

# 熊本地震を事例としたラーメン高架橋の 地震時挙動に及ぼす地中梁の影響

小野寺 周\*      和田 一範\*  
日野 篤志\*      室野 剛隆\*\*

**Effect of Underground Beam on Seismic Response of Railway Rigid Frame Viaduct  
in 2016 Kumamoto Earthquake**

Meguru ONODERA      Kazunori WADA  
Atsushi HINO      Yoshitaka MURONO

In the 2016 Kumamoto Earthquake, a case was confirmed where the degree of damage to a railway rigid frame viaduct was different from to an adjacent one. In one viaduct there was no damage, but in the other viaduct, cracks of piers occurred. There is structural difference in the presence or absence of underground beams between both structures. This difference seems to be a factor that caused a difference in damage degree. The seismic response of structures in the 2016 Kumamoto earthquake was investigated by numerical analysis in this study. As a result, it was shown that natural period of a structure without underground beams was closer to the predominant period of the ground motion than that of the other structure with underground beams. The seismic response of a structure without underground beams increased due to this. Furthermore, it was shown that the effect of the ground displacement on the structure without underground beams was larger than that on the other one.

キーワード：地中梁，鉄道ラーメン高架橋，2016年熊本地震，地盤変位，地震応答解析

## 1. はじめに

2016年に発生した熊本地震では2度の震度7の揺れを観測し、広域で強震動が記録された他、多くの鉄道構造物においてこれまで経験したことのない地震動が作用した。鉄道沿線の地震計でも大きな加速度が観測されており、回送中の新幹線車両の脱線<sup>1)</sup>等が発生した。鉄道構造物においては、ラーメン高架橋の防音壁や桁に被害が生じたものの、柱や梁等の主要部材については、ひび割れや浮き程度の比較的軽微な損傷に留まった<sup>2) 3)</sup>。主要部材における損傷を設計で想定した範囲に留めることができた点は、これまでの地震被害を踏まえて改訂されてきた鉄道の耐震設計法が一定の役割を果たした証と言える。

比較的軽微な損傷に留まった鉄道構造物の中で、2基のラーメン高架橋が隣接する区間において、両構造物の損傷程度が異なる事例が確認された。両構造物は同一地点に位置しているものの、一方のラーメン高架橋には損傷が見られず、他方のラーメン高架橋のみに柱上端部にひび割れ程度の軽微な損傷が生じていた。そこで、両者の構造諸元を比較した結果、線路方向における地中梁の

有無という構造的な違いが確認された。したがって、この違いによって同一地点における両構造物の地震時挙動が異なり、損傷程度に差が生じた可能性が考えられた。

以上を踏まえ本稿では、熊本地震での被害事例をもとに、地中梁の有無が構造物の地震時挙動に及ぼす影響について解析的な評価を行う。

## 2. 対象構造物の概要とモデル化

### 2.1 対象構造物

本検討では、同一地点に位置し、損傷程度に差が生じたラーメン高架橋2基を対象構造物とする。対象構造物の概要を図1に示し、構造諸元を表1にまとめる。なお、いずれの構造物も平成11年の設計標準<sup>4)</sup>に準拠して耐震設計されている。線路直角方向・線路方向ともに地中梁があるラーメン高架橋（以下、構造物Aと呼ぶ）では目立った損傷が見られなかったのに対し、線路方向のみに地中梁の無いラーメン高架橋（以下、構造物Bと呼ぶ）では、熊本地震後の随時検査によって柱にひび割れや浮き程度の軽微な損傷が確認された。

なお、表1に示すように、線路方向における地中梁の有無以外の構造諸元の違いとして、杭形式が異なっている点、構造物Bでは柱断面がより大きい点が挙げられる。これは、一般的に地中梁が無いことで構造物全体系の剛

\* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

\*\* 鉄道地震工学研究センター

特集：地震対策技術

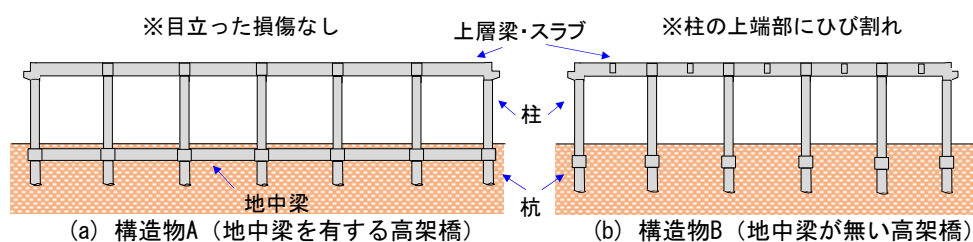


図1 対象構造物の概要

表1 対象構造物の構造諸元

対象構造物	構造物 A (地中梁あり)	構造物 B (地中梁無し)
径間数	6	5
構造物高さ	10.8m	11.8m
L方向スパン長	9.1m	8.7m
C方向スパン長	9.3m	4.8m
柱断面	0.9m × 0.9m	1.3m × 1.3m
柱鉄筋比	0.78%	0.62%
杭形式	場所打ち RC 杭	回転圧入鋼管杭 (鋼管厚 25mm, 羽根外径 1.9m)
杭径	1.3m	1.3m
杭長	26m	31m

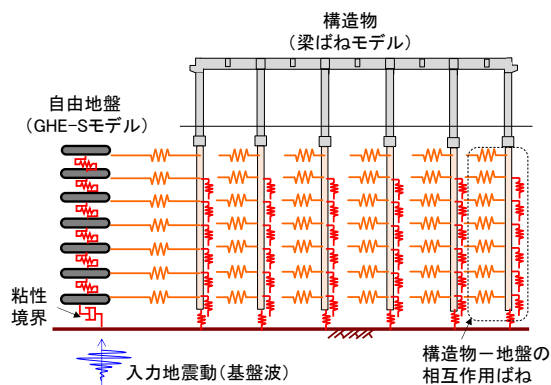


図2 解析モデル (一体型モデル)

表2 対象構造物近傍の地盤条件

層厚 (m)	土質区分	N 値	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 φ (deg)	単位体積重量 γ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断弾性波速度 Vs (m/s)
2.7	上載土	3	18	0	15	130
4.8	砂質土	5	0	26	17	137
2.0	粘性土	10	44	0	15	215
6.4	砂質土	19	0	33	18	213
4.0	粘性土	3	74	0	15	144
3.9	砂礫	20	0	34	18	326
9.9	砂礫	20	0	34	18	380

性が小さくなることから、地震時の水平作用力に対する剛性および抵抗力を確保するためと推測される。

## 2.2 モデル化

地中梁の有無が違いとなる線路方向について、設計計算書に基づき、梁ばね要素からなる2次元のフレームモデルを構築した。部材および基礎の地盤抵抗の非線形特性は現行の設計標準<sup>5) 6)</sup>に準拠してモデル化した。解析モデルには、図2に示すように、基盤から入力した地震動が構造物-地盤の相互作用ばねを介して構造物に作用する一体型モデル<sup>5)</sup>を用いた。これにより地盤と構造物の相互作用を自動的に考慮することができる。

地盤条件について、両構造物は線路方向に隣接して位置しているため、表2に示す同一のものとした。地盤の固有周期は0.58秒であり、G4地盤に分類される。自由地盤の非線形特性はGHE-Sモデル<sup>7)</sup>でモデル化した。

## 3. 振動特性および破壊形態の比較

構築した解析モデルに対して、プッシュ・オーバー解析を実施した。本解析では、自由地盤の変形を拘束する

ことで地盤変位が構造物に及ぼす影響を考慮していない。構造物天端位置の水平震度-水平変位関係を図3に示す。

図3より、いずれの構造物も柱の損傷が進展する破壊形態となっている。柱にひび割れが生じる水平震度は構造物Aで0.04、構造物Bで0.05である。また、柱の初期降伏が生じる水平震度は構造物Aで0.50、構造物Bで0.53であり、同程度の損傷が生じる水平震度はほぼ等しい。一方、初期降伏に到達する際の水平変位は構造物Aで81mm、構造物Bで147mmであり、地中梁の無い構造物Bの方が大きな変形を生じる。これは、地中梁が無いために構造物全体系の剛性が小さいことが要因として挙げられる。その結果、原点と初期降伏点を結んだ割線剛性から算定した固有周期(固有振動数)は構造物Aで0.8s(1.3Hz)、構造物Bで1.0s(1.0Hz)となる。なお、別途実施した固有値解析の結果、水平1次の固有周期は構造物Aで0.51s(2.0Hz)、構造物Bで0.59s(1.7Hz)であり、弾性時と降伏時の固有周期がいずれも異なる。

以上より、両構造物の破壊形態は同様であり、各損傷イベントが生じる水平震度もほぼ等しい一方、両構造物の固有周期は異なることが示された。

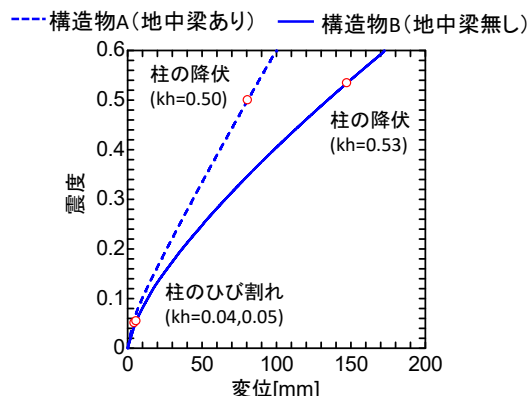


図3 構造物天端における水平震度－水平変位関係

#### 4. 熊本地震における地震時挙動の比較

##### 4.1 解析条件

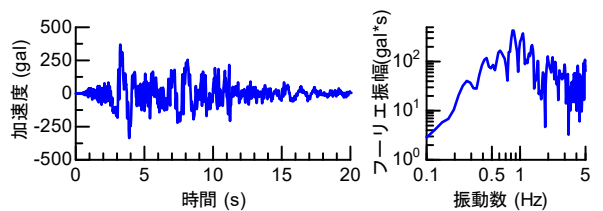
両構造物に対して地震応答解析を実施した。入力地震動は2016年熊本地震で観測された地表面波形をもとに、等価線形化法により基盤位置へと引き戻した波形（以下、推定基盤波と呼ぶ）を用いた。基盤波の推定に用いた地表面波形および観測点付近の地盤条件を図4および表3に示し、推定基盤波の時刻歴加速度とフーリエスペクトルを図5に示す。図5(b)より、入力地震動の卓越周期は1.0sであることが分かる。

応答値の算定に際して、数値積分は平均加速度法を用い、時間刻みを0.001sとした。減衰についてはいずれの構造物においても同様に、0.1Hz～10Hz程度の範囲でモード減衰定数が概ね一定となるようなRayleigh減衰を設定した。

##### 4.2 損傷程度の比較

構造物天端位置での応答加速度の時刻歴波形を図6に示す。最大応答加速度は構造物Aで436gal、構造物Bで684galであり、構造物Bは構造物Aの1.5倍以上大きな応答が生じていることが分かる。両構造物の応答に差が生じた点について、構造物の固有周期と地震動の卓越周期との関係から考察する。3章で示したように、構造物の弾性時と初期降伏時の固有周期を整理すると、構造物Aの周期帯は0.51s～0.8s、構造物Bでは0.59s～1.0sである。地震動の卓越周期は1.0s付近であり、図7に示すように構造物Bの周期帯の方が地震動の卓越周期に近接している。その結果、構造物Bはより大きな応答を示したと考えられる。

続いて、構造物の柱の損傷状態を図8により比較する。図中には応答が最大となった柱上端のモーメント－曲率関係の履歴を合わせて示す。構造物Aではいずれの柱も軸方向鉄筋の降伏が生じない程度の応答に留まっている。一方で、より大きな加速度が生じた構造物Bでは、図8(b)に示すようにいずれの柱でも上端部の鉄筋が塑性化する程度まで応答が進展している。

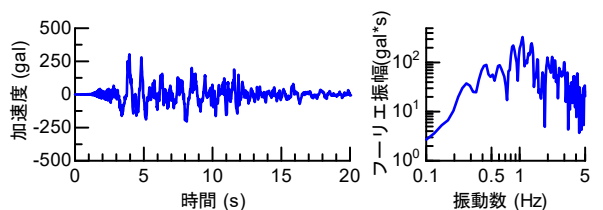


(a) 時刻歴加速度 (b) フーリエスペクトル

図4 基盤波の推定に用いた地表面波形

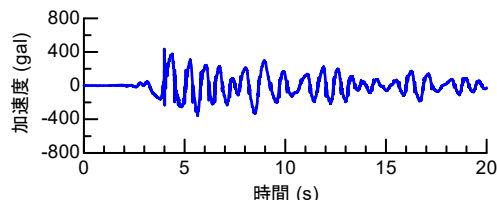
表3 基盤波の推定に用いた地盤条件

深さ (m)	土質	N値	せん断弾性波速度 (m/s)	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	平均粒径 (mm)
0.0～3.2	粘土	6	130	16.0	0.020
3.2～5.3	細砂	18	170	19.0	0.150
5.3～7.2	シルト	2	170	16.0	0.025
7.2～8.8	砂質シルト	2	230	16.0	0.040
8.8～18.6	細砂	32	230	19.0	0.150
18.6～23.0	シルト	4	160	16.0	0.025
23.0～25.9	細砂	7	160	19.0	0.150
25.9～26.1	粘土	31	225	17.0	0.020
26.1～29.5	粗砂	31	225	19.0	0.600
29.5～34.6	礫	44	440	19.0	2.000
34.6～35.7	粗砂	33	440	19.0	0.600

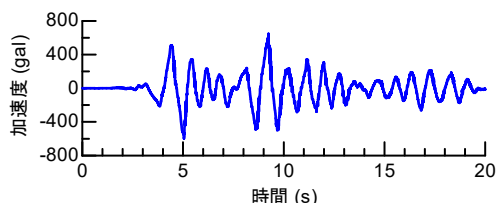


(a) 時刻歴加速度 (b) フーリエスペクトル

図5 入力地震動（推定基盤波）



(a) 構造物A(地中梁あり)



(b) 構造物B(地中梁無し)

図6 構造物天端における応答加速度の時刻歴

このように、両構造物の損傷程度は明確に異なっており、この差は実際の構造物の状況から推定される損傷の大小関係と整合している。以上より、損傷程度が異なった要因として、本検討で対象とした構造物の固有周期と地震動の卓越周期との一致性が考えられ、両構造物の耐力は同程度でありながら、地震動の卓越周期により近接した固有周期を有していた構造物Bで応答が大きくなったと考えられる。

特集：地震対策技術

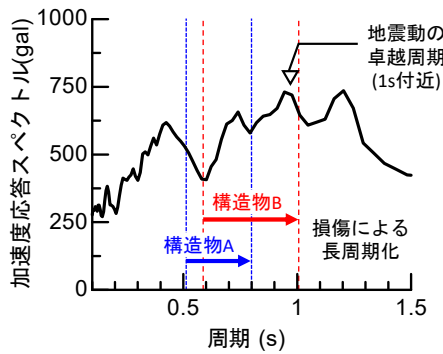


図7 構造物の固有周期と地震動の卓越周期の関係

5. 地中梁の有無に着目した地盤変位・慣性力の影響評価

5.1 検討方針

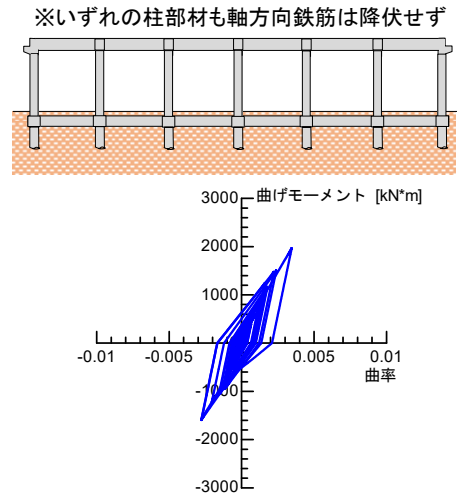
4章では、損傷程度に差が生じた要因として、本検討で対象とした構造物と地震動との周期特性の一致性を挙げた。一方、宇佐美ら<sup>8)</sup>は地中梁の無いラーメン高架橋では地盤変位によるモーメントが柱にまで及ぶことを示している。そこで本章では、損傷程度に差が生じた他の要因として地盤変位に着目し、地盤変位が両構造物の地震時挙動に及ぼす影響について比較する。

まず、地盤変位や慣性力が高架橋の応答へ与える影響を分離して評価するために、通常モデル(図2のモデルであり以下、全体系モデルと呼ぶ)の他に、高架橋を無質量とすることで慣性力が生じないモデル(以下、地盤系モデル)と、地盤と高架橋の相互作用ばねを基盤固定とすることで地盤変位が生じないモデル(以下、慣性系モデル)を構築した(図9)。なお、地盤系モデルは本検討と類似の既往研究<sup>8)</sup>でも用いられているものである。また、慣性系モデルは設計標準<sup>5)</sup>において分離型モデルと呼ばれ、一体型モデルと対比されるモデルである。

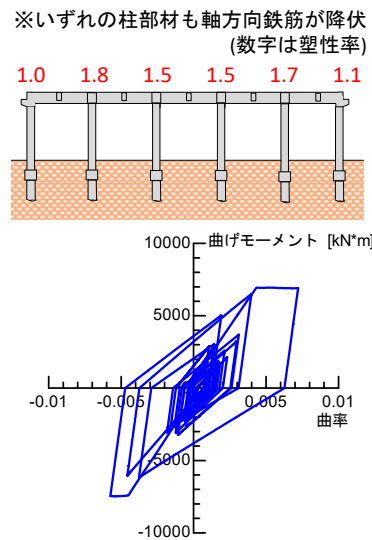
地盤系モデルによる応答は地盤変位のみ起因して生じるものとする。それに対し、慣性系モデルによる応答は高架橋の慣性力のみ起因したものとする。全体系モデルの応答値にはそれらの両影響が含まれることとなる。これらのモデルにより、地盤変位、慣性力の影響を分離して把握することができる。ただし、本検討では部材や地盤の非線形性を考慮している点、慣性系モデルは基盤位置で粘性境界を設けない境界条件である点等から、全体系モデルの応答値が地盤系モデルと慣性系モデルの単純な線形和とはならないことに留意されたい。

5.2 熊本地震を事例とした応答評価

熊本地震における推定基盤波(図5)を用いた場合の、全体系モデル、慣性系モデル、地盤系モデルの最大曲げモーメント分布を構造物A、Bそれぞれについて図10に示す。なお、同図はモーメント分布形状の相対的な比



(a) 構造物A (地中梁あり)



(b) 構造物B (地中梁無し)

図8 応答解析による損傷程度の比較

較を目的としているため、各モデルの最大モーメントで正規化して表示している。

まず、柱および杭のモーメント分布について、両構造物の地盤系モデルの結果(図中の橙色線)を比較すると、構造物Aは杭から地中梁部分までしかモーメントが生じていない一方、構造物Bは杭から柱上端までモーメントが生じている。次に、両構造物の慣性系モデルの結果(図中の緑色線)を比較すると、構造物Aは柱上端から地中梁部分までしかモーメントが生じていないが、構造物Bでは柱上端から杭中間までモーメントが生じている。よって地中梁が無い場合、地盤変位もしくは慣性力によって生じる曲げモーメントが杭から柱まで連続的に伝達することが分かる。

以上より、4章において構造物A、Bの柱の損傷程度が異なった要因として、構造物と地震動の周期特性の一致性を指摘したが、上記結果を踏まえると、その他の要

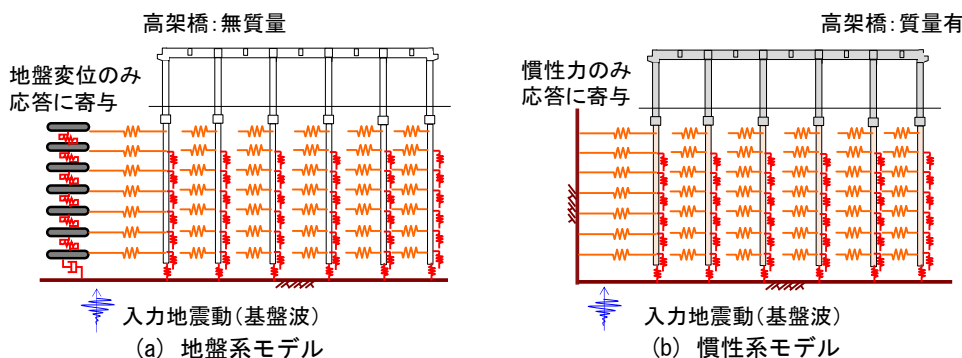


図9 慣性力と地盤変位の影響を評価するためのモデル概要（構造物 B を例として）

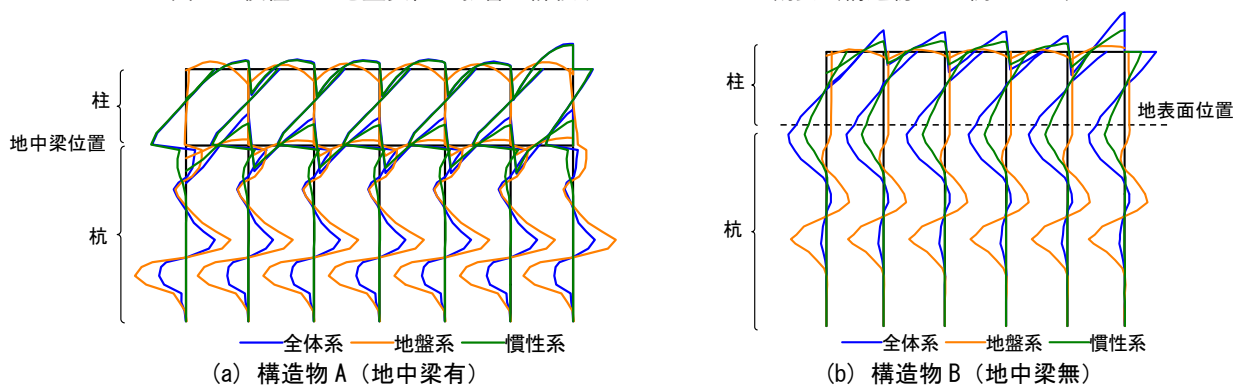
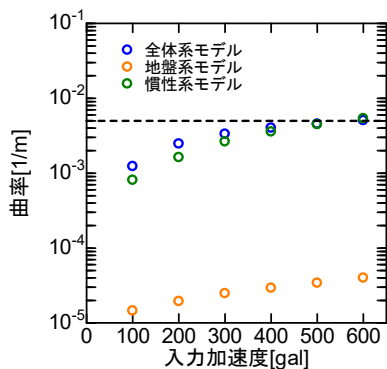
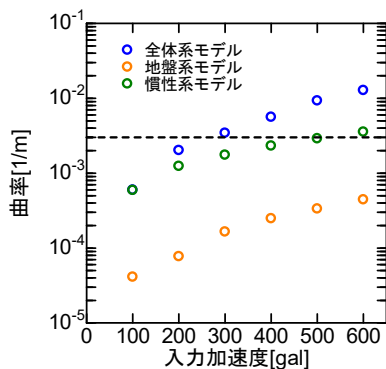


図10 最大曲げモーメント分布形状



(a) 構造物 A (地中梁有)



(b) 構造物 B (地中梁無)

図11 入力波形の加速度振幅と柱上端の応答曲率の関係

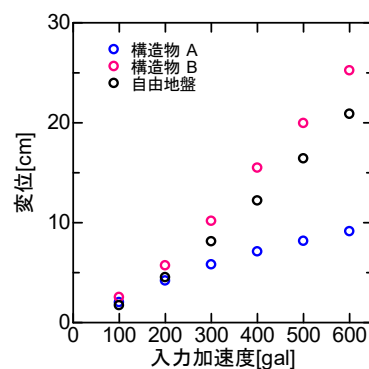


図12 入力波形の加速度振幅と各応答変位の関係

因として、地中梁が無い構造物 B では地盤変位によるモーメントが柱まで連続的に作用した点も考えられる。

### 5.3 設計地震動による応答評価

これまでの検討は熊本地震の特定の波形に対するものであった。本節では、設計地震動を用いたより一般的な考察を行う。使用する地震動は、耐震設計標準<sup>5)</sup>で示される L2 地震動スペクトル II (G1 地盤) とした。これは 0.1Hz ~ 10Hz 程度の範囲でフーリエ振幅が概ね一定であり、地震動の周期特性が対象構造物の地震応答に及ぼす影響を極力小さくすることができる。また、地盤の非線形程度と構造物の応答の関係を把握するため、入力地震動の最大加速度（以下、入力加速度と呼ぶ）を 100gal から 600gal まで 100gal 刻みで振幅調整して解析を実施し

た。

図 11 に入力加速度と柱上端の曲率の最大値の関係を示す。ここで、図中には各構造物の死荷重状態の軸力における降伏曲率を示す。図 11 より、慣性系モデルでは入力加速度の増大に伴う応答の増加傾向は両構造物で同程度である一方、地盤系モデルでは構造物 B の方が入力加速度の増加に伴って応答曲率の増加程度が大きくなっている。その結果、全体系モデルにおいて、最初に降伏曲率を超過する際の入力加速度は構造物 A で 500gal、構造物 B で 300gal であり、地盤変位の影響をより受ける構造物 B の方がより小さい地震動強度で柱の降伏まで損傷が進展する。

次に、構造物全体系の応答として、柱部材の応答に着目した比較をするために、入力加速度に対する各構造物

## 特集：地震対策技術

の全体系モデルにおける高架橋天端と杭頭の最大相対変位を図12に示す。図中には自由地盤の地表面最大変位も併せて示す。図12より構造物Bの方が構造物Aに比べて、入力加速度の増大に伴う相対変位の増加量が大きい。これは、図11で示した柱部材の1点での評価である応答曲率と同様の傾向が高架橋全体の応答でも表れていると言える。また、自由地盤の地表面最大変位も入力加速度の増大に伴って増加している。すなわち、入力加速度が大きい場合は地盤の非線形化も進展するため、地中梁の無い構造物Bでは地盤変位が柱の応答に及ぼす影響がさらに大きくなると考えられる。

## 6. おわりに

本稿では熊本地震を事例として、同等の地盤条件でありながら損傷程度に差が生じた鉄道ラーメン高架橋2基の地震時挙動を解析的に比較し、地中梁の有無に着目して損傷程度の差が生じた要因を整理した。また、地中梁の有無による地盤変位と慣性力の影響程度について熊本地震および設計標準<sup>5)</sup>の設計地震動を用いて検討した。本検討で得られた結果を以下に示す。

## (1) 構造物と地震動の周期特性に着目した場合

- ① 両構造物の降伏震度は同程度である一方、地中梁が無い構造物では、地中梁がある構造物に比べて固有周期が長い。
- ② ①の結果、地中梁が無い構造物の固有周期が本検討で用いた地震動の卓越周期に近接しており、地中梁がある構造物に比べてより大きな応答が生じた。ただし、②に関しては特定の構造諸元、地盤条件および地震動特性によるものであり、地中梁の有無による一般的な特性ではないことに注意が必要である。

## (2) 地盤変位に着目した場合

- ① 地中梁が無い構造物は地盤変位によるモーメントが杭～柱上端まで連続的に分布する。
- ② 設計地震動の入力加速度を変えた検討の結果、入力加速度の増加に伴って自由地盤が非線形化することで、地中梁が無い構造物では柱の応答曲率の増加程度がより大きくなる。

(2)の結果は、地中梁の無い構造物における応答特性の一般的な傾向と言える。

以上より、本検討で対象とした事例について、ラーメン高架橋2基の構造諸元、地盤条件および地震動特性に起因する周期特性の一致性、ならびに地中梁の有無に起因する応答特性の違いの両者によって、両構造物の損傷程度に差が生じたと考えられる。

ところで、道路橋等多くの土木構造物の耐震設計では、地盤変位の影響を考慮していない。鉄道では現行の設計

標準<sup>5)</sup>以前より、軟弱地盤においては応答変位法<sup>9)</sup>により地盤変位を考慮した設計を行ってきた。また、本稿のように構造条件によって地盤変位の影響程度が異なる点にも鑑みて、現行の設計標準では、軟弱地盤だけでなく深い基礎が建設される普通地盤まで応答変位法で評価することとしている。本稿の結果は、そのような地盤変位を考慮した現行の耐震設計法の有効性及び必要性を示したものと言える。

また、地盤は構造物に比べて一般に不均質性が高いにも関わらず、地質調査結果が疎らである場合や、非線形特性に関する情報が不足している場合も多い。その場合、地盤のモデル化は設計標準で示される標準的な方法により、評価対象構造物に比較的近い地質調査結果を用いて行われる。しかし、本稿の結果を踏まえると、地中梁が無い構造物の地震時挙動を評価する際には、構造物の十分近傍で地質調査を実施することや、必要に応じ動的変形特性試験を実施する等によって地盤のモデル化精度をより高めることが重要であると言える。

## 文献

- 1) 運輸安全委員会：九州旅客鉄道株式会社 九州新幹線熊本駅～熊本総合車両所間列車脱線事故、鉄道事故調査報告書 RA2017-8, 2017
- 2) 笠裕一郎, 海老原毅, 中島英明, 前川聡幸：平成28年熊本地震による鉄道橋の被害報告, 橋梁と基礎, Vol. 50, No. 7, pp. 40-42, 2016
- 3) 中島英明：「平成28年熊本地震」における九州新幹線の土木構造物の被災状況, JREA, Vol. 59, No. 11, pp. 48-51, 2016
- 4) 国土交通省鉄道局監修, (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 丸善出版, 1999
- 5) 国土交通省鉄道局監修, (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 丸善出版, 2012
- 6) 国土交通省鉄道局監修, (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物), 丸善出版, 2012
- 7) 野上雄太, 室野剛隆：S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, No. 2-0014, 2009
- 8) 宇佐美敦浩, 室野剛隆：パイルベント構造物における地盤と構造物の動的相互作用の解明, 鉄道総研報告, Vol. 29, No. 3, pp. 23-28, 2015
- 9) 室野剛隆, 西村昭彦：地盤と構造物の動的相互作用を考慮した応答変位法, 鉄道総研報告, Vol. 13, No. 2, pp. 41-46, 2000