

鉄道ラーメン高架橋の固有周期測定

○[土] 丸山 直樹 [土] 曾我部 正道 [土] 原田 和洋 [土] 谷村 幸裕 (鉄道総合技術研究所)

Measurement of Natural Period for Railway RC Rigid-Frame Viaducts

○Naoki MARUYAMA, Masamichi SOGABE, Kazuhiro HARADA, Yukihiro TANIMURA (Railway Technical Research Institute)

In this study, the authors measured elastic period of railway structure to use for seismic performance and train-running quality evaluation. 4 pick-up speed sensors were used for microtremor measurement of 56 Shinkansen structures. We clarified the following items: Firstly, we identified the first excellence cycle of structures and ground, and specified the elastic period and mode of the railway structures. Though both periods were adjacent, we can roughly identify them if we use multipoint measurement. Secondary, average ratio of a measured elastic period and a design equivalent period of rigid frame viaduct was 0.33 and standard deviation of it was 0.07.

キーワード：鉄道高架橋、等価固有周期、常時微動、耐震性能、地震時列車走行性

Keywords: railway viaducts, equivalence period, microtremor, seismic performance, train-running quality

1. はじめに

鉄道構造物の耐震設計における等価固有周期は、その耐震性能や地震時の列車走行性を左右する重要なファクターの一つである。等価固有周期は、構造物の新設設計のみならず、既設構造物の合理的な耐震診断にも有用な情報を与えることができる¹⁾²⁾。

図-1に鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計：以下、耐震標準という)のラーメン高架橋の等価固有周期の算定方法及び定義を示す¹⁾。等価固有周期は、構造物全体系(天端)に関する荷重-変位曲線上において、初降伏点への割線剛性を求め、図中の評価式にて算定される。

既に鉄道構造物においては、衝撃振動試験により弾性相当の固有周期を求め、これに基づき橋脚の健全度判定を行う手法が確立されており、測定技術や評価指標等が体系的に整理されている。とくに洗掘等、橋脚の支持条件が大きく変わる場合には、剛性の1/2乗に反比例する固有周期も有意差を持って変化するため、有効な評価指標となりうる。これらの技術は鉄道構造物の維持管理業務において既に重要な役割を担っている³⁾。

ラーメン高架橋についても、現在、体系的な標準値の整理が進められており、全体1次モードでは評価が困難な柱部材の地震被害や耐久性に関しても、より高次の部材振動モードを用いて高精度に検出する手法が提案されている⁴⁾。

一方、前述のように設計上の等価固有周期は、耐震性能や地震時の列車走行性の評価に重要であるが、測定結果からこの値を推定する手法については、体系的な報告がなされていない。測定される弾性相当の固有周期と設計上の等価固有周期の関係を明らかにし、実測からの簡易な推定法を提案することができれば、耐震診断等において一定の有益性が得られると考えられる。

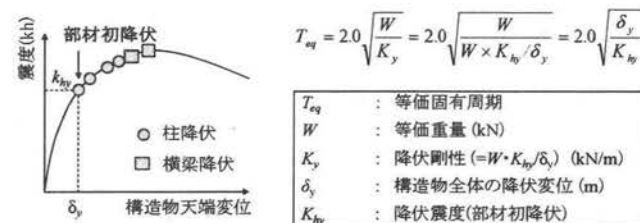
以上のような背景から、本研究では、近年建設された新幹線高架橋について着目し、以下の検討を行うことを研究の目的とした。

- (1) 常時微動計を用いた多点測定により、構造物の線路直角方向の弾性固有周期を推定する。
- (2) 得られた線路直角方向の弾性固有周期と設計上の等価固有周期との関係について整理する。

2. 検討方法

2.1 検討対象構造物

表-1に検討対象構造物の一覧を示す。写真-1に線区Aの俯瞰状況を示す。これらの構造物は、耐震標準に基づき設計されたもの



等価固有周期：構造物の静的非線形解析により得られる荷重～変位曲線において、構造物全体としての降伏点と原点を結んだ降伏剛性。構造物の全体の降伏点とは高架橋の柱などの上部構造物が最初に降伏に達する点。

図-1 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)におけるラーメン高架橋の等価固有周期の定義

表-1 検討対象構造物一覧

線区	構造物数量(基)		地盤種別	特記
	ラーメン	橋脚		
A	17	8	G5(軟弱)	杭長 40m
B	11	3	G4(普通～軟弱)	2層含む
C	10	7	G3(普通)	

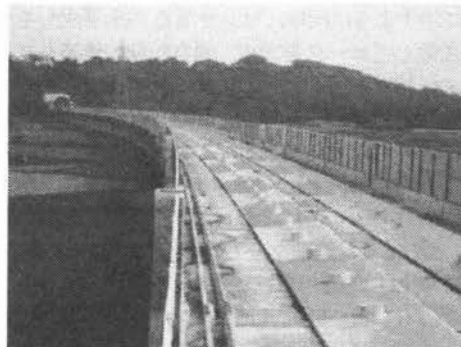


写真-1 線区Aの俯瞰状況

のであり、地域係数 1.0 の区間から、柱高さ、層構造、地盤種別を配慮して選定した。ラーメン高架橋の構造形式は全て 1 柱 1 杭形式である。本研究ではラーメン高架橋を主として対象としたが、高架橋群には架道橋等の橋脚が含まれる場合が多く、また桁式高架橋区間が混在する区間も存在するため、橋脚についても併せて測定した。

2.2 設計値

図-2 にラーメン高架橋の等価固有周期の解析手法の概念図を示す。ここで、柱、梁は、部材端部に曲げモーメント-部材角に関する非線形ばねを有する梁要素で、杭は曲げモーメント-曲率に関する非線形特性を有する梁要素で、杭周辺のばねはそれぞれ非線形ばねでモデル化される。このモデルに静的漸増荷重を行い、初降伏点を求めるものである。鉄道構造物の設計では標準設計の適用が行われるのが一般的である。従って設計上の等価固有周期が示されていない場合が多い。このような場合には、構造物の高さにより等価固有周期の線形回帰を行い、回帰線を求めたうえで個々の構造物の等価固有周期を得た。

2.3 測定値

図-3 に測定方法の概念図を示す。常時微動による構造物の微振動を 4 つの 3ch 速度計で測定した。複数のセンサを用いたのは地盤と構造物の固有振動が近接しており、またその大小関係も個々の構造物で逆転するため、モード形状を抽出しないと両者を識別できないからである。

速度センサ A は、地表面で高架橋から 5m 程度離れた位置に配置されており、これを地表面応答値とした。また地表面に置かれた測定器の鉛直成分の常時微動は工学基盤面の水平成分の常時微動に概ね等しいとする評価法が提案されている⁵⁾。そこで速度センサ A の鉛直センサを工学基盤面の水平振動成分とした。センサ C は構造物柱近傍の地表面に配置した。これは、地中梁又はフーチング上に設置されており、これを基礎の振動とみなした。センサ B, D は構造物の始点と終点に設置した。鉄道構造物は、調整桁等を解して隣接構造物と連結されており、必ずしも構造物が平行に移動しているとは限らないため、両センサにより評価を行うこととした。測定におけるサンプリングタイムは 0.002 秒とし、継続時間 30 秒のデータを整理して振動特性を抽出した。

3. 検討結果

3.1 線区測定結果

図-4 に測定結果の整理例を示す。まず図-4(a)に示すように、センサ A の水平成分をセンサ A の鉛直成分(工学基盤面水平成分に相当)で除してピークを求め、固有周期の候補をストックする。次に、図-4(b)に示すように同様にセンサ B, D の水平成分をセンサ A の水平成分で除してピークを求め、固有周期の候補をストックする。これらの候補に対してフーリエ振幅と位相からモード図を作成して、構造物と地盤の固有周期を分離した。図-4(c)に示すように、地盤卓越の最も低次に表れる 1.2 秒付近のピークから地盤の振動モードが得られる。また、図-4(d)に示すように、構造物卓越の最も低次に表れる 0.4 秒付近のピークから構造物の振動モードが得られる。このような整理を全ての構造物に対して実施したが、線区 C については、地盤の卓越ピークが識別できなかった。

図-5 に線区 A における検討結果を示す。以下、各図左縦軸には固有周期を、右縦軸には測定値と設計値の比率を示した。横軸左が起点側でセンサ B を配置した。センサ D は終点側に配置した。線区 A は G5 地盤(軟弱地盤: 地盤固有周期 0.75~1.00)であり、杭長は 38m と深い。ラーメン高架橋(R)の測定値と設計値の比率は、平均 0.36 で、0.21~0.44 の範囲であった。この線区 A では起

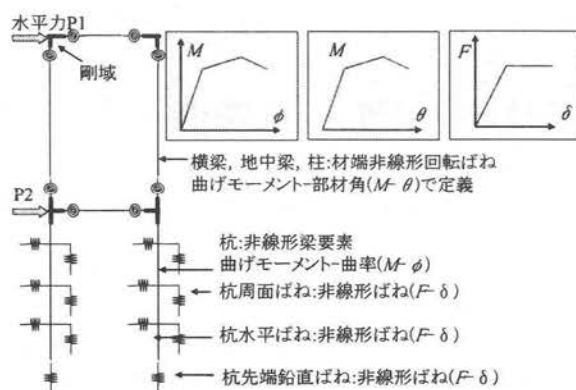
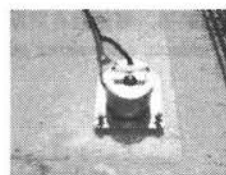
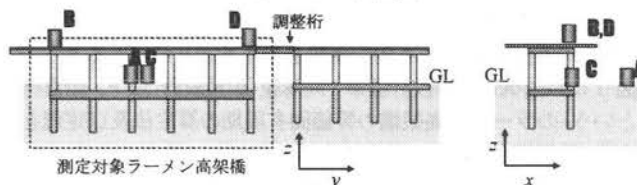


図-2 ラーメン高架橋の等価固有周期の解析手法の概念図



(a)センサ B 設置状況



(b)センサ配置状況

図-3 測定方法の概念図

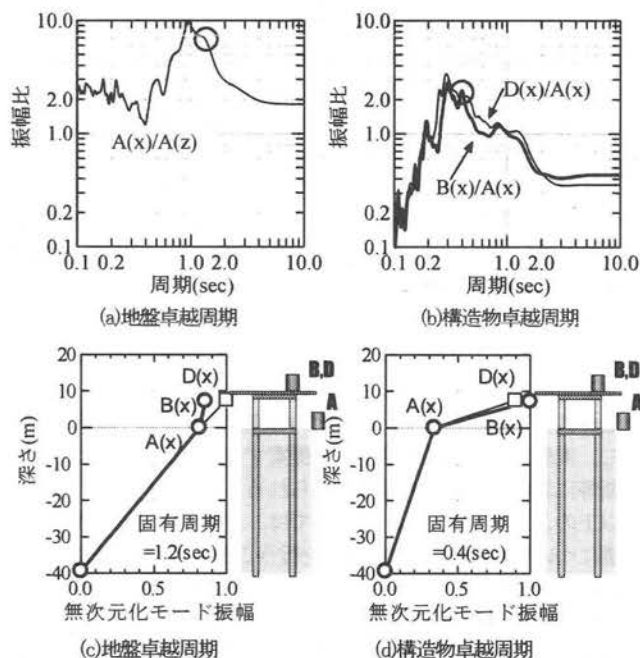


図-4 測定結果の整理例

点側から徐々に高さが高くなる傾向にあるが、測定値/設計値もこれに従って変化している。地盤の固有周期は実測値が長くなる傾向にあった。この区間の終点側は不整形地盤となっており、この影響で次第に地盤の周期が短くなっていく傾向がよみとれる。

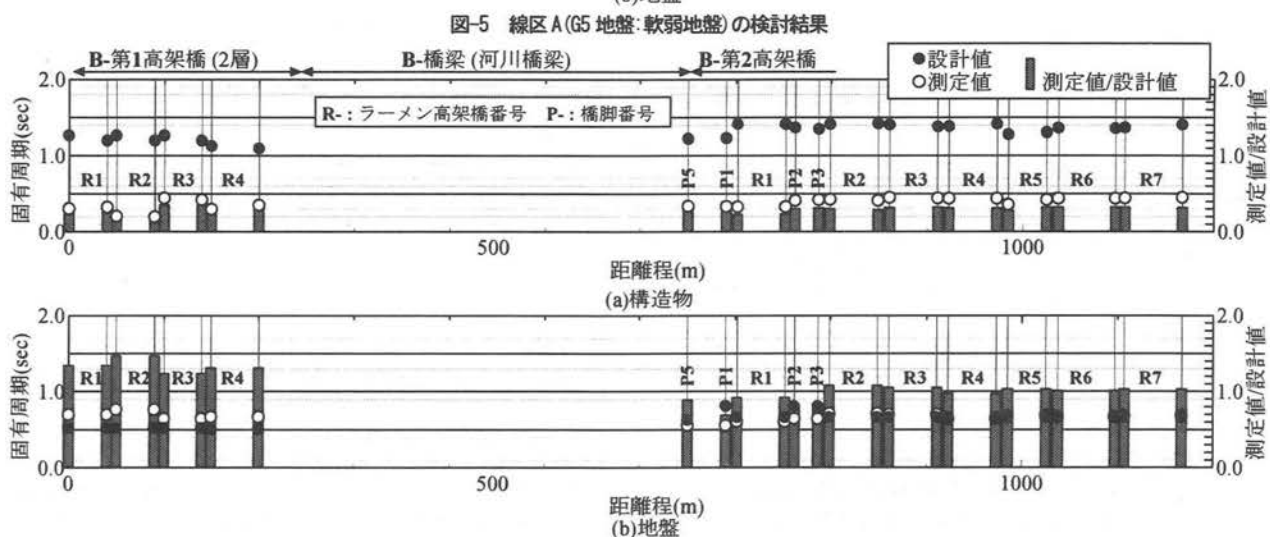
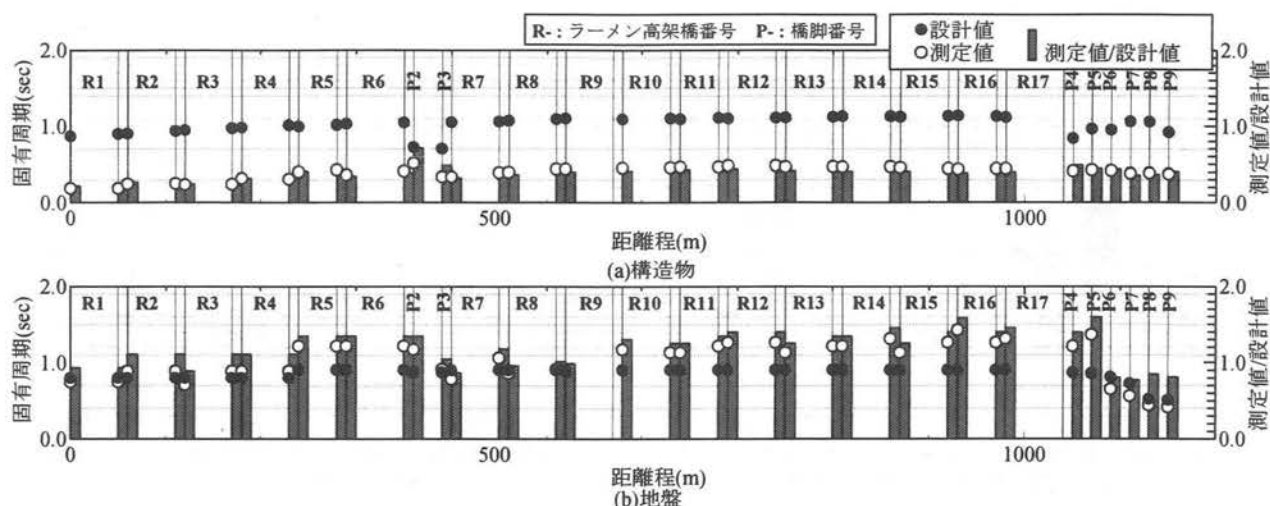


写真-2 B-第1高架橋R2(2層式)

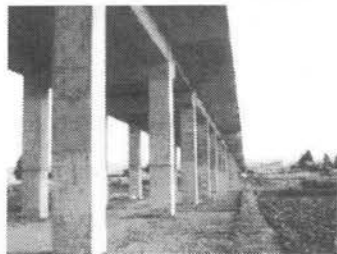


写真-3 C-第2高架橋R5

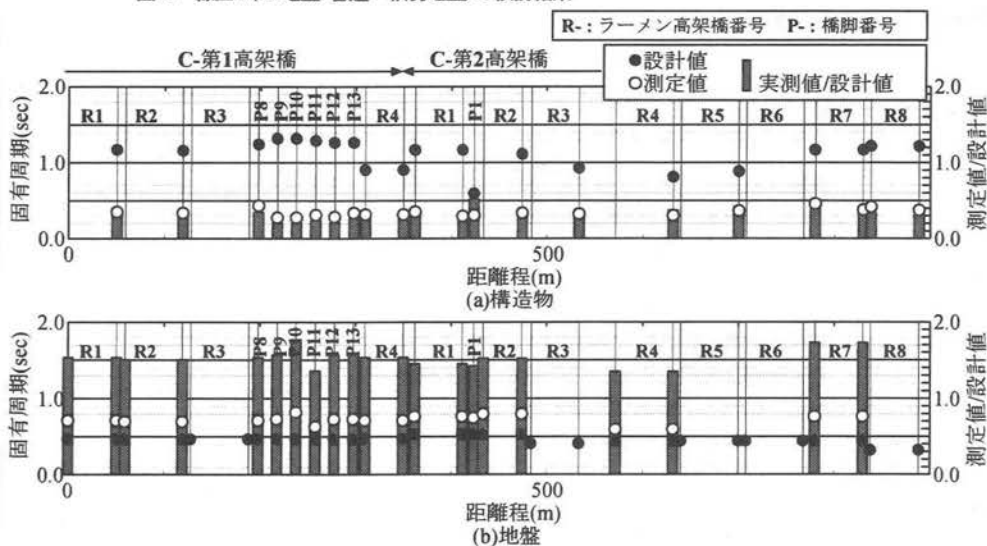


図-6に線区Bにおける検討結果を示す。線区BはG4地盤(軟弱～普通地盤:地盤固有周期0.50～0.75)である。線区Bは中央の橋長400mの河川橋梁が施工基面高さのコントロールポイントとなっている。このため橋梁の起点側は高さ14m以上の2層高架橋となっている。また橋梁の終点側は1層高架橋ではあるが、高さ12m以上と高い。写真-2に2層ラーメン高架橋の概況を示す。ラ

ーメン高架橋(R)の測定値と設計値の比率は、平均で0.29、0.16～0.35の範囲であるが、傾向までは読み取れない。地盤の固有周期は、図-5と同様に実測がやや長くなるか同程度であった。

図-7に線区Cにおける検討結果を示す。線区CはG3地盤(普通地盤:地盤固有周期0.25～0.50)である。線区Cは一層のラーメン高架橋(写真-3参照)と桁式高架橋から構成されている。ラーメン

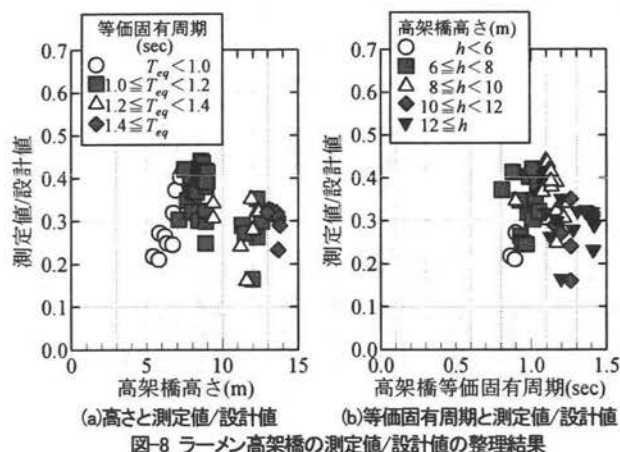


図-8 ラーメン高架橋の測定値/設計値の整理結果

高架橋(R)の測定値と設計値の比率は、平均で0.33, 0.29~0.46の範囲であるが、傾向までは読み取れない。センサBの故障のため、各ラーメン高架橋の起点側は未測定となった。地盤の固有周期は、実測が長くなる傾向にあるが、全体として振幅比 $A(x)/A(z)$ が小さく明確なピークが出る場合が少なかった。従って線区Cについては参考値と考えるのが適切であろう。

3.2 測定値/設計値の総合評価

図-8 にラーメン高架橋の測定値/設計値の整理結果を示す。高架橋の高さ、固有周期、地盤の固有周期により考察を試みたが、残念ながら一般的な傾向は見出せない。測定された弾性固有周期と設計上の等価固有周期の比率は平均0.33, 標準偏差0.07程度であった。

図-9 に橋脚の測定値/設計値の整理結果を示す。橋脚の高さ、固有周期、地盤の固有周期により考察を試みたが、残念ながら一般的な傾向は見出せない。測定された弾性固有周期と設計上の等価固有周期の比率は平均0.36, 標準偏差0.16程度であった。橋脚の方がラーメン高架橋よりもばらつきが大きい結果となった。

3.3 測定値/設計値の支配要因

これらの測定値/設計値が生じる原因については、現段階では十分に説明はできないが、以下に示すように幾つか要因が複合していると考えられる⁴⁾。

(1)地盤ばね

設計で用いられる地盤ばねはひずみレベル 10^{-3} 程度を目安に定められたものであるが、常時微動や衝撃振動試験等のひずみレベルは 10^{-6} 程度と考えられている⁶⁾。微小ひずみレベルにおける地盤ばね定数は理論式により求めることができるが、この値は設計のその概ね4~10倍程度となる。基礎の水平変位が全体系(天端)の水平変位に占める割合は大きくないが、基礎のロッキングに伴う変位も含めると、その影響は無視できない。定量的には各構造物の諸元に依存するが、一例として地盤ばねを4倍として検討したところ初期剛性で1.5~2倍程度の影響を及ぼすことが分かった。

(2)部材剛性

同様に、各部材の剛性は全断面有効剛性に近いと考えられる。この影響を考慮するためには、上記を勘案の上、静的非線形解析において、開始直後荷重ステップをモニタすればよい。定量的には各構造物の諸元に依存するが、一例として検討したところ1.5~2倍程度の影響があることが推定された。

(3)コンクリート強度

コンクリート強度とヤング係数の関係は、設計標準において定式化されているものの、そのばらつきは大きい。また、実際のコ

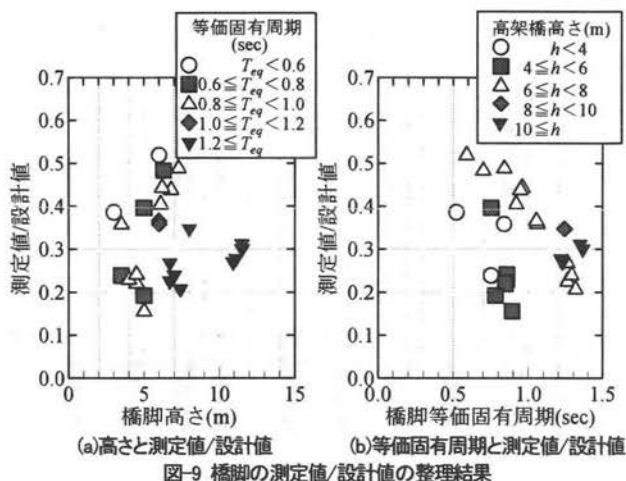


図-9 橋脚の測定値/設計値の整理結果

ンクリート強度も設計基準強度より高くなるのが一般的であり、呼び強度27に対して40N/mm²程度の強度が発現する場合も少なくない。

(4)重量

設計では、死荷重や付加死荷重の多くが安全に見込まれている。実際には設計よりも軽量で完成している可能性が高い。また設計値の算出を行う際の静的非線形解析には列車荷重も含まれているが、測定には含まれていない。

4. 結論

近年建設された新幹線高架橋について着目し、その固有周期に関して常時微動による振動測定を行った。本研究で得られた成果は以下の通り。

- (1)常時微動計を用いた多点測定により、高架橋及び地盤振動の1次卓越周期を整理し、弾性固有振動数を求めた。両者のモードは近接しているものの、多点測定を用いれば概ね識別することができる。
- (2)ラーメン高架橋における測定された弾性固有周期と設計上の等価固有周期の比率は、平均0.33, 標準偏差0.07程度であった。
- (3)橋脚における測定された弾性固有周期と設計上の等価固有周期の比率は、平均0.36, 標準偏差0.16程度であった。橋脚の方がラーメン高架橋よりもばらつきが大きい結果となった。

今後、更に測定構造物を増やすとともに、静的非線形解析により両者の差の発生原因について整理していく予定である。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－変位制限，丸善，2006。
- 3) 西村昭彦，棚村史郎：既設橋梁橋脚の健全度判定に関する研究，鉄道総研報告，Vol.3, No.8, pp.41-49, 1989
- 4) 西村昭彦：ラーメン高架橋の健全度評価法の研究，鉄道総研報告，Vol.4, No.9, pp.14-21, 1990
- 5) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定 Vol.2, No.4, pp.18-27, 1988
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説一，丸善，2006。