

高速走行車両の進行直角方向の安定性に及ぼす地震動の影響

市川吉洋¹，渡邊学歩²，川島一彦³

¹学生会員 東京工業大学大学院 修士課程 理工学研究科土木工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

²正会員 修(工) 東京工業大学大学院 助手 理工学研究科土木工学専攻(同上)

³フェロー 工博 東京工業大学大学院 教授 理工学研究科土木工学専攻(同上)

1. まえがき

平成16年10月23日17時56分、新潟県中越地方を中心に、震源深さが20km、マグニチュード6.8の直下型地震が発生した。この地震の影響により、上越新幹線・東京発新潟行き「とき325号」が浦佐―長岡間で脱線、停止した。10両編成の車両中8両が脱線し、最後部の車両はレールを乗り越え30度傾いたまま側溝に落下した。乗客を乗せた新幹線の脱線事故が発生したのは、1964年の東海道新幹線の開業以来初めてである。しかし、兵庫県南部地震の際に脱線事故が発生しなかったのは、地震の発生が早朝で走行中の車両が少なかったためである。今後、都市直下型地震が発生した場合に走行中の新幹線が脱線し、大事故に発展する可能性もある。強震動を受けても走行中の車両が脱線しないための対策が急務である。

本研究では、強震動を受ける高速走行車両の地震応答について解析を行い、入力地震動強度と車両の浮き上がりおよび脱線について検討を行ったのでこれについて報告する。

2. 高速走行車両のモデル化

本研究では、高速走行車両の地震時安定性を検討するため、新幹線200系車両を対象とし、進行直角方向の地震時応答について解析を行う。車両、台車および輪軸の寸法、各部に取り付けられているばねの剛性など構造諸元については、涌井ら、松浦らおよび松尾ら^{1), 2), 3)}が行った研究に従った。

2.1 車両の2次元モデル

解析では、図-1に示すように半車体+1台車+2輪軸からなる車両本体を2次元平面モデルによりモデル化した。車体、台車、車輪およびレールは剛な梁部材でモデル化し、車体―台車間、台車―車輪間の水平および鉛直

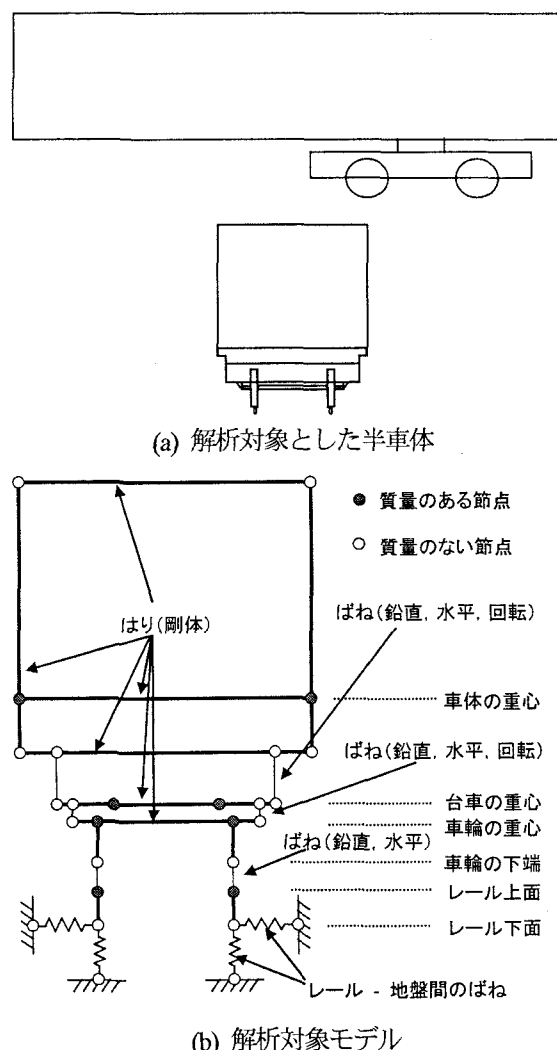
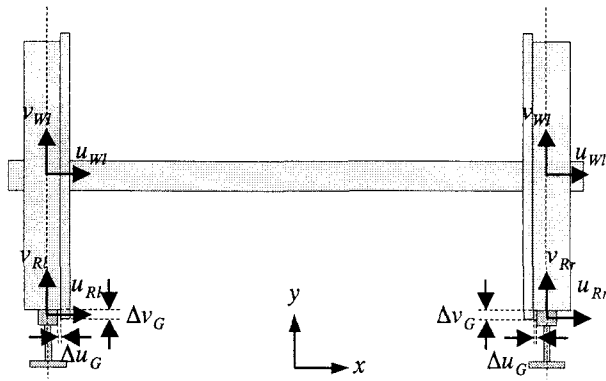


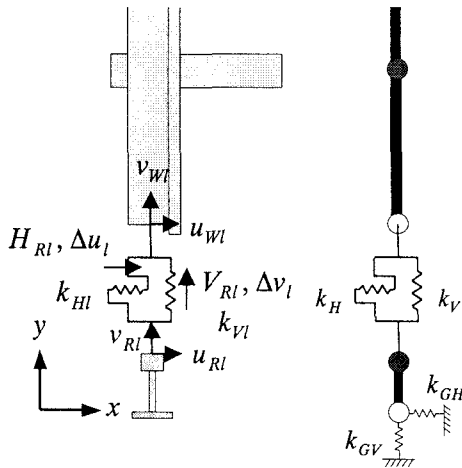
図-1 解析対象の車両および解析モデル

方向に装着されているばねおよびダンパーは、それぞれ、ばね要素およびダッシュポットによってモデル化した。車両の質量は車体の重心、台車の重心および輪軸の高さに配置し、並進質量、回転慣性質量が松浦らによって与えられる値に一致するように分布させている。

レールの質量としては軸距長の3倍のレール長に相当



(a) 解析対象とした新幹線の半車体



(b) 解析対象モデル

図-2 解析対象の車両および解析モデル

する質量を考慮した。

2.2 車輪～レール間のモデル化

車輪には図-2 に示すようなフランジが取り付けられている。車輪フランジとレール間の遊間 Δu_G は5mm程度と言われており、車輪がこれを超えて水平方向に変位しようとするとき車輪フランジにはレールからの接触力が作用し、車輪の水平方向移動が制限される。しかし、フランジ高さ Δv_G は30mmであり、車輪がレールから Δv_G 以上浮き上がると、車輪が遊間 Δu_G を超えて水平方向に変位しても、フランジにはレールとの接触力が生じないため、車輪フランジがレールに乗り上げたり、脱線する可能性がある。このような、車輪～レール間の相互作用を考慮するために、水平方向にはフランジ接触を、また、上下方向には車輪踏面～レール上面間に作用する接触力をモデル化するばね要素を以下のように設けた。

(1) 車輪～レール間の上下方向の相互作用

車輪踏面～レール上面間の接触と浮き上がりに応じて車輪～レール間に作用する上下方向力 V を次式のように仮定する。

$$V = \begin{cases} k_V \cdot \Delta v & \cdots \Delta v \leq 0 \\ k_{V0} \cdot \Delta v & \cdots \Delta v > 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 k_V は車輪とレールが接触している時の両者間の力の伝達を表すための架空のばねであり、計算上、剛性が十分大きいと仮定している。車輪とレールが非接触の状態にある時には上下方向には力の伝達が無いが、このように仮定すると数値解析しにくいいため、ここでは、微少なばね剛性の k_{V0} を仮定した。 Δv は車輪とレール間の上下方向相対変位であり、

$$\Delta v = v_W - v_R \quad (2)$$

ここで、 v_W は車輪の上下方向変位を、 v_R はレールの上下方向変位であり、図-2の上向きを正としている。

なお、本解析では k_V および k_{V0} をそれぞれ 10^8 (kN/m)および 1.0 (kN/m)と与えた。

(2) 車輪～レール間の水平方向の相互作用(左側レール)

車輪とレール間に作用する水平力 H を次式のように仮定する。ここでは、左側のレールの場合を示している。

$$H = \begin{cases} f_0(\Delta u) + k_{H0}\Delta u & \cdots \Delta u > -\Delta u_G \\ f_0(\Delta u) + k_f(\Delta u - \Delta u_G) & \cdots \Delta u \leq -\Delta u_G \text{ and } \Delta v \leq \Delta v_G \\ f_0'(\Delta u) + k_{H0}\Delta u & \cdots \Delta u \leq -\Delta u_G \text{ and } \Delta v > \Delta v_G \\ f_1(\Delta u) + k_{H0}\Delta u & \cdots \text{derailed or flange is on the rail} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $f_0(\Delta u)$:レールと車輪間の水平方向の摩擦力、 $f_0'(\Delta u)$:車輪がレールから浮き上がった状態で作用する水平方向の摩擦力、 $f_1(\Delta u)$:車輪のフランジがレール上にあるか、もしくは、車輪がレールから脱線した状態で作用する水平方向の摩擦力、 k_f :車輪フランジの水平方向剛性、 k_{H0} :数値計算を可能とするための微少なばねである。 Δu は車輪とレールの間の水平方向相対変位であり、

$$\Delta u = u_W - u_R \quad (4)$$

ここで、 u_W は車輪の水平方向変位、 u_R はレールの水平方向変位であり、図-2の右向きを正としている。

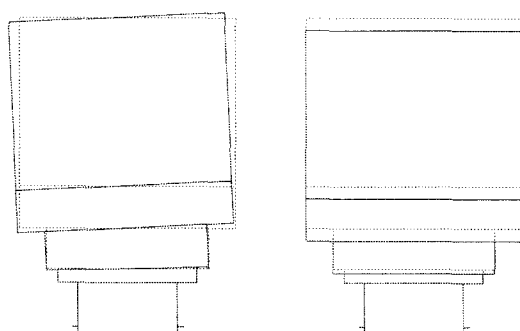
式(3)において、摩擦力 f_0 、 f_0' 、 f_1 はともに初期剛性が十分大きい弾塑性型バイリニアモデルによって表す。 f_0 の上限 f_{0Y} は以下のように与えた。

$$f_{0Y} = 0.25N \quad (5)$$

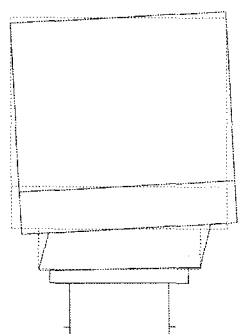
ここで、 N は車輪からレールに作用する鉛直力(圧縮力

表-1 車両の固有値特性

	f (Hz)	T (sec)	有効質量 (有効質量比 %)				2方向 累積有効 質量比 (%)
			M_{ex}	(%)	M_{ey}	(%)	
1	0.59	1.69	7.0	21	-	-	10.6
2	0.92	1.08	-	-	24.9	76	48.4
3	0.97	1.03	15.3	47	-	-	71.7
4	3.98	0.25	-	-	2.3	7	75.2
5	7.26	0.14	0.27	1	-	-	75.6
6	7.43	0.13	5.9	17	-	-	84.6
7	23.3	0.04	4.3	13	-	-	91.1
8	43.8	0.02	-	-	5.7	17	99.7



(a) 1次モード (b) 2次モード



(c) 3次モード

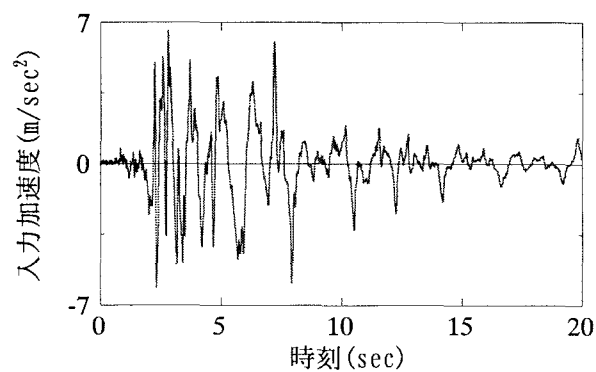
図-3 車両の固有振動モード

を正とする) である。 N は車両のローリングや上下方向地震力によって時間的に変化するはずであるが、ここでは、簡単のため、自重によって作用する軸力から変化しないものとした。また、 f_1 の特性はよく分からないことから、ここでは簡単のため、 $f_1(\Delta u) = f_0(\Delta u)$ と仮定した。また、 $f'_0(\Delta u)$ は本来存在しない摩擦力であるが、ここでは解析プログラムの制約から、 $f'_0(\Delta u) = f_0(\Delta u)$ と仮定した。

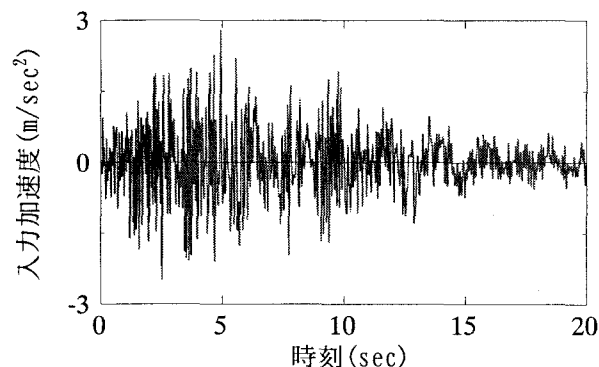
なお、以下の解析では k_f および k_{H0} をそれぞれ 10^8 (kN/m) および 1.0 (kN/m) と与えた。

3. 高速走行車両の振動特性

前章のモデル化により得られた 24 節点(質量を有するのは 8 節点)、37 自由度の車両解析モデルを用いて、ばねが全て初期線形状態にある場合の車両の固有値解析を



(a) NS成分



(b) UD成分

図-4 JR 鷹取記録

行った。表-1 には固有値解析によって得られた各次の固有周期および有効質量比を、図-3 には主要振動モードを示す。1次(周期 $T_1=1.7$ 秒)および3次(周期 $T_3=1.0$ 秒)では、車体および台車のローリングが卓越する。水平方向有効質量比もそれぞれ、21%および47%と大きいことから、車体および台車のローリング振動が連成して卓越することが分かる。2次モードでは車体の水平方向振動が卓越し、固有周期は $T_2=1.08$ 秒、有効質量比は25%である。

4. 高速走行車両の地震応答解析

4.1 解析に用いた入力地震動

地盤上および橋梁上にある新幹線を対象とした。地盤上の車両の地震応答解析を行う際には、図-4 に示す兵庫県南部地震によるJR 鷹取駅記録のNS成分を水平方向に、UD成分を鉛直方向に同時入力して非線形地震応答解析を行った。

固有周期 T_p の橋梁上を走行する場合には、図-5 に示すような、固有周期 T_p の1自由度系の弾性応答加速度を水平方向について計算し、これを水平方向の地震力として与えた。なお、上下方向については、構造物による増幅は小さいと考え、JR 鷹取駅記録のUD成分をそのまま入力した。

4.2 地盤上を走行する場合の地震応答

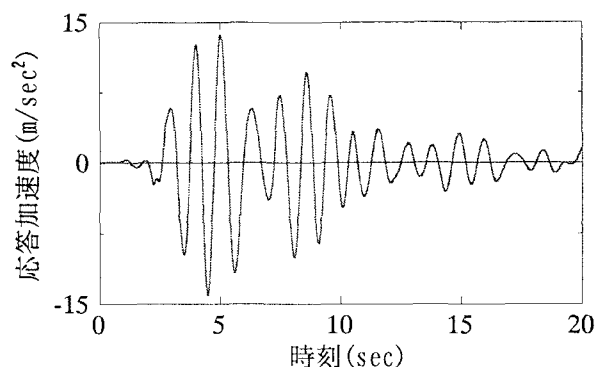
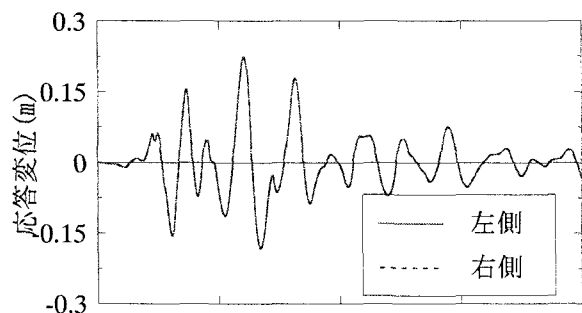
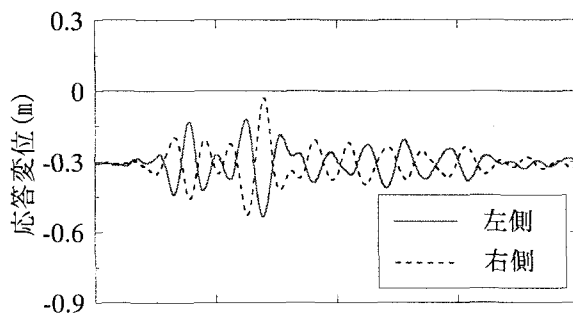


図-5 固有周期 T_p の1自由度系（橋梁をモデル化）の弾性応答加速度

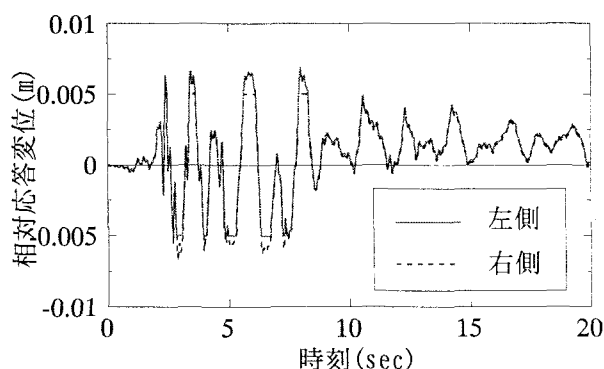


(a) 水平方向

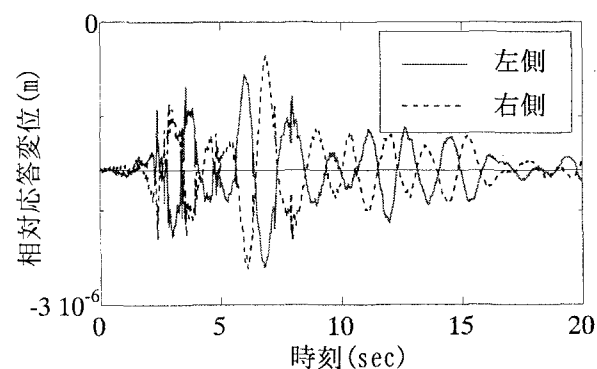


(b) 上下方向

(1) 車体の変位



(a) 水平方向



(b) 上下方向

(2) レール～車輪間の相対変位

図-6 地盤上を走行する場合の応答変位

図-6 には地盤上を走行する車両が地震動を受けた場合の応答変位を示す。水平方向について車体の応答変位は車体の左右両側でほぼ同じで、時刻 6.05 秒で 22.4cm の最大応答を生じる。これに対して、上下方向には、もともと自重により 30.8cm 沈下した状態から、地震力が作用すると左右両側でローリングにより異なる変位が生じ、時刻 6.98 秒で最大 15.5cm の応答を生じる。

車輪－レール間の相対変位に着目すると水平方向には両側の車輪とも+5mm～-5mm の範囲で振動しており、車輪フランジの移動制限によって、地震動が作用しても脱線はしないことを示している。上下方向の応答変位は非常に小さく車輪が浮き上がらない。

車体および輪軸の回転角を図-7 に示す。なお、輪軸の応答回転角は 6.77×10^{-4} rad と小さい。車体の応答回転角

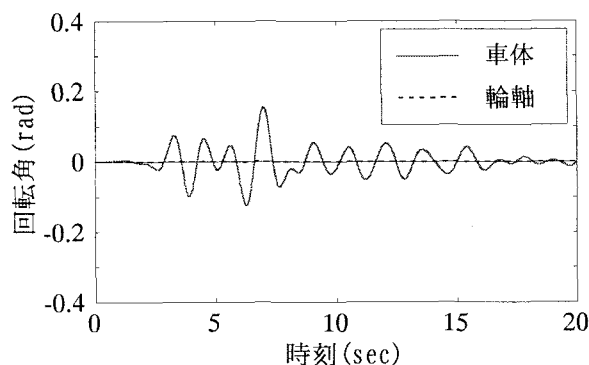


図-7 地盤上を走行する場合の車体および輪軸の回転

は時刻 6.96 秒において最大 0.15 rad (8.84 度) に達する。

車体の応答加速度を図-8 に示す。水平方向では 5.94 秒において最大 5.81 m/sec^2 の応答加速度が生じる。上

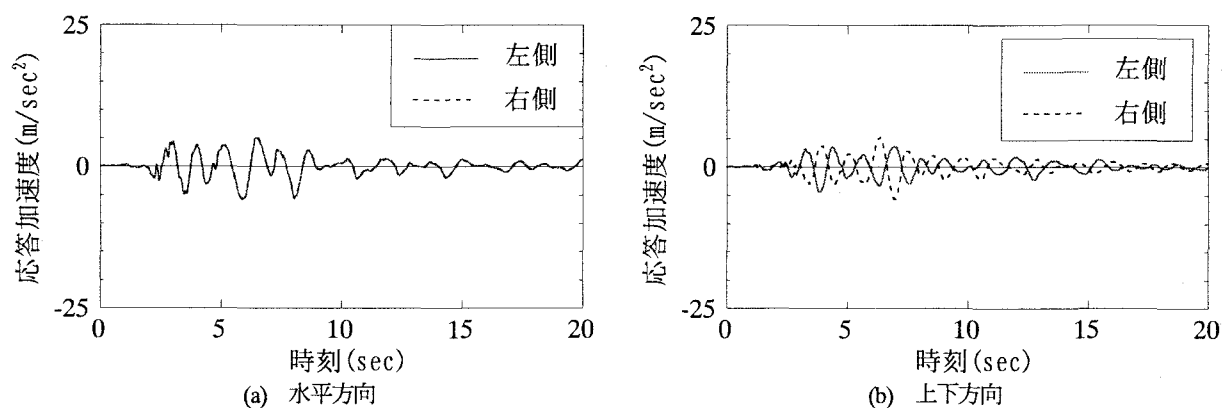
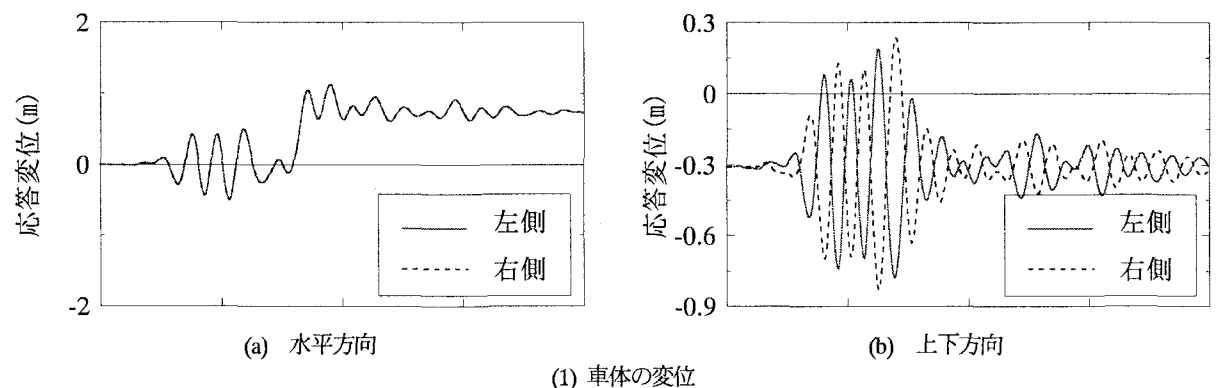


図-8 地盤上を走行する場合の応答加速度



(1) 車体の変位

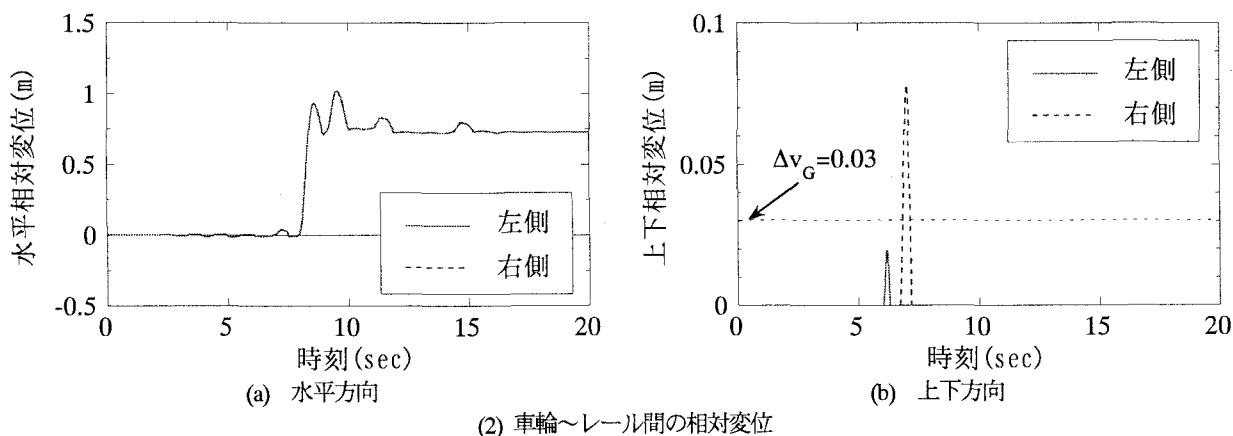


図-9 橋梁（固有周期1秒）上を走行する場合の応答変位

下方向にはローリングにより左右両側で正負逆向きの加速度が生じており、時刻5.84秒に最大 5.7 m/sec^2 の加速度が生じる。

4.3 橋梁上を走行する場合の地震応答

図-9には固有周期は1秒の橋梁上を走行中に地震動を受けた場合の応答を示す。車体の水平方向の応答変位は7.8秒付近から正方向にスライドし、75cm程度の残留変位が生じる。これは、後述する脱線によって生じたものである。上下方向変位については図-6と同様に、ローリングする結果、車両の左右両側で位相が逆向きになり、最大44.8cmの応答が生じる。

車輪-レール間の相対変位に着目すると上下方向相対変位は、右側の車輪が最大で78mm浮き上がる。この結

果、水平方向には時刻8秒から、変位が急増し最大で1.02mの変位が生じ、地震終了後には73cmの残留変位が生じており、車輪が脱線したことを示している。

時刻5.5～8.5秒付近の右側の車輪の水平および上下方向の応答を詳しく示すと図-10のようになる。時刻6.75秒から車輪が浮き上がり始める。続いて水平方向に車輪が滑り出し、時刻6.94秒には車輪の水平方向相対変位 Δu がフランジ遊間 $\Delta u_G = 5 \text{ mm}$ に達し、以後右側の車輪は車輪フランジの拘束が無くなるために脱線しやすくなる。これにより時刻8秒以降は車輪がレール上を滑り、前述したように最大1.02mの車輪の応答を生じる。

車体および輪軸の回転角を図-11に示す。脱線の生じる7秒付近で最大0.053rad（3.04度）の応答回転角が生じる。車体についても最大0.312rad（17.9度）となり、

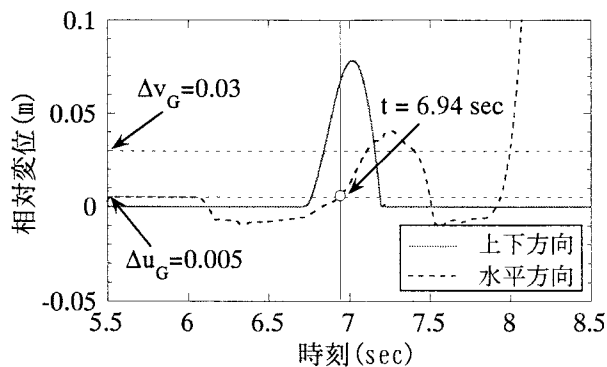


図-10 右側の車輪～レール間の水平および上下方向の相対変位

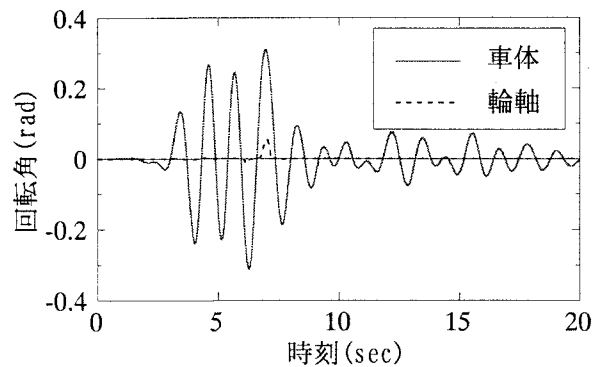
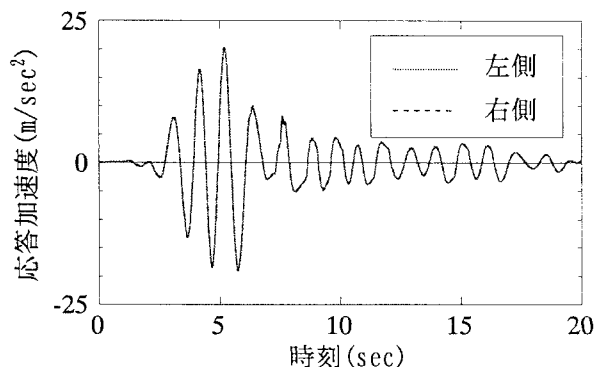
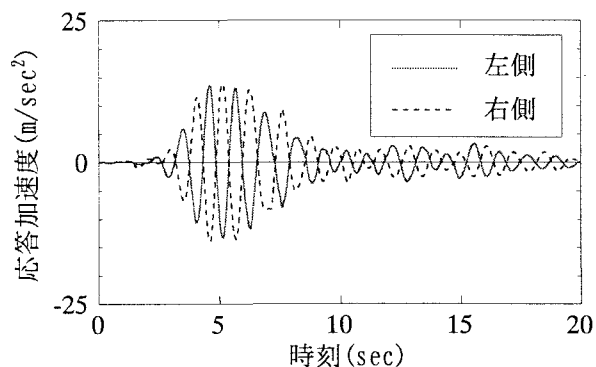


図-11 橋梁上（固有周期1秒）を走行する場合の回転応答変位



(a) 水平方向



(b) 上下方向

図-12 橋梁上（固有周期1秒）を走行する場合の応答加速度

車両が地盤上を走行する場合に比べて2倍程度大きくなる。

車体の応答加速度を図-12に示す。水平方向には 20.2 m/sec^2 ，上下方向には 13.9 m/sec^2 の応答加速度が生じており，車両が地盤上を走行する場合に比べて応答加速度が水平方向には3.5倍，上下方向には2.4倍も大きくなっている。

5. 結論

半車体分の車両をモデル化した2次元平面モデルを用いて，強震動が作用する場合の車両の地震時応答を非線形地震応答解析によって検討した。本研究で対象としたのは，1次（周期 $T_1 = 1.7$ 秒，有効質量比 21%）と3次（周期 $T_3 = 1.0$ 秒，有効質量比 47%）で，車体および台車のローリング振動が卓越し，2次（周期 $T_2 = 1.1$ 秒，有効質量比 25%）では車体の上下方向振動が卓越する車両である。本解析の結果得られた結論は以下の通りである。

1) 地盤上でJR鷹取駅記録のNS成分を水平方向に，UD成分を鉛直方向に作用させると，車体には水平および上下方向にそれぞれ22.4cmおよび15.5cmの振動が生じる。しかし，フランジの移動制限により，車輪～レール間の水平方向相対変位，上下方向相対変位は小さく，脱線していない。

2) 固有周期1.0秒の橋梁上を走行する場合には，車輪の上下方向の浮き上がりがフランジ高さ $\Delta v_G = 30 \text{ mm}$ を超え，車輪の水平方向変位がフランジ遊間 $\Delta u_G = 5 \text{ mm}$ を超えることにより，脱線する。

3) 車体および車輪の回転角は脱線の生じる7秒付近で，3.0度および17.9度となる。これは，地盤上を走行する場合に比べて，2倍程度大きい値である。

4) 車体に生じる応答加速度は水平方向には 20.2 m/sec^2 ，上下方向には 13.9 m/sec^2 生じている。地盤上を走行する場合に比べて，それぞれ，3.5倍および2.4倍大きくなる。

謝辞：解析データの入手に際しては（財）鉄道総合技術研究所の松本信之氏に御指導頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 涌井 一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路橋梁の連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31, pp 129-138, 1995.
- 2) 松浦章夫，富田健司，涌井一：鉛直フランジ付き3次元車両モデルによる振動軌道上車両の走行性に関する研究，土木学会論文集，No. 556/I-38, pp. 169-178, 1997
- 3) 松尾雅樹，室井陽三：高周波輪重変動下における脱線現象，鉄道総研報告，Vol.4.No.6, 1990.