

論文 常時微動測定による鉄道ラーメン高架橋の等価固有周期の推定

丸山 直樹*1・曾我部正道*2・原田 和洋*1・谷村 幸裕*3

要旨: 近年建設された新幹線高架橋について着目し, 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, 弾性固有周期を求めた。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た。また, 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。さらに, 測定弾性固有周期と設計等価固有周期に差が生じる原因を整理し, 地盤ばねの倍率, コンクリート強度, 荷重ケースを考慮した補正係数を導入することにより, 測定から等価固有周期をある程度精度よく推定できることを示した。

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

1. はじめに

構造物の固有周期は, 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。鉄道構造物の耐震設計ではこの指標として等価固有周期が用いられているが, これは新設構造物の設計のみならず, 既設構造物の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)におけるラーメン高架橋の等価固有周期の算定法及び定義を示す¹⁾。等価固有周期は, 構造物全体系(天端)に関する荷重-変位曲線上における初降伏点への割線剛性から, 図中の評価式で算定される。

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測定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であり, 地域別係数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。ラーメン高架橋の基礎形式は全て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。

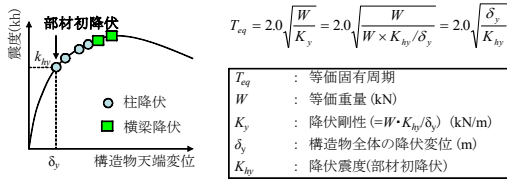
2.2 解析方法

図-2にラーメン高架橋の解析モデルの概念図を示す。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。鉄道構造物の設計では, 類似構造物への設計の適用を行うのが一般的である。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。

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 構造力学 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究室長 博(工) (正会員)



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 高架橋の等価固有周期¹⁾

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

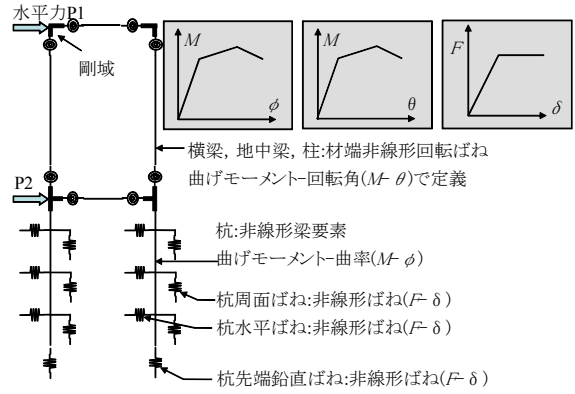
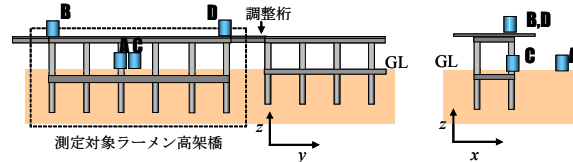


図-2 ラーメン高架橋の解析モデル



(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

2.3 測定方法

図-3に測定の方法を示す。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、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、調整桁等を介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

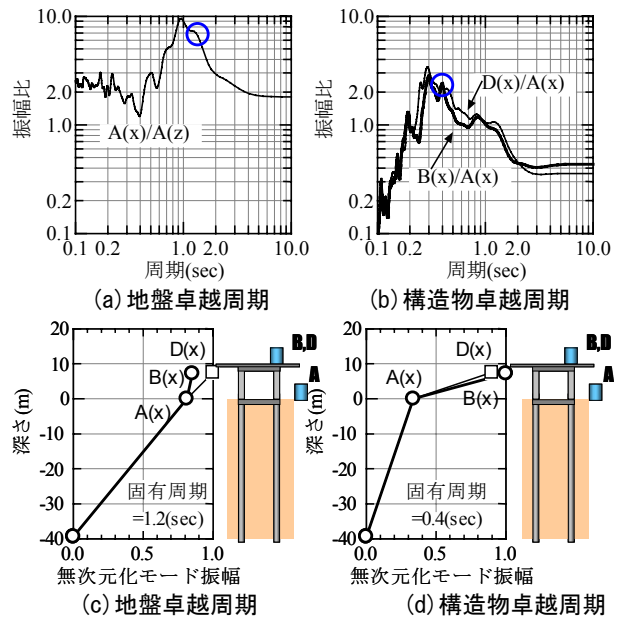


図-4 測定結果の整理例

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
 左縦軸に固有周期を、右縦軸に測定値（測定弾性固有周
 期）と設計値（設計等価固有周期）の比率を示す。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

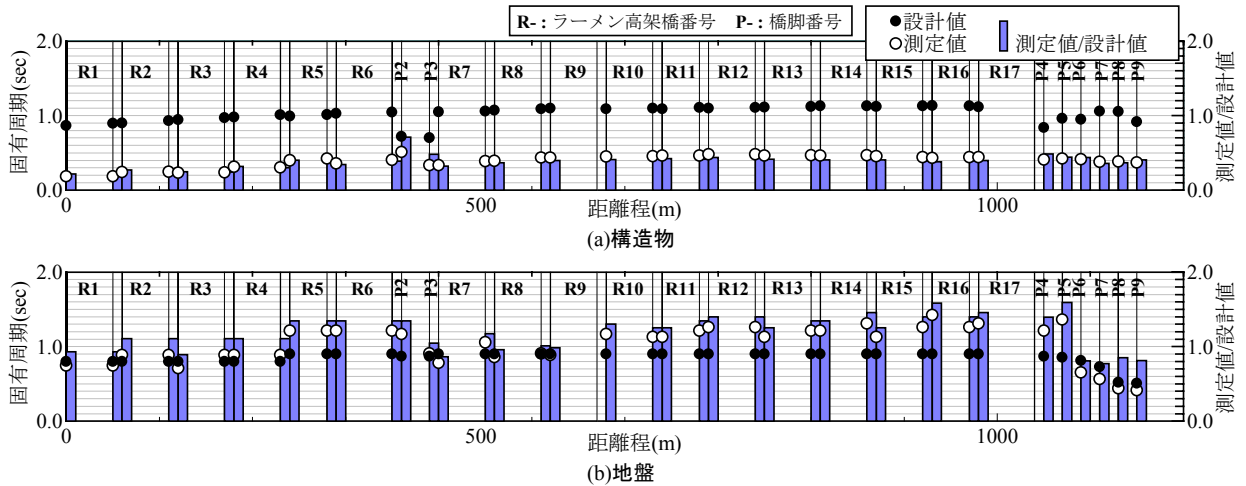


図-5 線区A(G5地盤：軟弱地盤)の検討結果

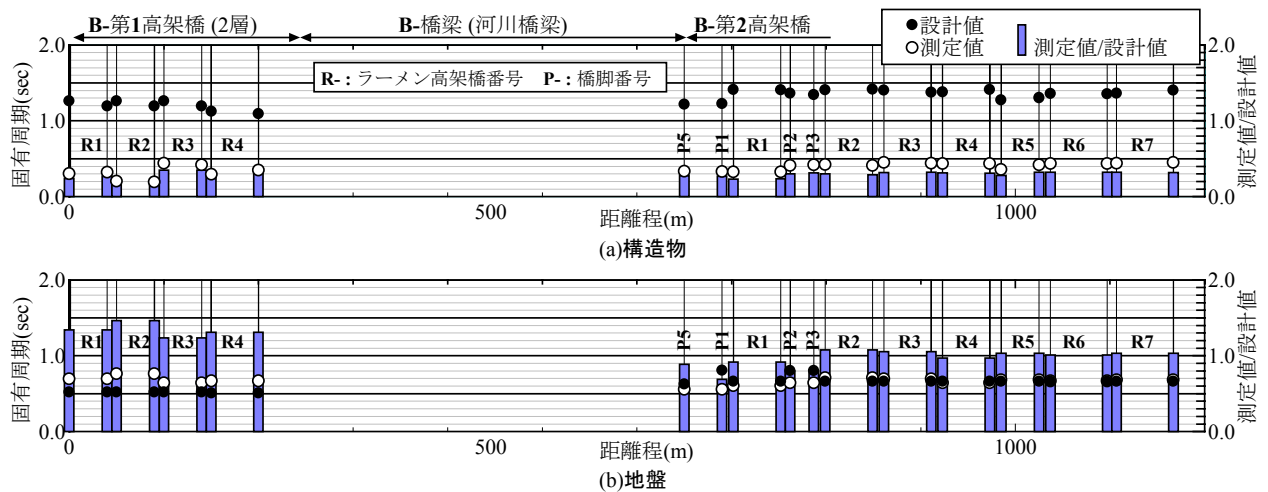


図-6 線区B(G4地盤：普通～軟弱地盤)の検討結果



写真-2 B-第1高架橋R2(2層式)



写真-3 C-第2高架橋R5

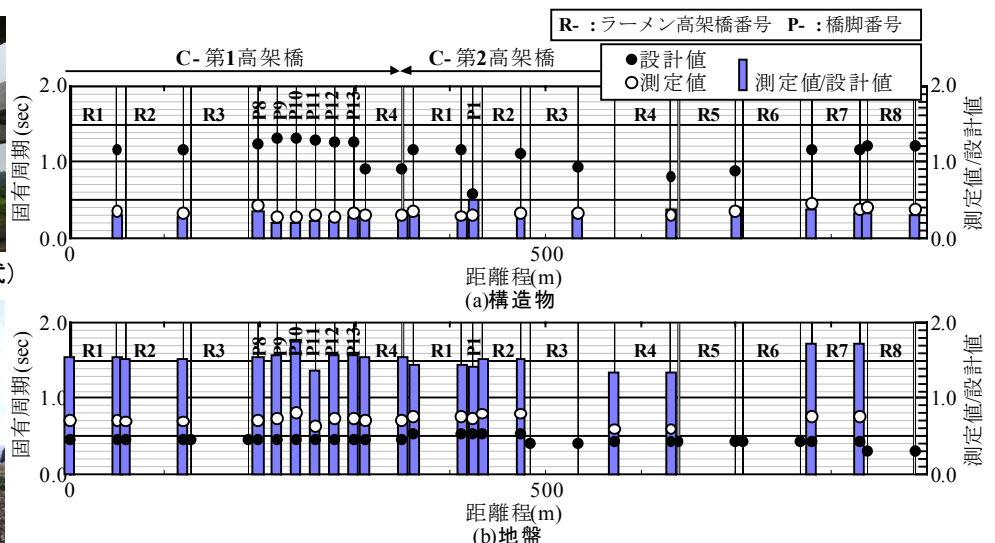
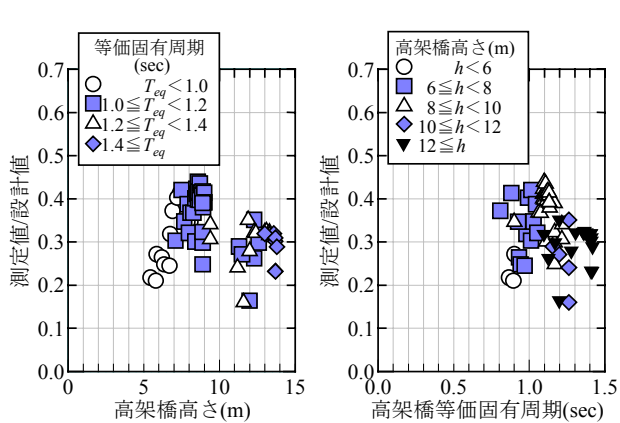
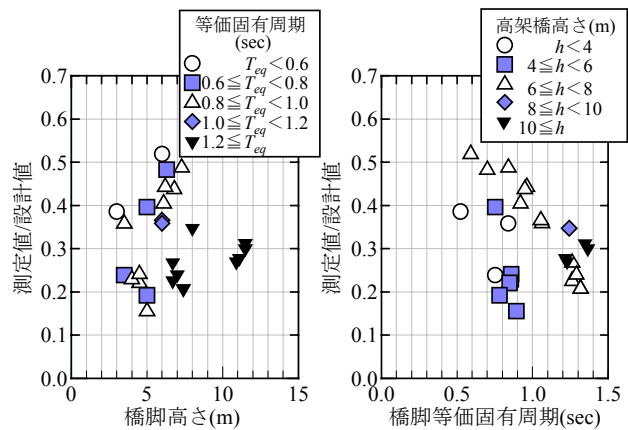


図-7 線区C(G3地盤：普通)の検討結果



(a)高さ測定値/設計値 (b)等価固有周期と測定値/設計値
図-8 ラーメン高架橋の測定値/設計値の整理結果



(a)高さ測定値/設計値 (b)等価固有周期と測定値/設計値
図-9 橋脚の測定値/設計値の整理結果

～1.00) であり、杭長は 40m 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る傾向が読み取れる。

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 層式高架橋となっている。また橋梁の終点側は 1 層式高架橋ではあるが、高さ 12m 以上と高い。写真-2 に 2 層式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 1 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、等価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、等価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。

以上の結果から限られた測定結果ではあるが、測定弾性固有周期から設計等価固有周期を簡易に推定する場合には、0.33～0.36 程度の補正係数を用いればよいと推定される。

3.3 補正係数の工学的な解釈

3.3.1 支配要因

これらの測定値と設計値で差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の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^{1),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。

(2)部材剛性

常時微動測定時において、各部材の剛性は全断面有効剛性に近いと考えられる。この影響を確認するためには、図-1 に示す静的非線形解析において、全断面有効剛性と見なせる载荷初期の荷重-変位関係を確認し、それらから固有周期を算出すると良い。

(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

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。例えば、呼び強度 27 のコンクリートではヤング係数が $20\sim 33\text{kN/mm}^2$ の範囲の値をとったという既往の調査結果がある⁷⁾。また、実際のコ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/mm^2 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、固定死荷重や付加死荷重の多くが安全側に見込まれている。また、列車荷重も含まれている。今回の測定対象の構造物は実際には設計より軽量で完成している可能性が高い。また、測定時点では軌道は敷設されておらず、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。

3.3.2 支配要因の推定

(1)解析概要

支配要因の影響を検討するため静的非線形解析を実施した。表-2 に検討対象を示す。各線区の代表的なラ

線区	構造物
線区A	R4
	R15
線区B	B1-BL
	B2-BL
線区C	C1-BL
	R4
	R8

表-4 検討結果一覧 (線区 A R4)

解析 CASE	解析条件			Teq(s)	Tin(s)
	地盤ばねの倍率	コンクリート強度(N/mm ²)	荷重ケース		
1	1	24	D+S+L	0.986	0.698
2	1	24	D+S	0.957	0.697
3	1	24	D	0.835	0.604
4	1	35	D+S+L	0.947	0.690
5	1	35	D+S	0.922	0.690
6	1	35	D	0.806	0.598
7	1	40	D+S+L	0.934	0.688
8	1	40	D+S	0.911	0.688
9	1	40	D	0.797	0.596
10	4	24	D+S+L	—	0.493
11	4	24	D+S	—	0.493
12	4	24	D	—	0.425
13	4	35	D+S+L	—	0.483
14	4	35	D+S	—	0.483
15	4	35	D	—	0.417
16	4	40	D+S+L	—	0.481
17	4	40	D+S	—	0.480
18	4	40	D	—	0.415
19	10	24	D+S+L	—	0.447
20	10	24	D+S	—	0.419
21	10	24	D	—	0.358
22	10	35	D+S+L	—	0.414
23	10	35	D+S	—	0.406
24	10	35	D	—	0.349
25	10	40	D+S+L	—	0.405
26	10	40	D+S	—	0.402
27	10	40	D	—	0.346

D: 死荷重, S: 雪荷重, L: 列車荷重

ーメン高架橋を対象とした。検討したパラメータは、支配要因と推定される地盤ばねの倍率 (3 ケース)、コンクリート強度 (3 ケース)、荷重ケース (3 ケース) をパラメータとした。これらのパラメータの違いによる影響を各ラーメン高架橋の線路直角方向の断面での静的非線形解析により検討した。

(2)解析結果

表-3 に検討結果一覧として、解析結果より求めた等価固有周期 T_{eq} と初期剛性時の固有周期 T_{in} を示す。なお、設計思想の観点から地盤ばねの倍率が 1 の場合のみ T_{eq} を示した。また、図-10 に静的非線形解析の水平変位-震度関係を示す。対象モデルは線区 A の R4 である。表-3 中の解析条件は、検討パラメータの地盤ばね、コンクリート強度、荷重ケースの順に示している。また、解析 CASE No.1 が設計値となる。

この結果より、各パラメータの影響により、 T_{eq} 、 T_{in} が異なっていることが分かる。 T_{in} は T_{eq} に比べ 30% 程度低減している。 T_{eq} において No.1 との比較を行った。荷重ケースの影響の No.3 では 15% 程度小さくなっている。コンクリート強度の影響の No.4 では 5% 程度小さくなっている。また、 T_{in} で各ケースとの比較を行った。 T_{in} における荷重ケースの影響は 20% 程度、コンクリート強度の影響は 9% 程度、地盤ばねの影響は 41% 程度であった。本検討のパラメータの幅では、地盤ばねの要因が大き

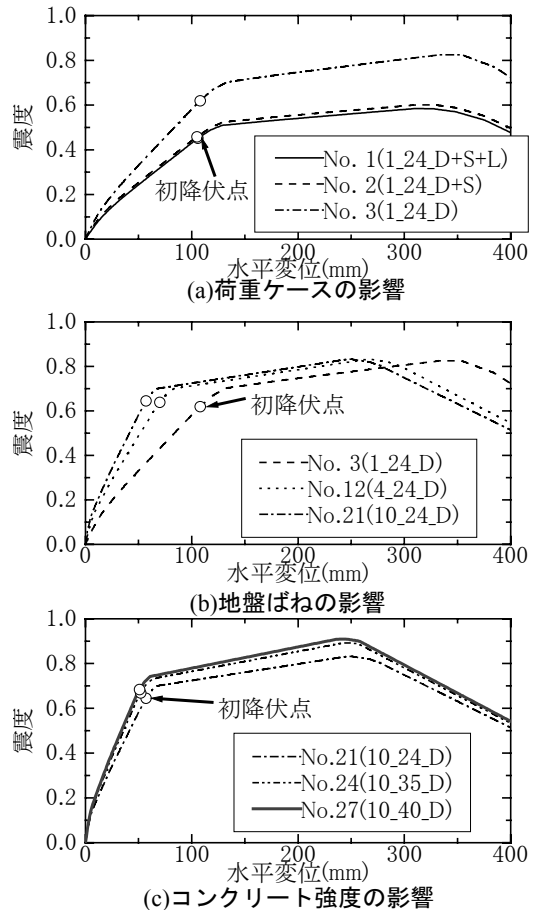


図-10 水平変位-震度関係 (線区 A R4)

影響すると考えられる。

図-11 に検討対象の固有周期の解析結果と測定値の比較を示す。この結果より、No.1 から各パラメータを変更することにより測定値に近づく傾向にあることが分かる。No.27 の T_{in} が他のケースに比べ、測定値に近いことが分かる。

表-4 に No.27 の T_{in} と測定値との比較を示す。これより、支配因子と考えられる影響を考慮することで、補正係数の工学的な意味を解釈できると考えられる。

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。
- (4)上記(2)、(3)の平均値を用いれば、一定の精度で測定弾性固有周期から設計等価固有周期を推定できると考えられる。
- (5)測定値と設計値に差が生じる原因を数値解析により整理した。地盤ばねの剛性倍率、コンクリート強度、荷重ケースを考慮することにより、補正係数の工学的な意味を説明できると考えられる。

謝辞

本研究では、鉄道総研 佐藤新二主任研究員（地震防災）、室野剛隆研究室長（耐震構造）の協力を得た。

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：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)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説

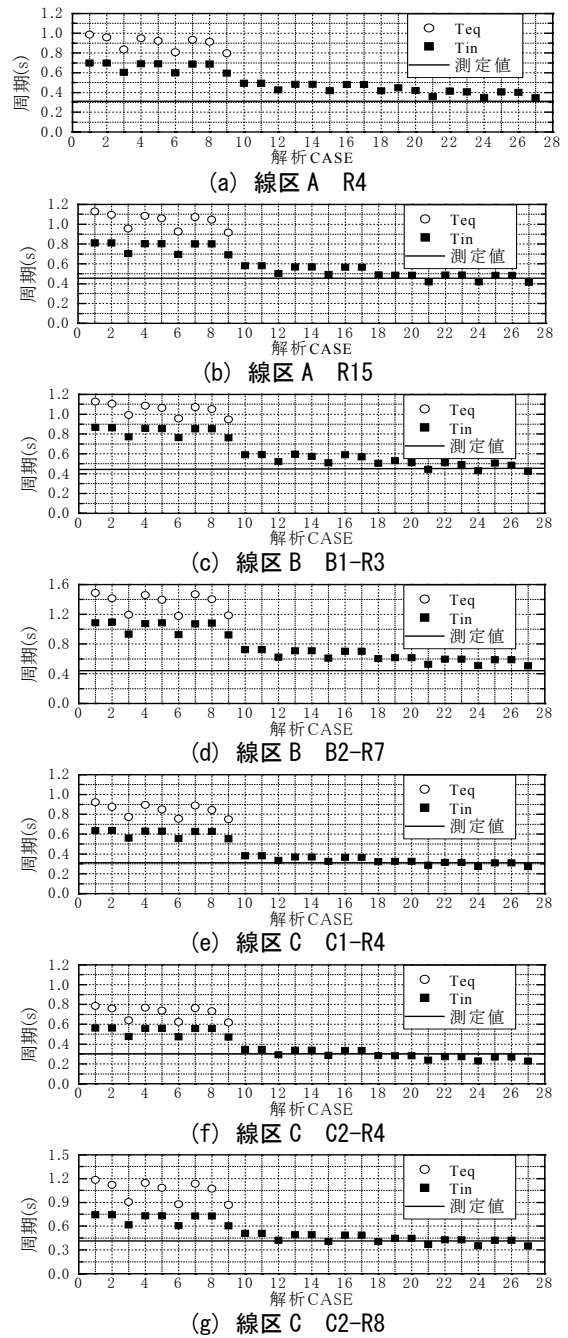


図-11 固有周期の比較

表-4 初期剛性と測定値の比較

線区	構造物	固有周期(s)		測定値/ T_{in}
		T_{in} (No.27)	測定値	
線区A	R4	0.346	0.312	0.90
	R15	0.415	0.455	1.10
線区B	B1-BL R3	0.425	0.443	1.04
	B2-BL R7	0.506	0.443	0.87
線区C	C1-BL R4	0.272	0.312	1.15
	C2-BL R4	0.229	0.301	1.32
	R8	0.349	0.415	1.19

(基礎構造物・抗土圧構造物)，丸善，2000

- 6)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，鉄道総研報告，Vol.2，No.4，pp.18-27，1988
- 7)土木学会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）改訂資料，pp.229-231,1986