

微動測定を利用した地震時構造物損傷度検査手法

Inspection Method for Earthquake Damaged Structure Using Microtremor Measurement

上半文昭*・目黒公郎**

Fumiaki UEHAN and Kimiro MEGURO

1. はじめに

著者らは、振動測定で構造物の地震時損傷度を精度良く検査できる手法を開発することを目的として、鉄道RCラーメン高架橋の損傷挙動の非線形構造解析に取り組んできた¹⁾。新しい非線形構造解析手法である応用要素法²⁾で構造物の損傷による固有振動数変化を崩壊レベルに至るまで解析できることを確かめ、構造物の損傷を固有振動数低下から検出する検査法の判定基準作成に役立てられることを示した。本論文では次の段階として、より詳細で簡易な検査法の開発に取り組む

兵庫県南部地震以降、せん断破壊先行型の高架橋柱は鋼板巻き立て補強された。そのため既存の高架橋柱の大半が曲げ破壊先行型となっており、地震時の損傷は柱端部に集中するものと予想される。この柱端部の損傷度を柱の上下端別々に且つ精度良く検査できるようになれば、最小限の応急復旧工事（部分的な補強・補修）の計画設定や、復旧工事後の施工不良箇所の検出等が可能になる。そこで、非線形構造解析で作成した判定基準と振動測定を利用したラーメン高架橋の柱上下端の損傷度判定手法を開発する。

損傷度の検出には、鉄道分野で古くから研究されてきた振動測定による構造物検査法を利用する。特に、検査をより簡単にするために、構造物の加振を必要としない微動（常時の微小な地盤震動）測定の利用を検討する。鉄道ではこれまでの経験から現場技術者が構造物の固有振動数や振動モード形状についての知識を有しており、振動測定を利用した構造物検査法をよく理解しているが、微動の利用技術を疑問視する技術者が少なくない。そこで、微動測定による構造物検査の模型実験を行い、その有効性を確かめる。

以下では、まず提案する損傷度検査手法の一連の流れを

数値解析による検証を交えて説明する。次にフレーム構造模型の微動測定実験を行い、微動測定による構造物の振動特性の同定精度と提案手法の妥当性を検証する。

2. ラーメン高架橋柱端部の損傷度検査法

2.1 概要

ここで提案するのは、非線形構造解析で作成した損傷度の判定基準と微動測定を利用した鉄道RCラーメン高架橋の柱端部の損傷度検査手法である。原則として、鉄道RCラーメン高架橋（図1）の線路直交方向断面を構成する各柱が左右対称な損傷形態を示すものと仮定し、柱の上端および下端のそれぞれの損傷度を検査するものとする。以下に、提案手法の概要を解析的検討結果を交えて説明する。

2.2 損傷度判定基準の作成手順

(1) 柱端部の塑性ヒンジ特性の解析

地震直後に効率良く損傷度検査を行うために、非線形構造解析で事前に損傷度の判定基準を作成する。まず対象とする鉄道RCラーメン高架橋の柱端部に生じる塑性ヒンジ部の損傷度毎の剛性を求める。鉄道では、部材の損傷度を図2のように定義している³⁾。対象とする柱断面の非線形構造解析を行って、各損傷度に対応する塑性ヒンジ部の剛性を求める。

(2) パラメータスタディによる損傷度判定基準の作成

次に、柱上下端に先に調べた各損傷度に対応する塑性ヒ

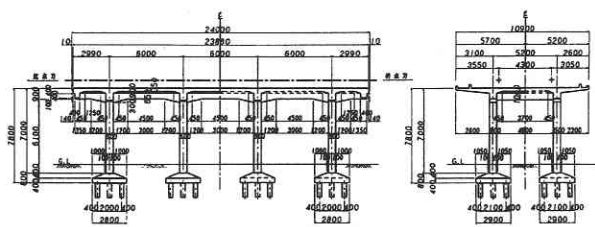


図1 鉄道RCラーメン高架橋（左図：線路方向，右図：線路直交方向）

*鉄道総合技術研究所

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

ンジが生じた際の振動特性の変化に関するパラメータスタディを行い、その結果をデータベース化して損傷度の判定基準を作成する。なお、損傷度判定基準は上部構造のみ(高架橋の地上部が剛基盤に固定された状態)を対象として作成する。ラーメン高架橋の数値モデルの柱端部に各損傷度に対応する剛性を代入して振動特性の変化を調べる。損傷度判定の指標として、高架橋の健全時の1次固有振動数 F に対する損傷後の高架橋の1次固有振動数 F^d (添字 d は損傷後の値であることを示す。)の比である「固有振動数変化率 (F^d/F)」と、図3 (a) に示す柱上端のモード振幅 A^{Top} と柱中央部のモード振幅 A^{Mid} の比である「上部/中央部振幅比 (A^{Top}/A^{Mid})」を用いることにする。固有振動数変化率は高架橋全体系の損傷度と関係する指標である。上部/中央部振幅比は柱上下端の損傷程度の比と関係がある指標として用いるものであり、1次振動モード形状を考慮すれば上下端の損傷度が等しい時に「=2」、下端に比べて上端の損傷が大きい場合には「>2」、逆の場合は「<2」の値を示すことがわかる(後述の図13参照)。

2.3 損傷度評価のための振動測定

地盤および基礎の影響を含んだ実構造物の損傷度評価を行うための振動測定方法を説明する。振動測定は、健全時の固有振動数 F_G (添字 G は地盤および基礎の影響を含んでいることを意味する。)を得るための事前測定と、地震や復旧工事等の事後測定との2度行う。事前の測定は高架橋の1次固有振動数がわかれば良いので高架橋上1点の振動測定を行い、そのフーリエスペクトルの卓越振動数を固有振動数 F_G とする。 F_G は地盤および基礎の影響を含むので

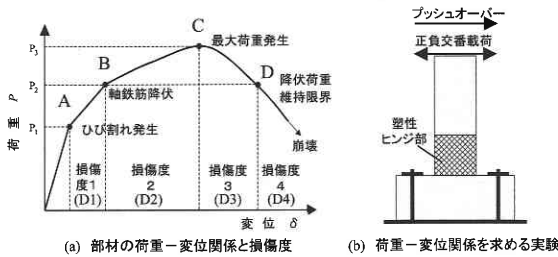


図2 RC部材の損傷度の定義

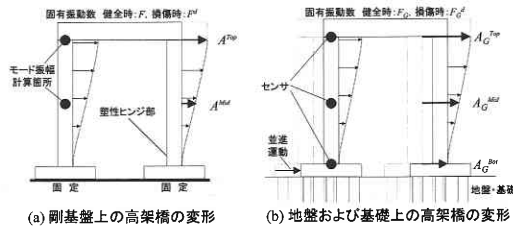


図3 高架橋の線路直交方向の変形

高架橋の上部構造のみの固有振動数 F より低い値を示す。なお、新幹線高架橋の上部構造のみの固有振動数 F は数値解析ではほぼ正確な値を計算できる。事後の測定では高架橋柱の上端、中央および下端にセンサを配置して振動を測定する(図3(b))。各センサで記録された微動のフーリエスペクトルのピーク値をモード振幅 A_G^{Top} , A_G^{Mid} および A_G^{Bot} とする。上端のセンサで記録された微動のフーリエスペクトルの卓越振動数を高架橋の損傷後の1次固有振動数 F_G^d とする。

2.4 損傷度評価指標の算出法

測定結果から地盤および基礎の影響を取り除き、高架橋の上部構造のみを対象として作成した損傷度判定基準に照合可能な損傷度評価指標を算出する。地盤-基礎パネの回転成分の影響を無視すれば、地盤および基礎の影響を含んだ柱上部、中央部、下部それぞれのモード振幅 A_G^{Top} , A_G^{Mid} , 及び A_G^{Bot} から、上部/中央部振幅比 A^{Top}/A^{Mid} が次のように近似される。

$$A^{Top} / A^{Mid} \approx (A_G^{Top} - A_G^{Bot}) / (A_G^{Mid} - A_G^{Bot}) \dots \dots \dots (1)$$

地盤および基礎を伴う高架橋を、水平地盤バネ K_G を伴った剛性が K (損傷後は K^d とする) で質量が M の1自由度系(図4)にモデル化する。上部構造のみの固有振動数を F 、地盤-基礎の影響を含んだ全体系の固有振動数を F_G 、損傷後の全体系の固有振動数を F_G^d 、そして損傷後の高架橋の振動系から地盤-基礎バネの影響を取り除いた損傷後の上部構造のみの固有振動数を F^d とすれば、固有振動数変化率 F^d/F が次のように求められる⁴⁾。

$$F^d / F = F_G \cdot F_G^d / \sqrt{F^2 \cdot F_G^2 - F_G^{d2} \cdot (F^2 - F_G^2)} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 F は計算で、 F_G と F_G^d は振動測定結果から得られる。

2.5 数値解析による検証

(1) 概要

線路に直交する断面が図5のような形状を持つ、地盤(N値20程度を想定)および杭基礎を伴った鉄道RCラーメン高架橋の数値モデルの解析例を用いて、提案手法によ

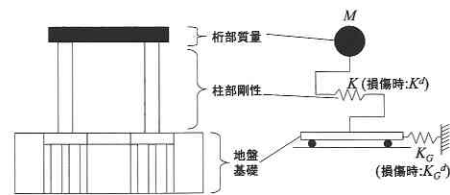


図4 地盤-基礎-上部構造系の単純化

研 究 速 報

る損傷度判定の流れを説明する。高架橋モデルのヤング率は、コンクリートが28.0 GPa、鉄筋が200 GPaである。桁部は剛体でその質量は160 tonである。地盤および基礎の詳細は省略するが、解析によれば上部構造のみの卓越振動数 F が4.0 Hzであったのに対して、 F_G は3.3 Hzに低下した。

(2) 柱端部の塑性ヒンジ特性の解析

図6に柱の数値モデルと正負交番荷解析結果および数値モデルの1次固有振動数変化率を示す。数値モデルの材料諸元および荷重軸力は高架橋モデルと等しい。正負交番荷解析結果の包絡線形状と固有振動数変化率を参考にして損傷度1~4(D1~D4)に対応する柱端部の塑性ヒンジ特性を決定する。ここでは、柱の数値モデルの固有振動数変化率がおよそ0.95(D1), 0.8(D2), 0.6(D3)そして0.4(D4)となるヒンジ特性をD1~D4に対応させた。

(3) パラメータスタディによる損傷度判定基準の作成

高架橋上部構造を図7に示す柱上部の回転を拘束した1本のRC柱にモデル化する。柱上下端に損傷度1~損傷度4に対応するヒンジ剛性を代入して解析し、損傷度判定に用いる指標の変化をまとめたのが表1である。

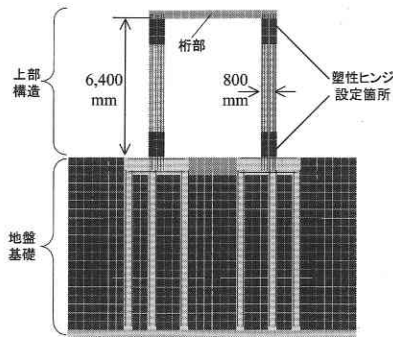


図5 鉄道RCラーメン高架橋の数値モデル (応用要素法)

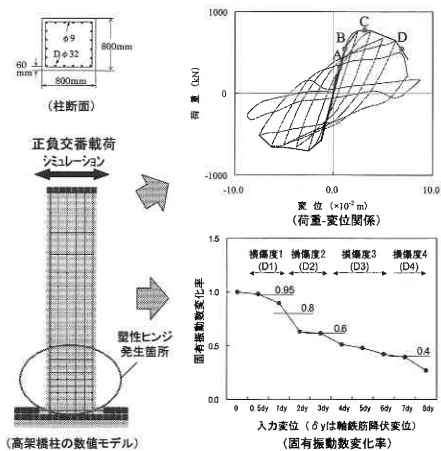


図6 損傷度に対応する塑性ヒンジ特性の決定

(4) 数値モデルの損傷度評価指標の算出と損傷度判定

一例として、図5の数値モデルの柱上端にD3相当、下端にD1相当の塑性ヒンジを与え、提案手法で損傷レベルを正しく判定できるかどうかを調べる。解析結果によれば、塑性ヒンジを与えた際の固有振動数 F_G^d は2.2 Hzで、モード振幅は柱上端の A_G^{Top} を1とすれば A_G^{Mid} が0.37, A_G^{Bot} が0.12であった。式(1)によれば上部/中央部振幅比 A^{Top}/A^{Mid} は3.5となる。また、式(2)によれば固有振動数変化率 F^d/F は0.60となる。表1を図化した図8に2つの指標を照合し、柱上下端の損傷度を推定する。まず上部/中央部振幅比 A^{Top}/A^{Mid} のグラフから柱の損傷度が「上端D3-下端D1」か、「上端D4-下端D3」の組合せに絞られる。固有振動数変化率 F^d/F のグラフの条件も満たすのは「上端D3-下端D1」の組合せのみとなり、数値モデルの柱上下端の損傷度を正しく判定できた。

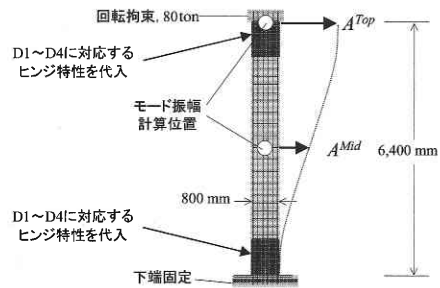


図7 柱1本に単純化した高架橋の数値モデル

表1 コンクリート配合

		柱上端部の損傷度				
		D1	D2	D3	D4	
柱下 端部 の 損 傷 度	D1	F^d/F	0.91	0.75	0.59	0.37
		A^{Top}/A^{Mid}	2.0	2.4	3.5	8.8
	D2	F^d/F	0.75	0.62	0.51	0.35
		A^{Top}/A^{Mid}	1.8	2.0	2.7	5.8
	D3	F^d/F	0.58	0.51	0.44	0.32
		A^{Top}/A^{Mid}	1.4	1.6	2.0	3.7
	D4	F^d/F	0.36	0.34	0.32	0.26
		A^{Top}/A^{Mid}	1.1	1.2	1.3	2.0

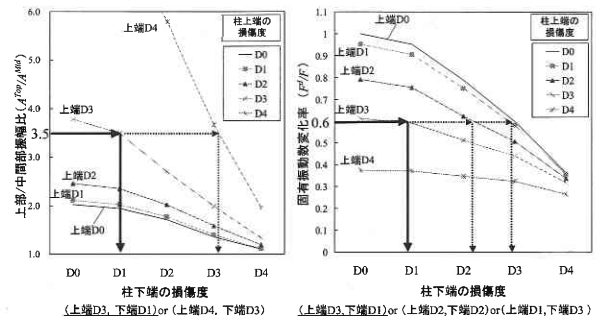


図8 高架橋柱上下端の損傷度の判定方法

3. フレーム構造模型の微動測定実験

3.1 概 要

鉄道ラーメン高架橋の損傷度評価に微動測定を利用するための基礎的な検討として、小型のフレーム構造模型の微動測定実験を実施する。微動測定による振動モード形状の同定精度を調べた後、提案する損傷度評価手法に対応する各種の実験を行って提案手法の妥当性を調べる。

3.2 実験装置および計測方法

一連の実験で使用するフレーム構造模型と微動の計測方法について説明する。図9にフレーム構造模型と微動センサ配置を示す。フレーム構造模型は鋼製で、上部ウェイト、桁部およびセンサの合計質量約 25 kg を L 型鋼の柱 4 本で支えた構造である。模型は床上に設置し、基礎部に固定用ウェイトを配して固定する。桁部および基礎部は、柱端部とボルトおよび固定金具で結合されており、ボルトの締め方や金具の種類を変更することにより、結合部の剛性を変化させられる。微動測定センサは、実際に構造物検査に用いるものと同様の微動計（速度計、固有周期 2.0 sec）を用いた。この微動計を基礎部、柱中間部、桁部の 3 箇所に設置し、水平 1 方向の振動を同時測定する。柱中間部のセンサは計測用棚上に設置した。

3.3 微動測定による振動モードの同定

微動の振幅情報の精度検証を目的として、微動測定結果からフレーム構造模型の振動モードの推定を試みる。振動モードの推定対象として、柱の上下端ともにほぼ剛結状態

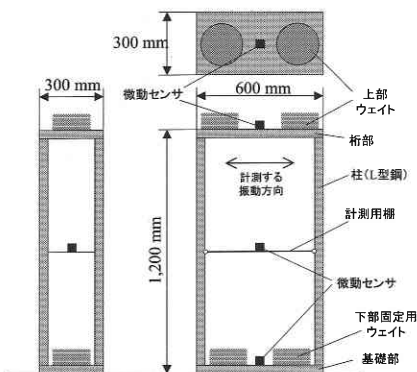


図9 フレーム構造模型とセンサ配置

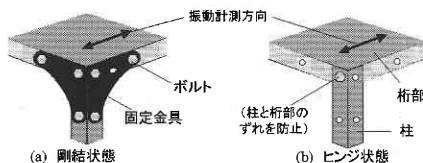


図10 柱と桁部および基礎部の結合状態

(図10(a))とした「上下端剛結モデル」と、柱下端は剛結のまま柱上端を図10(b)のヒンジ状態とした「上端ヒンジ-下端剛結モデル」を作成した。フレーム構造模型の1次振動モード形状を調べるために、計測用棚の設置高さを 200 ~ 1,000 mm まで 100 mm 刻みで変化させ、各センサで微動を同時記録（時間刻み 0.01 sec）した。記録波形の中でノイズの影響が少ない 20.48 sec の部分を選び出してフーリエ変換し、バンド幅 0.4 Hz の Parzen ウィンドウで平滑化して各微動記録のフーリエスペクトルを求めた。桁部、計測用棚および基礎部のフーリエスペクトルのピーク値をそれぞれ A^{Top} 、 A^{Mid} および A^{Bot} （微動によるわずかな並進成分）とし、モデルの並進運動を除いて桁部の振幅が 1 となるよう正規化した場合の計測用棚設置高さの振幅 A_h を次式で求める。

$$A_h = (A^{Mid} - A^{Bot}) / (A^{Top} - A^{Bot}) \dots \dots \dots (3)$$

結果を理論解と比較して図11に示す。微動測定でフレーム構造模型の1次振動モード形状を十分な精度で把握できている。

3.4 柱上下端の損傷による振動特性の変化（上部構造）

ここではフレーム構造模型の固有振動数とモード形状（柱上端部/柱中央部のモード振幅比）が、柱上下端の剛性変化によって数値解析結果どおりに変化し、且つその変化を微動測定で正しく把握できることを確かめる。フレーム構造模型の柱上下端の結合部を図12に示す剛性の異なる3種の結合状態（a）～（c）に変化させ、その際の1次固有振動数 F^d と上部/中央部振幅比 A^{Top}/A^{Mid} を調べる。実験との比較を目的として、各部の剛性と質量を実際のフレーム構造模型と等しくした数値モデル（図12）を作成し、柱端部の剛性を3通りに変化させて指標の変化を調べた。指標変化の解析結果および実験結果を表2に、図13に数値モデルの1次振動モード形状の変化を示す。数値解析と実験の結果はよく一致している。

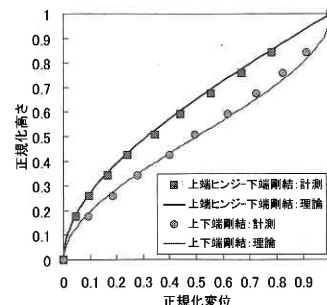


図11 微動測定による1次振動モード形状の推定結果

研 究 速 報

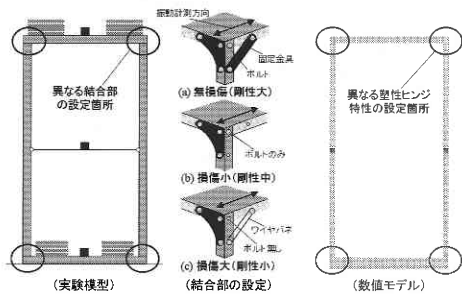


図 12 フレーム構造模型とその数値モデル (応用要素法)

表 2 損傷度評価指標の変化 (数値解析および実験)

		柱上端の結合状態						
		数値解析			実験			
		(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	
柱下端の結合状態	(a)	F_G^d	4.2	3.7	3.0	4.2	3.7	3.0
		A^{Top}/A^{Mid}	2.0	2.2	2.6	2.0	2.2	2.5
	(b)	F_G^d	3.7	3.3	2.7	3.7	3.3	2.7
		A^{Top}/A^{Mid}	1.8	2.0	2.3	1.8	2.1	2.3
	(c)	F_G^d	3.0	2.7	2.2	3.1	2.7	1.9
		A^{Top}/A^{Mid}	1.6	1.8	2.0	1.6	1.8	2.0

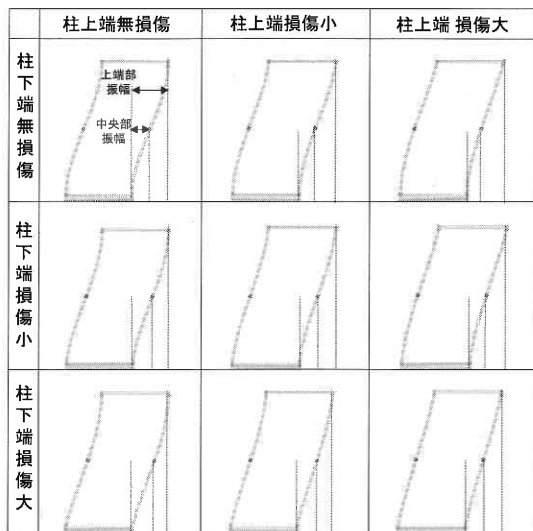


図 13 柱端部の損傷によるフレーム構造の1次振動モードの変化

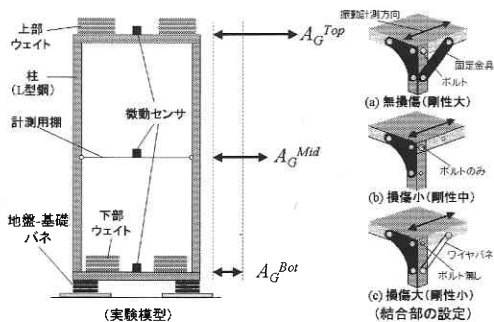


図 14 地盤-基礎バネを伴うフレーム構造模型

表 3 損傷度評価指標の変化 (実験, 地盤-基礎バネ有り)

		柱上端の結合状態			
		(a)無損傷	(b)損傷小	(c)損傷大	
柱下端の結合状態	(a)無損傷	F_G^d	3.4	3.1	2.8
		F^d	4.2	3.7	3.2
		A^{Top}/A^{Mid}	2.0	2.1	2.4
	(b)損傷小	F_G^d	3.1	2.9	2.5
		F^d	3.6	3.4	2.8
		A^{Top}/A^{Mid}	1.8	1.9	2.2
(c)損傷大	F_G^d	2.7	2.5	1.8	
	F^d	3.0	2.7	1.9	
	A^{Top}/A^{Mid}	1.7	1.8	2.0	

3.5 地盤および基礎バネの影響の除去

2.4節で示した地盤および基礎バネの影響の除去方法に関する実験を行う。図 14 に示す地盤-基礎バネ用のゴム支承を付加したフレーム構造模型の測定結果から提案手法でゴム支承の影響を除去し、表 2 と同様の結果を導けるかどうか確かめる。結合部の設定、微動の計測処理方法はこれまでと同様である。表 3 に地盤-基礎バネを伴ったフレーム構造模型の 1 次固有振動数 F_G^d 、式 (2) を用いて計算した F^d および式 (1) で計算した柱上部/柱中央部のモード振幅比 A^{Top}/A^{Mid} を示す。表 3 と表 2 の各値は良く一致している。

4. ま と め

鉄道 RC ラーメン高架橋の損傷度を微動測定で検査する手法を提案し、数値解析と模型実験によりその妥当性を検証した。微動測定から得られる振幅情報はフレーム構造の 1 次振動モードを捉えるのに十分な精度を持っていた。フレーム構造模型の柱端部の損傷度や地盤-基礎バネを変化させて、その振動特性の変化を微動測定で分析したところ、期待通りの結果が得られ、提案する損傷度評価法の妥当性を確認できた。

(2002 年 10 月 7 日受理)

参 考 文 献

- 1) 上半文昭, 目黒公郎: 非線形構造解析による RC 構造物の即時地震損傷度判定法に関する一考察, 応用力学論文集, Vol. 3, pp. 621-628, 2000.8.
- 2) Meguro K. and Tagel-Din H.: A new efficient technique for fracture analysis of structures, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, IIS, Univ. of Tokyo, No. 30, pp.103-116, 1997.
- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.
- 4) 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論文集, 2002 (印刷中).