdot l_{i,j}}$, $a=0.25$

図-9 地震動の補間方法

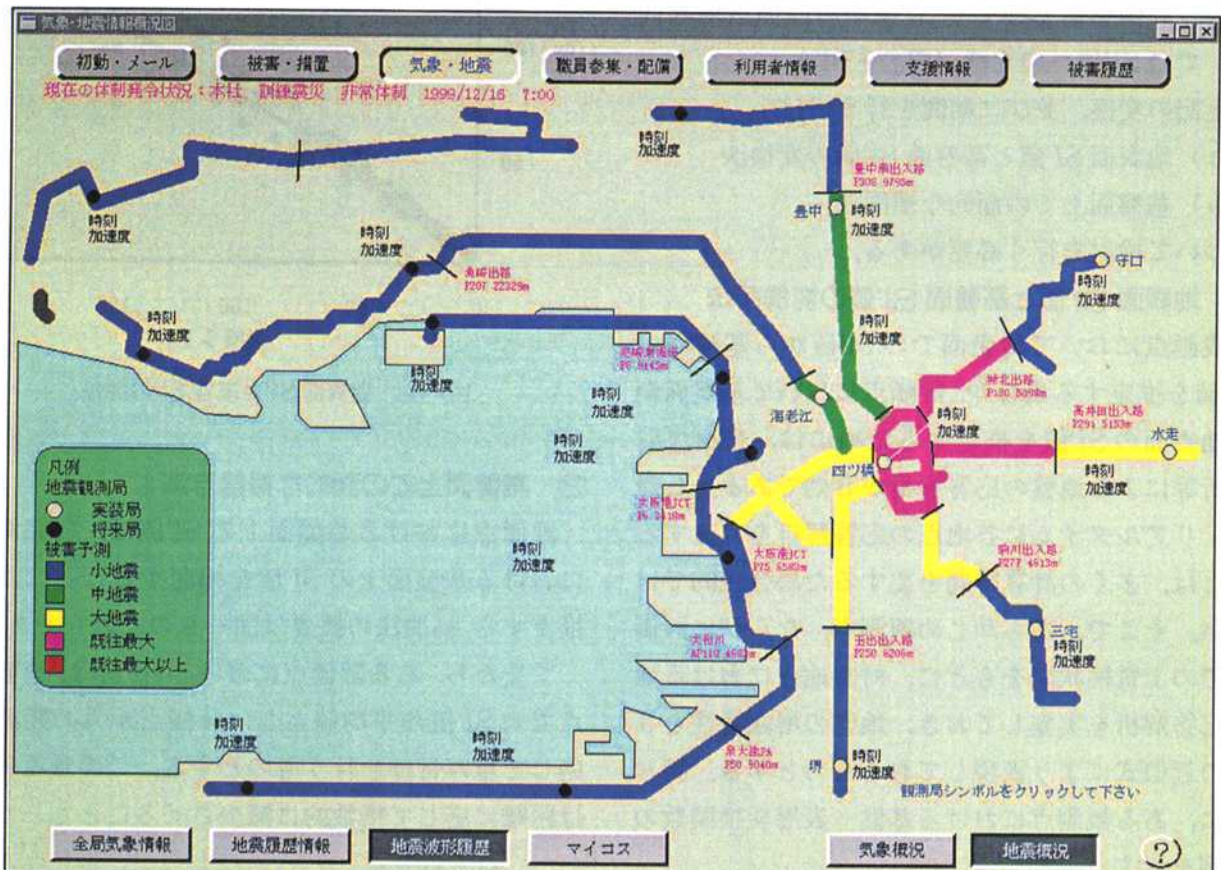


図-10 被害推定例

の位置等については特定しておらず、各観測地において既往の地震波形を一部加工したものを入力した。

5. まとめ

本論文では、阪神高速道路の80%以上を占める

コンクリート橋脚のデータベースを基に、128波の地震波データベースを入力した場合の非線形応答を集計することにより、地震強度（SI'値）と構造物の損傷程度との関連付けを行った。また、地震計が設置されている観測点におけるSI'値から、被害推定対象である評価点でのSI'値を推定する手法についても述べた。

本機能は、当公団の総合防災システムの中の一機能として盛り込まれており、地震発生直後の初動活動のより迅速、かつ適切な実施を支援する上で非常に有用な機能であると考えられる。今後さらなる推定精度の向上を図ると共に、当機能を用いたシュミレーションを行い、任意の地震に対する被害度の分布状況の推定に関しても検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 中村 豊：研究展望：総合地震防災システムの研究，土木学会論文集，No.531. pp.331-340, 1996.
- 2) 小田桐俊悦，杉田秀樹，金子正洋：公共土木施設のためのリアルタイム地震防災情報システムの開発，土木技術資料，39-9, pp.20-25, 1997.
- 3) 国上開発技術研究センター，震災復旧技術研究土木委員会：震災構造物の復旧技術に関する報告書，昭和59年.