

高架橋走行時の車両の地震応答解析

丸山喜久¹・山崎文雄²・川島一彦³

¹正会員 博（工） 東京工業大学21世紀COE研究員 都市地震工学センター
（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

²正会員 工博 千葉大学教授 都市環境システム学科（〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33）

³フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 土木工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

1. はじめに

我が国の自動車保有台数は年々増加し、平成16年4月現在では7000万台以上に達しており¹⁾、自動車を運転中に大地震に遭遇する人がいることも十分に考えられる。運転中に地震に遭遇すると、車両の走行安定性に何らかの影響があることを示唆するアンケート結果²⁾も得られている。高速道路構造物の耐震性は、兵庫県南部地震以降に耐震補強が進められていることなどを考えるとある程度は向上してきたと考えられるが、その利用者である走行車両に与える地震動の影響についてはあまり検討されていない。

丸山・山崎³⁾は、ドライビングシミュレータを用いた走行実験を行い、地震時の運転者の反応に関する基礎的検討を行っている。この検討では、車両は高速道路の平面道路を走行中であることを想定し、入力地震動に地表面で記録された地動加速度を用いている。一方、首都高速道路は、全長281.0kmのうち80%以上が高架橋などの道路構造物で構成されている⁴⁾。このことから、道路構造物の応答特性が走行車両に与える影響について検討を行うことで、高速道路ネットワークの安全性の向上につながるものと考えられる。

そこで、本研究では車両が道路構造物上を走行しているときに地震が発生した場合を想定し、高架橋走行車両の地震応答解析を行った。代表的な道路構造物の数値モデルを構築し非線形応答解析を行い、得られた応答加速度を6自由度車両モデル⁵⁾の入力地震動として用いた。解析結果を、平面道路走行時の車両の地震応答と比較した。

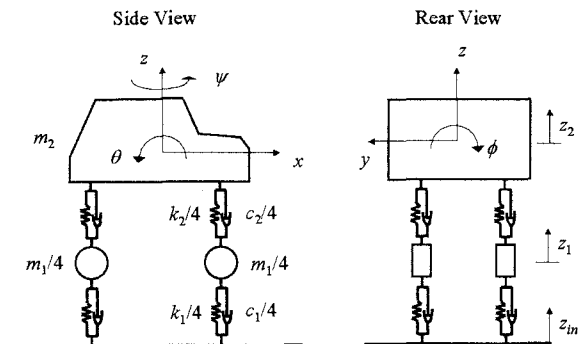


図-1 6自由度車両モデル

2. 6自由度車両モデル

図-1に、本研究で使用した車両モデル⁵⁾を示す。車両の基本運動は、並進3成分、回転3成分の6自由度としている。車両の並進成分の運動方程式は、以下のように書ける。

$$m(\ddot{u} - v\ddot{\psi} + \ddot{x}\cos\psi + \ddot{y}\sin\psi) = \sum_j \sum_i (F_{xij} \cos \delta_{ij} - F_{yij} \sin \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{xij} \quad (1)$$

$$m(\ddot{v} + u\ddot{\psi} - \ddot{x}\sin\psi + \ddot{y}\cos\psi) = \sum_j \sum_i (F_{xij} \sin \delta_{ij} + F_{yij} \cos \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{yij} \quad (2)$$

$$m_1(\ddot{\zeta}_1 + \ddot{z}_{in}) + c_1\dot{\zeta}_1 + c_2(\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_2) + k_1\zeta_1 + k_2(\zeta_1 - \zeta_2) = 0 \quad (3)$$

$$m_2(\ddot{\zeta}_2 + \ddot{z}_{in}) + c_2(\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_1) + k_2(\zeta_2 - \zeta_1) = 0 \quad (4)$$

ここで、 $m (= m_1 + m_2)$ は車両質量、 F_{xij} 、 F_{yij} はタイヤの前後力、横力、 δ_{ij} は前輪操舵角である。 u 、 v は車

両の前後速度，横速度， $\ddot{x}$ ， $\ddot{y}$ は，それぞれ絶対座標系⁵⁾での X ， Y 方向の地震による地動加速度である．式(3)，(4)は，上下方向の並進運動の運動方程式を表している． ψ はヨー角（鉛直軸周りの回転角）で式(5)のように書ける．

$$I_z \ddot{\psi} = (F'_{y11} + F'_{y12})l_f - (F'_{y21} + F'_{y22})l_r + (-F'_{x11} + F'_{x12})\frac{d}{2} + (-F'_{x21} + F'_{x22})\frac{d}{2} \quad (5)$$

l_f ， l_r は重心から前輪，後輪までの距離， d はタイヤの左右間距離である．

本研究の車両モデルは，ロール，ピッチ運動によるタイヤの接地荷重の変化についても考慮できるようになっており，これらの回転運動による車体荷重の移動分は以下になる．

$$W_{tr} = m_2(\dot{v} + u\dot{\psi} - \ddot{x}\sin\psi + \ddot{y}\cos\psi)h/d \quad (6)$$

$$W_{tp} = m_2(\dot{u} - v\dot{\psi} + \ddot{x}\cos\psi + \ddot{y}\sin\psi)h/(l_f + l_r) \quad (7)$$

ここで， h は重心高さである．

式(3)，(4)による上下方向の並進運動，式(6)，(7)によるロール，ピッチ運動により，各タイヤの接地荷重は以下になる．

$$W_{t11} = W_{t0f} - (W_{tp} + W_{tr})/2 - W_{tv} \quad (8)$$

$$W_{t12} = W_{t0f} - (W_{tp} - W_{tr})/2 - W_{tv} \quad (9)$$

$$W_{t21} = W_{t0r} + (W_{tp} - W_{tr})/2 - W_{tv} \quad (10)$$

$$W_{t22} = W_{t0r} + (W_{tp} + W_{tr})/2 - W_{tv} \quad (11)$$

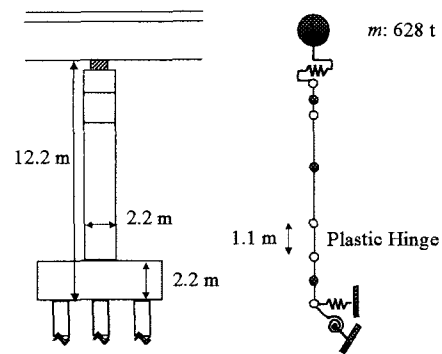
ここで， W_{tv} は上下並進運動による荷重変化， W_{t0f} ， W_{t0r} は前輪，後輪の静止荷重であり，以下のように書ける．

$$W_{tv} = (k_1\zeta_1 + c_1\dot{\zeta}_1)/4 \quad (12)$$

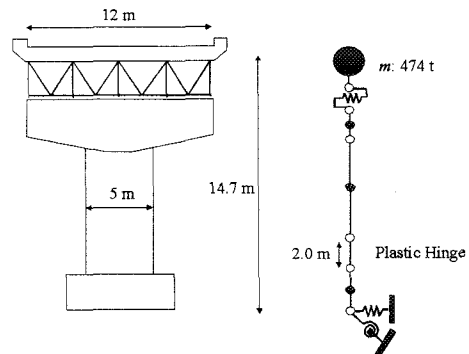
$$W_{t0f} = 0.5m_2gl_f/(l_f + l_r) + m_1g/4 \quad (13)$$

$$W_{t0r} = 0.5m_2gl_f/(l_f + l_r) + m_1g/4 \quad (14)$$

式(1)の F_x ， F_y はタイヤの接地荷重の関数⁵⁾であるので，ロール，ピッチ運動などの影響が車両の運動方程式にフィードバックされることになる．



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-2 解析対象橋脚の数値モデル

表-1 塑性ヒンジ部におけるモーメントー曲率関係

特性		橋軸	橋軸 直角
塑性ヒンジ 部のモーメ ントー曲率 関係	降伏モーメント (MNm)	48.6	106.9
	降伏曲率 (10^{-4} 1/m)	11.9	6.47
	終局モーメント (MNm)	48.6	106.9
	終局曲率 (10^{-4} 1/m)	227.6	53.6
地盤ばね 定数	A_{ss} (10^3 MN/m)	2.71	
	A_{sr} (10^3 MNm/m)	-4.36	
	A_{tr} (10^4 MNm/rad)	3.84	

3. 高架橋走行車両の地震応答解析

(1) 検討対象橋梁

検討対象橋梁は5径間連続鋼 I 桁橋⁶⁾とし，図-2に示すように，1基のRC橋脚とそれが支持する上部構造部分を切り出した基礎，橋脚，ゴム支承，桁からなる構造系である．橋脚高さは10m，断面は5m×2.2mである．図-2に示すように，橋軸方向，橋軸直角方向についてそれぞれ数値モデルを構築した．

ゴム支承は線形せん断ばねでモデル化⁷⁾し，そのばね剛性は橋軸方向，橋軸直角方向とも23.6 MN/mである．橋脚基部の塑性ヒンジを非線形はり要素によってモデル化し，Takeda型の剛性低下バイリニアモデル⁸⁾を用いた．表-1に塑性ヒンジ部における曲

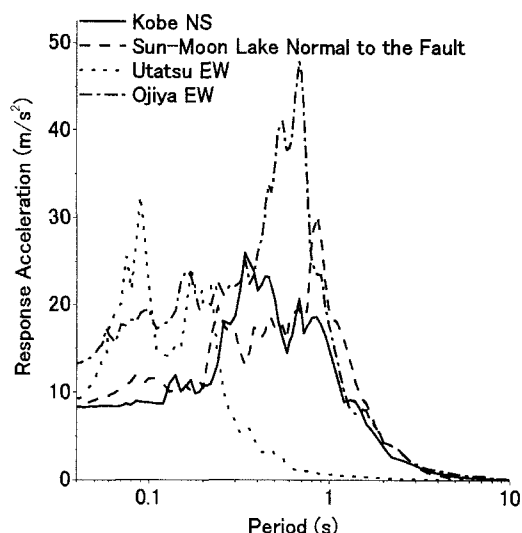
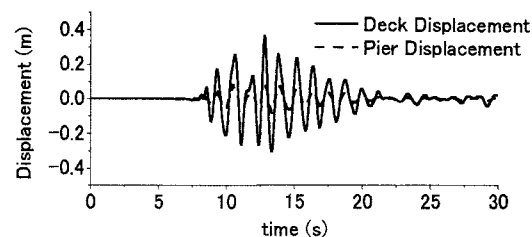
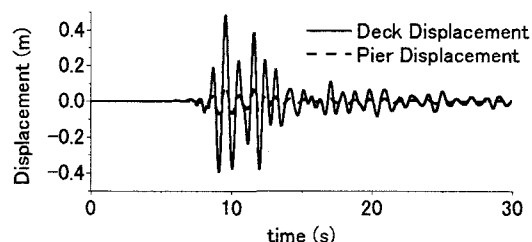


図-3 本研究で用いた入力地震動の加速度応答スペクトル (5%減衰)



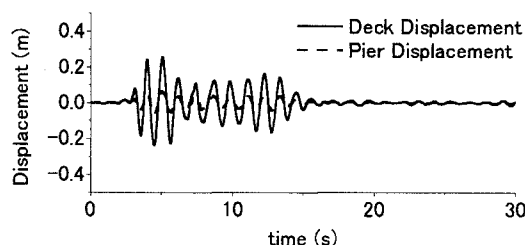
(a) 橋軸方向



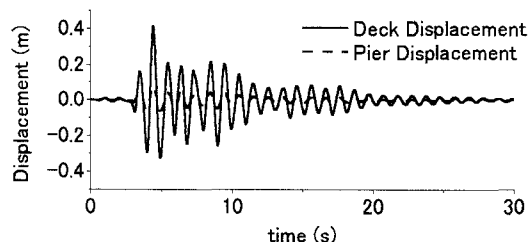
(b) 橋軸直角方向

図-5 橋梁の地震応答変位

(入力地震動: K-NET 小千谷記録)



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-4 橋梁の地震応答変位

(入力地震動: 神戸海洋気象台記録)

げモーメント-曲率関係と地盤ばね定数を示す。このモデルの橋軸方向の固有周期は1.19秒、橋軸直角方向の固有周期は1.02秒である。

解析に際しては、橋脚、ゴム支承、フーチングに対して0.02、地盤ばねには0.2の減衰定数を与え、ひずみエネルギー比例減衰法によって1次および2次のモード減衰定数を求めた後、これをレーリー減衰によってモデル化した。

(2) 橋梁の地震応答解析

入力地震動には、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録、1999年台湾集集地震におけるSun-Moon Lake記録、2003年三陸南地震におけるK-NET歌津記録（震央距離17km）、2004年新潟県中越地震におけるK-NET小千谷記録を用いた。図-3に、橋軸直角方向に入力した時刻歴波形の加速度応答スペクトル (5%減衰) を示す。神戸海洋気象台の応答スペクトルを基準として比較すると、Sun-Moon Lake記録は、周期0.7秒以上の振幅が大きい。K-NET歌津記録は、周期0.2秒以下の短周期において振幅が大きく、周期1秒以上の応答スペクトルはほぼ0である。K-NET小千谷記録は、とくに周期0.4-0.9秒で神戸波よりも振幅が大きく、周期1秒以上ではほぼ同程度である。

橋梁の地震応答解析結果の例として、神戸海洋気象台記録、K-NET小千谷記録を入力地震動として用いた場合の結果を示す (図-4、図-5)。橋脚頂部に水平力分散支承⁷⁾として積層ゴム支承が採用されている。水平力分散支承は上部構造と下部構造の相対変位を許容し、地震力を複数の下部構造に分散させるというメリットをもつ。そのため、桁の応答変位は0.3-0.5mに達するが、橋脚頂部の応答変位は0.1m程度に収まっている。K-NET小千谷記録を用いた方が、神戸波を入力地震動とした場合と比べて桁の最大応答変位は大きい。K-NET小千谷を入力地震動

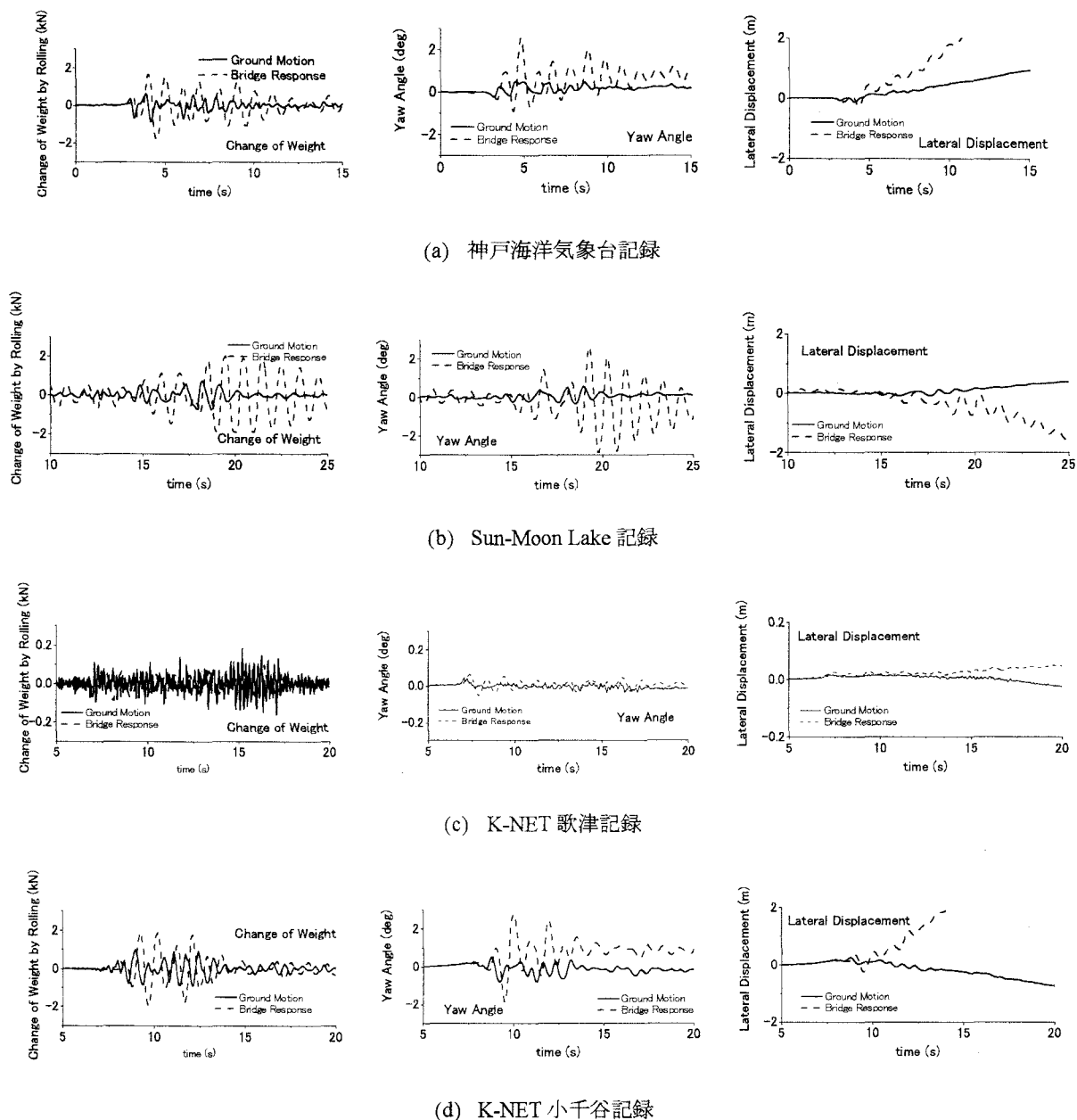


図-6 地表面地震動を入力した場合（実線）と橋梁の応答加速度を入力した場合（破線）の走行車両の応答の比較
（車速：100 km/h）

とすると、橋軸方向の橋脚基部は非線形化し、Sun-Moon Lake記録を入力地震動とした場合は、橋軸、橋軸直角方向とも橋脚は非線形化する。その他の場合は、線形応答の範囲であった。

(3) 高架橋走行車両の地震応答解析

以上のようにして得られた桁の地震応答加速度を車両の運動方程式に入力し、高架橋上の走行を想定した車両の地震応答解析を行った。本研究で用いた車両モデルの車体質量は1.1tであり、橋脚1基が支持する上部構造の質量と比較して、充分小さいことから橋梁－自動車間の相互作用については考えていな

い。車両モデルの上下成分入力動には、各地震記録の加速度波形の上下成分をそのまま用いた。

図-6に、地表面地震動を入力したときの走行車両の地震応答と、橋梁の応答加速度を入力地震動としたときの車両の応答を比較する。車両の応答量を表す指標値としては、ローリングによる車体荷重の移動量 W_r 、ヨー角 ψ 、車両の相対横変位量（走行軌跡）を示す。車速は100 km/hで一定とし、運転者のハンドル操舵などの震動に対する反応は考慮していない。K-NET歌津記録を入力地震動とした場合の車両の応答量は他の3ケースと比較して非常に小さく、図-6の縦軸のスケールを1/10で示している。これは、

表-2 支承剛性と橋梁の固有周期の関係

支承剛性 (MN/m)	固有周期 (s)	
	橋軸方向	橋軸直角方向
∞	0.66	0.54
47.2	0.95	0.81
23.6	1.19	1.02
17.7	1.33	1.14
11.8	1.57	1.35

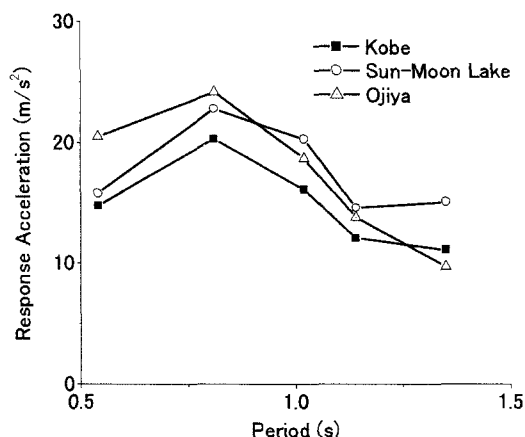
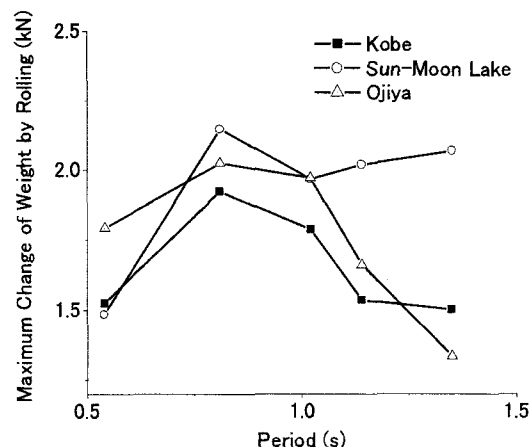


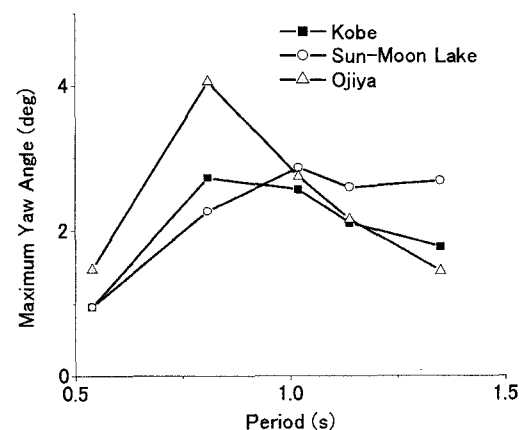
図-7 橋脚の固有周期と桁の最大応答加速度の関係
(橋軸直角方向)

地表面地震動の短周期成分が車両の応答に伝わりにくいためである⁵⁾。地表面地震動を入力した場合と橋梁の応答加速度を車両モデルに入力した場合の車両の応答量を比較すると、ローリングによる車体荷重の移動量 W_r は、K-NET歌津記録を入力地震動とした場合については両者でほぼ同程度の大きさであるが、その他の場合はいずれも橋梁の応答加速度を入力した方が大きくなっている。これは、車両のローリング運動が高架橋走行時に地震動が生じたときの方が大きくなることを意味する。ヨー角に関しては、K-NET歌津記録を入力地震動とした場合以外は、橋梁の応答加速度が入力されたときの方が2倍以上大きな値を示している。そのため、車両横変位量には、斜め方向に車両が走行している様子が見られる。

車体がロールして、左右のタイヤ間で W_r の荷重移動が生じると、タイヤのコーナリングフォース(横力)は W_r の大きさに応じて減少する。したがって、車両にはたらく慣性力と釣り合うコーナリングフォースを得るために前後輪の横滑り角は W_r の大きさに応じて大きくなる⁹⁾。一方、タイヤの横力が車両の重心周りにつくるヨーイングモーメントは、横滑り角を減少させるモーメントである。大きな横滑り角を打ち消すためには、大きなヨーイングモー



(a) ローリングによる荷重移動量



(b) ヨー角

図-8 橋脚固有周期と車両応答量の関係

メントが必要となるので、図-6のような結果が得られるものと考えられる。

4. 橋梁の固有周期と車両応答量の関係

橋梁の固有周期と走行車両の地震応答の関係を評価するために、図-2に示した基本構造のゴム支承剛性を変化させて3.と同様の検討を行った。表-2に、支承剛性と対象橋脚の橋軸方向、橋軸直角方向の固有周期を示す。ここで、支承剛性無限大は、固定支承で桁を支持した橋脚を表している。また、支承剛性23.6MN/mの場合が、3.で用いた基本構造の橋脚モデルに相当する。図-7に、神戸海洋気象台記録、Sun-Moon Lake記録、K-NET小千谷記録を入力地震動とした場合の桁の応答加速度(橋軸直角方向)最大値と橋脚固有周期の関係を示す。いずれの地震動

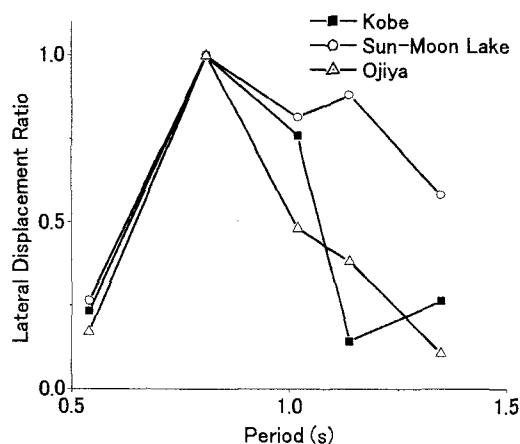


図-9 橋脚固有周期と車両の最終横変位の関係

についても、固有周期0.81sの場合の応答加速度が最も大きくなっている。

図-8に、橋脚固有周期とローリングによる車体荷重の最大移動量、最大ヨー角の関係を示す。神戸海洋気象台、K-NET小千谷記録を入力地震動とした場合は、桁の応答加速度が最大となる周期0.81秒のときに車両の応答量も最大となっている。Sun-Moon Lake記録の場合は、桁の応答加速度が小さくなる周期1秒以上の場合でも車両の応答はあまり低減しない。ヨー角については、桁の応答が最大となる周期0.81秒の場合よりも周期1.02秒の方が大きい。図-9に、橋脚固有周期と車両の解析終了時刻での横変位の関係を示す。本研究の解析では、運転者の反応を考慮していないので、横変位は解析の継続時間や地震動継続時間などに依存する。そこで、橋脚の応答加速度が最大となる周期0.81秒の場合の最終横変位量との比を算出し図-9に示す。神戸海洋気象台、K-NET小千谷記録を入力地震動とした場合には周期0.81秒のときをピークに構造物が長周期化するにつれて最終横変位量は小さくなるが、Sun-Moon Lake記録については周期1秒以上の場合でも他の2地震の場合と比べて応答の低減が見られていない。

5. まとめ

本研究では、高架橋走行時の車両の地震応答特性

を把握するために、道路構造物の数値モデルと6自由度車両モデルを用いて地震応答解析を行った。

地表面地震動を入力地震動とした場合と構造物の応答加速度を入力地震動とした場合の車両の応答を比較すると、車体のロール運動のための荷重移動量やヨー角が構造物応答を入力したときに大きくなり、その結果車両の横変位量も地表面地震動の場合と比べて大きくなる。

橋脚のゴム支承剛性を変化させて、固有周期と地震応答の関係を評価すると、神戸海洋気象台、K-NET小千谷記録を入力地震動とした場合は、桁の応答加速度が最大となる周期0.81秒の構造物上で、車両の応答量が最大となる。Sun-Moon Lake記録を入力地震動とすると、桁の応答加速度最大値は周期1秒以上で応答加速度は小さくなるが、車両の応答量には明瞭な低減が見られなかった。

以上のような走行車両の応答特性には、入力地震動の周波数特性や構造物のじん性率などが影響していると考えられ、今後更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 社団法人 日本自動車連盟ホームページ：
<http://www.jaf.or.jp/data/carnum.htm>
- 2) Kawashima, K., Sugita, H. and Kanoh, T.: Effect of earthquake on driving of vehicle based on questionnaire survey, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 6, pp. 405-412, 1989.
- 3) 丸山喜久, 山崎文雄: ドライビングシミュレータを用いた地震時運転者の反応特性に関する基礎的検討, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, CD-ROM, 8p, 2003.
- 4) 首都高速道路公団: 首都高速道路公団ガイド, <http://www2.mex.go.jp/profile/guide/index.html>, 2004.
- 5) 丸山喜久, 山崎文雄, 山之内宏安: 高速道路走行車両の地震応答解析, 土木学会論文集, No. 696/I-58, pp. 249-260, 2002.
- 6) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1998.
- 7) 板橋美保, 川島一彦, 庄司学: 橋脚系塑性率と全体系塑性率の違いが設計地震力の算定に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 619/I-47, pp. 131-144, 1999.
- 8) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, *Proceedings of 3rd Japan Earthquake Symposium*, pp. 357-364, 1970.
- 9) 安部正人: 自動車と運動と制御, 山海堂, 1996.