

阪神高速における地震防災システムの開発

加賀山泰一¹・奥西史伸²・鈴木直人³・澤田吉孝⁴

¹正会員 工修 阪神高速道路公団保全施設部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

²正会員 工修 阪神高速道路公団保全施設部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

³正会員 工修 建設技術研究所大阪支社 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 1-2-15)

⁴建設技術研究所大阪支社 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 1-2-15)

阪神高速道路公団では、構造物の耐震設計および維持管理において必要となる情報を収集するとともに、震災等の防災時における既設構造物の健全度評価、被害分析等の必要性が指摘されたことから、18カ所の地震観測にもとづく総合防災システムの構築を行っている。本論は、防災システムの機能のうち、地震強度から構造物の被害程度を予測するサブシステムの検討を行ったものである。

key Words : damage estimation, earthquake disaster reduction, real-time monitoring system

1. はじめに

阪神高速道路公団では、構造物の耐震設計および維持管理において必要となる情報を収集するとともに、震災等の防災時における既設構造物の健全度評価、被害分析等の必要性が指摘されたことから、18カ所の地震観測にもとづく総合防災システムの構築を行っている。また、これらの観測結果を活用し、地震時の交通管理の判断材料とするとともに、構造物点検や応急対策実施のための初動体制を計るために、各地震観測記録を受信し、リアルタイムに全路線の被害予測を行う総合防災システムを構築中である。

リアルタイムに被害予測を行う地震防災システムは各機関においても研究されており、代表的なものにJRのUreDAS・HERAS¹⁾、建設省のSATURN²⁾などがあげられる。地震防災システムによる被害予測のフローを図-1に示す。18カ所の強震計ネットワークで検知された強震記録は即座に防災センターに転送される。システムは a)ゾーニングされた路線全域の地震強度分布を推定するサブシステムと b)各路線の地震強度を受けて構造物の被害予測を行うサ

ブシステムから構成される。本論は、防災システムの中で、地震強度から構造物の被害程度を予測するサブシステムの検討を行ったものである。

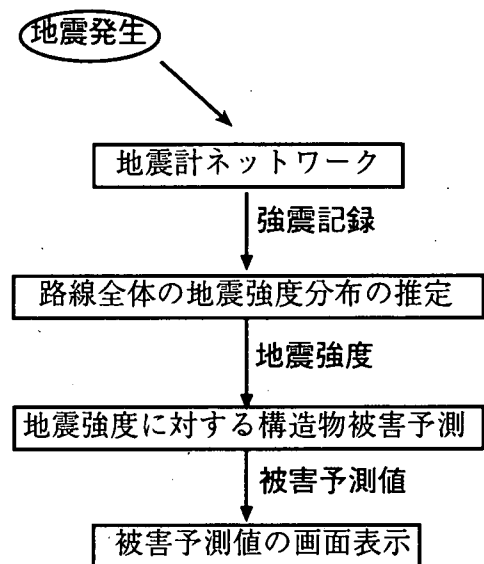


図-1 地震防災システムの概要

2. 検討手法

阪神高速道路公団の場合、多種多様な構造物が存在する建設省やＪＲと異なり、路線のほとんどが高架橋であり、またその約 80%の橋脚がＲＣ構造物である。そこで、あらかじめＲＣ橋脚の耐荷力を整理したデータベースをもとに、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ＲＣ橋脚の損傷程度を解析的に求めるものとした。

(1) 地震波データベース（以下「地震波ＤＢ」という）

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約 30 波収集した（図-2）。さらにそれらの地震波を基準として $\times 0.5, \times 1.5, \times 2.0$ の振幅調整を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) 橋脚データベース（以下「橋脚ＤＢ」という）

橋脚ＤＢは阪神公団において実施された耐震補強後の諸元データ（総数 1425 基）を利用した。図-3 に固有周期と降伏震度($k_{hy}=Pa/W$)、じん性率の頻度分布を示す。固有周期は $T=0.69\text{sec}$ を中心に $+0.2 \sim 1.2\text{sec}$ の間に 97%が分布している。補強後の橋脚であるため、降伏震度は $k_{hy}=0.5$ 程度、終局じん性率は $\mu=8$ 程度の橋脚が多い。

(3) 応答解析手法

地震波ＤＢ（128 波）に対して、非線形応答解析により橋脚ＤＢ（1425 基）の応答塑性率を求める必要がある。しかし 128×1425 の非線形時刻歴応答解析は膨大な計算時間を要するため、ここでは、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が精度よく推定することが可能である。したがって、128 波に対する所要降伏震度スペクトルを計算しておけば、橋脚の諸元（降伏震度 k_{hy} と固有周期 T ）から直ちに橋脚の応答塑性率が得られることになる。

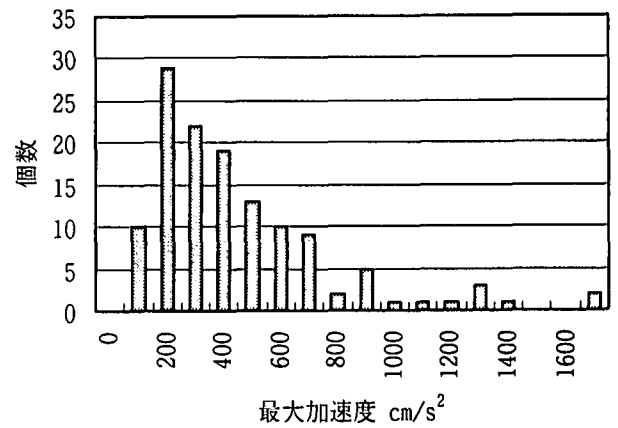


図-2 地震波 DB

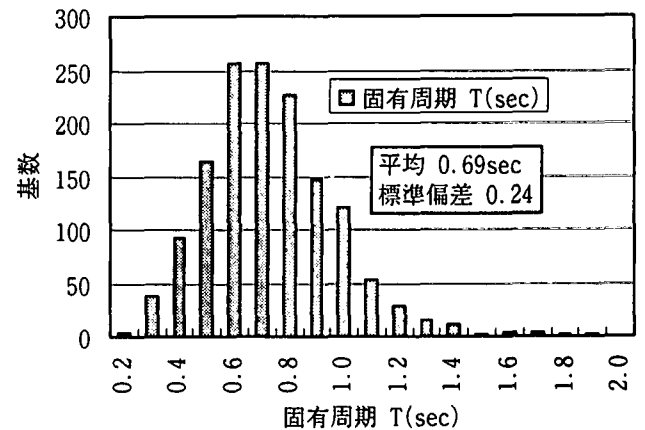
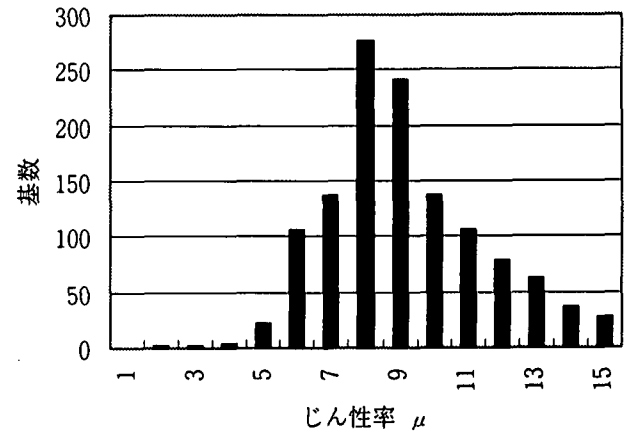
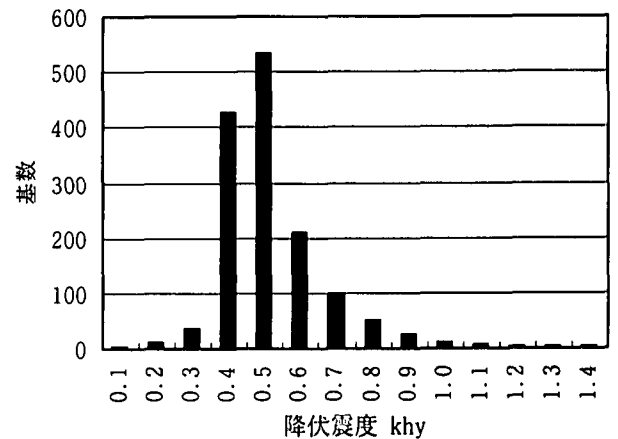


図-3 橋脚ＤＢの諸元

3. 地震強度指標の検討

構造物の損傷に相関のある地震強度の指標についてはいくつかの提案があり、代表的なものとしては最大加速度、最大速度、*SI* 値、最大応答加速度等があげられる。ここでは、地震強度、特性の異なる多数の地震波（地震波 DB）に対して橋脚 DB の応答塑性率を求め、応答塑性率と最も相関のよい地震強度の指標と判定基準を検討した。

スペクトル強度 *SI* は、Housner により提案され、通常の構造物の固有周期が 0.1～2.5 の間にあるとして、次式で与えられる。一般的に減衰 *h* は 20% の値が用いられる。

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, h) dT$$
 式 (1)

ここで、阪神公団の橋脚に着目すると、図-3 に示したように、固有周期が 0.2～1.2sec の間($m \pm 2\sigma$)に集中しているため、次式によるスペクトル強度 *SI'* を新たに定義した。

$$SI' = \int_{0.2}^{1.2} S_v(T, h) dT$$
 式 (2)

図-4 に地震強度（最大加速度、*SI'*）と応答塑性率の関係を示す。各プロットは地震波 DB 128 波に対する橋脚 DB 1425 基の応答塑性率の平均値である。地震強度が大きくなるとバラツキは大きい、特に中小地震強度の場合は *SI'* のバラツキが小さい。

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平均値と変動係数を表-1 に示す。*SI'* が最も応答塑性率と相関があることがわかる。

表-1 各地震強度と応答塑性率の関係

	最大加速度	最大速度	<i>SI</i>	<i>SI'</i>
平均値	1.11	0.91	0.89	1.06
変動係数	0.53	0.56	0.31	0.19

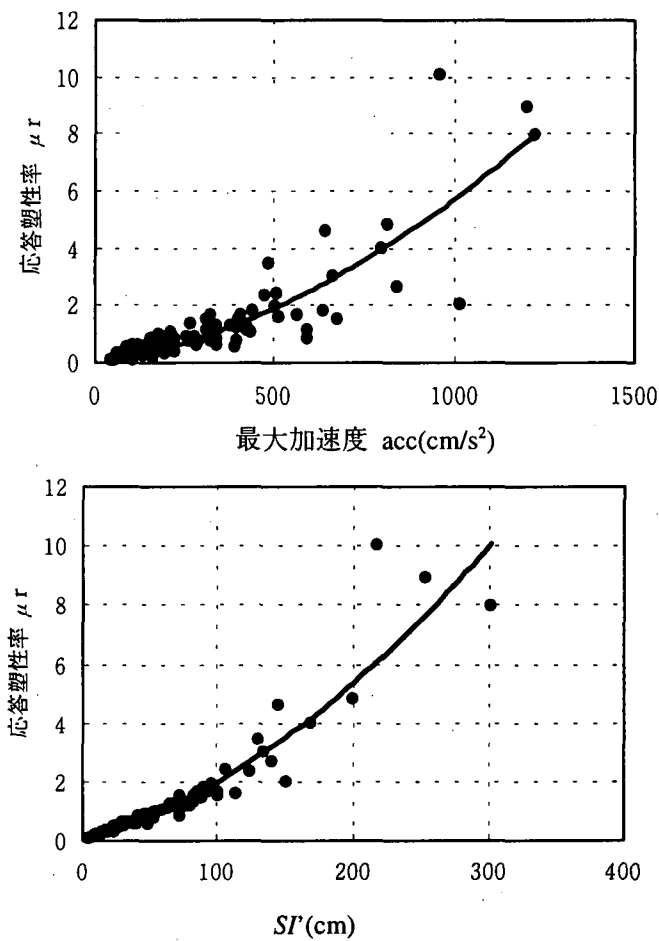


図-4 地震強度と応答塑性率の関係

4. 地震強度と被害予測の対応

式-2 で定義されるスペクトル強度 *SI'* が最も応答塑性率との相関が高いことがわかった。そこで、*SI'* と図-5 に示す具体的な損傷状況との対応づけを検討した。一般的な RC 橋脚を想定して、被災程度と応答塑性率等を表-2 のように関係づけた。

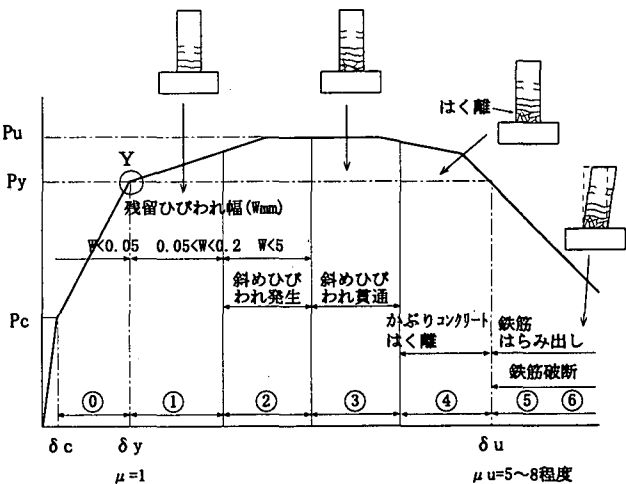


図-5 RC 橋脚の塑性率と損傷程度の関係¹⁾

表- 2 地震応答と被害程度の関係

ランク	被害程度	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	上部工加速度 $Acc>300gal$
C	構造物が損傷中	$\mu r>1.0$
B	構造物の損傷大（要補修）	$\mu r>2$
A	構造物の損傷大（要補修・ 補強）	$\mu r>\mu u$

表-2 で想定した応答塑性率と、地震強度 SI' の関係をもとに、以下の手順により SI' と被害程度との関係を求めた。

1)ある地震波に対し橋脚DBの応答計算を実施し、A ランク以上の応答を受ける基数、B ランク以上の応答を受ける基数・・Dランク以上の応答を受ける基数をそれぞれ集計し、対象とした地震波の SI' に対応するA～Dランクの損傷確率を求める。

2)128 波の地震波（地震波DB）の地震強度に対するA～Dランクの損傷確率をプロットし、地震強度 SI' とA～Dランクの損傷を受ける可能性の関係を評価する。

地震強度とCランク以上の損傷との関係を図-6に示す。図を見ると、 $SI'=30$ 程度からCランク損傷を受ける橋脚が出現し、 $SI'=100$ 程度となると、約90%の橋脚がCランク損傷となることがわかる。

同様の検討により、A～Dランク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-7に示す。図-7を用いることにより、地震強度 SI' に対応する橋脚の損傷ランクの割合が推定可能となる。

図-7において、それぞれの損傷ランクの非超過確率が95%の SI' を基準とした場合の、損傷ランク判定基準値を表-3に示す。表の判定基準値に従って路線図上に着色表示することが可能である。

表-3 累積被害曲線のパラメータと
損傷ランクの判定基準値

		Dランク	Cランク	Bランク	Aランク
		$acc>0.3$	$\mu>1.0$	$\mu>2.0$	$\mu>\mu u$
曲線のパラメータ	平均値	17.7	33.0	64.5	157.5
	標準偏差	6.1	11.6	21.5	67.6
SI' 非超過確率	95%	9.7	17.8	35.5	74.7

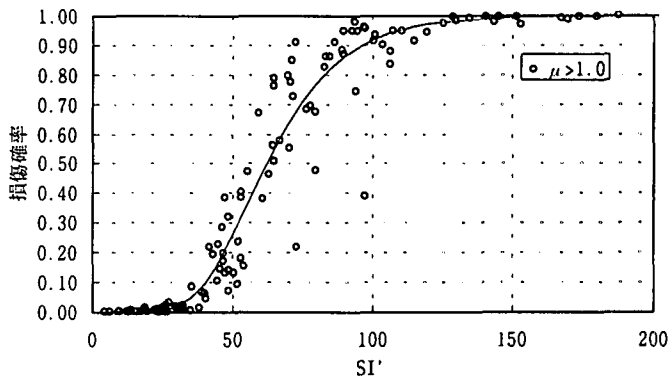


図-6 SI' とCランク損傷 ($\mu r>1.0$) の関係

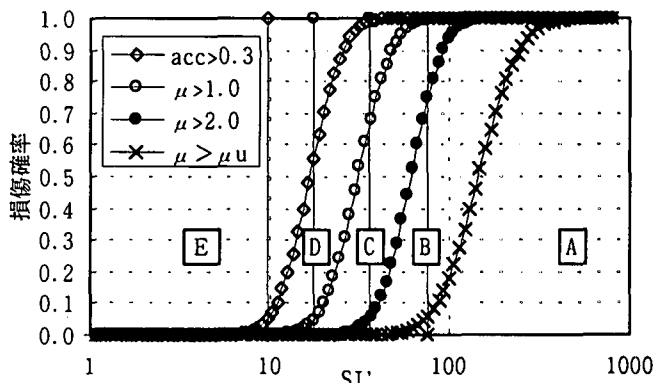


図-7 SI' と損傷確率の関係

5. まとめ

本論では、阪神高速道路の橋脚をほぼ網羅した橋脚DBに対し、128波の地震波DBを入力した場合の非線形応答を集計することにより、地震強度と構造物の損傷程度を関係づけることができた。おもな成果は以下のとおりである。

- ・ 構造物の損傷に最も相関のある地震強度指標として、橋脚DBの周期特性を考慮した SI' を提案した
- ・ 構造物の損傷程度を5段階に分類し、応答塑性率と損傷ランクを対応づけた
- ・ 応答解析結果を集計することにより、各損傷ランクの累積被害曲線を設定した

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)国土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