

地震により被災した鉄道高架橋に対する健全度判定

阪急エンジニアリング株式会社 正会員 上野勝大
 阪急電鉄株式会社 奥野雅弘
 阪急エンジニアリング株式会社 門田清人
 阪急エンジニアリング株式会社 正会員 庄 健介

1. はじめに

阪急電鉄伊丹線は兵庫県南部地震により伊丹駅のラーメン高架橋が倒壊する等、多大な被害を受けた。これらの震災復旧に当たり、倒壊した伊丹駅は全面的に再構築を行ったが、伊丹駅への取付区間にあたる伊丹高架橋（伊丹第一高架橋～伊丹第三高架橋）については、主に高架橋柱に損傷を受けたものの、倒壊には至っておらず、ひび割れ部の樹脂注入あるいは鋼板巻立て補強等により復旧工事を行った。

伊丹駅については、震災後の復旧仕様にもとづいて一から再構築されるため、運転再開に対する安全性は十分に確保できる。一方、補修、補強工事のみにより復旧を行った伊丹高架橋については、運転再開を決定するにあたり、何らかの適切な方法により構造物の健全性を評価しておく必要がある。

本報告は、こういった観点から、伊丹線の運転再開を決定する際に、伊丹高架橋に対して実施した健全度判定事例について報告するものである。なお、今回の健全度判定では、衝撃振動試験並びに列車載荷時の変位計測を行った上で、これらの調査結果を総合的に判断して健全性を評価している。

2. 伊丹高架橋の構造概要

阪急電鉄伊丹線は、大正9年に開業した、阪急電鉄神戸線塚口駅と北方の伊丹駅をつなぐ延長約3.1kmの路線である。このうち伊丹駅（高架駅）及び伊丹高架橋（伊丹第一高架橋～伊丹第三高架橋）は昭和43年に伊丹駅高架化工事に伴い構築されたもので、供用後、約30年が経過している（伊丹駅は震災後再構築している）。

今回、健全度判定を行った伊丹高架橋（伊丹第一高架橋～伊丹第三高架橋）は、1径間～3径間の複線2柱式RCラーメン高架橋9基で構成されており、基礎形式はすべて直接基礎である。本高架橋区間は伊丹駅（高架駅）への取付区間であることからそのほとんどが勾配区間にあり、比較的柱高が高くなる伊丹第二高架橋及び伊丹第三高架橋については、中間梁が設置されている。また、震災後の目視検査により損傷度合が激しいと判断された高架橋柱については、鋼板巻立てにより補強工事が行われている。また、健全と判断される柱についても、緊急耐震補強として、必要に応じてスパイラル筋により巻き立て補強が行われている。表-1に構造概要の一覧を、図-1に全体一般図を示す。

表-1 構造概要一覧

高架橋名	ラーメン番号	径間数	径間長(m)	高架高さ(m)	基礎形式	支持地盤N値	中間梁の有無	柱補強の有無	補強方法
伊丹第一高架橋	RA-1N	1径間	6.0	5.221	直接基礎	30	無し	有り	スパイラル筋巻き立て
	R-1	3径間	6.0	5.878	直接基礎	30	無し	有り	スパイラル筋巻き立て
	R-2	3径間	6.0	6.622	直接基礎	30	無し	無し	—
	R-3	3径間	6.0	7.366	直接基礎	30	無し	無し	—
	R-4	3径間	6.0	8.079	直接基礎	30	無し	無し	—
伊丹第二高架橋	R-5	2径間	7.3	8.437	直接基礎	30	有り	有り	鋼板巻立て
	R-6	3径間	7.3	8.836	直接基礎	30	有り	有り	鋼板巻立て
伊丹第三高架橋	R-7	3径間	7.3	9.156	直接基礎	30	有り	無し	—
	R-8	3径間	7.3	9.151	直接基礎	30	有り	無し	—

キーワード：健全度判定、衝撃振動試験、固有振動数、固有値解析、変位計測

連絡先：〒530-0012 大阪市北区芝田 1-4-8-4F TEL.(06)6359-2756 FAX.(06)6359-2762

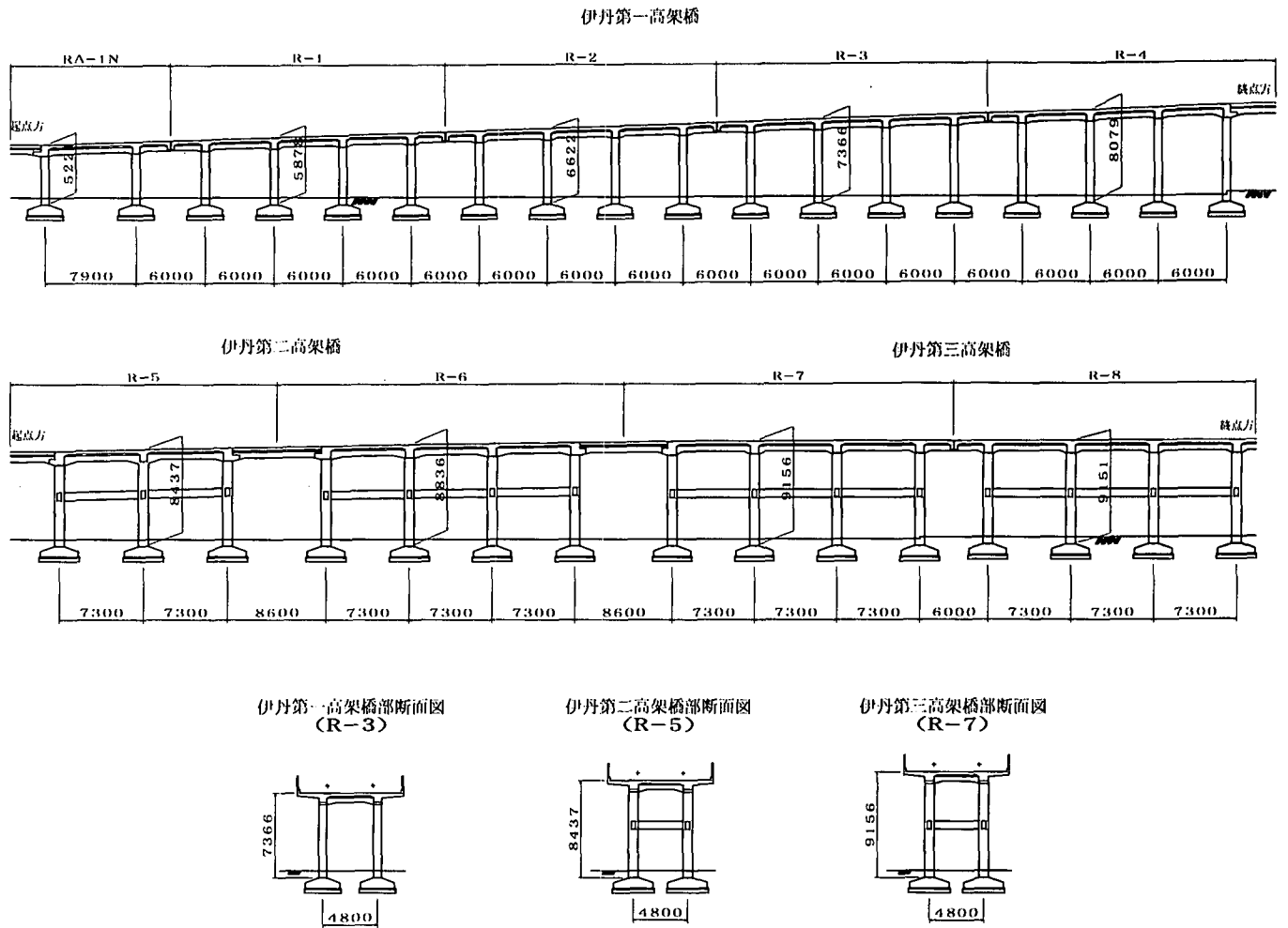


図-1 高架橋一般図

3. 健全度判定の手順

今回行った健全度判定では、まず、基礎及び躯体（主に柱、横梁）についての健全性を評価することを目的に衝撃振動試験を実施した。また、衝撃振動試験が主に線路直角方向について健全性を評価していることから、線路方向（主に縦梁）についてさらなる評価を加えておく必要があると考え、試験列車載荷時の変位計測を実施した。判定の手順は以下に示す通りである。

(1) 衝撃振動試験

- ① 衝撃振動試験により各ラーメン高架橋の固有振動数を測定する。
- ② まず、(財) 鉄道総合技術研究所が提案する固有振動数の標準値により実測固有振動数を評価する。
- ③ さらに、固有値解析により実測固有振動数を評価する。
- ④ 固有値解析で得られた躯体の曲げ剛性及び地盤バネ定数により、構造物の健全性を評価する。

(2) 列車載荷時の変位計測

- ① 計算により試験列車載荷状態における支点（柱）沈下量並びに縦桁のたわみ量を求める。
- ② 試験列車通過時における支点沈下量および縦梁のたわみ量を実測する。
- ③ 計算値と実測値の比較を行うことにより、構造物の健全性を評価する。

(3) 総合評価

衝撃振動試験並びに列車載荷時の変位計測の結果を総合的に評価して、本高架橋が運転再開に対する十分な健全性を確保しているかどうかを判断する。

4. 衝撃振動試験による健全度判定

(1)固有振動数の測定

本調査では、図-2 に示すように、ラーメン高架橋の天端を線路直角方向に重錘で打撃し、高架橋の速度応答を測定する衝撃振動試験により、各ラーメン高架橋の固有振動数を測定した。固有振動数の特定は、衝撃振動試験により測定した速度応答にフーリエ解析を実施した後、位相角が 180° となるピーク振動数を固有振動数として読み取る。

試験にあたっての速度応答測定位置は、径間中央柱（奇数径間の場合は原則として起点方の柱）の上端、中央、下端および径間両端の柱上端の合計5箇所を基本とした（図-2 参照）。ただし、RA-1N、R-6、R-7、R-8 のラーメン高架橋4基については、高架下店舗あるいは、その他の障害物等により柱中央及び下端の速度応答は測定できなかった。各ラーメン高架橋の応答波形測定位置一覧を表-2 に示す。

表-2 速度応答波形測定位置一覧

高架橋名	ラーメン番号	測点1 径間中央 柱上端	測点2 径間中央 柱中央	測点3 径間中央 柱下端	測点4 起点方柱 上端	測点5 終点方柱 上端
伊丹第一高架橋	RA-1N	○	×	×	○	○
	R-1	○	○	○	○	○
	R-2	○	○	○	○	○
	R-3	○	○	○	○	○
	R-4	○	○	○	○	○
伊丹第二高架橋	R-5	○	×	×	○	○
	R-6	○	×	×	○	○
伊丹第三高架橋	R-7	○	×	×	○	○
	R-8	○	×	×	○	○

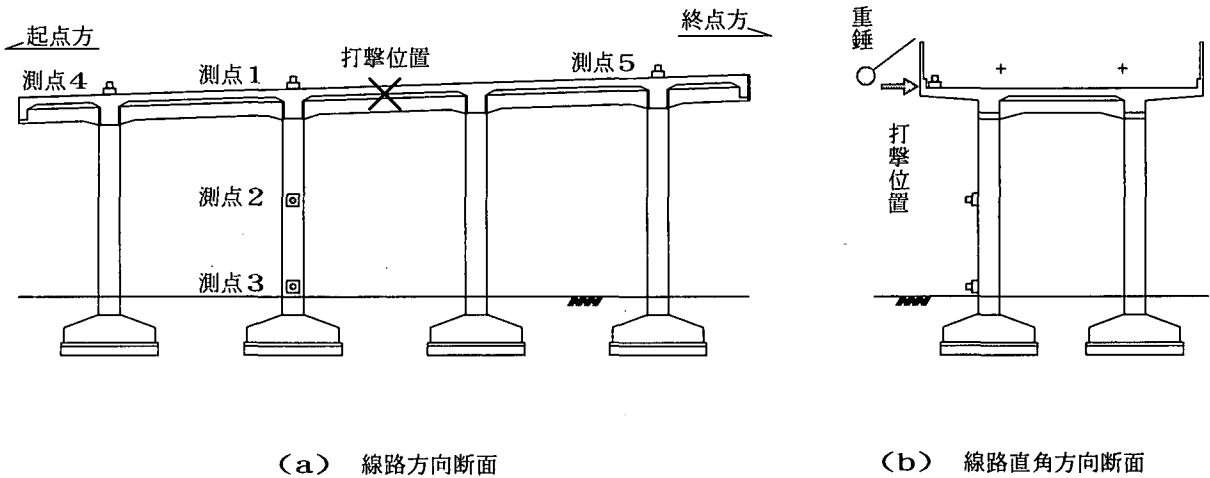


図-2 測定概要図

(2)測定結果

衝撃振動試験により求められた各ラーメン高架橋の固有振動数一覧を表-3 に示す。本調査箇所は、連続したラーメン高架橋区間にもかかわらず、固有振動数は若干ばらつきのある結果となっている。これは中間梁や柱補強の有無等の構造形式の違い、地盤強度の変化、損傷の度合い等により生じたものと推測されるが、一次の固有振動数のみでこれらを判別することは難しい。

なお、ここで示す固有振動数は、表-1 で示した各ラーメン高架橋柱の補強工事完了後に実施した衝撃振動試験により得られたものである。ただし、R-1 については、別途、補強前に衝撃振動試験を行っていたため、この結果を併せて表-3 に示す。補強後に行った衝撃振動試験で得られた固有振動数は、補強前の固有振動数を上回っており、補強の効果が固有振動数の向上により確認することができる。

表-3 固有振動数一覧

高架橋名	ラーメン番号	固有振動数 (Hz)
伊丹第一高架橋	RA-1N	4.9
	R-1(補強前)	3.3
	R-1(補強後)	3.8
	R-2	2.8
	R-3	2.3
伊丹第二高架橋	R-4	2.3
	R-5	3.4
伊丹第三高架橋	R-6	3.7
	R-7	2.8
	R-8	3.9

(3)固有振動数の標準値による評価

衝撃振動試験により実測した固有振動数を(財)鉄道総合技術研究所（以降、鉄道総研と略称する）が提案する固有振動数の標準値並びに健全度指標により評価したり。ここで固有振動数の標準値とは、鉄道総研が過去に実施した衝撃振動試験のデータをもとに、統計解析を行って作成した算定式により算定される振動数で、直接基礎形式のラーメン高架橋では、高架橋高さや支持地盤のN値のみでその値が与えられる。また、健全度指標とは、実測値／標準値で算出される値である。この値により表-4に示すとおり判定ランクが区分される。

表-4 判定ランクの区分

健全度指標	判定ランク	処置
0.70以下	A1	異常時外力に対して危険があり、対策を考慮する必要がある。
0.71以上0.86未満	A2	固有振動数の低下など進行性の把握を行う。
0.86以上	B	現状では問題が少なく健全であると考えられる。

表-5に健全度判定結果を示す。これによると、伊丹第一高架橋のR-2～R-4がA2ランクとなり、これを除くラーメン高架橋は全てBランクとなる。

次に、この結果を表-1で示した構造概要と照らし合わせて考察してみることにする。

表-5 固有振動数の標準値による健全度判定結果

高架橋名	ラーメン番号	標準値 (Hz)	固有振動数 (Hz)	健全度指標	判定ランク
伊丹第一高架橋	RA-1N	3.608	4.9	1.36	B
	R-1(補強前)	3.460	3.3	0.95	B
	R-1(補強後)	3.460	3.8	1.10	B
	R-2	3.300	2.8	0.85	A2
	R-3	3.165	2.3	0.73	A2
	R-4	3.055	2.3	0.75	A2
伊丹第二高架橋	R-5	3.015	3.4	1.13	B
	R-6	2.954	3.7	1.25	B
伊丹第三高架橋	R-7	2.917	2.8	0.96	B
	R-8	2.918	3.9	1.34	B

まず、高架橋柱の補強を行っているラーメンについてはすべてBランクとなっていることがわかる。さらに、中間梁の設置されているラーメン高架橋についてもすべてBランクとなっていることがわかる。つまり、柱の補強を行っていないラーメン高架橋のうち中間梁のないタイプのものだけが、A2ランクになっているということがわかる。先に述べたとおり、鉄道総研が提案する固有振動数の標準値を算定する過程では、柱の補強及び中間梁の有無については計算の諸元に含まれていないため、固有振動数の標準値は、仮に中間梁の有無あるいは柱補強の有無等、構造形式に違いがあっても、高架高さ及び支持地盤のN値が同じ場合には同一の値が与えられることになる。したがって、今回のように、標準値算定式では計算の諸元に与えられない要素（中間梁、柱補強）において、その構造形式に違いがある場合、判定結果にばらつきを生じることは当然の結果ともいえる。

したがって、この標準値による判定結果はあくまでも目安とし、列車の運転再開を決定するにあたっては、これらの構造形式の違いを正確に評価した結果をもとに、構造物の健全性を評価することとした。

(4)固有値解析による評価

実測した固有振動数を、固有値解析結果により評価した。固有値解析にあたっては、構造物の形状、寸法、重量等を把握し、適切にモデル化を行う必要がある。ここでは、長さや剛性を持つ部材と、重量を持つ質点（節点）とで構成する多質点系のモデルとして構造物をモデル化し、地盤はバネに置換した。

固有値解析では、次に示す方法で算出される躯体の曲げ剛性および地盤バネ定数を解析モデルに与えることにより、各ラーメン高架橋の固有振動数を計算した。なお、ここで計算される固有振動数をこれ以降、「固有振動数の設計値」と称することにす。

① 躯体の曲げ剛性

断面寸法とコンクリートの設計強度から、「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」⁴⁾にもとづいて算出される値（ $f'_{ck}=240\text{kg/cm}^2$ 、 $E_c=2.7\times 10^5\text{kg/cm}^2$ ）。

② 地盤バネ定数

土質調査の結果得られたN値等から、「鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）」⁵⁾ にもとづいて算出される値（右に示す式で算出される地盤反力係数から求められる）。

鉛直地盤反力係数 $k_v = f_{rk} (0.2 \alpha E_0 B_v^{-1/2})$
 水平地盤反力係数 $k_h = f_{rk} (0.5 \alpha_s \alpha E_0 B_h^{-3/4})$
 せん断地盤反力係数 $k_s = \lambda k_v$
 ここに、 f_{rk} ：地盤抵抗係数
 α ： E_0 の算定方法に対する補正係数
 E_0 ：地盤の変形係数 (kgf/cm²)
 B_v ：フーチング底面の換算幅 (cm)
 α_s ：側面に対する補正係数
 B_h ：フーチング前面の換算幅 (cm)
 λ ：換算係数

また、耐震補強が施されている柱部材については、補強により付加されている寸法を考慮した上で、曲げ剛性を算出した。さらに、R-1については、補強前と補強後のそれぞれの状態について固有振動数の設計値を算出した。

表-6 固有振動数の設計値一覧

各ラーメン高架橋における固有振動数の設計値一覧並びにこれと実測した固有振動数との比較一覧を表-6に示す。

高架橋名	ラーメン番号	固有振動数の初期値(Hz)	固有振動数の実測値(Hz)	実測値/設計値
伊丹第一高架橋	RA-1N	3.727	4.9	1.31
	R-1(補強前)	2.808	3.3	1.18
	R-1(補強後)	3.126	3.8	1.22
	R-2	2.215	2.8	1.26
	R-3	2.046	2.3	1.12
伊丹第二高架橋	R-4	1.771	2.3	1.30
	R-5	2.730	3.4	1.25
伊丹第三高架橋	R-6	2.759	3.7	1.34
	R-7	2.474	2.8	1.13
	R-8	2.633	3.9	1.48

鉄道総研が提案する固有振動数の標準値による判定では、判定ランクが低くなっていた

R-2、R-3、R-4の3基のラーメン高架橋を含め、全てのラーメン高架橋について、実測した固有振動数は固有値解析により算出した固有振動数の設計値を上回っていることがわかる。

つぎに、解析で求まる固有振動数とその振動モードが、実測した固有振動数とその振動モードに一致する場合の躯体の曲げ剛性及び地盤バネ定数を求めた。

まず、衝撃振動試験を行った際に、高さ方向に3点の応答波形を測定したR-1～R-5の3基のラーメン高架橋について解析を行った。解析の結果得られた各ラーメン高架橋の振動モード図（R-1については補強前、補強後の2ケースを示す）を図-3～図-8に、このときの地盤バネ定数及び躯体の曲げ剛性の設計値に対する比（以下、シミュレート倍率と称する）を表-7に示す。ここで、振動モード図は、縦軸が高架橋の高さ(m)、横軸が振幅（解析値と実測値の最大振幅を一致させている）を示す。表-7をみると、地盤バネ定数については設計値の2.3～2.8倍、部材の曲げ剛性については設計値の1.0～1.4倍となっている。各ラーメン高架橋によってシミュレート倍率に若干のばらつきがあるものの、振動モードの傾向としては同様の結果を示しており、R-2～R-4のラーメン高架橋3基についても、他のラーメン高架橋に対して特に健全度が低い結果とはなっていない。さらに、R-1についての補強前と補強後の解析結果をみると、双方のシミュレート倍率は良く一致しており、柱の補強効果が解析によりの確に再現できていることが確認できる。

次に、RA-1N、R-6、R-7、R-8のラーメン高架橋4基について解析を行った。このラーメン高架橋4基については、高架下店舗やその他の障害物により、柱の中央および下端については応答波形を測定できなかったため、実測値と解析値の比較をできるのは固有振動数のみとなり、振動モードを比較することはできない。振動モードが比較できない場合、不確定な要素が多く、実際の地盤バネ定数と躯体の曲げ剛性をシミュレートすることは難しい。以上より、ここでは次のような仮定に基づき実際地盤バネ定数と躯体の曲げ剛性を求めることにした。まず、連続した本ラーメン高架橋区間における地盤の状態はほぼ同一であると仮定し、R-1～R-5の解析によって求めた地盤バネのシミュレート倍率（最大倍率2.8倍）を地盤バネに乗ずることとした。つぎに、この場合の解析モデルについて、躯体の曲げ剛性をシミュレートしながら、

固有振動数の実測値と解析値を一致させ、固有振動数が一致した場合の躯体の曲げ剛性を、その構造物の実際の諸元とすることにした。

解析を行った結果求められた各ラーメン高架橋の躯体曲げ剛性を表-7に示す。躯体の曲げ剛性は、すべてのラーメン高架橋について設計値を上回っていることがわかる。特に、RA-1NおよびR-7については、解析により求まる躯体曲げ剛性は順に1.16倍、1.06倍となり、解析モデルが実際の構造状態を的確に再現できているといえる。

逆にR-6およびR-8については、躯体の曲げ剛性をかなり大きく評価しないと、固有振動数が一致しない結果となった。これは、このラーメン高架橋2基がいずれも高架下が店舗として利用されていることから、柱間になんらかの壁が施工されており、この影響により固有振動数が変化したのではないかと考えられるが、この点に関しては今後の検討課題ともいえる。いづれにしても、躯体の曲げ剛性としては高い方向に評価されているため、構造物の健全性については問題ないと判断できる。

表-7 シミュレート倍率一覧

高架橋名	ラーメン番号	シミュレート倍率		固有振動数 (Hz)
		躯体の曲げ剛性	地盤のバネ定数	
伊丹第一高架橋	RA-1N	1.16倍	2.8倍	4.9
	R-1(補強前)	1.07倍	2.8倍	3.3
	R-1(補強後)	1.07倍	2.8倍	3.8
	R-2	1.35倍	2.8倍	2.8
	R-3	1.10倍	2.5倍	2.3
	R-4	1.40倍	2.3倍	2.3
伊丹第二高架橋	R-5	1.34倍	2.8倍	3.4
	R-6	1.56倍	2.8倍	3.7
伊丹第三高架橋	R-7	1.07倍	2.8倍	2.8
	R-8	2.17倍	2.8倍	3.9

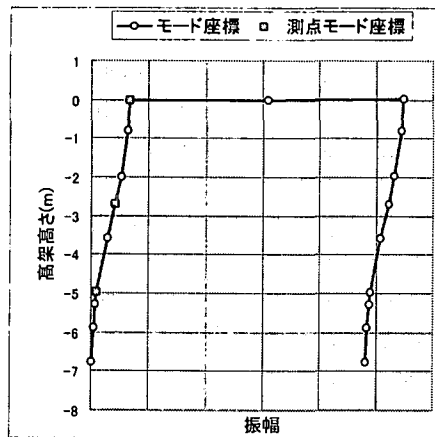


図-3 R-1(補強前)振動モード図

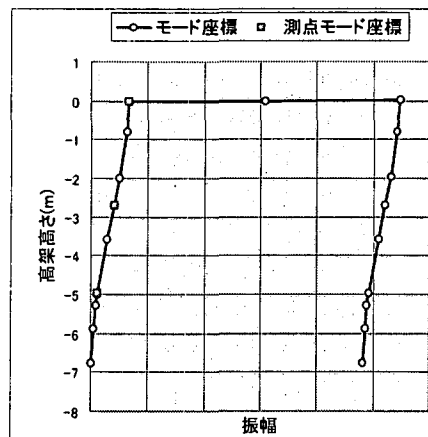


図-4 R-1(補強後)振動モード図

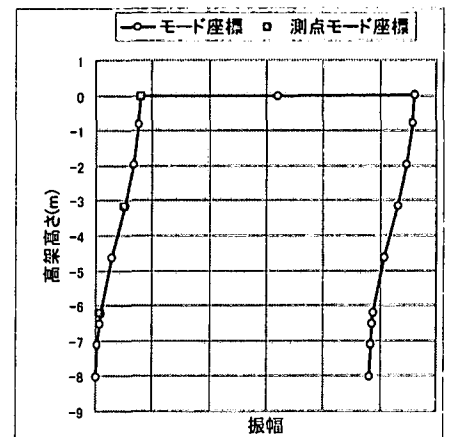


図-5 R-2 振動モード図

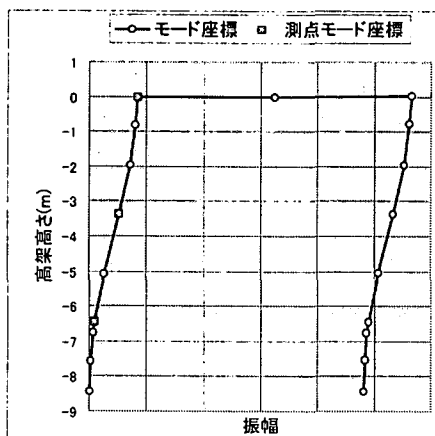


図-6 R-3 振動モード図

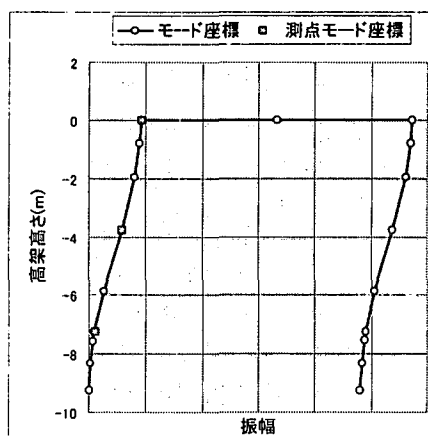


図-7 R-4 振動モード図

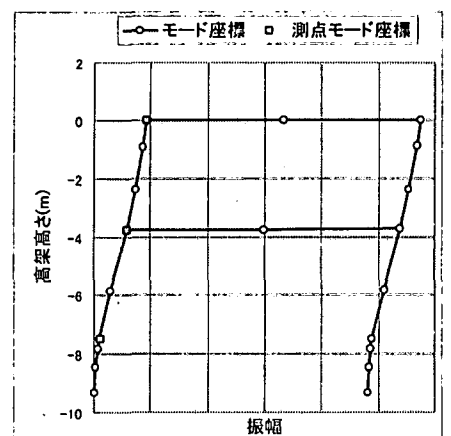


図-8 R-5 振動モード図

5. 列車載荷時の変位計測による健全度判定

衝撃振動試験による健全度判定では、主に基礎の健全性並びに線路直角方向における躯体(柱、梁)の健全性を評価した。その結果、本高架橋は設計上必要となる健全性を十分に有しており、震災による損傷の影響等は特に認められなかった。しかしながら、本高架橋が未曾有の大地震をうけたことを考えた場合、さらに十分な調査を行って運転再開を決定する必要がある。ここでは、試運転列車を載荷した際の構造物の変位を計測することにより、その健全性についてさらなる評価を行うこととした。変位計測を行う項目としては、線路方向における躯体の健全性を評価するため、縦梁についてのたわみ量を、また、目視では確認できない基礎の健全性をさらに評価するため、支点部(柱)の沈下を測定することとした。

また、測定にあたっては、現場において測定された変位量が有意なものであるかどうかを即座に判断するため、あらかじめ列車停車位置を設定し、静的載荷状態における計算上の変位量を算出しておくことにした。このときの計算に用いる計算諸元(躯体の曲げ剛性、地盤バネ定数)は、固有値解析で当初に設定したものと整合を図っている。各測定についての概要及び調査結果を以下に示す。なお、今回測定を行ったのはR-1、R-2、R-3の高架橋3基である。

(1) 支点(柱)沈下測定

柱側面に電子スタッフをアンカーにより取付け、側道側に設置した電子レベルにより列車載荷時の柱の沈下量を測定した。なお、今回用いた計器の最小測定単位は0.1mmである。

測定の結果及び計算値との比較について以下に述べる。

あらかじめ算出した計算上の沈下量は0.1mm~0.4mmであったが、列車載荷時に支点の沈下を測定した結果、ほとんど沈下する傾向は見られなかった。このため、計算値と実測値を比較することはできなかったが、列車載荷時において沈下が発生しなかったことから、実際の地盤バネ定数が、当初に計算値を算出する際に設定した地盤バネ定数を十分に上回っていることがわかる。また、これは固有値解析において地盤バネ定数が初期値の2.3~2.8倍といった十分な強度を有していると評価した内容と良く整合が取れているといえる。以上の結果より、本高架橋は、伊丹線の運転再開に対して十分な基礎の健全性を有していると評価できる。

(2) 縦桁のたわみ測定

各高架橋の縦桁下に打ち込んだアンカーからインバート線を垂らし、その先に5kgfのおもりを付け、おもり下に設置した高感度のひずみ式変位計により列車載荷時のたわみ量を測定した。

測定位置図を図-9に、計算上のたわみ量並びに実測したたわみ量の一覧を表-8に示す。

現場にて実測したたわみ量は概ね計算値内に収まっていることがわかる。一部(測点5及び測点11)、実測値が計測値を上回っているが、そのたわみ量の差が0.02~0.03mm(比率では10%~20%程度)といったごく微小なものであることから、これは測定機器の精度あるいは、列車停車位置と計算上の列車載荷位置が完全には一致できなかったことにより生じた誤差と判断することもできる。全般的に実測値と計算値との変状モードが良く一致していること、また、列車載荷時に発生した変状が列車通過後に全て初期状態に復元しており、発生した変位が弾性変形内であると判断できることから、たわみ量について異常と思えるような変状は認められない。以上より、縦梁についてもその健全性について特に問題はないと評価できる。

表-8 縦桁たわみ量測定結果並びに計算値一覧

単位:mm

測定位置	R-1			R-2				R-3				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
実測値	0.00	-0.10	-0.20	+0.02	-0.10	-0.25	-0.08	-0.05	+0.08	-0.20	-0.28	+0.01
計算値(初期値)	+0.19	-0.23	-0.36	+0.05	-0.08	-0.34	-0.25	+0.18	+0.20	-0.46	-0.25	+0.02

+は隆起、-は沈下を示す。

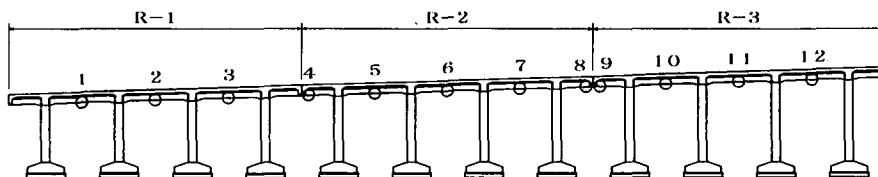


図-9 測定位置図

6. まとめ

今回の健全度判定の結果をまとめると、つぎのようなことがいえる。これらを総合的に判断して、本高架橋は運転再開に対して十分な健全性を有していることを確認した。

- ① 衝撃振動試験により実測した各ラーメン高架橋の固有振動数は全て固有値解析により算出した固有振動数の初期値を上回っている。
- ② 固有値解析の結果、実際の地盤バネ定数は初期値の 2.3 倍～2.8 倍といった、十分な強度を有していると考えられる。
- ③ 固有値解析の結果、実際の躯体の曲げ剛性は全て初期値の剛性を上回っている。
- ④ 列車荷重載荷時に測定した支点(柱)の沈下量及び梁のたわみ量において、有意と考えられるような変状は認められなかった。
- ⑤ 固有値解析により、主に地盤バネ定数を向上させて実際の振動数及び振動モードを再現した内容は、列車載荷時の変位計測結果と良く一致する。

7. おわりに

ラーメン高架橋の健全度判定を行う場合、上部工(柱、梁等)については、その損傷度合いが目視によりある程度判断できる。しかしながら、基礎については、目視が困難であるため何らかの非破壊的な検査手法によりその健全性を評価する必要がある。今回の健全度判定では衝撃振動試験と変状計測を併用することにより、基礎を含む高架橋全体の健全性を評価することができた。ただし、列車供用中の路線について列車載荷時の変位計測を行うことは現実的ではないため、今後は衝撃振動試験単独での健全度評価手法の確立を目指していく必要があるといえる。最後に今後の課題について以下に挙げておく。

- 1) 災害等による損傷度合いあるいは経年的な劣化等を、精度良く評価するため、現状の固有振動数を測定しておく必要がある。
- 2) 全ての高架橋について固有値解析を実施することは、多大な労力を必要とするため、構造形式をさらに忠実に評価した固有振動数の標準値算定式確立を目指す必要がある。
- 3) 柱の耐震補強あるいは、耐震壁、テナント等、竣工時から構造形式が変化する場合の固有振動数の評価方法確立を目指す必要がある。

<参考文献>

- 1) (財)鉄道総合技術研究所:「衝撃振動試験マニュアル」平成6年3月
- 2) 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, '90.9
- 3) 西村昭彦:「衝撃振動試験によるラーメン高架橋の健全度判定」日本鉄道施設協会誌 1991-2
- 4) (財)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」平成4年 10 月
- 5) (財)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」平成9年3月