

# 不整形地盤の波動伝播特性が 地震時の車両の挙動に及ぼす影響

川西 智浩<sup>1</sup>・室野 剛隆<sup>2</sup>・宮本 岳史<sup>3</sup>・曾我部正道<sup>4</sup>

<sup>1</sup>鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:kawa@rtri.or.jp

<sup>2</sup>鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部, 博士(工学) (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

<sup>3</sup>鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部, 博士(工学) (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: takefumi@rtri.or.jp

<sup>4</sup>鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部, 博士(工学) (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: sogabe@rtri.or.jp

鉄道構造物の耐震設計においては、構造物上の列車の走行安全性を確保する必要がある。列車の走行安全性を調べるためには、入力地震動の特性を考慮することが重要であるが、不整形地盤においては、基盤傾斜部で波が発生して水平方向に伝播するため、鉄道車両の挙動もこの波動伝播特性に影響を受けると考えられる。そこで本研究では、まず不整形地盤の2次元動的FEM解析のパラメータスタディを実施し、得られた地震波を用いて車両の挙動解析を実施することにより、不整形地盤の波動伝播特性が構造物上の車両の挙動に及ぼす影響について検討を行った。

**Key Words :** *soft ground with non-flat base, horizontally propagating wave, vehicle dynamics*

## 1. はじめに

鉄道構造物の設計にあたっては、地震時に構造物上を走行する車両の走行安全性を確保する必要がある。地震時における車両の挙動特性については、これまでに実台車を用いた加振試験<sup>1)</sup>や解析的検討<sup>2,3)</sup>によって、基本的な特性が明らかにされてきている。これらの検討を踏まえて、「鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限」<sup>4)</sup> (以下、変位制限標準)では、L1地震動に対して列車走行安定性を確保するために、地震動によって生じる構造物の横方向の振動変位及び構造物境界における軌道面の不同変位が、定められた限界値を超えないことを照査するよう記されている。

これらの検討は、線路方向に連続する各構造物に入力される地震波がすべて同一であることを前提としている。しかし、基盤が傾斜している不整形地盤においては、波動が複雑に伝播したり、表面波等の2次元的な波が発生する<sup>5,6)</sup>。したがって、不整形地盤上に建設される橋脚も複雑な挙動を示し、その結果、走行する車両の挙動にも影響を及ぼすと考えられる。

そこで本研究では、不整形地盤の波動伝播特性が

地震時の車両の挙動に及ぼす影響を把握するための基本的な検討を行う。まず、不整形地盤の2次元動的FEM解析を実施して不整形地盤上の地震波を算定し、次に1自由度系の応答解析を実施することで橋脚天端の応答波を求める。そして、この波を車両に入力し、車両挙動のシミュレーションを行う。不整形地盤における表層地盤のせん断弾性波速度ならびに傾斜角を変えたパラメータスタディを実施することにより、地盤の不整形性が車両の挙動に及ぼす影響を調べることにした。

## 2. 不整形地盤の2次元動的FEM解析

### (1) 解析条件

図-1に示すように、表層地盤と基盤からなる二層系の不整形地盤を想定する。地震時の車両挙動に大きな影響を及ぼすのは線路直角方向の振動特性であるため、本研究ではこの不整形地盤を面外方向に加振し、2次元動的FEM解析を実施する。解析ケースおよび地盤条件を表-1に示す。地盤については非線形性を考慮することとし、非線形構成則としてはROモデルを用いる。また、減衰はレーリー減衰を用い、表層地盤の1次固有振動数と5Hzで $h=0.01$ とし

た。境界条件は、側面を等変位境界，底面を粘性境界とした。以上の地盤条件のもとで、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」<sup>7)</sup>で定められているL1地震動適合波（図-2）を入力して面外方向に加振し，地盤の動的解析を実施した。

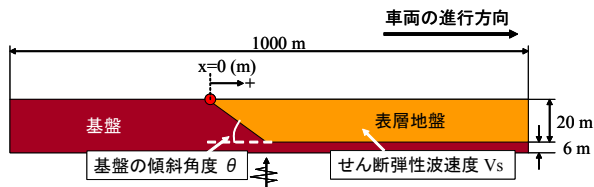


図-1 不整形地盤モデル

表-1 解析ケース

	表層地盤		基盤
単位体積重量 (KN/m <sup>3</sup> )	16		20
せん断弾性波速度 (m)	100	200	400
$\theta = 30^\circ$	Case 1	Case 3	
$\theta = 90^\circ$	Case 2		

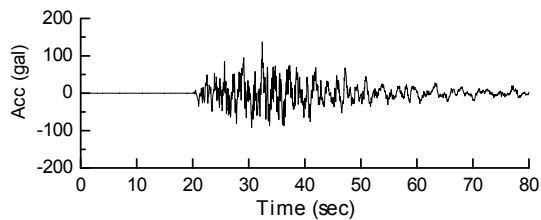


図-2 入力地震波

## (2) 解析結果

Case1における代表4地点での面外方向の地表面加速度波形を図-3に，加速度のスナップショットを図-4に，それぞれ示す。基盤傾斜部で波が発生して水平方向に伝播しており，この波動伝播特性の影響で各地点にそれぞれ異なる地震波が到達している。したがって，不整形地盤における隣接構造物間の応答に時間差が生じるため，構造物上を走行する列車の挙動にも影響を及ぼすと考えられる。

次に，各ケースの地表面最大加速度を比較した結果を図-5に示す。水平方向伝播波の影響で，基盤傾斜部付近における加速度が，基盤傾斜部から離れた地点に比べて大きくなっている。また，表層地盤のせん断弾性波速度が小さいほど，その差が顕著になることがわかる。

また，水平方向伝播波の速度も構造物の応答の時間差に影響を及ぼすと考えられるが，本検討のように面外方向に加振した場合には，水平方向に伝播する波としてLove波が卓越することが知られている<sup>8)</sup>。Love波の位相速度には分散性があるが，表層地盤のせん断弾性波速度が小さいほど，Love波の位相速度も小さくなり，その結果，隣接する橋脚の応答の時間差が大きくなると考えられる。

以上を勘案すると，不整形地盤においては，表層地盤のせん断弾性波速度が構造物上の列車の挙動に

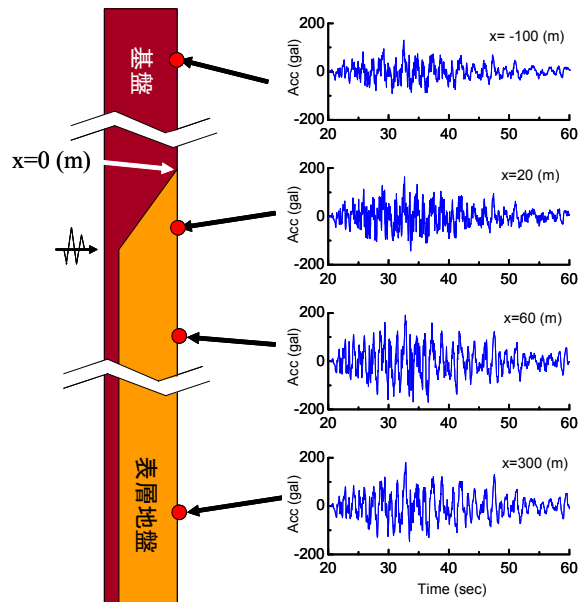


図-3 地表面加速度波形 (Case 1)

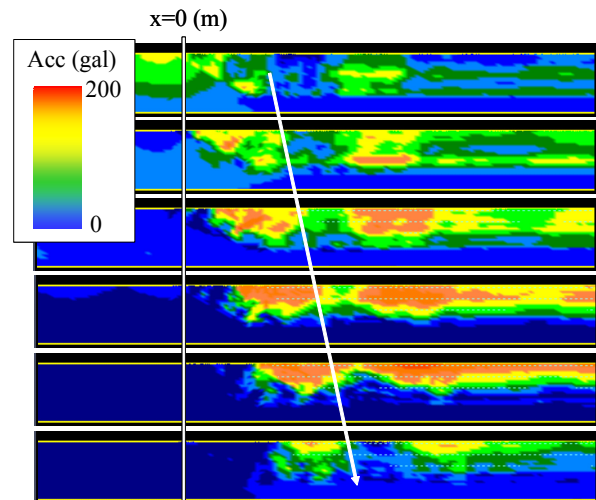


図-4 加速度のスナップショット (Case 1)  
< 32.5(sec)より 0.1秒おき >

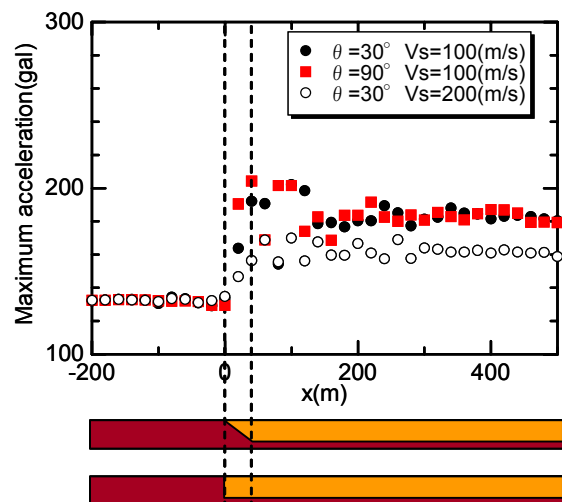


図-5 地表面最大加速度の比較

影響を及ぼすことが想定される。

### 3. 地盤の不整形性が構造物の応答に及ぼす影響

#### (1) 解析条件

ここでは、不整形地盤の波動伝播特性が構造物の応答に及ぼす影響を検討するため、解析対象とした地盤上に、20m間隔で橋脚を建設することを想定し、2. で算定した地表面加速度波形を1自由度系構造物に入力して応答解析を実施する。1自由度系構造物は以下の条件で設定する。

- ・ 構造物の固有周期は0.8(sec)とし、線路方向の全橋脚について同一の値とする。
- ・ 減衰定数は5%とする。
- ・ 構造物は弾性体とする。

#### (2) 解析結果

まず、Case1における橋脚の加速度応答を図-6に示す。不整形地盤の波動伝播特性と構造物における応答の影響により、各橋脚の波形に大きな差が生じている。

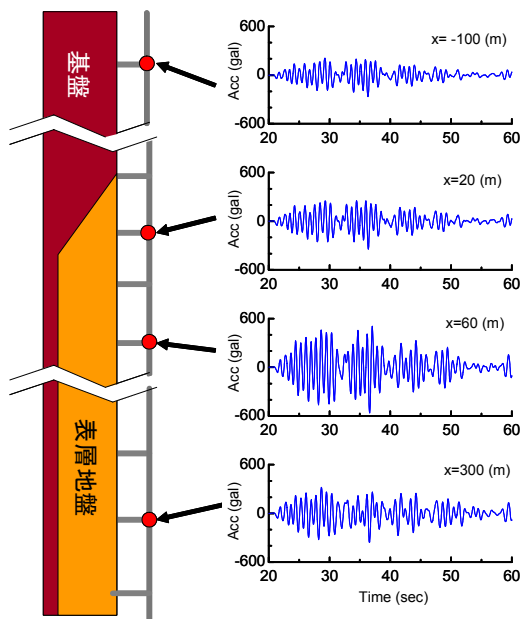


図-6 橋脚天端の応答加速度波形 (Case 1)

次に、列車走行性を確保するための指標の一つとして鉄道構造物の耐震設計で用いられている、式(1)および図-7に示す角折れを算定することにより、地盤の不整形性が列車の走行性に及ぼす影響を簡易に検討する。

$$\theta' = \left\{ \frac{1}{S_1} (y_2(t) - y_1(t)) - \frac{1}{S_2} (y_3(t) - y_2(t)) \right\}_{\max} \quad (1)$$

各解析ケースの橋脚天端における角折れを比較した結果を図-8に示す。基盤の傾斜角度を変化させても、角折れの値はそれほど大きくは変わらないが、

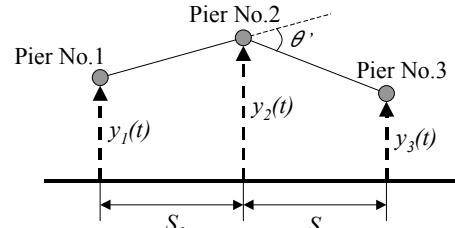


図-7 角折れの算定

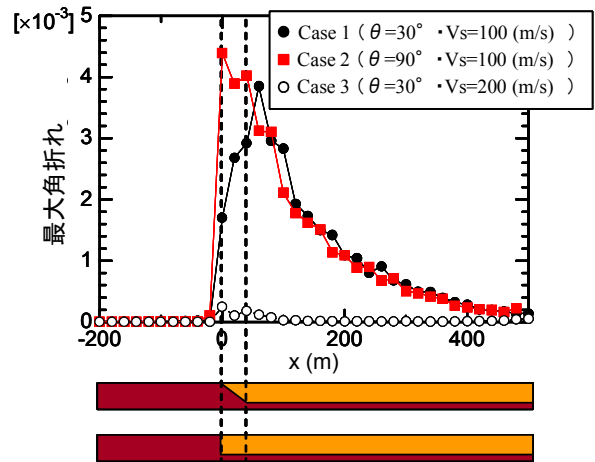


図-8 各ケースの角折れの比較

表層地盤のVsが小さくなると角折れが急激に大きくなっている。これは、表層地盤のVsが小さくなるほど、基盤傾斜部で発生する水平方向伝播波の影響が大きくなり、各地点における最大応答値が地点毎に大きく変化するとともに、水平方向伝播波の伝播速度が遅くなるため、橋脚間の応答の位相差が大きくなることの原因である。つまり、表層地盤が軟弱な場合には、水平方向伝播波の影響で角折れが大きくなるために、構造物上を走行する車両の挙動に影響を及ぼす可能性が高いことがわかる。

### 4. 地盤の不整形性が車両の挙動に及ぼす影響

#### (1) 解析手法

著者の一人は、地震時の鉄道車両の動的挙動を検討できるシミュレーションプログラム(VDS: Vehicle Dynamics Simulator)<sup>2)</sup>を開発している。そこで本章では、3. で得られた構造物天端の応答波形を車両に入力することにより、不整形地盤における構造物上を走行する列車の挙動について調べる。

まず、1車体、2台車、4輪軸について各6自由度、8個の車輪を支える各レールに2自由度、合計58自由度の剛体モデルにより、鉄道台車を図-9に示すようにモデル化する。次に、図-10に示すように、高架橋の応答波形を、車輪ごとにレールを支持しているばねを通じて車輪に入力する。ここではスラブ軌道を想定したレール支持ばね剛性を用いている。なお、大変位振動に対する車両挙動は左右変位の振動

が大きな影響を与えることから、ここでは左右変位、つまりレール直角方向の振動のみ入力することとする。

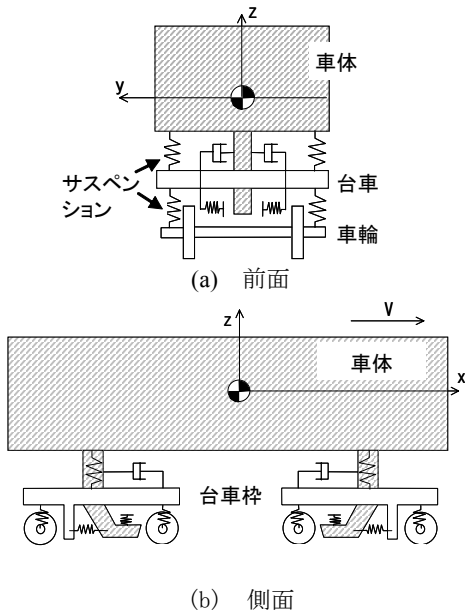


図-9 解析に用いた車両モデル

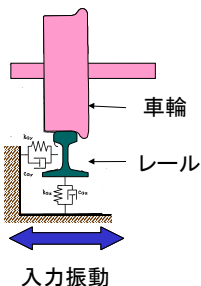


図-10 振動入力モデル

## (2) 安全限界の評価方法

車両の走行安全性を評価する指標として、ここでは車輪の上昇量に加えて、車輪とレールの相対変位を用いる。図-11に示すように、車輪がレールから左右方向に70mmはずれた時点で安全限界を超えたもの(脱線)と判断する。また、入力波の振幅を5%ずつ増加させながら脱線判定を行い、安全限界を超えないと判断される入力波の最大振幅倍率を安全限界倍率と定義し、この値も安全限界の評価に用いることとした。

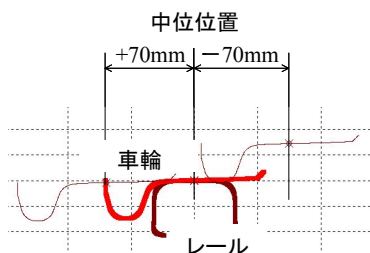


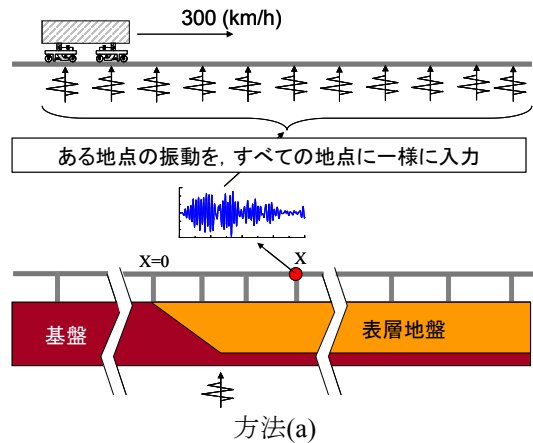
図-11 安全限界の評価

## (3) 車両挙動のシミュレーション

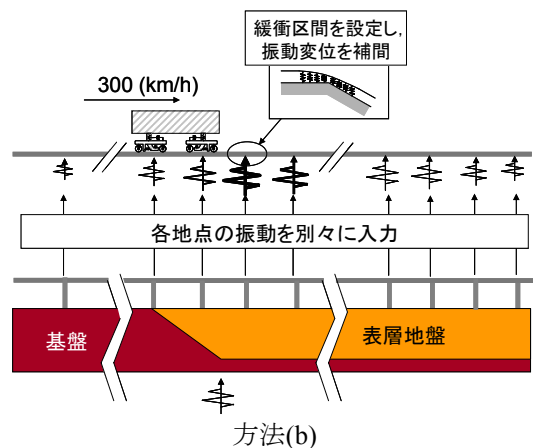
3. で算定した橋梁天端の波形を入力して、車両挙動のシミュレーションを実施する。ここでは、図-12に示すように、次の2通りの方法により解析を行うこととした。

<方法(a)> ある橋脚の振動を、すべての地点に一樣に入力する。

<方法(b)> 各地点の振動を別々に入力する。



方法(a)



方法(b)

図-12 解析方法

まず、方法(a)のシミュレーションにより、各ケースの安全限界倍率を算定した結果を図-13に示す。横軸は、一樣に入力した振動が得られた橋脚位置を示している。Case1とCase2では、基盤傾斜端部付近における安全限界倍率の値がその他の場所よりも小さくなっている。これは、基盤傾斜端部付近で得られた地震動が、列車の走行安全性にとって比較的厳しいことを意味している。これに対しCase3では、安全限界倍率の値がCase1とCase2に比べて大きくなっている。この結果は、表層地盤のせん断弾性波速度が小さい場合に、特に基盤傾斜部周辺で、列車の走行安全性の検討を詳細に検討する必要があることを示唆している。

次に、方法(b)によるシミュレーション結果について述べる。方法(b)では、図-14に示すように鉄道車両の通過するタイミングを様々に変化させ、最大

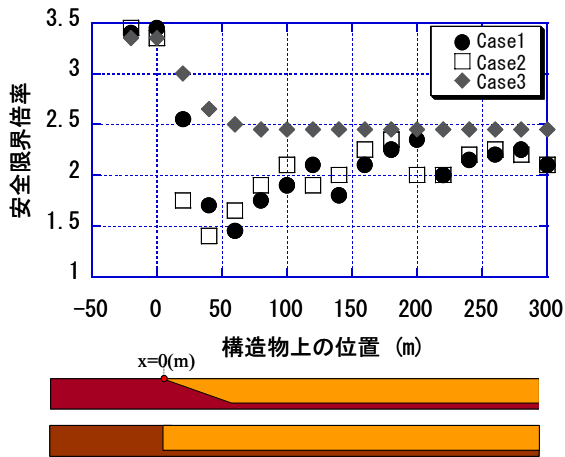


図-13 安全限界倍率の比較 (方法(a))

の車輪上昇量を計算した。その結果を図-15に示す。横軸は、車輪が最も上昇した位置を示している。車輪が最も上昇する位置は、基盤傾斜部から100(m)以上離れている。これは、基盤傾斜部付近で車輪が上昇し始め、車両が走行するに伴って共振した結果、基盤傾斜部から少し離れた地点で最も車輪が上昇するためである。また、Case3においてはほとんど車輪が上昇していないのに対し、Case1やCase2では最大40cmほど車輪が上昇している。したがって、詳細な動的解析の結果でも、表層地盤が軟弱になるほど、不整形地盤上の列車の挙動に影響を及ぼすことがわかった。

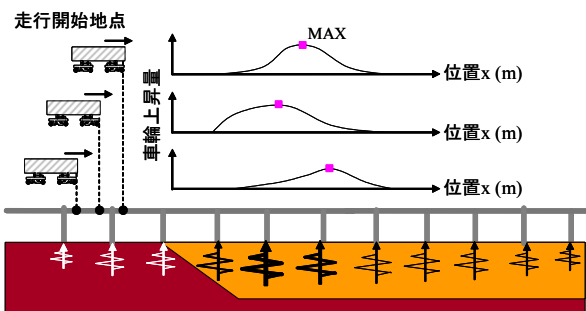


図-14 方法(b)における車輪上昇量の算定

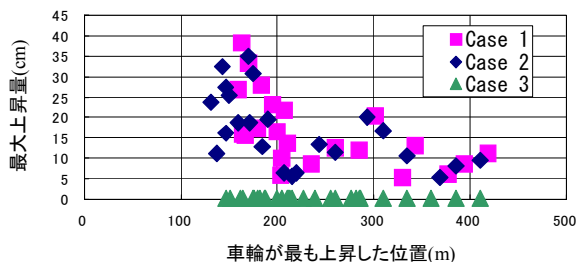


図-15 車輪上昇量の算定結果

## 5. まとめ

本研究では、まず2次元動的FEM解析を用いて不整形地盤の地震波を算定し、橋脚天端の応答を算出するとともに、得られた振動を車両に入力して車両の挙動をシミュレーションすることにより、地盤の不整形性が車両の挙動に及ぼす影響について調べた。得られた結果を以下に示す。

- 1) 基盤傾斜部で発生した水平方向伝播波の影響により、不整形地盤上の各点に到達する波が異なり、この水平方向伝播波は鉄道高架橋の応答にも影響を及ぼす。
- 2) 表層地盤のせん断弾性波速度が小さくなるほど、鉄道高架橋の応答の変動が大きくなり、橋脚間の応答の時間遅れも大きくなる。
- 3) 表層地盤が軟弱な場合には、車両とレールの総大変位や車両上昇量が大きくなるため、鉄道高架橋上を高速で走行する列車の走行安全性に注意する必要がある。

## 参考文献

- 1) 宮本岳史, 松本信之, 曾我部正道, 下村隆行, 西山幸夫, 松尾雅樹: 大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.72, No.706, pp.1849-1855, 2005.
- 2) 宮本岳史, 石田弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.64, No.626, pp.3928-3935, 1998.
- 3) 宮本岳史, 石田弘明, 羅休, 松尾雅樹, 長谷川浩二: 振動する軌道上を走行する車両の挙動, 日本機械学会第13回交通・物流部門大会講演論文集, No.04-53, pp.243-246, 2004.
- 4) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限, 2006.
- 5) 室野剛隆, 西村昭彦, 室谷耕輔: 地震動に与える表層地盤の局所的変化の影響と耐震設計への適用性に関する提案, 土木学会ローカルサイト・エフェクト・シンポジウム論文集, pp.183-188, 1998.
- 6) 川西智浩, 室野剛隆, 青木一二三, 山崎貴之: 地盤の不整形性が軌道面の折れ角に及ぼす影響, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, No.131, 2005.
- 7) (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, 1999.
- 8) 秋山伸一: 傾斜層で発生する波動とLove波の関連, 土木学会論文集, No.459/I-22, pp.129-138, 1993.

# THE INFLUENCE OF WAVE PROPAGATION CHARACTERISTICS IN SOFT GROUND WITH NON-FLAT BASE ON BEHAVIOR OF RAILWAY VEHICLE

Tomohiro KAWANISHI, Yoshitaka MURONO, Takefumi MIYAMOTO and  
Masamichi SOGABE

In order to check the safety of trains running on railway structures, it is essential to take into account the characteristics of earthquake motion. In soft ground with a non-flat base, waves are generated over a slanted base area and propagate in the horizontal direction. The behavior of railway vehicles is therefore affected by these horizontally propagating waves. In this paper, we clarify the effects of wave propagation characteristics on the dynamic behavior of railway vehicles by numerical simulation. We first ascertained the characteristics of seismic ground behavior in the out-of-plane direction in soft ground with a non-flat base using 2D dynamic FEM analysis. Next, we calculated the seismic deformation of railway viaducts constructed on soft ground with a non-flat base. Finally, we investigated the dynamic behavior of vehicles running along railway structures on soft ground with a non-flat base.