論文 地盤・構造物の連成を考慮した直接基礎RCラーメン高架橋の大規模 3次元解析と1質点解析の地震応答に関する一考察

平林 雅也*1・伊東 佑香*1・小林 薫*2

要旨:構造物の静的・動的な挙動を把握するときの簡易なモデル化の手段として,構造物を設計振動単位ご とに質点系モデルを用いる方法がある。一方,コンピュータの性能や材料構成則の向上に伴い,立体要素の 3次元 FEM を用いた詳細な解析モデルにより,構造物・地盤の大規模連成解析が可能となっている。そのた め本検討では,約26万要素の3次元 FEM により列車走行の実測波形を再現できる地盤・構造物連成の全体 モデルを構築し,1質点モデルに置換して全体モデルの地震応答の再現性を確認した。その結果,1質点系の 履歴則,重量,減衰定数を適切に設定することで全体モデルの応答を概ね再現することができた。 キーワード:構造物,地盤,連成解析,減衰定数,振動数,有限要素法,1質点系

1. はじめに

構造物の静的・動的な挙動を把握するときの簡易なモ デル化の手段として、構造物を設計振動単位ごとに、一 体型または分離型の質点系モデルを用いる方法がある¹⁾ ²⁾。ここで構造物と地盤の相互作用の影響を適切に考慮 するため、地盤反力を回転ばねや分布ばねに置き換えて 支持力特性の違いを評価する必要がある。一方、コンピ ュータの性能や材料構成則の向上に伴い、立体要素の3 次元 FEM を用いた詳細な解析モデルにより、構造物・ 地盤の大規模連成解析が可能となっている。

詳細な解析モデルによる地震応答解析が望まれるが, 設計に用いるスペクトル作成などでは,相当量の解析回 数が必要となる場合,詳細なモデルでは解析コストを要 する。そのため,質点系などの簡易なモデルに変換可能 であれば解析コストを低減することが可能となるが,履 歴則,重量,減衰定数を適切に設定する必要がある。

そのため本検討では,3次元 FEM により列車走行の 実測波形を再現できる地盤・構造物連成の全体モデルを 構築し,1 質点モデルによる全体モデルの地震応答の再 現性を確認した。

2. 構造物・地盤の3次元 FEM モデルの構築と解析 2.1 対象構造物

図-1に示すような直接基礎 RC ラーメン高架橋を対象

とした。これは基礎が単純であるために、振動モード数 が少なく、1 質点系にした場合も再現性が高いと考えら れるためである。また、通常の鉄道ラーメン高架橋は1 層または2 層がほとんどであるため、振動モードの多い 2 層ラーメンを1 質点系で再現できれば、振動モードの 少ない1 層 z な高架橋を基礎の性能を含めて、質量 W、 剛性 K、減衰 C (減衰定数 h) で表現することを目的と する。

2.2 振動特性測定

対象となるラーメン高架橋の列車通過直後の振動を複 数回測定することにより、振動波形および振動特性を得 ることとした³⁾。測定方法は、構造物中央天端付近の線 路直角方向の振動をレーザードップラー速度計⁴⁾により 複数回測定した。

表-1 に測定した振動特性を示す。振動数は 2.44~ 2.93Hz(周期 0.341~0.410 秒),減衰定数は 2.66~6.50% となった。図-2 に測定波形と、検討に用いた修正波形 の一例を示す。測定結果や既往の研究⁵⁾より、構造物の 一次固有振動モードの周波数は 1~10Hz の間と想定され る。測定したデータの波形は、高い周波数により波の一 部がパルス波のような形状で大きく立ち上がっている箇 所があることや、基軸がずれていること、1Hz 以下の長 周期成分が含まれてしまい全体的にうねりが生じている ことがある。それらの影響を削除するために 0.5~30Hz



*1 東日本旅客鉄道㈱ JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 研究員 修士(工学) (正会員) *2 東日本旅客鉄道㈱ JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 主幹研究員 博士(工学) (正会員) のバンドパスフィルタを用いて高周波数成分や長周期成 分を削除した。長周期成分と見なせる波形の基線ずれも この方法を用いることで修正している。ここでの振動数 は1次モードと考えられる振動数で,修正波形のフーリ エスペクトルにおいて複数のピークが得られた場合,振 動数が低い値のものを採用している(図-3)。これは, 低次のモードほど振動数が低くなるためである。また, 減衰定数は図-2の修正波形に示すように,測定波形の プラス側とマイナス側それぞれにおいて,適当な測定点 を結ぶ包絡線により減衰曲線を指数関数でフィッティン グし,自然対数eの乗数cが角振動数ωと減衰定数hの積 であることから,推定される1次固有モードの振動数か ら式(1)を用いて算定する方法である。

$$h = -\frac{c}{\omega} = -\frac{c}{2\pi f} \tag{1}$$

ここに, h: 減衰定数

C:減衰曲線におけるeの乗数

ω:角振動数

f:一次固有振動モードの固有振動数

測定した波形は,多くの振動モードを有している可能 性がある。特に振動数の近いモードが存在する場合,う なりが発生する。うなりが発生していると見みられる測 定波形については,図-2に示すように,うなりの最大 値と考えらえる各点を用い,最小二乗法を用いた指数関 数の近似曲線により減衰の包絡線を作成した。

2.3 解析モデル概要

地震時の実構造物の挙動を把握するために,図-4 に 示すような構造物および地盤の全体の3次元 FEM モデ ルを構築し,列車走行解析による振動波形と列車走行時 の測定波形と合わせることでモデルの妥当性を検証する こととした。

全体をモデルにしたのは、初期減衰や地盤と構造物の 連成挙動により全体系の減衰が適切に評価できると考え たためである。構造物は振動単位系と想定される、ラー メン1ブロックおよび両端の調整桁とし、モデル化して いない部材(路盤鉄筋コンクリート,軌きょう、ダクト, 高欄)の荷重は,軌道中心に分布荷重として与えている。 地盤のサイズは、フーチングの幅・奥行の10倍程度とし、 基盤より10m深くした。

各箇所の諸元を表-2に示す。RC ラーメンは、六面体 要素を用い、柱・中層横梁・上層横梁に鉄筋を考慮した 分散ひび割れモデルにより適用し,残りを弾性体とした。 調整桁は、剛性・質量を設定した梁要素を用い、桁の端 部には橋軸方向の移動拘束を設定することで、半分の桁 のモデルで疑似的に桁全体をモデル化している。地盤は、 六面体要素を用い、ボーリングによる地盤材料とN値か ら、鉄道構造物設計標準(以下、設計標準と称す)およ

表-1 測定結果

鱼	乍動粉	平均值	田吉	減衰定数(%)		
_魺 定 回数	派到奴 (Hz)	致 z) との差 (%) (sec)		+側	一側	
No.1	2.93	4.35	0.341	6.50	5.34	
No.2	2.44	13.06	0.410	2.99	3.42	
No.3	2.93	4.35	0.341	3.53	2.66	
No.4	2.93	4.35	0.341	5.96	4.72	





図-4 解析モデル

び道路橋示方書のより各種数値を設定した。さらに、地 盤の変形履歴には GHE-S モデル ⁷を用い, 振動での地盤 の変形履歴による減衰を再現することとした。GHE-S モ デルの各種パラメータは表-3に示す通りとし、平均粒 径 D50 として、安田らの式⁸により設定している。

また、地盤の境界条件は、側面をせん断土槽と同様に 同じ方向の水平変形とするような拘束式で設定し、底面 を粘性境界として反射を防いでいる。

2.4 列車走行解析

モデルが実構造物を再現しているか確認するために, 列車走行解析を実施し,走行直後の振動波形と振動特性 を再現することとした。ここでは、最も減衰定数が低く なる表-1における No.3 を再現することとし、スラブ天 端において振動数 2.93Hz, 減衰定数 2.5~3.5%を目標と した。

解析条件は次の通りとした。なお、橋梁を通過後の振 動が再現できればいいので、構造物より長い編成数にす ることとし、実際より少ない3両編成としている。

- 直接積分法による時刻歴応答解析
- ・走行履歴を軌道中心へ入力
- 速度: 275km/h
- 編成数:3 両
- 荷重:110kN/軸(軸配置を図-5に示す)
- ・積分間隔 5.0×10-3 秒

モデルの軌道中心線上の節点に時刻ごとの荷重列の移 動を行った。載荷点が節点と節点の間である場合は、節 点からの距離で按分している。なお、車両を振動系とし て扱わない理由として,既往の研究 %より,このたびの 対象であるコンクリート構造物の場合、列車を振動系と しても大きな影響は生じないと想定され、さらに走行中 の通過後の振動を分析するため、車両の振動系は大きく 影響しないと考えたためである。

ここで、コンクリート要素に剛性比例減衰を適用して 解析を行い、構造物のみのモデルと地盤・構造物の全体 モデルにおいて, 走行後の振動波形についてフーリエス ペクトルより固有振動数を算定し、図-2のように自由 振動曲線を想定して減衰定数も求めた。その結果を図-6 に示す。全体モデルの減衰定数および振動数は、構造物 のみの減衰定数に伴い増減する傾向が見られた。ここで, 構造物のみの減衰定数を 4.9% としたときに, 全体モデル で振動数3.08Hzと減衰定数3.16%となり測定結果と概ね 一致する結果となった。このときの測定波形と全体モデ ルの波形は、それぞれが線路直角方向の速度波形である ものの、波形測定の違いなどが原因と考えられる最大値 の差異が生じているため、最大値で割ることで正規化し て、重ね合わせることで比較をした(図-7)。これより 波形は概ね一致することがわかり, 全体モデルが概ね実

表-2 解析における各材料の諸元

【コンクリート(弾性体)】						
単位	ホアソン	ヤング率				
体積重量	比	E				
(kN/m ³)		(kN/m^2)				
25.0	0.167	2.56E+07				

【コンクリート(分散ひび割れモデル)】						
単位	ホアソン	圧縮	引張	鉄筋		
仕珪舌旦	ᅶ	改由い	と中央	의미사 드	12	

単位	ポアソン	圧縮	引張	鉄筋	鉄筋	AH 44
体積重量	比	強度fc	強度ft	剛性E	降伏fyt	
(kN/m^3)		(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/m^2)	(N/mm^2)	里
25.0	0.167	-33.8	1.96	2.05E+08	345	適宜

【地盤】

а

	単位	ポアソン	せん断
種類	体積重量	比	剛性
	(kN/m^3)		(kN/m^2)
砂	18.4	0.45	18,600
砂:水中	20.4	0.49	20,700~326,000
粘土	1.78	0.49	106,000~242,000
[T (h)]	表-3	GHE-	S の各種パラメー

hmax

119						
Y	r	C1(0)	C1(∞)	C1(0)	C1(∞)	
1.365~8.084E-04		1	0.9	0.25	2.5	
a	β	hmax	к	γ0	Gmin/Gmax	
3.202	2.227	0.25	1.1	0.0006	0.18	
【粘土】						
γ	r	C1(0)	C1(∞)	C1(0)	C1(∞)	
6 131~8 737E-04		1	0.8	03	25	

Gmin/Gmax

v 0



物を再現できていると判断した。

2.5 地震応答解析

実構造物の大規模地震時の挙動を確認するために、構 築した3次元 FEM モデルにより次の解析条件で地震応 答解析を実施した。

・直接積分法による時刻歴応答解析



図-8 地震応答解析の各箇所応答値(等倍地震波)

・入力地震波2種類(基盤(モデル底面)に加速度入力)

- L2 地震波スペクトル IG2 (0.5 倍)
- -L2 地震波スペクトル IG2 (等倍)
- ・積分間隔 5.0×10-3秒

等倍の地震波による解析結果を図-8 に示す。フーチ ング底面高さの波形は基盤の入力波形に比べて,位相が 遅れ,かつ振幅が増大しており,重複反射理論に基づい ていることがわかる。入力地震波を2種類としたのは,1 質点系に置き換えた場合,地震波の大きさによらず評価 できるか確認するためである。

2.6 水平交番載荷解析

1 質点系モデルの骨格曲線を設定するために,水平方 向の交番載荷を実施した。載荷点はスラブ天端とし,載 荷点の荷重変位関係を確認した。解析結果の一例を図-9 に示す。荷重変位関係において,コンクリートに亀裂の 発生する C 点,鉄筋が降伏する Y 点,最大荷重となる M 点,荷重低下後 Y 点と同じ荷重となる荷重変位を N 点と し,解析における各点の荷重変位を**表**-4 に示す。

この結果より得られた荷重変位曲線は,地盤と構造物 基礎の相互作用による変形性能を有しているため,地盤 のばねをモデル化する必要はない。

3. 1 質点系による解析

3.1 モデル概要

3次元 FEM モデルと比較するための1質点系モデル は次のような条件とした。

- 履歴則は耐震標準に示された JR 総研剛性低減 RC 型
- 弾性振動数が測定振動数(3.0Hz 程度)と同様となる
 - よう、1次剛性と質点の重量を調整

3.2 水平交番載荷解析

全体モデルの水平交番載荷による荷重変位関係にフィ ッティングするよう表-4 に示す設定とした。解析結果 は図-10ようになり、全体モデルの骨格を概ね再現でき ていると考えられる。ここで重量のケースが2種類ある が、上層梁以上の重量 Wu, 柱以下のフーチング等を含 む重量 Wp を用いている。ケース1は設計標準¹⁾におけ る等価重量 Wu+0.4Wp=18,119kN としたもの、ケース2 は、重量を Wu=12,419kN としたものとした。ケース2

表-4 1質点系における各種設定値

【骨格曲線】

	δ (mm)	P(KN)
C点	8	3,474
Y点	104	19,749
M点	224	22,270
N点	640	19,740

【質量·弾性振動数】

	ケース1(Wu+0.4Wp)	ケース2(Wu)
質量(kN)	18,119	12,419
振動数(Hz)	2.44	2.95



図-9 交番載荷解析における C 点時の応力分布



でWuとしたのは、構造物がトップヘビーであるため、 上部の重量のみで表現できるかと考えたためである。な お、弾性振動数はケース2が目標値とほぼ同等となった。 3.3 地震応答解析

水平交番載荷解析により設定した特性を持つ2種類の 1質点系モデルに減衰定数を設定することで地震応答解 析を実施した。

このモデルは, 地盤・構造物連成による3次元 FEM モ

デルの水平交番載荷解析の結果によるものであり,基礎の性能を含んでいるため,分布ばねや回転ばねを用いないこととした。また,入力地震動は基礎底面に入力される地震波が適切と想定されるため,3次元 FEM 解析にて,構造物のモデルより十分離れた箇所の地盤モデルにおける,フーチング底面高さの振動波形(図-8)を抜き出して1質点モデルに与えることとした。このときの減

衰定数を0%,3%,5%,10%の4種類とした。

全体モデルと1質点モデルの応答加速度の履歴として、 ケース1を図-11に、ケース2を図-12に示す。また、 表-5 に全体モデルの最大・最小応答値と、同様の時刻 における1質点モデルの最大・最小応答値を集約した。 等価重量を用いたケース1では、全体モデルに比べて



応答値が小さく, 表-5より4割以上の差が生じるケー スがあることがわかる。これは1質点モデルに用いた重 量が大きいため,全体モデルより小さな加速度でM点に 達し,それ以上の加速度が出なくなったためだと考えら れる。一方,ケース1より重量の小さいケース2におい ては,全体モデルに比べて最大2割程度の差が見られる ものの概ね全体の解析結果と同じ波形を得ることができ た。さらに,弾性振動数が目標値となっていることから も,適切な履歴則と重量が再現できたためだと考えられ る。以上より,履歴則と荷重を適切に設定することで,1 質点モデルにより直接基礎のRCラーメン高架橋は概ね 再現できると考えられる。

この解析結果より,質量全体を Wu+Wp とした場合に 対する Wu の等価質量比が 1.0 に近い結果となっている。 これは,図-1 に示すような直接基礎ラーメン高架橋の Wp の大半がフーチングによるためで,加振時の等価 1 自由度系を想定すると,Wu による振動が卓越し,その ときの1次モードが支配的になるためだと考えられる。

また、減衰定数の影響を見ると図-11 および図-12 において大きな違いが見られないことがわかる。これは 載荷履歴が骨格モデルのY点を超えているために、粘性 減衰より履歴減衰が支配的になっているためだと考えら れる。より再現性の高いケース2に着目すると、全体モ デルと1質点モデルの応答加速度の差は、表-5におい て、加振波の0.5倍では減衰定数3%のとき、加振波の等 倍では減衰定数0%のときに最小となった。

以上より,構造物地盤連成系における荷重変位の骨格 と,適切な重量がわかれば,1質点系を用いて直接基礎 のラーメン高架橋を再現できると考えられる。

4. まとめ

直接基礎 RC ラーメン橋脚において、3 次元 FEM モデ ルと1 質点系モデルにより地震応答解析を行い以下のこ とがわかった。

- 走行解析の結果,構造物のみの減衰定数を4.9%以上 とすると、全体モデルの減衰定数が測定結果と概ね 一致し、設計時に使用する RC 構造物 5%の減衰定数 が妥当だということを確認した。
- ・ 地盤構造物の連成解析を実施したモデルによる、交 番載荷の荷重変位の骨格を利用して、1質点モデル を構築した結果、地震応答解析にて概ね同様の波形 が得られ、地盤のばねを省略することができた。
- 1 質点系の減衰定数を変化させて地震応答解析した結果,波形に顕著な差異は見られず,大規模地震では履歴減衰が支配的であることが確認された。
- ・ 地震応答解析において、1 質点モデルの重量を等価 重量としたときより、上部重量としたときの方が全

表-5 解析結果一覧

/		h	応答加速	度(m/s²)	全体系	との差
/		(%)	+側	一側	+側	一側
	全体系	I	11.9	-12.8	I	1
		0	11.2	-11.2	-6%	-12%
	ケース	3	11.3	-11.3	-5%	-11%
to tE 达	1	5	8.5	-10.1	-28%	-21%
		10	8.1	-8.6	-31%	-32%
(~ 0.3)		0	13.5	-14.5	13%	13%
	ケース	3	11.0	-12.7	-8%	0%
	2	5	10.0	-11.7	-16%	-8%
		10	9.2	-10.1	-22%	-21%
	全体系	-	15.2	-16.0	-	-
		0	8.7	-11.2	-43%	-30%
	ケース	3	10.5	-12.7	-31%	-21%
to tE 达	1	5	11.6	-13.6	-24%	-15%
		10	13.4	-14.9	-12%	-7%
(~ 1.0)		0	17.4	-17.3	14%	8%
	ケース	3	18.1	-18.9	19%	18%
	2	5	18.3	-18.8	20%	18%
		10	19.2	-17.6	26%	10%

体モデルとの差は小さくなった。

上部重量による1質点モデルに着目すると、全体モデルと1質点モデルの応答加速度の差は、使用した加振波の0.5倍では減衰定数3%のとき、加振波の等倍では減衰定数0%のときに最小となった。

参考文献

- (財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標 準・同解説 耐震設計,丸善,1999
- (財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計,丸善,2012
- 平林雅也,小林薫:走行列車の振動を用いた鉄道構 造物の振動特性測定と再現解析,コンクリート工学 年次論文集, Vol.36, No.2, pp1315-1320, 2014
- 上半文昭:構造物診断用非接触振動測定システム「U ドップラー」の開発,鉄道総研報告, Vol.21, No.12, pp.17-22, 2007
- 5) 徳永宗正,曽我部正道,上半文昭,谷村幸裕,室野 剛隆,小野潔:常時微動による鉄道構造物の等価固 有周期推定手法,鉄道総研報告,Vol.25,No.6, pp.35-40,2011
- 6) 日本道路協会:道路橋示方書(V耐震設計編)・同 解説, 2013.7
- 7) 室野剛隆,野上雄太,田上和也,坂井公俊:GHE-S モデルによる土の動的非線形挙動の評価方法,鉄道 総研報告, Vol25, No.9, 2011
- 8) 安田 進,山口 勇:種々の不撹乱土における動的 変形特性,第20回土質工学研究発表会,pp.539-542, 1985
- 徳永宗正,曽我部正道,浅沼潔:列車荷重のモデル 化が構造物の地震時動的応答に及ぼす影響,コンク リート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp871-876, 2011