

ラーメン高架橋の健全度評価の一手法

関 雅樹¹・西村 昭彦²・丸山 泉³・中野 聡³

¹正会員 工修 東海旅客鉄道株式会社 (〒100 東京都千代田区丸の内一丁目6号5番地)

²正会員 工博 財団法人 鉄道総合技術研究所 (〒185 東京都国分寺市光町二丁目8号38番地)

³正会員 株式会社 福山コンサルタント (〒133 東京都江戸川区北小岩三丁目17号2番地)

兵庫県南部地震により東海道新幹線のラーメン高架橋も被害を受け、これに対する健全性および耐震補強後の確認として、衝撃振動試験を行った。その結果地震前後の比較により、一部の高架橋において地震後に、固有振動数が低下しているデータが得られた。このデータを用いて高架橋の固有振動モードを説明し得る柱の剛性と地盤ばねを逆解析することにより、柱の剛性と地盤ばね定数は定量的に把握できるが、その解析は煩雑であった。そこで本研究では、あらかじめ解析により柱の剛性と高架橋の全体系1次モードおよび柱の2次モードの固有振動数の関係のノモグラムを作成し、様々な柱の剛性を合理的に評価できる方法を開発した。

Key Words : earthquake damage , rigid frame bridge , natural frequency , dynamic percussion test , serviceability

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、東海道新幹線においてもラーメン高架橋の柱に被害を受け、機能回復のために早急な修復が行われた。

これらの復旧に際しては、修復を行った構造物はもとより、外観上被害を受けていない構造物に対しても何らかの調査を行い、健全性を確認した後に運転の再開あるいは徐行解除を行う必要があった。

復旧に際しての構造物の調査は、JR東海が東海道新幹線のコンクリート構造物の健全度調査方法として、1991年より取り入れている衝撃振動試験¹⁾を用いた。この衝撃振動試験は重錘によって構造物を打撃し、その打撃力による応答から構造物の固有振動数を求めて健全度を判定する非破壊試験のひとつである。

衝撃振動試験による構造物の健全度の評価は、従来、標準値を用いて行っていた。標準値とは構造物が有するであろう標準的な固有振動数である。その値は、構造諸元を変数とする回帰式で示され、その回帰式は健全な構造物に対する試験結果を母集団とした統計解析から求めている。健全度の評価は、衝撃振動試験で得られた固有振動数と標準値とを比較し、その比率として算出される健全度指数の値によっていた。

しかしながら、健全度指数が低く健全でないと判定された場合においても、その原因が柱と基礎、地盤のどちらにあるのかを特定することが困難であった。このため、

筆者らは、兵庫県南部地震により被害を受け地震後に固有振動数が低下しているラーメン高架橋に対し、ばねマス振動モデルによる固有値解析の手法を用いて、柱の剛性と地盤ばね定数をそれぞれ定量的に把握できる評価方法の検討を行った。その結果、衝撃振動試験から得られるラーメン高架橋の2種類の固有振動数とモード形状を説明可能とする2つの変数が解析によって算出されることを確認している²⁾。この柱の剛性と地盤ばね定数の解析値は、それぞれ現状を説明できる値であることがわかっており、あわせて固有振動数の低下が主に柱の剛性の低下であることも判明している。しかしながら、これらの解析は非常に煩雑であったため、あらかじめ、解析により、変状の度合いと固有振動数の低下の関係をノモグラムで作成し、様々な柱の剛性を合理的に評価できる方法を検討した。

2. 衝撃振動試験から得られる固有振動数

ラーメン高架橋の衝撃振動試験では、先に述べたように2種類の固有振動数と固有振動モードを把握することができる。ひとつは、全体系の1次モードの振動であり、もうひとつは柱の部分系2次モードの振動である。

衝撃振動試験から得られた固有振動数の例として、図-1に示す高架橋に対して、高架橋の天端位置を線路直角方向に打撃して全体系1次モードを測定した結果を図-2

に、高架橋の柱の中間位置を線路直角方向に打撃して、柱の部分系2次モードを測定した結果を図-3にそれぞれ示す。このように柱の部分系2次モードは、柱の中間部分が直角方向に変位し、かつ左右の柱が同位相となることがわかる。

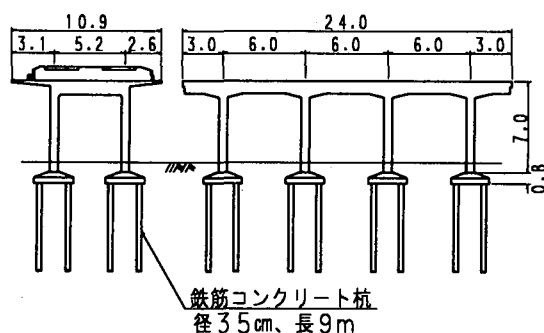
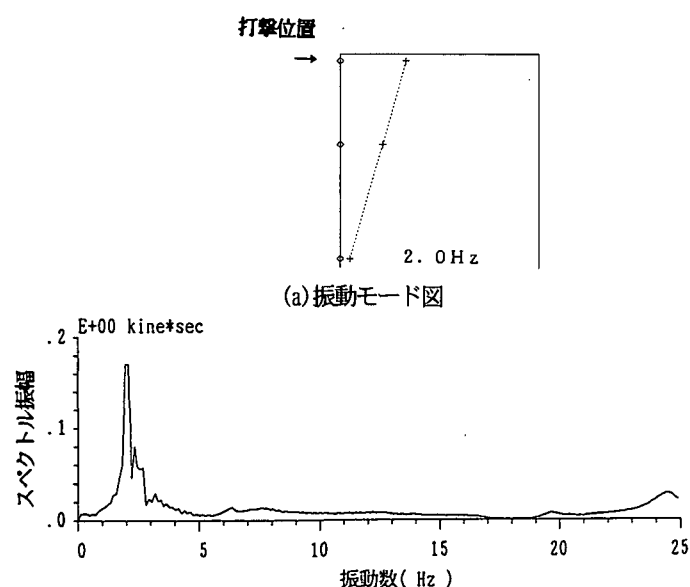
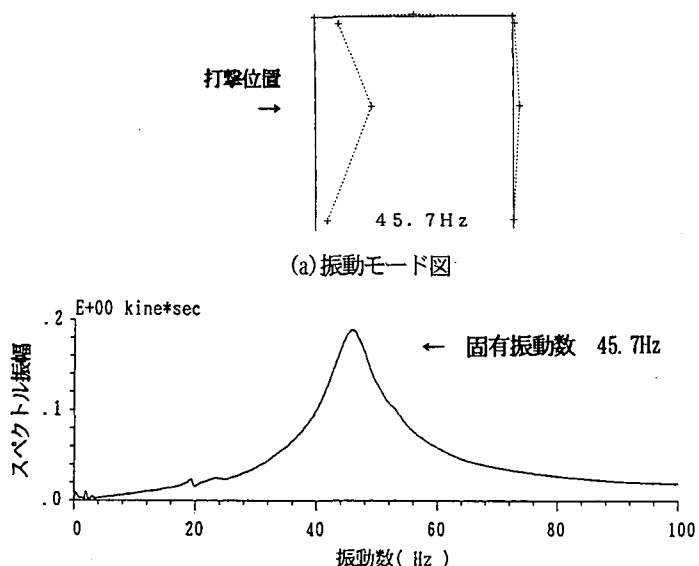


図-1 ラーメン高架橋一般図



(a) 振動モード図
(b) 振動波形のフーリエスペクトル図
図-2 全体系1次モード測定位置



(a) 振動モード図
(b) 振動波形のフーリエスペクトル図
図-3 柱の部分系2次モード

3. 柱の剛性を評価するノモグラムの作成

(1) ノモグラムの作成方法

ラーメン高架橋の柱の剛性を評価するノモグラムは、ラーメン高架橋を線路直角方向を対象とした2次元ばねマス系としてモデル化し、図-4に示すフローチャートに沿って解析を行い、全体系1次と柱の部分系2次の固有振動数の関係を把握することによって作成した。

なお、フローチャート中に示す地盤ばね定数の設定では、基礎の設計計算上存在し得るすべての地盤ばね定数に対応できるように、直接基礎と杭基礎を考慮して、それぞれ数段階づつ変化させている。

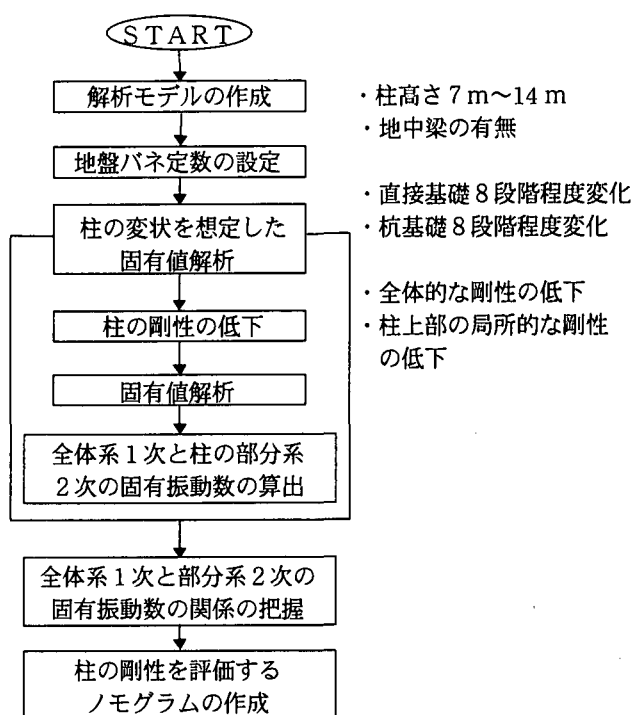


図-4 ノモグラム作成の流れ

(2) 柱の変状の想定

ノモグラムの作成時に想定した柱の変状は表-1に示すように、柱の全体的な剛性の低下を数段階想定した。

表-1 想定した柱の変状と柱の剛性の関係

想定位置	全断面有効に対する柱の剛性の割合	剛性の低下の度合い
全体的な剛性の低下	70%	鉄筋までは達しない
	60%	せん断補強鉄筋位置まで進行
	40%	主鉄筋位置まで進行

(3)解析振動モード

柱の変状を想定した固有値解析の結果として、柱高さ7m、柱の剛性100%の場合の全体系1次と柱の部分系2次の解析振動モードを図-5に示すが、図-3に示した実測固有振動モードとほぼ同様のモード形状であることが確認できる。

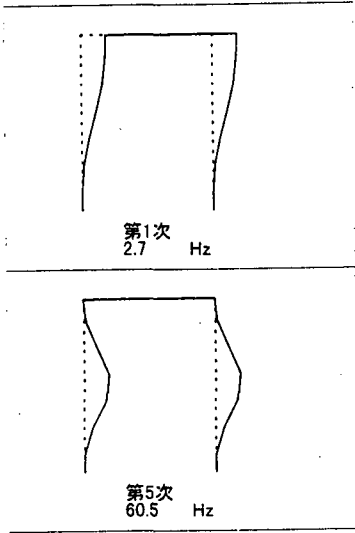


図-5 解析振動モード

(4)ノモグラムの作成

固有値解析の結果から、柱高さ7mの高架橋における全体系1次と柱の部分系2次の固有振動数の関係を表-2に示す。なお、基礎のばね定数は回転ばねのみを示しているが水平ばねも同様に变化させている。

これらの全体系1次と柱の部分系2次の固有振動数の関係から柱の剛性の変化を読み取るノモグラムを作成した結果を図-6に示す。このノモグラムは柱高さ7mに対するものを図-6(a)に、柱高さ10mに対するものを図-6(b)に示している。また、解析モデルでは、直接基礎と杭基礎（杭長5m～30m）の2種類を想定したが両者はほぼ同一線にあることから、基礎形式に関わらず同一のノモグラムとした。

このように同一の柱の剛性では全体系1次と柱の部分系2次の固有振動数はなめらかな曲線で結ばれる関係にあり、柱の剛性が低下するとこの曲線の形状を保ったまま、固有振動数が低い方へとシフトすることがわかる。

4. ノモグラムの妥当性の検証

作成したノモグラムの妥当性の検証は、ラーメン高架橋に対する衝撃振動試験の結果から全体系1次と柱の部分系2次の固有振動数をぬき出し、ノモグラムと比較することによった。柱高さ7mのラーメン高架橋に対する衝撃振動試験の結果を表-3に示す。

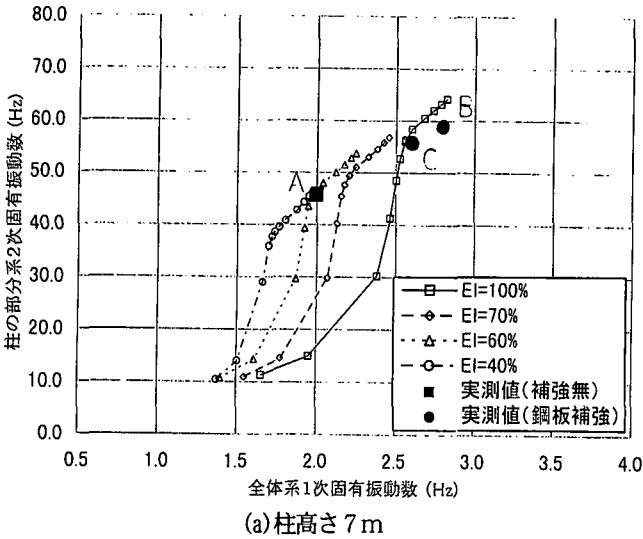
さらにこれらの試験結果は前出図-6(a)のノモグラムに示しているが、柱の補強を行っていないA高架橋では実測値は柱剛性60%の線上にあり、柱の鋼版補強を行っているB高架橋およびC高架橋では、柱剛性100%の線を越える位置に実測値はあることがわかり、ノモグラムの妥当性はある程度検証できたと考えられる。

表-2 全体系1次と柱の部分系2次の固有振動数の関係
(表中の数値は上段が全体系1次、下段が柱の部分系2次の固有振動数を示す。)

柱高さ	柱の剛性の割合	直接基礎 (回転バネ定数 $tf \cdot m/rad$)					杭基礎 (回転バネ定数 $tf \cdot m/rad$)				
		2.7E+06	5.4E+06	8.1E+06	1.1E+07	1.3E+07	5.6E+05	8.4E+05	1.1E+06	1.7E+06	2.5E+06
7 m	100%	2.60	2.68	2.74	2.79	2.82	2.47	2.50	2.53	2.56	2.56
		58.40	60.50	62.00	63.20	64.20	41.30	48.50	52.70	56.00	56.30
	70%	2.25	2.32	2.38	2.42	2.45	2.13	2.16	2.17	2.20	2.21
		51.00	53.00	54.50	55.80	56.80	40.20	45.40	47.60	49.30	49.50
	60%	2.04	2.12	2.17	2.21	2.25	1.92	1.95	1.97	2.00	2.00
		48.00	50.00	51.50	52.80	53.70	39.40	43.50	45.10	46.50	46.60
	40%	1.80	1.87	1.92	1.95	1.97	1.70	1.72	1.73	1.76	1.76
		40.80	42.80	44.30	45.40	46.20	35.90	37.70	38.60	39.50	39.60
柱高さ	柱の剛性の割合	直接基礎 (回転バネ定数 $tf \cdot m/rad$)					杭基礎 (回転バネ定数 $tf \cdot m/rad$)				
		6.0E+06	1.0E+07	1.5E+07	2.0E+07	2.5E+07	1.2E+06	2.0E+06	3.0E+06	4.0E+06	5.0E+06
10m	100%	2.20	2.23	2.26	2.28	2.29	2.19	2.22	2.23	2.24	2.25
		32.90	34.20	34.80	35.10	35.40	32.40	34.00	34.70	35.10	35.30
	70%	1.94	1.97	2.00	2.01	2.03	1.93	1.95	1.96	1.97	1.98
		29.00	29.80	30.30	30.60	30.80	28.70	29.60	30.10	30.30	30.40
	60%	1.82	1.85	1.87	1.89	1.90	1.81	1.82	1.83	1.84	1.85
		27.30	28.10	28.40	28.70	29.00	27.10	27.80	28.20	28.40	28.50
	40%	1.53	1.56	1.58	1.60	1.61	1.51	1.53	1.54	1.54	1.55
		23.20	23.70	24.00	24.30	24.50	23.00	23.40	23.60	23.80	23.90

表-3 ラーメン高架橋の衝撃振動試験結果（柱高さ 7 m）

高架橋名	柱高さ (m)	固有振動数 (Hz)		柱の 補強状況
		全体系 1 次	柱の部分系 2 次	
A	7.0	2.0	45.8	補強なし
B	7.0	2.8	59.0	鋼版補強 有
C	7.0	2.6	55.8	鋼版補強 有



5. まとめ

本研究によって、ラーメン高架橋の柱の剛性は、衝撃振動試験によって全体系 1 次および柱の部分系 2 次の固有振動数を測定すれば、複雑な解析を行うことなしに、ただちに定量的に把握できることが明らかとなった。

なお、このノモグラムは、柱高さの変化および地中梁の有無等の構造諸元の違いに対して対応できるように数十種類作成している。

この手法による柱の剛性の評価は、地震後の被害の有無および被害の程度のみならず、補強工事後の性能確認調査や目視による検査では困難な健全度の評価に対して十分効果を発揮することと考えられる。

参考文献

1) 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、1990. 9。
2) 関 雅樹、水谷 健太、西村 昭彦、中野 聡：
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、1996. 11。

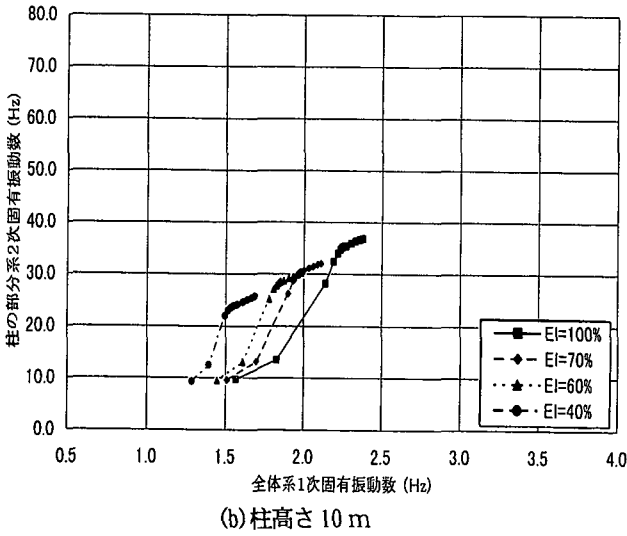


図-6 柱の剛性を評価するノモグラム