

3 径間鉄道 RC ラーメン高架橋の衝撃係数に関する研究

鉄道総研 正 ○渡辺 勉 鉄道総研 正 曾我部正道
ジェイアール九州コンサルタンツ 正 原田 和洋

1. はじめに 鉄道構造物の動的応答に関する設計では、列車荷重に設計衝撃係数を乗じることにより、動的応答を静的応答に置換する手法が用いられている。この設計衝撃係数は、いずれも単純桁の全体1次モードに基づき定められたものである。近年の列車の高速化にともない、構造物の動的応答の増大に関する安全性の確保が重要視される中で、RCラーメン高架橋についても現象解明及び設計法の確立が求められている。そこで本研究では、列車走行に伴うRCラーメン高架橋の動的応答(衝撃係数)に関して、各種パラメータに着目した数値シミュレーションを行い、併せて簡易算定法の提案を行った。

2. 解析手法 数値解析には、車両と鉄道構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS を用いた。図1に車両の解析モデルを示す。車両の力学モデルは、車体、台車、輪軸の各構成要素を剛体質点と仮定し、これら剛体質点をばね及びダンパで結合した。列車の編成量数は16両とした。図2に3径間RCラーメン高架橋の有限要素法による解析モデルを示す。全長25mで、径間は7.9m+8.0m+7.9m、柱断面は1.1m×1.1m、柱高さは10.0m、柱中心間隔は5.6m、中間スラブの厚さは0.25m、高欄高さは2mのRCラーメン高架橋である。中間スラブ、張出スラブ、高欄、縦梁および横梁はシェル要素で、柱ははり要素でモデル化した。地中梁、地盤はモデル化していない。隣接する調整桁の重量は、端部の横梁の重量に付加した。調整桁と高架橋の境界条件は設けていない。解析メッシュ刻みは0.4m程度で、総節点数は2847点、総要素数は2732要素である。列車は、スラブ上に定義された走行路の上を走行する。解析に用いた減衰定数 ξ は2%とした。

表1に解析条件を示す。解析パラメータとしては、非構造部材(路盤コンクリート)の剛性、ヤング係数、列車速度を設定した。ここで、路盤コンクリートなどの非構造部材については、実際の構造物の応答及び固有振動数に影響を与えることが知られている。このため、非構造部材(路盤コンクリート)の剛性の影響を考慮したモデルをCASE2として設定した。また、ヤング係数については、骨材の種類や品質の程度及び地域によって大きく変動することが知られている。設計で用いられるヤング係数¹⁾に比べるとかなり硬いあるいは柔らかい材料定数の設定となるが、基本ケースのヤング係数を1.5倍及び0.7倍にしたものをCASE3及びCASE4として設定した。列車速度は、50, 100~400km/hとし、50km/hの応答を衝撃係数算定の際の構造物の静的応答として使用した。

3. 解析結果 表2に固有値解析結果を示す。合わせて、部材振動性状の簡易同定法²⁾を用いて行った計測結果も示す。簡易算定法による値については後述する。表2より、実際に高架橋が施工された場合の、各パラメータによる固有振動数のばらつきを把握することができる。非構造部材の剛性を考慮すると、中間スラブではCASE1の21HzがCASE2の52Hzに増加した。ヤング係数が増減すると、中間スラブではCASE1の21Hzが、CASE3の26Hzに増加、CASE4の18Hzに減少した。また、計測結果とCASE1を比較すると、中間スラブは概ね一致しているが、張出スラブ、縦梁及び横梁は計測結果に比べて固有振動数が小さくなった。一方、計測結果とCASE2を比較すると、縦梁では概ね一致しているが、張出スラブ、中間スラブ及び横梁は計測結果に比べて固有振動数が大きくなった。このように、非構造部材の剛性を考慮することは、中間スラブでは剛性を大きく評価すること、縦梁では剛性の概ね適切な評価を与えることがわかる。また、張出スラブ及び横梁については、実際の構造物はCASE1とCASE2の中間の状態であると推察される。

図3に張出スラブ及び中間スラブの時刻

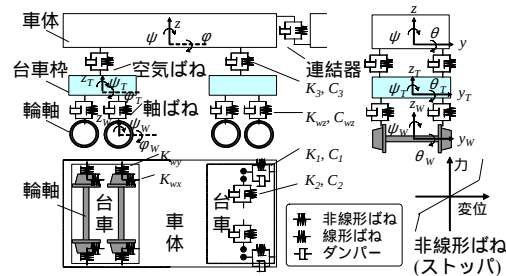


図1 車両の力学モデル

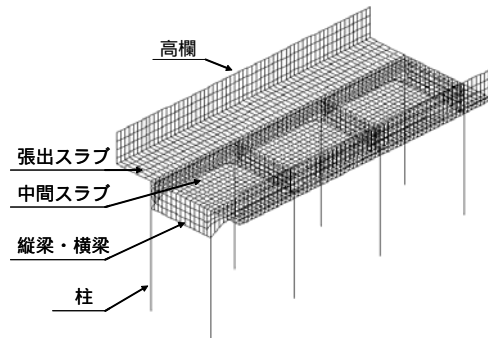


図2 ラーメン高架橋の解析モデル

表1 解析ケース

CASE	非構造部材の剛性	ヤング係数 (kN/m ²)	列車速度 (km/h)
1	非考慮	2.65×10^7	50 100~400
2	考慮	2.65×10^7	
3	非考慮	3.98×10^7	
4	非考慮	1.85×10^7	

表2 固有値解析結果

振動形態 (1次振動モード)	固有振動数(Hz)					簡易算定法
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	計測結果	
全体線路方向	3	3	3	2	3	-
全体線路直角方向	3	3	4	2	3	-
全体:ねじれ	9	9	11	7	-	-
張出スラブ	9	14	11	7	11	11
中間スラブ	21	52	26	18	21	21
縦梁	22	29	27	19	30	30
横梁	35	58	42	29	45	40

キーワード RC ラーメン高架橋, 衝撃係数, 共振, 数値実験, 高速化

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (財) 鉄道総研 鉄道力学研究部(構造力学) TEL042-573-7290

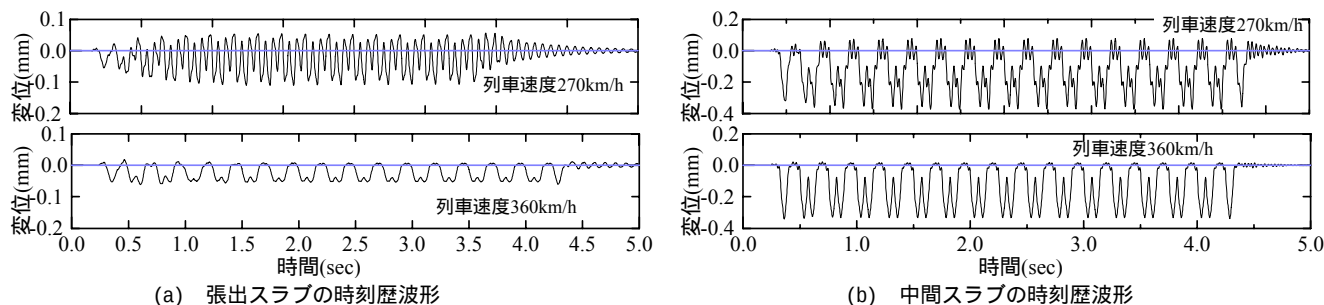


図3 張出スラブ及び中間スラブの鉛直変位の時刻歴波形

歴波形を示す。同図に示すように、列車速度 270km/h では、変位方向が片振りではなく正負の方向に両振りであり、共振増幅傾向を読み取ることができる。

図4に張出スラブ及び中間スラブに関して、列車速度が曲げ応力の衝撃係数に及ぼす影響を示す。本解析では列車速度 50km/h の結果を静的応答として用いた。同図より、張出スラブは列車速度 270km/h で、中間スラブは列車速度 270km/h、300km/h 付近で共振ピークを生じていることがわかる。ここで、連行移動荷重による共振ピークは、列車速度 V (m/s) が式(1)となる場合に生じる。

$$V = f \cdot L_v \quad (1)$$

ここに、 f は固有振動数、 $L_v (=25\text{m})$ は車両長である。また、この $1/n$ 速度 (n は整数) においても 1 次固有振動モードに対する n 次共振が生じる。式(1)より、張出スラブ (固有振動数は 9Hz) の共振速度は 810、405、270km/h と求まり、図4の 270km/h の共振ピーク及び図3で示した波形は、1 次固有振動モードに対する 3 次共振であると推定される。また、中間スラブも同様に計算すると 7 次共振であると推定される。

衝撃係数の値は、部材毎に異なっていることがわかる。例えば 270km/h で評価した場合、張出スラブ、中間スラブの衝撃係数はそれぞれ、1.27、0.24 となった。また 360km/h ではそれぞれ 0.48、0.20 となった。図5に張出スラブの衝撃係数の各 CASE の比較を示す。張出スラブについては、CASE1 の 270km/h のピークが CASE3 では 330km/h、CASE4 では 225km/h にピークがシフトしており、ヤング係数の違いによる固有振動数の変化によるものであると説明できる。一方 CASE2 については、非構造部材の剛性の影響から固有振動数が増加したことにより、今回解析対象とした列車速度の範囲内ではピークが見られなくなった。

4. 衝撃係数の簡易算定法の検討 ラーメン高架橋の衝撃係数を検討する場合には、動的応答解析等により求めるのが最も精度が高く効率的であると考えられるが、一方で簡易算定法に対するニーズも高いと考えられる。そこで、単純梁の衝撃係数算定法を拡張する形で、ラーメン高架橋の簡易算定法に関する検討を行った。設計標準¹⁾では、衝撃係数を式(2)に示す無次元化速度パラメータ α 、及び無次元化スパン L_b/L_v とから求める手法を用いている。

$$\alpha = V/2f \cdot L_b \quad (2)$$

ここで、 V は列車速度、 f は固有振動数、 L_b はスパン長、 L_v は車両長である。固有振動数 f については、筆者らが提案する推定法を用いて算出した²⁾。また部材のスパン長 L_b は図2に示す解析モデルに単位荷重を載荷したときの曲げ応力に関する影響線により決定することとした。図6に単位荷重載荷時の影響線を示す。各部材とも柱軸線間スパン長よりも基線長さが大きくなっており、部材のスパン長 L_b は、柱軸線間スパン長とすればよい。しかし、中間スラブ及び張出スラブについては、共振しやすい低い固有振動数となる傾向にあるため、安全側の判断として、 L_b を柱軸線間縦梁スパン長の 80% とすることを提案した。以上の提案した方法による固有振動数及び衝撃係数を表2及び図4にそれぞれ示した。固有振動数及び衝撃係数ともに簡易算定法による衝撃係数は、計測結果及び解析結果を安全側に包含 (固有振動数を同程度か低く算定) していることがわかる。

5. まとめ 部材の種類によって衝撃係数は異なる。例えば、列車速度 360km/h で評価した場合、張出スラブ、中間スラブの衝撃係数はそれぞれ 0.48、0.20 であった。ヤング係数をパラメータとし場合、共振速度のピークが変化した。共振速度の変化に換算すると、ヤング係数 1.5 倍で 55~60km/h 程度の差、ヤング係数 0.7 倍で 45km/h 程度の差であった。単純梁の衝撃係数算定法を拡張し、ラーメン高架橋の衝撃係数に関する簡易計算法を提案した。部材のスパン長 L_b のとり方は、安全側の評価となるように、中間スラブ及び張出スラブについては柱軸線間縦梁スパン長の 80% とすることを提案した。

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 - コンクリート構造物 -、丸善、2004

2) 原田ほか：鉄道橋の動的応答における部材振動性状の簡易同定法、コンクリート工学年次論文集、Vol. 30, No. 3, 2008