

振動計測に基づく構造物のモデル化・性能評価に関する研究

Modeling and Performance Evaluation of Structures Based on Vibration Measurement

山口 宏樹^{1*}, 吉岡 勉², 伊藤 信¹

H. Yamaguchi¹, T. Yoshioka² and S. Ito¹,

¹ 埼玉大学大学院 理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

² 大日本コンサルタント株式会社

Nippon Engineering Consultants Co., Ltd.

Abstract

The two fundamental studies on vibration measurement based structural modeling and structural health monitoring were conducted. One is on an appropriate model of cable-stayed bridge for earthquake resistant design, which was discussed by comparing the earthquake-induced response record and the simulated response of the model. Another is on a reliable method of damping identification; RD-ERA-Bootstrap method, based on ambient vibration measurements, which was applied to a PC box-girder bridge and a middle-rise building. The important findings through the studies are summarized in the present paper.

Key Words: structural modeling, health monitoring, damping identification, cable-stayed bridge, middle-rise building, PC box-girder bridge, strong motion record, ambient vibration measurement

1. はじめに

道路橋を代表とする建設構造物において、振動を計測する機会が増えている。その目的のほとんどは耐震性や構造健全度など、構造物の有する性能を正しく評価しようとするものであり、構造モデルの妥当性や構造パラメータの同定に関する問題に帰着する。このような背景にあって、本研究では以下の関連する2つの研究を行った。

第一は、強震記録から斜張橋構造モデルの妥当性を検討したものである。これは、近年の道路橋耐震設計において地震応答解析による動的解析照査法が主流となり、如何に精度良い解析モデルを構築す

るのが重要な課題となっているものの、実際の地震時挙動との比較から解析精度を検証した事例は比較的少ないことによる。

第二は、構造物の健全度評価に関するものである。振動特性変化に基づく構造健全度評価は、固有振動数、減衰比、モード形状を総合的に用いて行う必要があるが、減衰については同定の不安定性、メカニズムの複雑さによって未だに課題が多く残されている。そこで、RD・ERA法に統計的評価法の一つである Bootstrap 法を加えた方法の有効性の検討を行い、減衰同定の精緻化を試みた。

* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

電話・Fax: 048-858-3552

Email: hiroki@post.saitama-u.ac.jp

2. PC 斜張橋の地震応答解析モデルに関する検討

PC 斜張橋を例に、強制加振実験により得られた固有振動特性に基づいて、設計実務で一般的な立体骨組モデルを構築し、2003 年十勝沖地震で得られた強震記録を用いた動的解析により構築したモデルの妥当性を検討した。対象とした斜張橋は図 1 に示すとおり、橋長 501m、中央径間 251m であり、主塔は RC 独立 1 本柱形式、主桁は 4 室箱桁である。

(1) 解析モデル 解析モデルは図 2 に示す立体骨組モデルとした。主塔及び橋台の基部において地盤バネで基礎～地盤系を SR バネでモデル化した。主桁の支承条件は橋軸方向を可動、橋軸直角方向及び鉛直方向を固定とした。主桁及び主塔はコンクリート総断面の剛性を有する線形梁要素、ケーブルは引張力にのみ抵抗する弦要素でモデル化した。

(2) 固有値解析結果と強制加振実験結果の比較 上述のようなモデル化を基本に表 1 に示す境界条件などのパラメータを変化させ、計 5 ケースの固有値解析を行い、強制加振実験及び過年度に実施された FEM 解析の結果との比較から 3 次元骨組モデルの精度検証を行った。

主要な固有振動数の比較結果を表 1 に示す。橋脚、橋台基部及び支承においては全点固定としたケース 4 が最も一致しており、曲げ逆対称 1 次及び曲げ対称 2 次を除いて、誤差が 9% 以内となる。また、振動モードについても実験結果と良い対応となった。

(3) 応答解析と強震記録の比較 2003 年十勝沖地震において、地表面下 1m (図 1 の①点) で得られた水平 2 方向の強震記録を入力地震波として地震応答解析を行った。強制加振実験に比べて大振幅の水平振動である地震時では、支承条件や地盤条件は設計で想定した状態に近いと考えられることから、最適モデルケース 4 に対して橋軸方向の

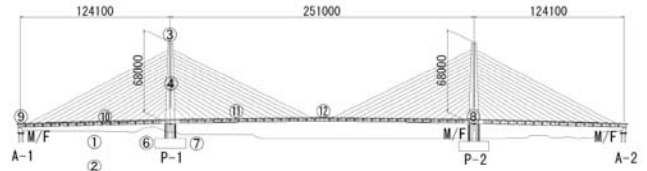


図 1 対象とした斜張橋の一般図と強震観測点

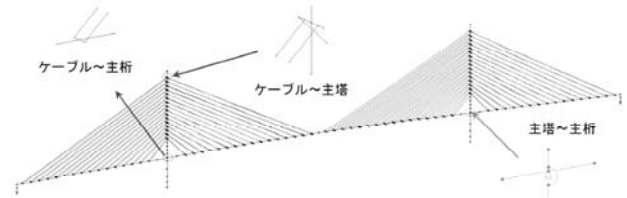


図 2 斜張橋の立体骨組モデル

支承条件を全点可動に、地盤条件を弾性支持に変更した骨組モデルを用いた。また、地震応答解析における減衰は卓越する 2 つの振動モードのモード減衰を 10% として設定した Rayleigh 減衰を用いた。

解析結果と強震記録との応答加速度の比較したものを図 3 に示す。中央径間中央の桁の応答加速度は、橋軸方向加振では実測値と良く一致しているが、橋軸直角方向では卓越振動数に差異が見られる。主塔天端の応答加速度では、橋軸直角方向加振において 60 秒以上の加速度波形が実測値と大きく異なり、実測では減衰せずに自由振動している。また、橋脚天端の応答加速度では、1Hz 前後で卓越がある実測値に対して解析では 3~5Hz が卓越している。

表 1 検討ケースと主要な固有振動数の比較

解析条件			ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
パラメータ	境界条件	基礎～地盤系	バネ	固定	固定	固定	固定
		橋軸方向支承条件	全点可動	全点可動	全点可動	全点固定	全点固定
	解析手法	微小変位	微小変位	微小変位	微小変位	有限変位	
	部材断面剛性	鉄筋考慮せず	鉄筋考慮せず	鉄筋考慮	鉄筋考慮	鉄筋考慮	
	ケーブルモデル	1分割	1分割	1分割	1分割	8分割	
振動モード	実験結果 平均値	FEM※ 解析結果	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
曲げ対称1次	0.439	0.429 (0.98)	0.349 (0.79)	0.364 (0.83)	0.380 (0.87)	0.404 (0.92)	0.403 (0.92)
曲げ逆対称1次	0.683	0.638 (0.93)	0.671 (0.98)	0.727 (1.06)	0.766 (1.12)	0.594 (0.87)	0.590 (0.86)
曲げ対称2次	1.3055	1.244 (0.95)	1.061 (0.81)	1.074 (0.82)	1.146 (0.88)	1.162 (0.89)	-
曲げ逆対称2次	2.075	-	1.698 0.818	1.703 0.821	1.888 0.910	1.888 0.910	-
曲げ対称3次	2.6365	2.482 (0.94)	2.161 (0.82)	2.169 (0.82)	2.393 (0.91)	2.394 (0.91)	-
ねじれ対称1次	0.976	0.877 (0.90)	0.819 (0.84)	0.822 (0.84)	0.879 (0.90)	0.879 (0.90)	0.880 (0.90)

※ () 内は実験値に対する比率を示す。

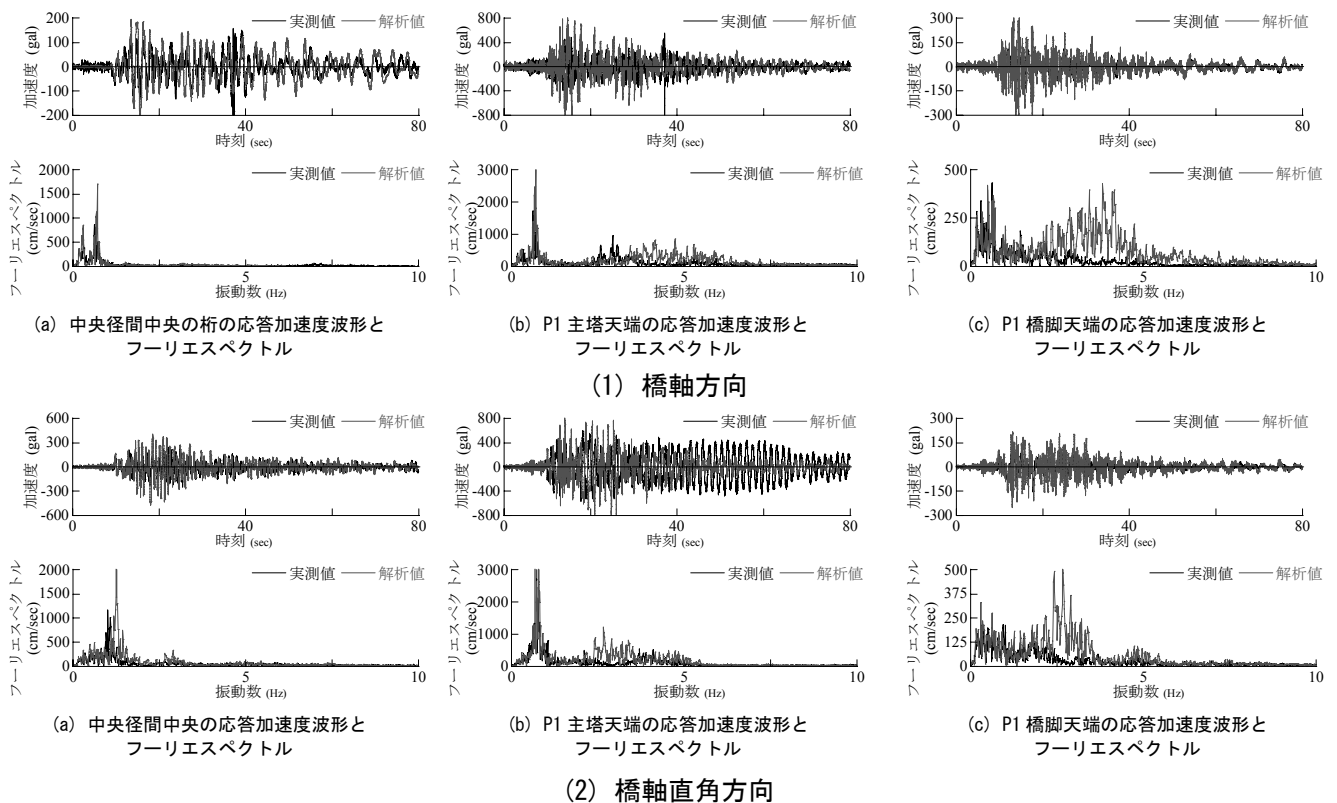


図3 解析結果と強震記録との応答加速度の比較

以上のとおり、本研究の骨組モデルでは実測値と差異が大きく、地震時の実挙動を捉えていない。今後、コンクリート部材の非線形特性や境界条件に着目して、さらに検討を行う予定である。

3. RD・ERA・Bootstrap 法による減衰同定の精緻化

RD・ERA 法に Bootstrap 法を加えた方法について、RC 造 10 層建物 (H44.5m, B32×24.3m)・PC 箱桁 3 径間連続橋 (計測対象とした側径間部分約 60m) の 2 つの建造物の常時微動データを用い、その有効性の検討を行って減衰同定の精緻化を試みた。

(1) 減衰同定法 ERA は構造システムを表す数学モデルの特性行列を決定する方法であり、高精度な同定法として用いられてきた。入力データとして自由振動波形を用いることから、常時微動波形を用いる場合、RD 法の併用が必要となる。RD 法では外力を平均 0 の理想的なランダム外力として仮定し、応答を時間軸上で、閾値などの条件によって抽出し、多数重ね合わせて平均することでランダム応答成分を除去し自己相関関数を得て、自由振動波形とす

る。ERA 解析により同定される固有振動数は、Stabilization Diagram, MAC などの精度指標を用いて安定した同定がなされるが、減衰についてはばらつきが大きく、不安定である場合が多い。本研究では、リサンプリング手法である Bootstrap 法を適用して、常時微動データから RD 法によって得られた応答を、無作為抽出し重ね合わせることで、1 つのデータから複数の自由振動波形を得て ERA 解析を繰り返す。これにより、1 回の減衰同定における不確実性を考慮して、統計的に減衰を評価することが出来る。

(2) 実測概要 層状建物では屋上階段部分に計測器を設置し、水平・鉛直方向速度成分を計測した。計測時間は 1 回 30 分で計 2 回である。橋梁では箱桁内部の 4 地点 (ジョイント部から各 2m, 22m 地点に 2 個) に計測器を設置し、鉛直方向速度成分を計測した。計測時間は 1 回 30 分で計 6 回である。なお、サンプリング周波数は各 200Hz であった。

(3) 同定結果 層状建物では単点 ERA 解析、橋梁では多点 ERA 解析における固有振動数と減衰比の関係を示したものが図 4 である。固有振動数について

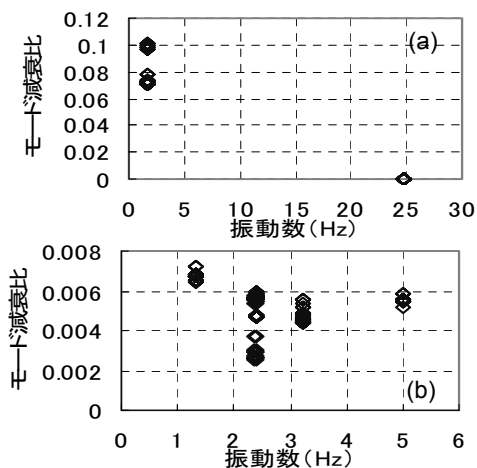


図4 モード減衰 vs 固有振動数 : (a)建物, (b)橋梁

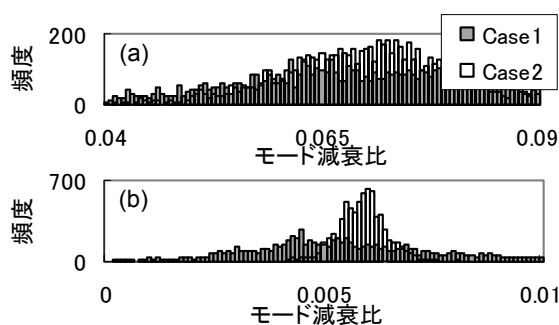


図5 減衰の Bootstrap 分布 : (a)建物, (b)橋梁

ては両構造物において安定した同定がなされているが、減衰についてはばらついていることが分かる。

Bootstrap 法によって 200 回同定を繰り返し、得られた 1 次モード減衰比の Bootstrap 分布を図 5 に示す。それぞれ RD 法において閾値を 0 以上とした場合 (Case1)、標準偏差の 0.8 倍以上とした場合 (Case2) で解析を行っているが、閾値を大きくした Case2 ではピークが明確になっており、ノイズの影響が少なくなっている。また、層状建物に比べ橋梁では振幅レベルが大きいためノイズの影響が小さく、同じケースにおいても橋梁の方が比較的安定した同定がされているが、橋梁ではピークが変化しており、振幅を制限することで減衰同定結果のばらつきだけでなく、値も影響を受け変化している。

(3) 減衰の振幅依存性 橋梁データに対し、RD 法により得られた各ランクの自由振動波形初期値を振幅とし、固有振動数、減衰比の変化を見たものが図 6 である。減衰は振幅依存性が明確に、モードによってその傾向が異なることが分かる。さらに、1 回の同定における不確実性を考慮して、新たに設定

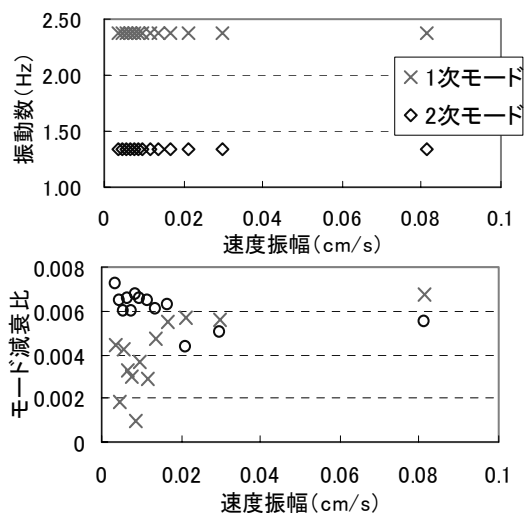


図6 振幅による同定値の変化

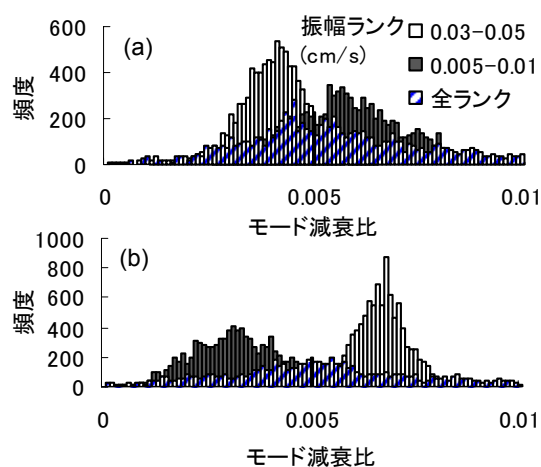


図7 ランク別の Bootstrap 分布; (a) 1 次, (b) 2 次

した 2 つのランク、振幅レベルを制限しない全ランクに Bootstrap 法を適用した (図 7)。ノイズの影響が小さいと思われる大きいランクに対してばらつきが少ないこと、振幅レベルを指定しない全ランクの減衰同定値は広くばらついており、2 つのランクの間になだらかなピークを持っていることが分かる。つまり、振幅依存性による変化幅の平均値を同定しやすいと考えられる。また、モードによる変化の違いとして 1 次モードは振幅レベルの増加に伴い減少し、2 次モードでは逆の傾向が見られる。

4. まとめ

強震振動記録および常時微動計測データを基に、構造物のモデル化、減衰評価の精緻化に関する検討を行って有用な知見を得た。今後は研究をさらに深め、構造健全度評価へと展開させる予定である。