

加速度センサを用いた道路橋の 地震時被災度判定手法の開発

小林 寛¹・運上茂樹²・加納 匠³

1独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ耐震チーム主任研究員

(〒305-8516 つくば市南原1-6)

E-mail:hi-koba@pwri.go.jp

2独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ耐震チーム上席研究員

(〒305-8516 つくば市南原1-6)

E-mail:unjoh@pwri.go.jp

3独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ耐震チーム交流研究員

(〒305-8516 つくば市南原1-6)

E-mail:kanou55@pwri.go.jp

大地震時における橋梁構造物の被災程度、継続使用の可否などの判断は、専門家による目視判定に頼らざるを得ないのが現状であり、構造物の損傷度を迅速かつ正確に判定可能とするセンシング技術の開発が望まれる。本文では、一方向及び三方向の加振入力を行ったRC単柱模型による振動台実験の結果から、地震前後の固有周期の変化を用いて地震時の応答塑性率を推定し、損傷度の評価が可能であることを明らかにした。また、動的解析により全橋モデルを用いた応答塑性率推定手法に関する評価を行い、固有周期の変化に基づく地震時橋梁被災度判定システムの提案を行うものである。

Key Words: *Damage evaluation, RC columns, Shaking table test, Natural period, Ductility factor, Dynamic analysis*

1. はじめに

大地震が発生した場合、道路橋などライフラインの被災状況の把握とそれに基づく災害時ネットワークの確保は、直後の救急救命活動、被災者の避難、救援物資輸送等の震後対応において極めて重要となる。現状では橋梁構造物の被災状況の把握は専門家による目視点検に頼っており、被災度の定量的な判定基準が無いことや、土中や水中、夜間時等目視不可能なケースが少なくないこと、限られた人員による情報把握には多大な時間を要することなどの問題点がある。従ってこれらの被災状況の判定を専門家に頼ることなく正確かつ迅速に行える技術の開発は、二次災害の防止や震後対応、復旧計画の策定の観点からも強く望まれている。

ここで、目視に頼らない損傷の検知手法として、鉄道橋では重錘等を用いて与えた衝撃から固有周期

を測定し構造物の損傷を検知する手法が実用化されており、これを用いたRCラーメン高架橋の全体系1次固有振動数の低下率からその損傷度を推定する手法が提案されている¹⁾。また、衝撃による加振ではなく常時微動を用いる手法も研究されており、その計測に微動センサを用いる手法²⁾やレーザードップラ速度計を用いる手法³⁾も提案されている。しかしながら、これらの手法はセンサや計測機器を事前に設置しておく必要があり、地震時にリアルタイムに損傷を検知するには課題が残る。

一方道路橋においては、長大橋など特殊な橋梁では、建設時より加速度計等のセンサーを複数設置し、地震時の挙動を直接的にモニタリングできるようになっているものがあり、近年ではそれらのデータを地震発生時に回収・分析してリアルタイムに表示するシステムなども提案されている⁴⁾が、既設橋梁に

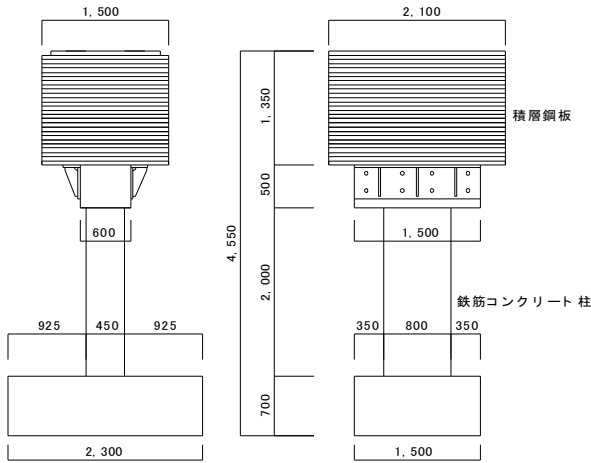


図-1 実験供試体(単位mm)

表-1 供試体諸元

	一方向加振モデル	三方向加振モデル
断面寸法[mm]	800×450	
慣性力作用位置高さ	フーチング上面より3000mm	
軸力	柱基部で1MPa	
主鉄筋	SD295, D10, 鉄筋比0.95%	
帯鉄筋	SD295, D6, 鉄筋比0.47%	
主鉄筋降伏強度[Mpa]	376.6	394.1
帯鉄筋降伏強度[Mpa]	340.8	374.7
コンクリート圧縮強度[Mpa]	30.3	34.8
降伏変位[mm]	14.7	14.8(9.9)*
終局変位[mm]	199.3	201.1(82.7)*
加振パターン	JR鷹取NS方向 振幅15%、50%、60%、 80%×3回	JR鷹取NS方向 (EW方向)* 振幅15%、90%、50% 一方向正弦波30波

*()書きは橋軸直角方向を示す

設置する場合にコストが嵩んだり、災害時に大量のデータを伝送する回線の確保等の問題があり、数多い一般橋梁への適用は現実的でない。また一般橋を対象としてRC単柱の固有振動数と損傷度の関係についての研究⁵⁾もなされているが、リアルタイムに損傷度を判定するには至っていない。

そこで本研究では地震前後の固有周期の変化をリアルタイムに捉え、これより最大応答塑性率を推定して即時に最低限の被災度判定(通行の可否)に用いる手法を考案し、RC単柱振動台実験結果をもとに、本手法の検証を行った。本文では、さらにこの手法に基づいた地震時橋梁被災度判定システムの提案を行うものである。

2. RC単柱振動台実験

(1)実験概要

大地震時における橋脚の損傷度評価手法の開発を目的として、RC単柱の振動台実験を実施した。

図-1および表-1に示すRC単柱を大型振動台上に設置し、短辺方向一方向及び三方向の地震入力を行った加振

表-2 実験結果

	加振ケース	加振後固有周期(s)	振動台最大加速度(gal)	ウェイト中心最大加速度(gal)	柱基部最大ひずみ(μ)	ウェイト中心応答変位(mm)	応答塑性率
一方向加振 橋軸方向	加振前固有周期	0.29					
	鷹取地震波15%	0.34	111	213	795	6.3	0.4
	鷹取地震波50%	0.64	443	356	47,481	62.8	4.3
	鷹取地震波60%	0.68	481	339	32,619	95.8	6.5
	鷹取地震波80% 1回目	0.79	722	352	25,716	136.1	9.3
	鷹取地震波80% 2回目	0.93	707	346	17,378	148.2	10.1
	鷹取地震波80% 3回目	0.93	693	308	20,912	137.5	9.4
三方向加振 橋軸方向	加振前固有周期	0.31					
	鷹取地震波15%	0.51	136	244	1,721	13.4	0.9
	鷹取地震波90%	1.02	431	337	NA	176.0	11.9
	鷹取地震波50%	0.85	330	144	NA	104.7	7.1
	正弦波1Hz	0.68	32	109	NA	47.9	3.2
三方向加振 橋軸直角方向	加振前固有周期	0.21					
	鷹取地震波15%	0.24	130	218	1,119	5.4	0.5
	鷹取地震波90%	0.49	688	518	57,458	76.2	7.7
	鷹取地震波50%	0.49	399	346	51,090	68.7	6.9
	正弦波1Hz	0.34	4	46	47,111	5.0	0.5

実験を実施した。以後、RC単柱模型の短辺方向を橋軸方向、長辺方向を橋軸直角方向ということとする。

地震入力としては1995年兵庫県南部地震の際にJR鷹取駅で観測された加速度波形⁶⁾を用いた。時間軸を50%に圧縮し、振幅は表-1に示すように段階的に変化させた。

計測は3成分の加速度計を振動台上、フーチング上、ウェイト重心位置、ウェイト上部に設置したほか、鉄筋ひずみゲージを軸方向鉄筋に柱基部付近を中心にフーチング中から柱中程まで配置した。また、ウェイト重心位置の変位をレーザー変位計を用いて計測した。加速度については加振時のほか振動台の立ち上げ時、降下時、各加振のインターバルにも微動の計測をした。

(2)実験結果

実験時に計測された最大加速度、最大ひずみ、最大変位、応答塑性率を表-2に示す。ここで、一方向加振と三方向加振橋軸方向については、それぞれ同一計測点でのデータを示す。

これより、鷹取波15%入力時はいずれのケースとも弾性範囲内の応答であったことがわかる。一方向加振と三方向加振橋軸方向の結果を見比べると、指令値に対する振動台加振の誤差はあるものの、三方向加振の方がより大きな鉄筋ひずみが生じたことがわかる。また、どちらの加振ケースも2度目の加振(一方向:鷹取地震波50%、三方向:鷹取地震波90%)で降伏を大きく超えた。三方向供試体については試験の最後に1Hzの正弦波を橋軸方向のみに入力したが、供試体の固有周期と共振し、入力に比べると大きな応答変位を生じた。

実験時における目視観察結果によれば、鷹取波50%を入力した一方向加振に対しては全周にクラックが発生するものの破りコンクリートの剥離などは観察されず、鷹取波90%を入力した三方向加振に対しては写真-1に



写真-1 鷹取地震波90% (三方向入力) 加振後の状況

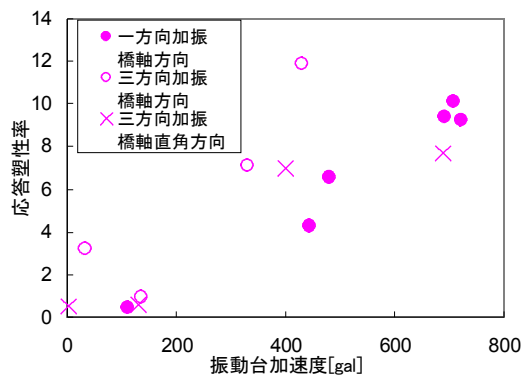


図-2 入力加速度と応答塑性率

示すように角部コンクリートの剥落および全周での被りコンクリートの浮きが観察された。

また一方向入力においては、鷹取波80%の2回目加振後に、ようやく一面のみ被りコンクリートの剥落および浮きが観察された。表-2に示す結果と対照すれば、本供試体において応答塑性率が概ね10以上になると被りコンクリートの剥落や浮きが観察されたが、応答塑性率が4を超える程度では全周のクラック程度しか観察されていなかった。

これらの目視確認できる現象は、対象物の配筋や入力の繰り返し回数などによっても変わってくると思われる、目視点検から精度良く変位応答を推定することは、困難であることがわかる。

3. 損傷度の推定

(1) 応答塑性率と入力加速度

表-2から損傷度の評価指標として応答塑性率が有効と考えられるため、応答塑性率と入力加速度の関係を図-2に示す。図より良好な相関関係が見られ、入力加速度から応答塑性率がある程度推定可能と思われるが、入力波

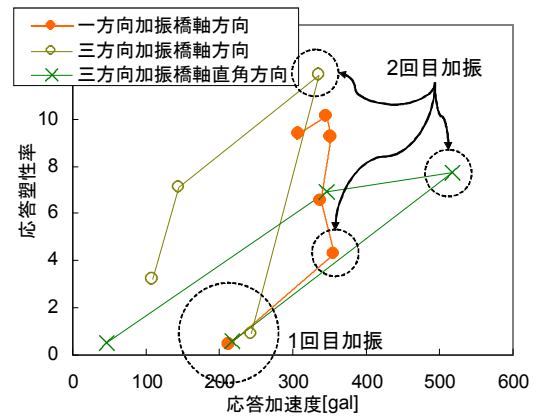


図-3 応答加速度と応答塑性率

の周期特性により共振を起こした場合などは応答を小さく評価する可能性もあり、注意が必要である。また、実橋梁を考えた場合、各橋脚位置で正確な入力加速度を得るためには各橋脚のフーチング上に機器を設置する必要があり、土中や水中の設置等、相当な困難を伴う事が予想される。

(2) 応答塑性率と応答加速度

橋脚基部は土中や水中であることが多く、一般に計測は困難であることから、次に橋脚上での計測による損傷度の推定を検討する。

供試体上部のウェイト上で計測された応答加速度と応答塑性率の関係を図-3に示す。図より、最初に降伏を超える2回目加振までは応答塑性率との相関を見ることができるが、損傷の進展に伴い応答加速度が頭打ち或いは減少している。このように、弾性域を大きく超え非線形域にはいるような応答については、応答加速度から単純に応答塑性率を推定することは困難であることがわかる。

(3) 固有周期の変化と応答塑性率

続いて橋脚上で計測された固有周期による損傷度の推定を検討する。

今回の実験のように、単純な1質点の振動系にモデル化できる場合、固有周期 T は質点質量 m と剛性 K を用いて以下の通り表すことができる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (1)$$

そこで加振前の健全時の固有周期を T_0 、加振後の固有周期を T 、同じく加振前の剛性を K_0 、加振後の剛性を K とすると、加振前後の固有周期の変化率は

$$\frac{T}{T_0} = \sqrt{\frac{K_0}{K}} \quad (2)$$

と表すことができる。今回のRC柱を、降伏荷重 P_y を有する完全弾塑性と仮定すれば、降伏変位を δ_y 、応答変位

表-3 加振前後の固有周期と応答塑性率

	加振ケース	加振後 固有周期 (s)	ウェイト中心 応答変位 (mm)	降伏 変位 (mm)	変位から求 めた応答 塑性率	固有周期か ら求めた応 答塑性率
一方向加振 橋軸方向	加振前固有周期	0.29				
	應取地震波15%	0.34	6.3		0.4	1.4
	應取地震波50%	0.64	62.8		4.3	4.8
	應取地震波60%	0.68	95.8		6.5	5.4
	應取地震波80%1回目	0.79	136.1		9.3	7.2
	應取地震波80%2回目	0.93	148.2		10.1	10.1
	應取地震波80%3回目	0.93	137.5		9.4	10.1
三方向加振 橋軸方向	加振前固有周期	0.31				
	應取地震波15%	0.51	13.4		0.9	2.7
	應取地震波90%	1.02	176.0		11.9	10.9
	應取地震波50%	0.85	104.7		7.1	7.6
	正弦波1Hz	0.68	47.9		3.2	4.8
三方向加振 橋軸直角方向	加振前固有周期	0.21				
	應取地震波15%	0.24	5.4		0.5	1.3
	應取地震波90%	0.49	76.2		7.7	5.2
	應取地震波50%	0.49	68.7		6.9	5.2
	正弦波1Hz	0.34	5.0		0.5	2.6

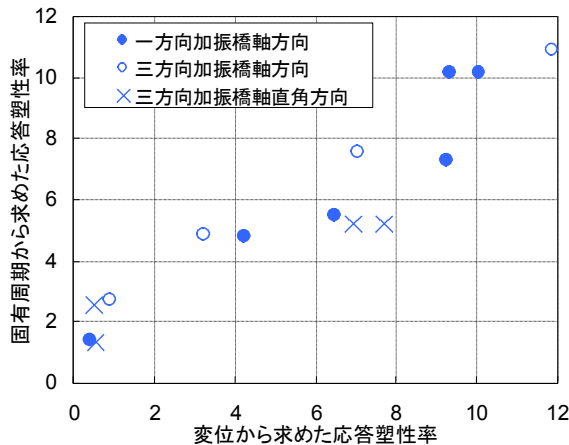


図-4 固有周期から求めた応答塑性率

を δ として、

$$K_0 = \frac{P_y}{\delta_y} \quad (3)$$

$$K = \frac{P_y}{\delta} \quad (4)$$

であるから、加振前後の固有周期変化率は

$$T/T_0 = \sqrt{\frac{\delta}{\delta_y}} = \sqrt{\mu} \quad (5)$$

となり、応答塑性率 μ の平方根となる。

この関係から、加振前後の固有周期の変化率を用いた応答塑性率の推定が可能となる。固有周期の算定は、 T_0 については第1回目加振の主要動を受ける直前の約10秒間、 T については各加振時記録の最後約10秒間のフーリエスペクトルより求めた。

算出した加振前後の固有周期、固有周期から求めた応答塑性率を表-3に示す。ここで表中の最大応答変位、降伏変位、応答塑性率は表-2と同じである。また表中の降伏変位は試験当日の材料強度を用いて道路橋示方書V耐震編⁷⁾によった。

固有周期の変化率から算出した応答塑性率と最大応答変位から算出した応答塑性率の関係を図-4に示す。図より固有周期の変化から推定した応答塑性率は入力方向の

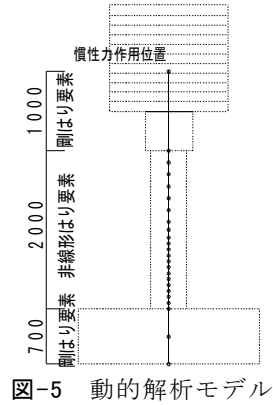


図-5 動的解析モデル

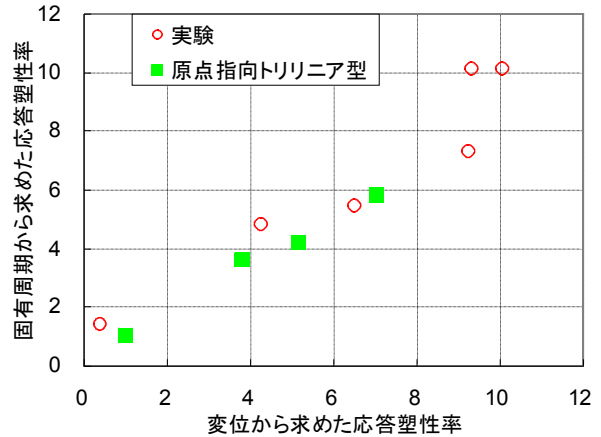


図-6 単柱モデルによる実験と解析の比較

違いや入力波の違いによらず実測値と良く一致しており、橋脚上に設置した加速度計の記録から固有周期を算出することにより、十分な精度で橋脚の応答塑性率を推定でき、これをもって地震時における橋脚の損傷度の評価が可能であることがわかる。

4. 動的解析による検討

(1)単柱モデルを用いた動的解析

固有周期の変化から応答塑性率を推定して損傷度を評価する方法をRC単柱による実験で確認し、提案した。そこで、様々な構造条件を持つ実橋において、この損傷度評価方法の適用にあたっての問題点を抽出する目的で動的解析による検討を行った。

全橋モデルに先立ち、図-1に示す実験供試体を図-5のようにモデル化し、振動台上での観測波形を入力として単柱実験の再現を試みた。式(3)、(4)に示すように固有周期の変化率から応答塑性率を推定するにあたり完全バイリニアの等価剛性を用いていることから、非線形履歴モデルとしては原点指向モデルを用いることとした。

一方向入力時の実験結果と動的解析による固有周期の変化率を用いた応答塑性率の推定結果を図-6に示す。図

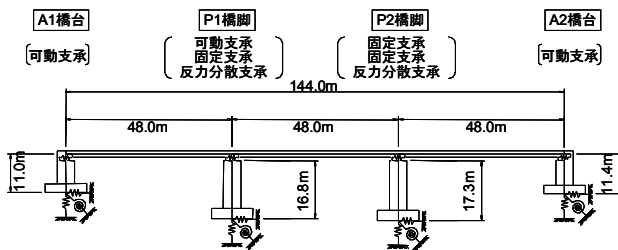


図-7 橋梁全体系モデル

表-4 全橋モデル解析ケース

解析ケース	地盤条件	支承条件				備考
		A1	P1	P2	A2	
Case1	I種地盤相当 地盤ばね設定	M	M	F	M	M: 可動支承 F: 固定支承 E: 反力分散支承
Case2	完全固定	M	M	F	M	
Case3	完全固定	M	F	F	M	
Case4	完全固定	M	E	E	M	

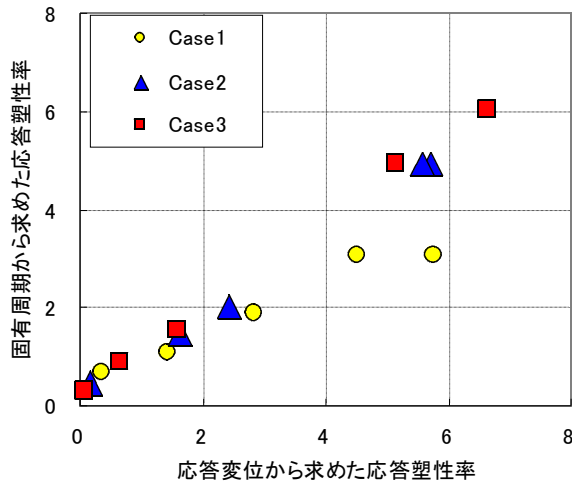


図-8 全橋モデルによる応答塑性率の比較

より、解析結果と実験結果は同じ傾向を示しており、非線形履歴モデルとして原点指向型を用いることにより応答塑性率の推定が良く再現できていることがわかる。

これより、以後全橋モデルを用いた解析においては非線形履歴モデルとして原点指向型を用いることとした。

(2)全橋モデルを用いた動的解析

全橋モデルとしては図-7に示す多質点系骨組みモデルを用い、地盤ばねおよび支承条件をパラメータとして表-4に示す4ケースについて解析を実施した。ここで着目橋脚はP2橋脚である。入力地震動、数値積分条件、非線形履歴モデルは単柱モデルと同じものを用いた。

Case1~Case3について応答塑性率の推定結果を図-8に示す。応答塑性率の推定は式(5)により、加振後固有周期 T としては着目橋脚天端の接点における応答加速度計算結果の入力終了後10秒間のフーリエスペクトルから求めた卓越周期を用い、加振前固有周期 T_0 としては固有

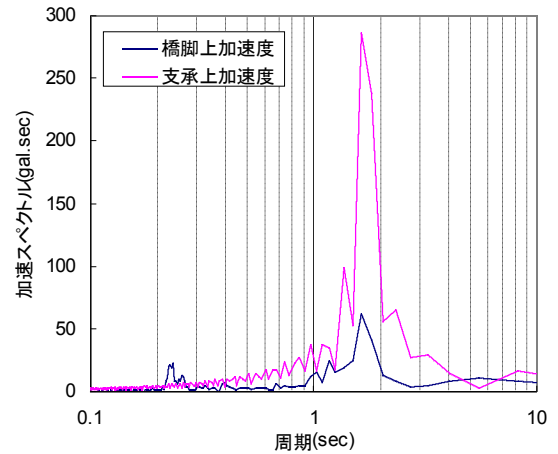


図-9 反力分散モデルの応答スペクトル

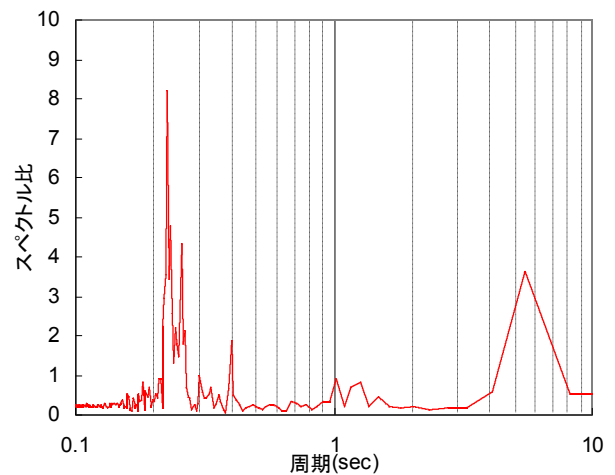


図-10 橋脚上と支承上の応答スペクトル比

値解析における着目橋脚の1次振動モード時の周期を用いた。これを着目橋脚天端の接点における変位から求めた応答塑性率と比較した。

図より両者は比較的一致しており、通常の固定支承を持つ橋脚に対しては、解析上でも固有周期の変化から応答塑性率が簡易に推定できることがわかる。ただし、反力分散型支承を持つCase4については、次節に述べるように加振後固有周期が支承を介して上部構造の振動の影響を著しく受けるため、固定支承と同様の方法では応答塑性率の推定が不可能であることがわかった。

(3)反力分散支承を持つ橋脚の応答塑性率の推定

反力分散支承を持つCase4モデルの鷹取地震波50%入力時における加振終了後自由振動中の橋脚上部および支承上部の節点の応答スペクトルを図-9に示す。橋脚上部の応答に着目すると、橋脚自身の固有周期よりも支承上部における卓越周期と同じ周期が大きくなり、支承ばねを介して上部構造の振動の影響を強く受けていることがわかる。そこで、上部構造の振動の影響を取り除くため、支承上部における応答と橋脚上部における応答のスペク

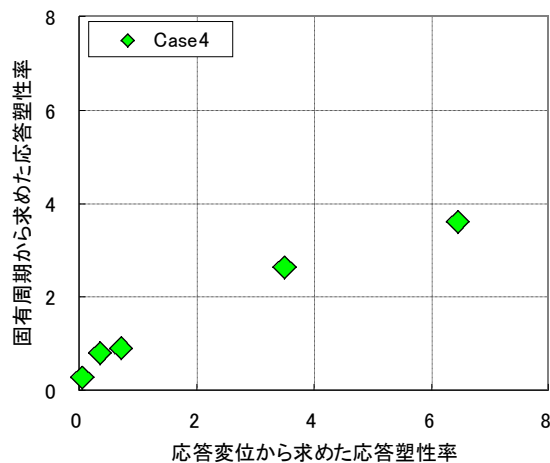


図-11 スペクトル比を用いて同定した固有周期より推定した応答塑性率の比較

トル比を算出した結果を図-10に示す。

この図より0.23秒あたりに上部構造の振動の影響を受けない橋脚固有の周期が卓越することがわかる。この方法で求めた橋脚の固有周期を加振後の固有周期として、式(5)により反力分散支承を持つCase4について応答塑性率を推定した結果を図-11に示す。

このようにして上部構造の応答の影響を取り除くことにより、反力分散支承を持つ橋梁においても橋脚の応答塑性率を簡便に推定することが可能となる。

5. 地震時橋梁被災度判定システム

ここまで橋脚上部の加速度応答記録から橋脚の損傷度を推定する手法について述べたが、この手法を用いた地震時橋梁被災度判定システムについて述べる。

本システムの目的は、地震直後における二次災害防止と災害時道路ネットワーク情報の収集・提供、被災橋梁の合理的な復旧計画策定であり、そのために必要な情報を収集し提供できるものとする。図-12に概念図を示す。

各橋脚上部に加速度センサとマイコンボード、メモリを一体化したセンサユニットを取り付け、地震時には各橋脚の応答塑性率を即座に演算し、その損傷度を検知できるようにする。地震直後に橋梁の応答塑性率がある設定値を超えれば、何らかの損傷を受けたと判断して情報板などにより通行止を実施すると同時にその情報を道路管理者、近隣の走行車両などに発信する(一次判定)。

さらに、1次判定により損傷を受けたと判定された橋梁については、メモリに記録された応答時刻歴波形を回収して損傷の程度を詳細に判定し(二次判定)、復旧範囲や復旧方法決定の判断材料とする。

こういったシステムを広域に整備することにより大地

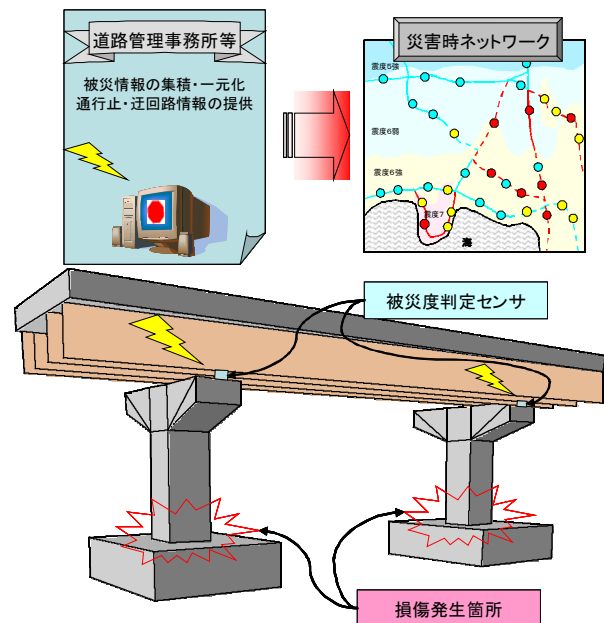


図-12 地震時橋梁被災度判定システム概念図

震時においても災害時道路ネットワークの確保が容易となり、被災地内外の支援活動を円滑にするものである。

6. まとめ

道路橋の地震時被災度判定センサの開発を目的として、振動台実験および動的解析を実施したところ、以下のことが明らかとなった。

- ・入力加速度と応答塑性率の間には良好な相関が見られるが、入力波の周期特性によっては応答を小さく評価する可能性もあり、注意が必要である。
- ・加振前後の固有周期の変化から、入力方向や入力波形の影響を受けることなく応答塑性率が精度良く推定できる。
- ・橋脚上部と上部構造の応答のスペクトル比を用いることにより、反力分散支承を持つ橋梁においても橋脚の固有周期の変化から応答塑性率を推定することが可能である。

謝辞:本研究の一部は日本学術振興会の基盤研究(A)「都市インフラの地震被災診断システムの開発」(研究代表者:茨城大学横山功一教授)によるものである。

参考文献

- 1) 関雅樹, 西村昭彦, 佐野弘幸, 中野聡: RCラーメン高架橋の地震時損傷レベルの評価に関する研究, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp. 51-64, 2003.4
- 2) 上半文昭, 目黒公郎: 微動測定を利用した地震時構造

物損傷度検査手法に関する実験的研究, 第11回日本地震工学シンポジウム講演論文集CD-ROM, 2002.11

- 3) 上半文昭, 目黒公郎: 鉄道構造物の振動診断を目的とした非接触微動測定法の開発, 第27回土木学会地震工学論文集CD-ROM, 2003.12

- 4) 忽那幸治, 鹿野善則, 芦塚憲一郎, 大保直人, 山野辺慎一, 河野哲也: 伊勢湾岸自動車道木曾川橋における地震時挙動観測とその活用, 第27回土木学会地震工学論文集CD-ROM, 2003.12

- 5) 近藤益央, 運上茂樹, 足立幸郎: 固有振動数による鉄筋コンクリート橋脚の損傷度評価, 第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集pp287-290, 1998.12

- 6) Nakamura Y. "Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, JR Earthquake Information." No.23c, RTRI, 1995.

- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2002.3 (2005.3.15受付)

DEVELOPMENT OF AN EARTHQUAKE DAMAGE DETECTION METHOD FOR BRIDGE STRUCTURES WITH THE ACCELERATING SENSOR

Hiroshi KOBAYASHI, Shigeki UNJOH, Takumi KANOH

After a large scale earthquake, damage evaluation of bridge structures is currently conducted by means of visual inspection by bridge experts. So the develop of sensing technique which can detect the damage level of bridge structures promptly and correctly is expected. A new damage evaluation system using advanced sensors just after the earthquake is being developed.

This paper presents the study on the damage evaluation method using the natural period change of the bridge columns, and the effectiveness of the proposed method demonstrated through two series of shaking table tests.