S1-4-4 列車走行による PC 単純下路桁の応答特性に関する 3 次元動的 FEM 解析

[土] ○松橋 宏治, 曽我部 正道, 谷村 幸裕, 長谷川 淳史((財)鉄道総合技術研究所)

3-D FEM Dynamic Analysis for Response Characteristic by Train Running on PC Simple Through Girder

Koji Matsuhashi, Masamichi Sogabe, Yukihiro Tanimura, Atsushi Hasegawa (Railway Technical Research Institute)

A through concrete railway girder is often used as a structure when head space is necessary under girder. Although many construction results have already been realized, few detailed analytical studies have been conducted. Also, due to its open cross-section, generation of several kinds of vibration can be predicted for this structural type of girder. However there are few studies on its dynamic response characteristics thus far. In this study, the modeling of a through concrete railway girder (50m span length, double track, 2 main girders) was conducted by the finite element method (FEM) and the study focused on its dynamic behavior through numerical analysis in view of resonance generation. More specifically, vibration mode of girder was clarified, and influences of train speed, non-structural member and the number of loading tracks on a girder were investigated based on this analysis.

キーワード: PC 単純下路桁, 共振, 衝撃係数, 3 次元動的 FEM 解析 Keyword: Through girder, Resonance, Impact factor, 3-D FEM dynamic analysis

1. はじめに

下路形式のコンクリート鉄道橋は、桁下空頭が制限され る箇所によく用いられる構造形式である. 下路形式は, 主 桁の横拘束がほとんど無いこと、主桁間のスラブのスパン が非常に長いこと、などの点で T 型桁や箱桁などの上路形 式とは構造形式が大きく異なる. そのため、列車走行に伴 い発生する桁の振動は、鉛直方向へのたわみに加え、主桁 のねじれ、ウェブの横倒れ、直角方向へのスラブのたわみ 等、さまざまな形態が発生することが予想されるが、この ような動的な振動性状については、これまでほとんど検討 されていないのが実情である.

そこで、本研究では実橋を有限要素により精緻にモデル 化し,数値解析により列車の通過に伴う共振発生の観点か ら PC 単純下路桁の動的応答特性について検討した.

2. 解析対象構造物

解析対象構造物は、複線用 PC 単純下路桁(橋長 50.0m, 支間 48.60m) で、スラブ軌道を有する、図1に桁の断面図 を示す. 図中に示す着目点 A, B は以降で示す解析結果の 着目点である.



3. 解析条件

3.1 解析モデル

(1) 要素分割 図2に要素分割図を示す.



⁽²⁾ 境界条件

境界条件は、実橋と同様の支承条件を模擬し,支承本体 (ゴムシュー)位置を鉛直z方向固定,固定側ストッパー 位置を橋軸 y および橋軸直角 x 方向固定, 可動側ストッパ ー位置を橋軸直角 x 方向固定とした.

3.2 入力条件

(1) コンクリートの物性値

コンクリートの設計基準強度は、Pek=40N/mm²とし、材 料物性値としてヤング係数 Ec=31 kN/mm², ポアソン比 v =0.2, 単位体積重量 r=24.5 kN/m³を使用した.

(2) 列車

列車は、実車両(車両長 25m, 軸重 P=120 kN, 16 両編 成)を考慮した.

3.3 数值解析法

数値解析法はモーダル法によった.減衰定数は各次のモ ードに対し h=2%とした¹⁾.

3.4 解析ケース

表1に本検討で実施した解析ケースを示す.列車速度 266km/hは,基本固有振動数に対する共振速度である.

複線載荷ケースでは、上下線の列車が同時に桁に進入す るとして解析を行った.また、本検討では、非構造部材で ある軌道スラブをモデル化することを基本としており、ケ ース No.14 においてこの有無による影響について検討して いる.

No.	載荷	列車速度	/#==#=
	線数	(km/h)	1佣考
1		静載荷	
2		100	
3		160	
4	単線	200	
5		240	
6		266	共振速度
7		300	
8		366	
9		400	
10		静載荷	
11	法行 公 行	200	
12	T及形状	266	共振速度
13		360	
14	単線	266	軌道スラブ無し

4. 解析結果

4.1 固有值解析結果

表2に、固有値解析による5次モードまでの固有振動数 n,および各振動数に対応する共振速度 v を示す.共振速度 は $v=n \cdot L_v$ (L_v : 車両長で 25m) により算定される¹⁾. ま た、図3~5に代表的な振動モードとして、1次、2次およ び4次のモード図を示す.

表 2	固有値解析結果
-----	---------

次数	1	2	3	4	5
固有振動数 n (Hz)	2.97	3.85	7.92	8.21	9.28
共振速度 v (km/h)	266	346	712	739	835

4.2 応答解析結果

(1) 単線載荷の解析結果

単線載荷ケースの解析結果として、図6および図7にA 点のスパン中央における鉛直変位 dz,および橋軸直角方向 の引張応力度 σx を,図8に B 点のスパン中央における橋 軸直角方向水平変位 dxの時刻暦応答波形を示す.ここでは, 列車速度 v=200, 266, 360km/h の結果を示した.図6は主 桁のたわみ、図7はスラブのたわみ、図8は主桁の横倒れ に着目したものである.



図 3 1次モード (n = 2.97Hz 鉛直方向のたわみ)



図 4 2 次モード (n=3.85Hz 主桁のねじれ)



図 5 4次モード (n=8.21Hz 鉛直方向たわみ2次モード. スラブのたわみとウェブの倒れこみを伴う)

図6より, 鉛直変位には列車速度266km/hにおいて1次 モードに対する共振による応答波形が確認された. このよ うな波形は、これまでに実測で得られている共振波形とも 酷似している¹⁾.(列車速度 360km/h で予想される 2 次モー ドの共振の影響は確認されなかった.)同様に図7より、ス ラブの応力度にも1次モードに対する共振による影響が確 認されたが、その他のモードの共振は、いずれの列車速度

でも確認されなかった.図8より,主桁天端の水平変位には、1次モードに対する共振による影響に加え,列車速度360km/hにおける2次モードに対する共振が確認された.



32 -0.2
 -0.4
 -0.6
 2
 4
 (sec)
 8
 2
 4
 (sec)
 6
 8
 10
 2
 3
 2
 4
 (sec)
 6
 8
 10
 3
 2
 4
 (sec)
 5
 4
 (sec)
 5
 10
 10
 2
 4
 (sec)
 5
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10
 10

(2) 複線載荷の解析結果

複線載荷ケースの解析結果を、単線載荷の解析結果と同 様の着目点、列車速度にて図 9~11 示す.何れの結果にお いても、列車速度 266km/h における 1 次モードの共振によ る影響が確認される.また、単線載荷時において主桁天端 の水平変位に確認された 2 次モード(主桁のねじれ)の共 振は、図 11 に示すとおり、複線載荷時においてはほとんど 確認されなかった.

(3) 軌道スラブの有無による影響

軌道スラブの剛性による影響を図 12 に示す. これより, 両者の波形には明確な差があり,共振速度が変化したこと がわかる.以下に,軌道スラブの影響について考察する.

軌道スラブの有無による両者の剛性比は,繰返し加振の 影響を受けていない第1波目の変位量の比で求まる.第1 波目のピーク変位量は,軌道スラブ有りで2.46mm,軌道 スラブ無しで2.61mmであったので,剛性比は(軌道スラ ブ有り):(軌道スラブ無し)=(1/2.46):(1/2.61)=1.06:1.00 となる.また,波形から周期を読み取ることにより求めた 両者の固有振動数は,(軌道スラブ有り):(軌道スラブ無し) =2.97Hz:3.08Hzで,軌道スラブ無しの場合の共振速度は 277km/h と推定され、スラブ軌道を考慮することにより 10km/h 程度減少する.これは、軌道スラブにより剛性は増 加するものの、付加される重量の影響が支配的なため、固 有振動数ならびに共振速度が低下したものと考えられる.



4.3 速度効果の衝撃係数

ここでは、本解析結果における速度効果の衝撃係数 i_aに ついて検討する.衝撃係数は式(1)により算定した.

$$i = \frac{f_d - f_s}{f_s} \tag{1}$$

ここに, fa: 動的な応力またはたわみの最大値 fs: 静的な応力またはたわみの最大値

また,比較として文献 2)の手法により算定した衝撃係 数の設計値についても示し,その妥当性について検証した.

(1) 主桁の衝撃係数

主桁に対しては,たわみ(鉛直変位 *δ*₂)および応力(引 張応力度 *σ*_y)に対して衝撃係数を算定した.その結果を図 13 および図 14 に示す.

この結果より,複線載荷時の衝撃係数は単線載荷時より も大きい数値で,共振速度 266km/h において設計値を 3% 上回った.設計値は単純梁を用いたシミュレーション解析 により求められたものである.今回の精密な数値解析の結 果では若干これを上回わったものの,衝撃係数の設計値は, 本 FEM 解析値とほぼ同等考えてよいと思われる.



図 14 主桁応力 σ_yに対する速度効果の衝撃係数

(2) スラブの衝撃係数

スラブに対しては、応力(橋軸直角方向の引張応力度 σ_x) に対して衝撃係数を算定した。衝撃係数の設計値について は、部材(応力影響)スパン L_b のとり方や部材の固有振動数 の評価方法は未だ十分に解明されていないため、本検討で は衝撃係数の設計値を表3に示す3ケースについて算定し、 FEM 解析値と比較した。図15 にこれらの結果を示す。

図 15 より, FEM 解析値による衝撃係数のピークは,主 桁と同様に列車速度 266km/h で生じている.また,設計値 との比較において,設計値1については1次モードに対す る共振速度 266km/h で解析値を過小評価しており,設計値 2 については,解析値を包絡するものとなっているが,解 析値のピークを2倍程度過大評価している.これに対して, 設計値3については解析値を抱絡し,ピーク値と良い一致 を示している.

表 3 スラブ衝撃係数の設計値算定ケース

	部材(応力影響)スパンLb	固有振動数加		
設計值 1	11.8m スラブ直角方向スパン	8.21Hz (4 次)		
設計値 2	48.6m 主桁橋軸方向スパン	2.97Hz (1 次)		
設計值 3	38.9m 主桁橋軸方向スパンの 80%	2.97Hz (1次)		



5. まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめる.

- 固有値解析より,列車速度 266km/h で1次モード(主桁のたわみ)に対する共振が,350km/h で2次モード(主桁のねじれ)に対する共振が生じる結果が得られた.
- 2)応答解析の結果,列車速度 266km/h のケースにおける鉛 直変位に、過去の計測結果に酷似した1次モードに対す る共振波形が確認された.また、列車速度 360km/h 単線 載荷のケースの主桁天端の水平変位に2次モードに対す る共振が確認されたが、複線載荷の場合、このモードの 共振はほとんど確認できないほど小さいものとなった.
- 3)応答解析により、非構造部材である軌道スラブの影響について検討したところ、軌道スラブを考慮することにより剛性は若干増加するものの、付加される重量の影響が支配的なため、固有振動数ならびに共振速度が低下した.
- 4)速度効果の衝撃係数 i_aについて, FEM 解析値と設計値²⁾ を比較した.その結果,主桁に対する設計値は FEM 解 析値とほぼ同等の結果であった.また、スラブに対する 設計衝撃係数の算定法には、これまで不明な点があった が、本検討では部材(応力影響)スパン L_bを主桁スパンの 80%、固有振動数に1次モードの固有振動数を用いて算 定することで解析値とよく一致した.

参考文献

 自我部 正道,松本 信之,藤野 陽三,涌井 一,金森 真, 宮元 雅章:共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計 法に関する研究,土木学会論文集,No.724/I-62, pp83~102, 2003

2)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