

# 地盤の不整形性が軌道面の折れ角に及ぼす影響

川西智浩1・室野剛隆2・青木一二三3・山崎貴之4

 <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>鉄道建設・運輸施設整備支援機構(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1) E-mail:123.aoki@jrtt.go.jp
 <sup>4</sup>鉄道建設・運輸施設整備支援機構(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1) E-mail:tak.yamazaki@jrtt.go.jp

鉄道構造物の設計では,L1地震時に列車走行性を損なうような過大な変位が生じないように,軌道面の折 れ角の照査を行うことを原則としている.鉄道構造物等設計標準・同解説では,不整形地盤の影響を加味 した折れ角の算定方法はまだ検討されていないが,不整形地盤では,波動が複雑に伝播したり,表面波等 の2次的な波が発生するため,軌道面の折れ角にも大きな影響を及ぼすと考えられる.そこで本研究では, 不整形地盤において面外加振時の2次元FEM解析を実施し,面外方向の波動伝播特性を明らかにするとと もに,その結果に基づいて軌道面の折れ角を算定することにより,地盤の不整形性が折れ角に及ぼす影響 について検討を行った.

Key Words : out-of-plane vibration, irregular ground, finite element method, folding angle

### 1.はじめに

鉄道構造物においては、地震時に隣接する構造物 間の変位差が大きくなると,列車走行安定性が損な われるため、地震時の変位の照査を行う必要がある。 「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」<sup>1)</sup> (以下,耐震標準とする)においては,L1地震動に 対して列車走行安定性を確保するために,軌道面に おける折れ角を算定し,列車走行速度に応じた折れ 角の制限値を超えないことを照査するよう定めてい る.しかし,耐震標準に示された折れ角の算定方法 を不整形地盤に適用する手法に関しては明確に示さ れていない.不整形地盤では波動が複雑に伝播し, 軌道面の折れ角にも大きな影響を及ぼすと考えられ るため,折れ角の算定にあたっては地盤の2次元 FEM解析を逐一実施するのが望ましいが,設計実務 上は困難である場合も多く、不整形地盤における波 動伝播特性を考慮した折れ角の簡易な算定方法を検 討することが必須となっている.軌道面における折 れ角は,隣接する構造物間に生じる線路直角方向の 変位を用いて算定するため,不整形地盤における折 れ角の特性について検討するためには,不整形地盤 における面外方向の波動伝播特性を明らかにする必 要がある.

不整形地盤における波動伝播特性については,これまで数多くの研究がなされている.まず, Ishii

and Ellis<sup>2)</sup>や丹羽・廣瀬<sup>3)</sup>は,傾斜層における平面波 の多重反射や回折波の発生過程などを明らかにした. Bard and Bouchon<sup>4).5)</sup>は,Aki and Larner法<sup>6)</sup>を用いて, 盆地端部で表面波が生成されることを指摘している. 大槻ら<sup>7)</sup>は,実測波形と計算波形を比較することに より,SV波が不整形地盤に入射されると,基盤傾斜 部付近でレーリー波が発生することを示している.

本研究で取り扱うような面外加振問題においては, SH波の波動伝播特性を把握することが重要である. 木下<sup>8)</sup>は,傾斜層に入射したSH波が繰り返し全反射 し,堆積層を伝播することによってLove波的な卓越 波に成長することを示した.中村ら<sup>9)</sup>や秋山<sup>10)</sup>は, SH波が入射した場合に不整形地盤で発生するLove波 の発生機構について明らかにしている.

これらの研究により,不整形地盤における面外加 振時の波動伝播特性は定性的には明らかになりつつ あるが,地盤の不整形性を考慮した折れ角の算定方 法を検討するためには,設計レベルでよく用いられ ている1次元地盤の応答解析結果との比較を行った り,不整形地盤の各パラメータと折れ角との関係を を定量的に明らかにすることが必要となる.竹宮・ 石山<sup>11)</sup>は,1つの不整形地盤モデルに対して2次元 FEM解析を用いて面外加振を実施し,1次元解析と の比較を行っているが,耐震設計に反映させるため には,さらに数多くのパラメータスタディを実施す る必要がある. そこで本研究では,著者の一人が実施した面内加 振時の検討<sup>12)</sup>と同様の方法で,不整形地盤における 面外加振時の2次元FEM解析を実施し,各パラメー タが不整形地盤の波動伝播特性に及ぼす影響につい て考察するとともに,計算した地表面波形を用いて 軌道面における折れ角を算定し,構造物や地盤の固 有周期と折れ角との関係について基礎的な検討を実 施した.

# 2.不整形地盤における面外加振時の2次元 FEM解析

#### (1) 解析モデル

図-1のように, 堆積層と基盤層からなる二層系の 不整形地盤を想定し、時間領域における直接積分に より,2次元FEM解析を実施する.入力波は,堆積 層の固有周期を中心周期にもつRicker Wavelet波とし、 最大加速度は1(m/s<sup>2</sup>)とした.このとき,表層地盤の 固有周期はTg= 4H/Vsで算出した.また,地盤は弾 性地盤とし,地盤条件を表-1に示すように設定する. 時刻歴において非線形計算を実施した場合と弾性地 盤として等価線形的な値を用いた場合では,両者の 波動伝播特性には違いが生じることを確認している <sup>13)</sup>が,ここでは議論を明確にするために,減衰定数 を等価線形的な値に設定し,h=0.15とした.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=0.15とした.境界条件は,面内の2方 向に関しては側面,底面とも完全固定とし,また面 外方向については,側面を自由境界,底面を粘性境 界とした.以上の条件のもとで,面内加振時の検討 <sup>12)</sup>と同じように,地盤傾斜角,表層厚さH,堆積 層と基盤層のインピーダンス比 をパラメータとし て解析を実施した.解析ケースを表-2に示す.なお, 各地点で同一の地盤条件をもつ1次元解析も実施し た.

#### (2) 解析結果

各地点の位置を,図-2に示すように基盤傾斜部から平坦部に移行する点を原点とした場合について, Case1における2次元FEM解析の地表面加速度波形 g(t)を図-3に示す.地点によって最大加速度が異 なり,基盤傾斜端部で加速度が最も大きくなってい る.また,基盤傾斜部から離れるにしたがって,継 続時間が伸びている.地盤が水平成層地盤であれば これらの現象は起こらないため,不整形地盤の影響 によるものと考えられる.

次に,2次元FEM解析の応答波形g(t)から1次元 解析の応答波形f(t)を差し引いたものf'(t)を図-4 に示す.波が基盤傾斜部で発生し,時間遅れを伴っ て水平方向に伝播していることが分かる.面内加振 の場合も,波が基盤傾斜部で発生していることが確 かめられており<sup>12)</sup>,面外加振時の波動伝播特性は面 内加振時と同様の傾向があると考えられる.

1次元解析の応答波形 f(t)は,鉛直下方から伝播



図-1 不整形地盤モデル

表-1 地盤余件					
	堆積層	基盤層			
単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	16	20			
せん断弾性波速度Vs(m/s)	表-2の通り	400			
減衰定数h	0.15	0.15			

表-2 解析ケース

表層Vs(m/s)	100		150	200	
インピーダンス比κ	0.2		0.3	0.4	
θ(°)	10	20	40	20	20
10		Case6			
15		Case7			
30	Case4	Case1	Case5	Case2	Case3
45		Case8			
90		Case9			



図-2 各位置の座標の取り方

する直達波(重複反射波)に相当する.不整形地盤 における波動伝播は複雑なものであるが,本研究は, 不整形地盤の波動伝播特性を設計用にモデル化する ことが目的であるため, f'(t)を基盤傾斜部で生成 される水平方向伝播波に対応すると考えて,検討を 行う.

# 3.鉛直方向伝播波と水平方向伝播波の最大振 幅比

#### (1) 検討方法

最近では,設計レベルでも1次元の地盤応答解析 により鉛直下方から伝播する直達波(鉛直方向伝播 波)を算定する場合が多いことから,鉛直方向伝播 波と水平方向に伝播する波の最大振幅比の特性を明 らかにすることは,不整形地盤の地表面波形を推定



図-3 2次元 FEM 解析による地表面加速度波形 (Case1)

するために重要となる.したがって本研究では,2. で算定した応答波形を用い,次式により最大振幅比 の算定を行った.

 $\alpha = |f'(t)|/|f(t)| = |g(x) - f(x)|/|f(x)| \quad (1)$   $\Box \subseteq \overline{C},$ 

g(t):2次元解析の応答波形

f(t):1次元解析の応答波形(鉛直方向伝播波)

f'(t):基盤傾斜部で発生した水平方向伝播波

をそれぞれ表している.

(2) 各パラメータが最大振幅比に及ぼす影響

表-2に示した各ケースについて,(1)に示した方 法で最大振幅比を算定することにより,不整形地盤 の各パラメータが最大振幅比に及ぼす影響について 検討した.

#### a) 傾斜角の影響

表層厚さH=20m, 表層Vs=100m/sの場合(Case1, Case6~Case9)について, 傾斜角 と最大振幅比と の関係を図-5に示す.基盤傾斜端部で最大振幅比は 最も大きくなっており, また, 傾斜角が大きくなる ほど最大振幅比が大きくなっている.

# b) 層厚の影響

傾斜角30°,表層Vs=100m/sの場合(Case1, Case4~Case5)について,表層厚さと最大振幅比と の関係を図-6に示す.層厚が厚くなるほど,最大振 幅比が大きくなることがわかる.また,距離xを層 厚Hで除した基準化距離x/Hを横軸にとって最大振幅 比を示したものが図-7である.層厚によらずほぼ1 本の曲線上にプロットされていることがわかる.し



図-4 2次元 FEM 解析の波形から 1次元解析に による波形を差し引いた波形 (Case1)

たがって,基準化距離x/Hを用いることにより,層 厚と最大振幅比との関係を把握することが可能である.

c) インピーダンス比の影響

傾斜角30°,表層厚さH=20m/sの場合(Case1~Case3)について,インピーダンス比と最大振幅比との関係を図-8に示す.インピーダンス比が小さくなるほど,最大振幅比が大きくなることがわかる. d)まとめ

本節では,不整形地盤における各パラメータが鉛 直方向伝播波と水平方向伝播波の最大振幅比に及ぼ す影響について検討を実施した.その結果,以下の 傾向があることがわかった.

- ・ 最大振幅比は,基盤傾斜端部で最大となる.
- ・ 傾斜角が大きいほど,最大振幅比が大きい.
- ・ 層厚が厚いほど,最大振幅比が大きい.
- インピーダンス比が小さいほど,最大振幅比が 大きい。

これらの傾向はすべて,面内方向加振時における最 大振幅比の検討結果<sup>12)</sup>と同じである.そこで次節で は,面内加振時と面外加振時の最大振幅比について 比較検討を行う.

(3) 面内加振時における最大振幅比との比較

鉄道の耐震標準<sup>1)</sup>では,面内加振の解析<sup>12)</sup>に基づ いて,面内加振時における鉛直方向伝播波と水平方 向伝播波の最大振幅比を次式で定義している. ・ $X \ge 0$ のとき

$$\alpha = 0.3 \times \exp\left(-\frac{7.0}{\theta}\right) \times \sqrt{\frac{1}{\kappa}} \times \exp\left(-0.44X\right)$$
(2)



・X < 0のとき</p>

$$\alpha = 0.3 \times \exp\left(-\frac{7.0}{\theta}\right) \times \sqrt{\frac{1}{\kappa}} \times \left(1 + \frac{x'}{L_B}\right)$$
(3)

ただし, $\theta$ は基盤の傾斜角度, $\kappa$ はインピーダンス比,Xは基準化距離(=x/H,x:基盤傾斜端部からの距離,H:層厚), $L_B$ は基盤面が傾斜している部分の長さである.

図-9に,(2),(3)式により算出した面内加振時の最 大振幅比と,本研究の解析結果を用いて算定した面 外加振時の最大振幅比との比較を示す.面外加振時 の方が最大振幅比が若干小さくなっているが,グラ フの形状はよく似ており,位置と最大振幅比の関係 は面内加振時とほぼ同じ傾向があることがわかる. ここでは代表例としてCase1の場合についてのみ示 しているが,他のケースについても同様の傾向があ ることを確認している.

#### (4) まとめ

本章では,面外加振時について鉛直方向伝播波と 水平方向伝播波の最大振幅比を算定し,各パラメー タが最大振幅比に及ぼす影響について調べるととも に,面内加振時における最大振幅比との比較を行っ







た.その結果,各パラメータの影響や位置との関係 については,面内加振時と傾向は概ね似ている.し たがって,面外加振時についても,面内加振時と同 様の方法で最大振幅比のモデル化が可能であると考 えられる. (1) 折れ角の算定方法

軌道面における折れ角は,図-10に示すように, 各橋脚の変位量とスパンを用いて次式で表される.



図-10 軌道面における折れ角の算定

ここで, $\delta_{1,t}, \delta_{2,t}, \delta_{3,t}$ は,それぞれ橋脚P1,P2,P3 の時刻*t*における変位を,また $l_{1,t}$ ,はスパンを表す.

本章では,以下の手順にしたがって軌道面におけ る折れ角を算定する.

- ・不整形地盤上に約20m間隔で橋脚を建設すること を想定する.
- ・2次元FEM解析により算定した地表面加速度波形 を各橋脚に入力し、1自由度系の応答解析を実施 して、地盤に対する橋脚の相対変位を求める.
- ・橋脚の相対変位に地表面の変位を加え,橋脚の絶 対変位を算出する.
- ・(4)式により,軌道面における折れ角を時々刻々 算定し,最大折れ角を求める.

なお,橋脚の減衰定数は5%とし,橋脚の固有周期は 線路方向の全橋脚について同一であると仮定する. 橋脚の固有周期を0.1(sec)から2.0(sec)まで0.1(sec)刻 みに変えて折れ角を算定することにより,橋脚の固 有周期が軌道面の折れ角に及ぼす影響について検討 を行う.

なお,以上に示した方法は,折れ角を時々刻々算 定してその最大値を求めており,地震動の位相差を 考慮して最大折れ角を算出していることになる.こ れに対し,地震波の位相差を考慮せず,各地点にお ける最大変位を用いて算定した折れ角は,式(5)のよ うに表される.

$$\theta' = \frac{\delta_{2,\max} - \delta_{1,\max}}{l_1} + \frac{\delta_{2,\max} - \delta_{3,\max}}{l_2}$$
(5)

ここで, $\delta_{1,max}$ , $\delta_{2,max}$ , $\delta_{3,max}$ は,それぞれP<sub>1</sub>,P<sub>2</sub>,P<sub>3</sub> 橋脚における最大変位を表す.隣接する橋脚の応答 に位相差が全くない場合には,(4)式,(5)式により 算出される折れ角は同じ値となる.本章では,位相 差を考慮した(4)式による折れ角と,位相差を考慮し ない(5)式による折れ角の比較検討も行う.

#### (2) 橋脚位置と最大折れ角の関係

CASE1について,橋脚位置と(4)式を用いて求めた 軌道面の最大折れ角(橋脚の固有周期が0.1(sec)~ 1.0(sec)の場合)の関係を図-11に示す.図-11には,



図-11 橋脚位置と最大折れ角の関係(Case1)

参考のために地表面位置における最大折れ角も示している.基盤傾斜端部において折れ角が最大となり, 基盤傾斜部から離れるにしたがって,最大折れ角は小さくなっている.また,地表面位置での折れ角に対して,軌道面の折れ角は最大3倍程度にまで増幅しており,構造物の影響により軌道面における折れ角は大きく変化することがわかる.

#### (3) 構造物の固有周期が最大折れ角に及ぼす影響

図-12に示す傾斜部基盤端点と傾斜部基盤端点から100m地点の2地点において,(4)式(位相差あり)と(5)式(位相差なし)により最大折れ角を算出し, 横軸に構造物の固有周期をとって最大折れ角との関係を示したものが,図-13である.

地震波の位相差を考慮して時々刻々折れ角を算定 した場合,折れ角が最大となる構造物の固有周期は, 2地点とも約0.6(sec)となっている.これは,入力波 の卓越周期や表層地盤の固有周期(Case1では,と もに0.8(sec))とは異なる値であり,また2地点とも 値が共通している点を考慮すると,最大折れ角に影 響を及ぼしているのは,水平方向伝播波であると考 えられる.

各橋脚地点における水平方向伝播波のフーリエス ペクトルを,図-14に示す.卓越周期は概ね0.6(sec) となっており,折れ角が最大となる構造物の固有周 期とほぼ一致している.また,構造物の固有周期が



(b)基盤傾斜端部から 100m 地点(x=100) 図-13 構造物の固有周期と最大折れ角の関係

0.6(sec)の場合における,各地点の折れ角の時刻歴波 形を,図-15に示す.折れ角が最大となる時刻が基 盤傾斜部から離れるにしたがって遅くなっており, 水平方向伝播波の特徴とよく似ている.以上より, 時間遅れを伴って水平方向に伝播する波の卓越周期 と構造物の固有周期が一致したことにより,大きな 折れ角が発生したことがわかる.

また,図-13を見ると,位相差を考慮せずに算出 した折れ角は,位相差を考慮した場合に比べて小さ くなっているうえ,折れ角が最大となるような構造 物の固有周期も,位相差を考慮した場合とは異なっ ている.したがって,各地点における最大変位のみ を用いても軌道面における折れ角を評価できないこ とがわかる.

(4) 構造物の固有周期と地盤の固有周期との関係を 用いた最大折れ角の検討

(3)において,折れ角量が最大となる場合の構造



図-14 水平方向伝播波のフーリエスペクトル





図-16 地盤の固有周期の平均値

物の固有周期が水平方向伝播波の卓越周期と一致していることを指摘した.面外方向の解析では,水平 方向に伝播する波としてLove波が卓越すると考えられるため,その卓越周期はLove波のairy相の周期と 一致する可能性が高い<sup>10)</sup>.しかし本研究では,不整 形地盤の波動伝播特性を設計用にモデル化すること を念頭に置いているため,簡易な方法によって水平 方向伝播波の卓越周期を把握できることが望ましい. ここでは,水平方向伝播波の卓越周期は基盤傾斜部 における地盤の固有周期と関連性があると考えた. すなわち,図-16に示すように,折れ角量が最大と なる場合の構造物の固有周期(0.6(sec))は,基盤傾 斜部における地盤の固有周期の平均値(CASE1: 0.56(sec))に近い値となっていることから,本研究 では、構造物の固有周期を基盤傾斜部における地盤 の固有周期の平均値で正規化した値を求め、この値 と最大折れ角との関係について整理するとともに、 傾斜角、層厚、インピーダンス比の各パラメータが 最大折れ角に及ぼす影響について検討した.

a) 傾斜角の影響

傾斜部基盤端点と傾斜部基盤端点から100m地点の 2地点について,横軸に,構造物の固有周期を基盤 傾斜部における地盤の固有周期の平均値で割った値 を,縦軸に最大折れ角をとり,傾斜角が最大折れ角 に及ぼす影響について表層厚さH=20m,表層 Vs=100m/sの場合(Case1, Case6~Case9)の結果を 用いて検討した.その結果を図-17に示す.構造物 の固有周期と基盤傾斜部における地盤の固有周期の 平均値が一致する場合に,折れ角が最大となる傾向 が見られる.また,基盤傾斜部から離れた地点では, 傾斜角が大きいほど最大折れ角は大きくなるが,基 盤傾斜端部では が30°の場合に折れ角が最大とな っている.これは,隣接する橋脚が基盤傾斜部に位 置しており,鉛直方向伝播波の位相差も折れ角に影 響しているためと考えられる.したがって,基盤傾 斜部では折れ角が最大となる傾斜角は,隣接する橋 脚の位置, すなわちスパンにも依存すると考えられ



図-17 構造物および地盤の固有周期と 最大折れ角の関係(傾斜角の影響)

る.

b) 層厚の影響

傾斜角30。,表層Vs=100m/sの場合(Case1, Case4~Case5)について,層厚と最大折れ角の関係 を比較した結果を図-18に示す.各ケースとも,構 造物の固有周期と基盤傾斜部における地盤の固有周 期の平均値が一致する場合に,折れ角が最大となり, また層厚が厚くなるほど,最大折れ角が大きくなる. 層厚が10(m)程度になると,他のケースに比べて最 大折れ角は急激に小さくなる.耐震標準では,面内 加振時において不整形地盤の影響を考慮する層厚を 10(m)以上と定めており,面外加振を行って折れ角 を算定した場合についても,不整形地盤の影響を考 慮する層厚の閾値を定めることが,設計実務上有効 であるといえる.

#### c) インピーダンス比の影響

傾斜角30°,表層厚さH=20m/sの場合(Case1~ Case3)について,インピーダンス比と最大折れ角 の関係を比較した結果を図-19に示す.構造物の固 有周期と基盤傾斜部における地盤の固有周期の平均 値が一致する場合に,折れ角が最大となる傾向は, インピーダンス比が変化しても同様である.また,





(b)基盤傾斜端部から100m地点(x=100)

図-19 構造物および地盤の固有周期と 最大折れ角の関係(インピーダンス比の影響)

インピーダンス比が小さくなるにつれて,最大折れ 角は急激に大きくなることがわかる.したがって, 表層地盤が非常に軟弱な場合については,折れ角の 検討を十分に行うことが望ましいと言える.

## 5.結論

本研究では,不整形地盤において面外加振を行っ て2次元FEM解析を実施し,面外加振時の波動伝播 特性について検討するとともに,不整形地盤上に橋 脚を建設した場合について軌道面での折れ角を算定 し,橋脚位置や構造物の固有周期が折れ角に及ぼす 影響について調べた.その結果,以下の知見が得ら れた.

- ・鉛直方向伝播波(鉛直下方から伝わる直達波)と
  基盤傾斜部で発生した水平方向伝播波の最大振幅
  比を算定した結果,不整形地盤における傾斜角,
  層厚,インピーダンス比の各パラメータが最大振
  幅比に及ぼす影響は,面内加振時の検討結果と概
  ね傾向は同じであった.
- ・不整形地盤において面外方向に加振すると,基盤 傾斜部で発生した波が時間遅れを伴って水平方向 に伝播する.この水平方向伝播波のフーリエスペ

クトルの卓越周期と,軌道面での折れ角が最大と なる場合の橋脚の固有周期が概ね一致しており, 基盤傾斜部で発生した水平方向伝播波が軌道面で の折れ角に大きな影響を及ぼしていると考えられ る.

 ・今回の解析では,橋脚の固有周期と基盤傾斜部に おける地盤の固有周期の平均値が一致するとき, 軌道面での折れ角が最大となる傾向があり,折れ 角が最大となる固有周期を簡易に算定できる可能 性があることがわかった.

なお,今回の検討では,不整形地盤における波動 伝播特性を把握することを目的としているため,単 純なRicker Waveletを入力波とするとともに,地盤を 等価線形的に考慮するため,減衰定数h=0.15の弾性 地盤と設定して解析を実施しており,解析条件によ っては,水平方向伝播波の伝播特性が変化し,それ に伴って水平方向伝播波の加速度が最大となる地点 や,折れ角と橋脚の固有周期の関係などが変わって くる可能性もある.今後は,実際の設計に反映させ ることを念頭に置き,列車走行安定性の検討で用い られているL1地震動を入力波とするとともに,地盤 の非線形性を考慮して,折れ角の検討を行う予定で ある.

#### 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,1999.
- 2) Ishii , H. and R. M. Ellis : Multiple Reflection of Plane SH Waves by a Dipping Layer , *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.60, pp.15-28, 1970.
- 3) 丹羽義次,廣瀬壮一:傾斜層を有する地盤における理 論的地震動解析,土木学会論文報告集,第337号, pp.57-66,1983.
- 4) Bard, P.-Y. and M. Bouchon: The Seismic Response of Sediment-Filled Valleys. Part 1. The Case of Incident SH Waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.70, No.4, pp.1263-1286, 1980.
- 5) Bard, P.-Y. and M. Bouchon: The Seismic Response of Sediment-Filled Valleys. Part 2. The Case of Incident P and SV Waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.70, No.5, pp.1921-1941, 1980.
- 6) Aki , K. and K. L. Larner : Surface Motion of a Layered Medium Having an Irregular Interface Due to Incident Plane SH Waves , *Journal of Geophysical Research* , Vol.75 , No.5 , pp.933-954 , 1970.
- 7)大槻明,田蔵隆,清水勝美:傾斜基盤を有する不整形 地盤の地震時挙動と地盤ひずみ,土木学会論文集, No.350/I-2, pp.291-300, 1984.
- 8) 木下繁夫: 傾斜層内におけるSH波の全反射振幅, 地震, 2, No.38, pp.597-608, 1985.
- 9) 中村晋,末富岩雄,秋山伸一,吉田望:傾斜基盤の存 在により生じるLove波の特性,土木学会論文集, No.398/I-10, pp.339-348, 1988.
- 10) 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.
- 11) 竹宮宏和,石山基:不整形性・非線形性を考慮した沖 積地盤の地震応答性状,土木学会論文集,No.477/I-25, pp.73-81,1993.

 12) 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.
 13) 今村年成,室野剛隆,畠中仁,棚村史郎,室谷耕輔: 土の非線形を考慮した不整形地盤における波動伝播特性に関する一考察,第57回土木学会年次学術講演会講 演概要集第1部,pp.1733-1734,2002.

(2005.3.15 受付)

# EFFECT OF GROUND IRREGULARITY ON FOLDING ANGLE OF RAILWAY TRACK

# Tomohiro KAWANISHI, Yoshitaka MURONO, Hifumi AOKI and Takayuki YAMAZAKI

In seismic design of railway structures, a folding angle of railway track must be checked in order to secure the train running stability. On irregular grounds, the angle are strongly effected by surface waves which are generated around a dipping basement. Therefore, a method must be presented for calculating the folding angle taking into the ground irregularity account. In this paper, characteristics of out-of-plane vibrations on the irregular ground are clarified by using FEM analyses and the effects of ground irregularity on folding angles of raiway track are investigated by using the calculated earthquake ground motions.