# 論文 固有振動特性に着目した鉄道高架橋の健全度評価に関する研究

吉田 幸司<sup>\*1</sup>·関 雅樹<sup>\*2</sup>

要旨:多数の既存構造物の維持管理を行うためには,簡易かつ適切な健全度評価が必要であ る。本研究では,鉄道振動に着目し,一般的な箇所に比べて鉄道振動が大きい箇所の鉄道 RC ラーメン高架橋を対象に,高架橋の固有振動数を衝撃振動試験により把握し,部材の剛 性低下率等による健全度評価を実施し,柱の剛性低下を確認した。また,健全度の異なる近 接した高架橋での振動測定結果から,構造物の健全度が鉄道振動に与える影響を示し,鉄道 高架橋の健全度評価の一次抽出指標として鉄道振動の適用可能性を示した。 キーワード:固有振動数,剛性,衝撃振動試験,RC ラーメン高架橋,鉄道振動

1. はじめに

鉄道や高速道路などの既存の社会資本施設は, その多くが今後も機能を維持向上しながら供用 されていかなければならない重責を担っている。

構造物の健全性が何らかの要因によって損な われた場合,ひび割れ,列車通過時の桁や梁の たわみの増加,構造物の振動や沿線地盤振動(以 下,「鉄道振動」という。)など,他の健全な構 造物と異なる特異な現象が現れる。こうした構 造物が発信する情報を把握し,診断することが 維持管理上重要である。

一方,東海道新幹線では,健全度評価の一環と して,RC ラーメン高架橋の固有振動数に着目し, 1991 年より衝撃振動試験<sup>1)</sup>を採用して,その把 握を実施してきた。本手法は,高架橋に何らか の変状が発生した場合,固有振動数が低下する ことから,その低下度合(剛性低下度合)によ り健全度を評価するものである。一般に,健全 度評価は経時変化から判断するが,経験的,実 験的に評価式等も提案されている<sup>1)~3)</sup>。

そこで、本研究では、鉄道振動に着目し、鉄道 振動が他と比較して大きい特異な現象から構造 物の健全度評価への可能性を見出すため、一般 的な箇所に比べて鉄道振動が 5~8dB 大きい箇 所の RC ラーメン高架橋を対象に衝撃振動試験 を実施し,固有振動数の測定結果を用いた健全 度評価を実施した。また,健全度が異なる高架 橋にて振動測定を実施し,剛性低下が鉄道振動 に与える影響を検討した。

# 2. 固有振動特性に着目した健全度評価

## 1 衝撃振動試験の概要

本研究で測定対象とした RC ラーメン高架橋の標準形式を図-1 に示す。

衝撃振動試験では、図-2に示す高架橋の橋軸 直角方向の振動モード形状での固有振動数を得 ることを目的に、各々のモード形状を励起する よう、全体系は高架橋の中央部天端を重錘にて、



\*1 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 構造物チーム研究員 工修 (正会員) \*2 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 チームマネージャー 博(工) (正会員)



表-1 対象高架橋の諸元

No.	柱断面寸法 (m)	高さ(m)	基礎種別	杭長(m)	
A高架橋	0.6 × 0.6	7.0	RC杭	18.0	
B高架橋	0.6 × 0.6	6.5	RC杭	10.0	
C高架橋	0.6 × 0.6	6.5	RC杭	10.0	
D高架橋	0.6 × 0.7	7.0	直接基礎	-	
E高架橋	0.6 × 0.7	7.0	直接基礎	_	

柱部分系は柱中間部を掛矢にて、それぞれ橋軸 直角方向に強制振動させ(図-1 矢印)、速度計 センサーにより応答波形を測定する。また、い ずれも10回の測定結果による波形を重ね合わせ て、フーリエ解析し、卓越する固有振動数を算 出する。

#### 2.2 健全度判定の対象高架橋

一般的な箇所に比べて鉄道振動が振動レベル (VL)で5~8dB大きい箇所のRCラーメン高架 橋として,A,B,C高架橋の3つの高架橋ブロ ックを対象に衝撃振動試験を実施した。ここで, 表-1に健全度判定の対象高架橋の諸元を示す。 なお,表-1には,後述する詳細な振動測定を実 施した箇所をあわせて表記している。

各高架橋の構造形式は,図-1に示すような1 層 2 柱式 3 径間の複線ラーメン高架橋であり, 軌道構造はバラスト軌道である.いずれの高架 橋も柱断面 0.6m×0.6m, RC 杭基礎形式で,A 高 架橋は高さ 7.0m, 杭長 18.0m, 地盤は軟弱なシ ルト層,砂層からなり,地盤固有周期が 0.65sec の軟弱地盤である。また,B,C 高架橋は高さ 6.5m, 杭長 10.0m, 砂層地盤で固有周期が 0.33sec の普

表-2 衝撃振動試験結果

検討対象	実測固有振動数(Hz)					
	全体系	柱部分系2次				
	1次	1P	2P	3P	4P	
A高架橋	2.0	50.0	51.0	49.0	50.0	
B高架橋	2.5	61.0	60.0	59.0	61.0	
C高架橋	2.5	62.0	62.0	62.0	61.0	

通地盤である。

これらの各高架橋に対して、衝撃振動試験を 実施し、全体系1次モード、柱部分系2次モー ドの固有振動数を測定した。

## 2.3 衝撃振動試験による健全度評価

衝撃振動試験の結果を表-2に示す。また,各 高架橋の健全度評価は,衝撃振動試験で得られ た全体系1次モード,柱部分系2次モードの固 有振動数を用いて,既往の知見を参考に,あら かじめ柱の剛性低下,地盤ばね定数の変化をパ ラメトリック解析して柱断面,高さ毎に図式化 した RC ラーメン高架橋ノモグラム<sup>4)</sup>を活用し て評価した。

図-3 にノモグラムによる健全度評価の例と して、A 高架橋での評価を示す。健全度評価の 結果、A 高架橋の健全度は、柱の剛性が 30%以 下に低下しているものと考えられる。ここで、 柱剛性低下率は、柱の剛性:EI=100%(健全)、 60%(軸方向鉄筋位置までのひび割れ)、30%(曲 げ降伏相当)、3%(曲げ最大荷重相当)と想定<sup>4)</sup> している。それゆえ、A 高架橋では、軸方向鉄 筋位置以深のひび割れが発生していると想定さ れる。なお、現地高架橋を目視にて確認すると、 柱下部に打継ぎ目があり、この部分に補修の痕 跡が見られ、この影響と考えられる。

また, B, C 高架橋の健全度についても, 同様 に評価した結果, それぞれ, 60%~30%の範囲に プロットでき, 柱の剛性が低下している健全度 評価結果となった。そのため, 柱には軸方向鉄 筋位置付近までのひび割れが生じていると考え られる。なお, 現地での目視検査では該当する ひび割れ等を確認できてはいない。



(A 高架橋)

各高架橋とも,現状の供用条件における維持 管理レベルからは機能低下は認められないが, いずれも柱の剛性低下が想定された。特に A 高 架橋については,過去の補修部付近また地中部 も含め詳細調査と調査結果を踏まえた対策を実 施することとしたい。

## 2. 4 健全度評価解析

次に,前節での健全度評価結果を深度化する ため,解析的検討を実施した。一般に,衝撃振 動試験結果を用いた健全度評価の逆解析手法と しては,固有値解析が用いられるが,ここでは, 衝撃振動試験をそのままシミュレートする衝撃 荷重による時刻歴応答解析<sup>4)</sup>を実施した。

高架橋の着目位置における応答速度波形とフ ーリエスペクトル・位相差スペクトルの実測値 と解析値とを一致させるように設計基準  $^{56}$ より 設定した柱剛性と地盤ばね定数の初期値を変化 させ、柱の剛性(EI)と地盤ばね定数(K<sub>h</sub>, K<sub>v</sub>, K<sub>r</sub>)を算出する。なお、解析モデルは、2次元ば ね・質点系の振動モデルで、図-4 に A 高架橋 の解析モデルを一例として示す。また、時刻歴 応答解析は直接積分法(ニューマークβ法)、積 分時間間隔は 0.002sec で、衝撃荷重の入力位 置・応答値の着目位置を図-5 に、入力する衝撃 力を図-6 に示す。



図-4 解析モデルの例(A高架橋)





図-6 衝撃荷重波形のモデル

表-3 応答解析結果

検討対象。	剛性初期値に対する倍率					地盤ばね初期値に 対する倍率			
	剛域	柱		1# 2m		水平	鉛直	回転	
		上端	中間	下端	傾采	フーチンク	ばね	ばね	ばね
A高架橋	1.0	1.0	1.0	0.1	10.0	1.0	13.5	37.0	37.0
B高架橋	1.0	1.0	1.0	0.4	10.0	1.0	4.0	4.0	4.0
C高架橋	1.0	1.0	1.0	0.4	10.0	1.0	4.0	4.0	4.0

応答解析を行った結果を表-3に、また、解析 例として、A 高架橋の応答速度波形、フーリエ スペクトル、位相差スペクトルについて、実測 値を図-7、解析値を図-8にそれぞれ示す。



図-7 衝撃振動試験実測値の例(A高架橋)

図-7,図-8の比較から、応答解析結果のフ ーリエスペクトル形状、ならびに位相差スペク トルについて、概ね実測値に整合しており、妥 当なシミュレート結果であると考えられる。ま た、算出した柱剛性低下率と地盤ばね定数の倍 率から、健全度評価ができる。なお、横梁の剛 性を10倍に設定しているが、これは、高架橋の 3次元性を考慮し、スラブや縦梁の影響を見込ん だものである。また、設計基準<sup>6</sup>により算出され る地盤ばね定数の初期値はひずみレベルの大き い地震時のばね定数(10<sup>-2</sup>レベル)であり、衝撃 振動試験時のようなひずみレベルの小さい(10<sup>6</sup> ~10<sup>4</sup>レベル)場合とは異なることを考慮して倍 率を乗じている。

表-3の応答解析結果から、A 高架橋の健全度 は柱下端付近の剛性が 10%程度まで低下してお り、前節での健全度評価と整合する。また、B, C 高架橋の健全度は柱下端付近の剛性が 40%程



度に低下しており,これらもまた,前節の健全 度評価と整合する。

一般的な箇所に比べて鉄道振動が大きい箇所 の高架橋について健全度評価を実施し,いずれ も柱の剛性低下と判断された。一般に,鉄道振 動には,車両,構造物,基礎ならびに地盤のそ れぞれの特性が相互に影響するため,一概には 言えないが,鉄道振動の大きい箇所では,構造 物の健全度が鉄道振動に影響している可能性を 含めて,検討していくのがよいと考える。

#### 3. 高架橋健全度と鉄道振動

#### 3. 1 振動測定概要

東海道新幹線では健全度の把握のために衝撃 振動試験を実施していることは先にも述べたが, 測定により得られた固有振動数から,同じよう な構造諸元であっても,他と異なる値となる場 合がある。 そこで、これまでの検討とは逆の手順で健全 度と鉄道振動との関連について検討することと し、実際に曲げひび割れ等の変状が確認され、 剛性が低下していると想定された特殊な高架橋 例(D高架橋)について、詳細な振動測定を実 施した。なお、比較のためD高架橋と構造形式 が同一かつ建設位置が比較的近接し、健全な高 架橋であるE高架橋を選定した。いずれの高架 橋も柱断面0.6m×0.7m、高さ7.0mの直接基礎形 式である。また、地盤はいずれも洪積層の良好 な地盤で、地盤の固有周期が0.17secである。

振動測定の概要を図-9に示す。測定点は,柱 上部,柱直下の地盤面,構造物中心から 12.5m および 25.0m 離れた地盤面である。それぞれの 地点で,線路方向,線路直角方向および鉛直成 分(以下,それぞれ,X,Y,Z成分とする)の 3 成分の振動レベルと振動加速度レベルを測定 した。沿線振動問題では,水平,垂直のそれぞ れに人体感覚補正を行った振動レベルの最大値 による評価が実務上重要となるため,指標とし て,振動加速度レベル(VAL)を補正した実効 値(すなわち,振動レベル(VL))を用いた。ま た,振動レベルは列車速度と輪重の違いにより 異なる値を示す。したがって,測定列車は,速 度と軸重の異なる 100 系車両(最高速度 220km/hr, 軸重 16.0t) と 300 系(700 系)車両(最高速度



270km/hr, 軸重 11.4t)の2 種類で実施した。

なお,測定の都合上,D高架橋は下り線側,E 高架橋は上り線側にて振動測定を実施した。

#### 3.2 振動測定結果と考察

測定対象としたD高架橋とE高架橋において, 健全度の比較として衝撃振動試験を実施し,測 定した固有振動数から剛性低下率を算出した。 その結果,一部に変状のあるD高架橋は,健全 であるE高架橋に対し60%程度の剛性である。

この健全度の差異が沿線振動に与える影響を 振動測定の実測結果から考察する。

高架橋の振動レベルの測定結果を図-10 に示 す。なお, 比較にあたっては, それぞれ振動測 定側の列車走行時の振動測定結果(D 高架橋は 下り線走行時, E 高架橋は上り線走行時)を比較 している。振動レベル値は, 同種車両でほぼ同 じ速度域にある複数の振動測定データの振動レ



ベル最大値(VLmax)の平均である。

図-10から、X、Y 方向の振動レベルは 12.5m の場合を除き、ほぼ同様であるのに対し、Z 方向 の振動レベルは、剛性の低い特殊な高架橋の方 が大きい傾向を示している。なお、E 高架橋(健 全な高架橋)の 12.5m での水平成分の測定結果 が大きい結果となっているが、その原因は水平 振動に対して現地の地表付近での特殊な地盤伝 達条件によると思われる。

このように、変状等により構造物の剛性が低下 した特殊な高架橋では、健全な高架橋に比べて 振動レベルが大きくなると考えられる。したが って、振動レベル増大の要因の一つに構造物の 健全性が影響するのであれば、振動レベルが他 に比べて大きい高架橋には何らかの変状が発生 していると推定して、詳細な検査を実施するた めの一次抽出指標として活用できる可能がある と考える。

## 4. まとめ

衝撃振動試験による RC ラーメン高架橋の固 有振動数測定結果を用いた健全度評価に関する 研究より,以下の知見を得た。

(1)一般的な箇所に比べて鉄道振動が大きい 区間の高架橋3ブロックについて検討した結果, 現状の供用条件における維持管理レベルからは 機能低下は認められないが,いずれも柱の剛性 低下が想定された。このことから,鉄道振動の 大きい箇所では,構造物の健全度が鉄道振動に 影響している可能性を含めて検討していくのが よい。

(2)構造形式,地盤条件が同一で,健全度に 差異のある高架橋の振動測定結果から,変状等 により構造物の剛性が低下し,固有振動数に他 と異なる傾向が伺える特殊な高架橋では,振動 レベルが大きくなる可能性があることが確認で きた。振動レベルが他に比べて大きい高架橋に は何らかの変状が発生していると推定して,詳 細な検査を実施するための一次抽出指標として 活用できる可能がある。 多くの既存構造物を適切に維持管理していく には、構造物が発信する様々な情報を捉え、判 断していくことが必要である。本研究では、鉄 道振動が大きいという情報を詳細検査の一次抽 出に用いうる可能性を示し、また、抽出した構 造物の詳細な判定手法の一つとして固有振動特 性に着目した衝撃振動試験による健全度判定手 法を示した。いずれも、今後の実測データの蓄 積と更なる研究を要する部分もあるが、今後の 維持管理の一助になれば幸いである。

# 謝辞

本研究にあたり,株式会社福山コンサルタン ト東日本事業部都市設計部次長の中野聡氏にご 協力を賜り,ここに記して謝意を表します.

# 参考文献

- 西村昭彦: ラーメン高架橋の健全度評価手法 の研究,鉄道総研報告, Vol.3, No.9, 1990.9
- 2) 関 雅樹,水谷健太,中野 聡,西村昭彦: 兵庫県南部地震によるラーメン高架橋の振 動特性に関する考察,土木学会論文集, No.550, V-33, pp.145-153, 1996.1
- Seki,M., Tsutsumi,Y., Mizutani,K., Nishimura,A., Nakano,S. : An Evaluation Method of the Serviceability of Rigid Frame Bridges in Tokaido Shinkansen, WCRR, pp.531-537, FIRENZE16-19, Vol.B, Nov.1997
- 田中宏昌,関 雅樹,下村 勝,中野 聡: ラーメン高架橋の健全度に関わる柱の剛性 評価法の研究,構造工学論文集, Vol.47A, pp.1019-1028, 2001.3
- 5) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物),丸善, 1999.10
- 6) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・抗土圧構造物), 丸善,1997.3