

不整形地盤における高架橋軌道面の折れ角の特性について

川西智浩¹・室野剛隆²・青木一二三³・山崎貴之⁴

¹正会員 工修 (財)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)

²正会員 工博 (財)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)

³正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道設計本部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

⁴正会員 工修 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道設計本部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

1. はじめに

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。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が、鉄道構造物等設計標準・同解説¹⁾に示されている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おらず、設計実務にあたっても、不整形地盤上に建設される構造物の折れ角の算定にあたっては地盤の2次元FEM解析を逐一実施しているのが現状である。したがって、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。

不整形地盤の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²⁾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³⁾や秋山⁴⁾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定量的に明らかにすることが必要となる。竹宮・石山⁵⁾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外加振時の検討⁶⁾と同様の方法で、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について検討するとともに、その結果に基づ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) 解析条件

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。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⁷⁾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。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

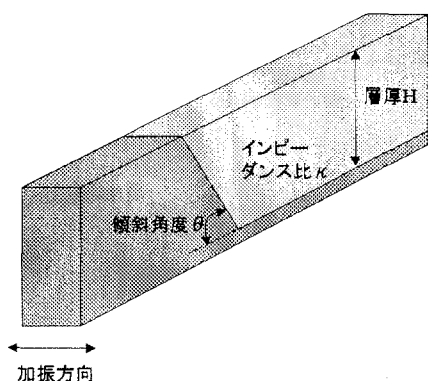


図-1 不整形地盤モデル

表-1 地盤条件

	堆積層	基盤層
単位体積重量 γ (kN/m ³)	16	20
せん断弾性波速度 V_s (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 V_s (m/s)	100			150	200
インピーダンス比 κ	0.2			0.3	0.4
θ (°) \ H (m)	10	20	40	20	20
10		Case6			
15		Case7			
30	Case4	Case1	Case5	Case2	Case3
45		Case8			
90		Case9			

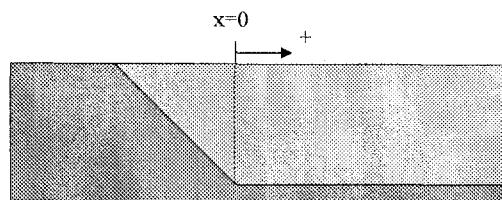


図-2 各位置の座標の取り方

$h=0.15$ 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。

また、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 $1(\text{m/s}^2)$ とした。このとき、表層地盤の固有周期は $T_g = \Sigma 4H/V_s$ で算出した。

以上の条件のもとで、面内加振時の検討⁶⁾と同じように、地盤傾斜角 θ 、表層厚さ H 、堆積層と基盤層のインピーダンス比 κ 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。このような特徴は面内方向加振時の検討においても確かめられており⁹⁾、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、鉛直下方から伝播する直達波（重複反射波、以下、鉛直方向伝播波）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. 軌道面における折れ角の算定

(1) 折れ角の算定方法

軌道面における最大折れ角は、図-5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。

$$\theta = \left\{ \frac{1}{S_1} (y_2(t) - y_1(t)) - \frac{1}{S_2} (y_3(t) - y_2(t)) \right\}_{\max} \quad (1)$$

ここで、 $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$ は、それぞれ橋脚P1, P2, P3の時刻 t における変位を、また S_1, S_2 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。
- ・(1)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。

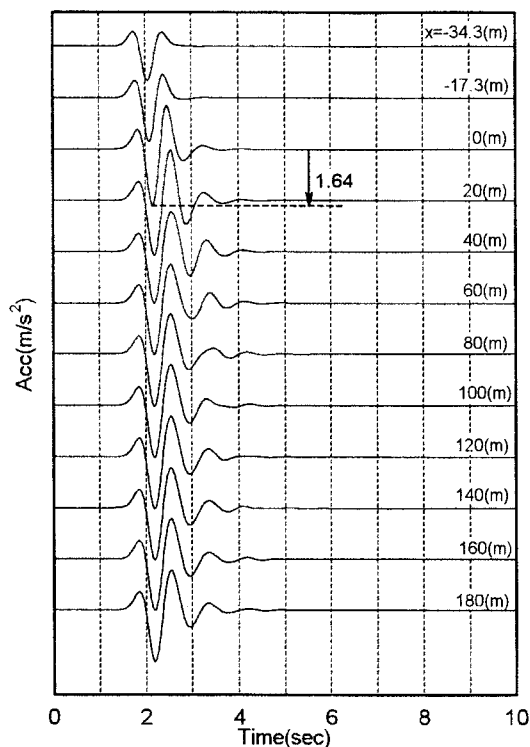


図-3 2次元FEM解析による地表面加速度波形 (Case1)

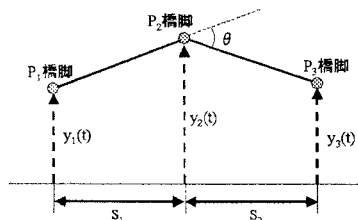


図-5 軌道面における折れ角の算定

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。

(2) 構造物の固有周期と最大折れ角との関係

一例としてCASE1について、基盤傾斜端部位置($x=0$)と基盤傾斜端部から100m位置($x=100$)における構造物の固有周期と最大折れ角の関係を算定した結果を図-6に示す。どちらの位置においても、折れ角が最も大きくなる構造物の固有周期は約0.6(sec)であるが、この周期はCASE1における表層地盤の固有周期や入力波の卓越周期である0.8(sec)とは異なる値である。構造物の固有周期が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-7に示す。折れ

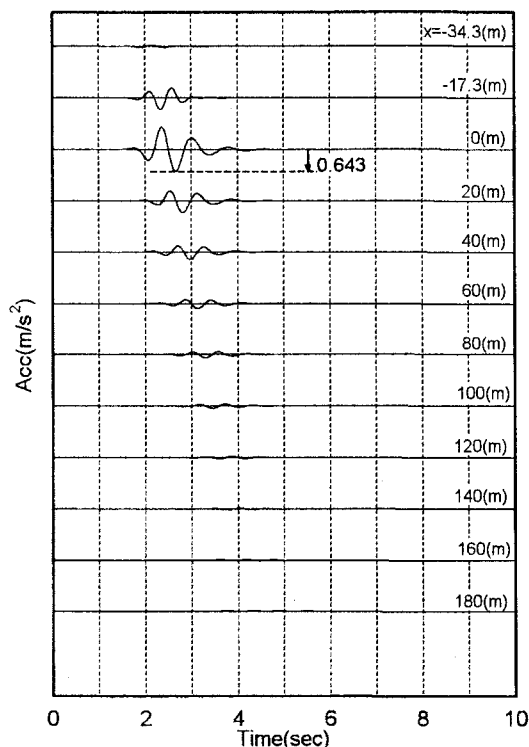
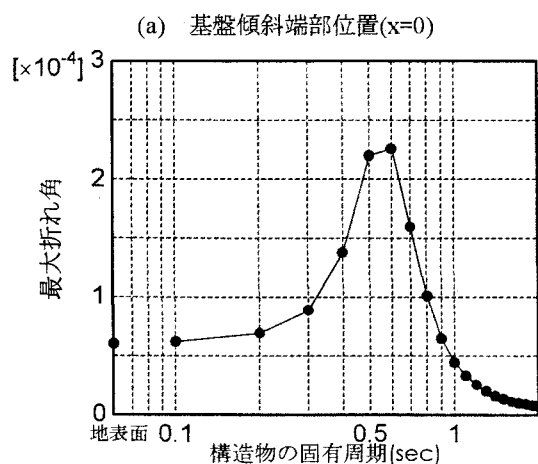
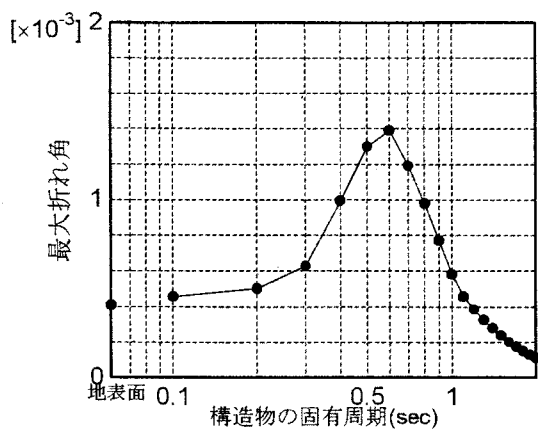


図-4 2次元FEM解析の波形から1次元解析による波形を差し引いた波形 (Case1)

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、この傾向は水平方向伝播波の特徴とよく似ている。したがって、基盤傾斜部分で生成される表面波が水平方向に伝播し、折れ角に影響を及ぼしているものと考えられる。

(3) 最大折れ角に及ぼす水平方向伝播波の影響

まず、図-4に示した水平方向伝播波 $f'(t)$ のフーリエスペクトルを図-8に示す。水平方向伝播波の卓越周期は概ね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、水平方向に伝播する表面波の卓越周期は、表面波の群速度が停留するairy相と大きく関係していることがわかっており^{4,8)}、図-9に示した水平方向伝播波 $f'(t)$ の群速度の算定結果を見ても、airy相は0.6(sec)付近に位置している。つまり、水平方向伝播波のairy相の周期と、折れ角が最大となる構造物の固有周期はほぼ一致している。面外加振時には、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、Love波の群速度を適切に算定してairy相を求めることにより、折れ角が最大となる構造物の固有周期を把握することができると考えられる。



(a) 基盤傾斜端部位置(x=0)
(b) 基盤傾斜端部から 100m 位置(x=100)
図-6 構造物の固有周期と最大折れ角の関係
(CASE1)

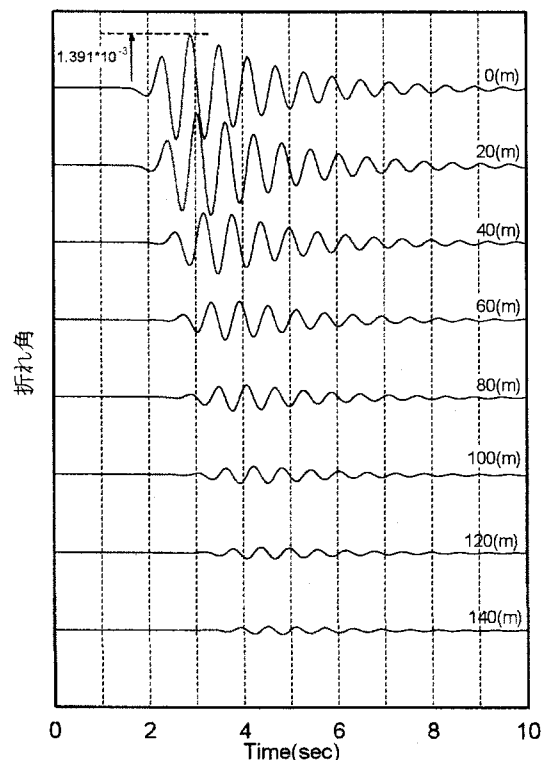


図-7 各地点における折れ角の時刻歴波形

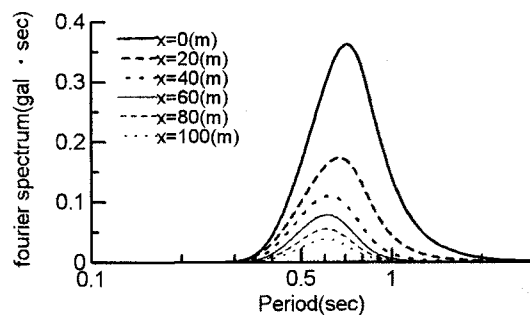


図-8 水平方向伝播波のフーリエスペクトル
(Case1)

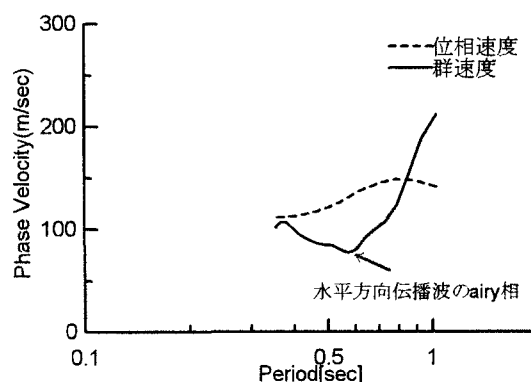


図-9 水平方向伝播波の位相速度及び群速度
(Case1)

4. 各パラメータが軌道面の折れ角に及ぼす影響

折れ角が最大となる構造物の固有周期は、表-1に示した各ケースでそれぞれ異なるが、3. (3)に示した性質を利用し、構造物の固有周期を水平方向伝播波のairy相の周期で正規化することにより、各ケースの折れ角を比較することが可能となる。ここでは、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。

(1) 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水平方向伝播波のairy相の周期で割った値を、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-10に示す。どのケースにおいても、構造物の固有周期と水平方向伝播波のairy相の周期が一致する場合に、折れ角が最大となる傾向が見られる。また、基盤傾斜端部では、傾斜角による影響はそれほど大きくないが、基盤傾斜部から離れた地

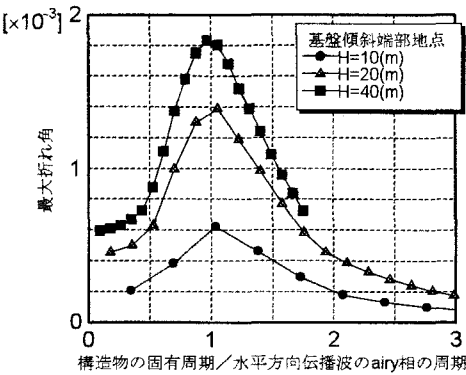
点では、傾斜角が大きいほど最大折れ角は大きくなる傾向がある。

(2) 層厚の影響

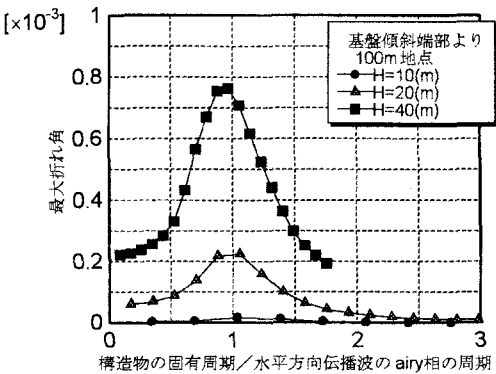
傾斜角 30° ，表層 $V_s=100\text{m/s}$ の場合（Case1，Case4～Case5）について，層厚と最大折れ角の関係を比較した結果を図-11に示す．各ケースとも，構造物の固有周期と水平方向伝播波のairy相の周期が一致する場合に，折れ角が最大となり，また層厚が厚くなるほど，最大折れ角が大きくなる．

(3) インピーダンス比の影響

傾斜角 30° ，表層厚さ $H=20\text{m/s}$ 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-12に示す．構造物の固有周期と水平方向伝播波のairy相の周期が一致する場合に，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，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のがわかる．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．

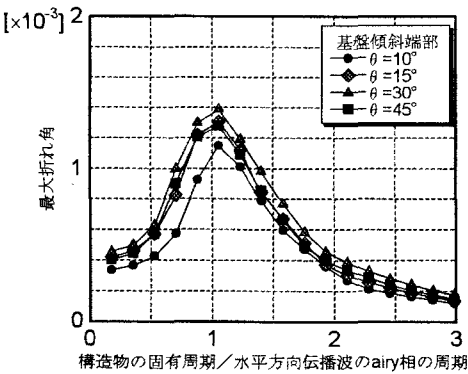


(a)基盤傾斜端部地点(x=0)

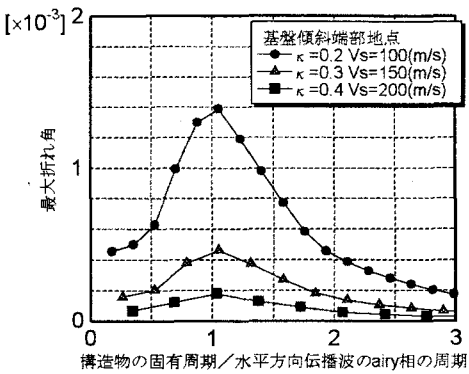


(b)基盤傾斜端部から 100m 地点(x=100)

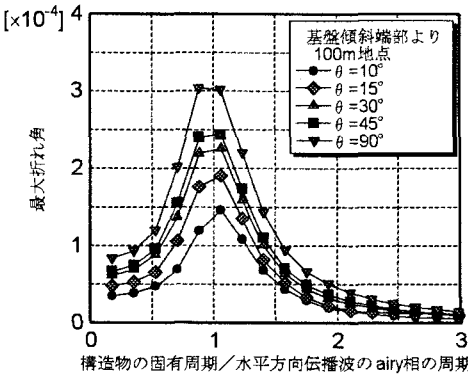
図-11 層厚が最大折れ角に及ぼす影響



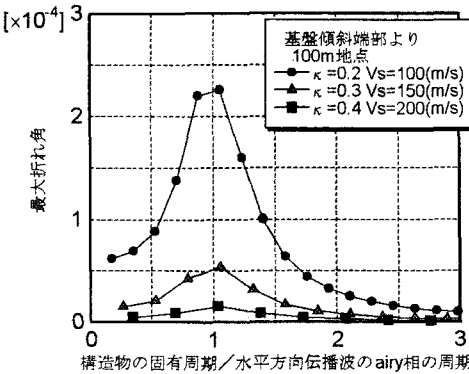
(a)基盤傾斜端部地点(x=0)



(a)基盤傾斜端部地点(x=0)



(b)基盤傾斜端部から 100m 地点(x=100)



(b)基盤傾斜端部から 100m 地点(x=100)

図-10 傾斜角が最大折れ角に及ぼす影響

図-12 インピーダンス比が最大折れ角に及ぼす影響

5. 不整形地盤の影響を加味した折れ角算定法に関する検討

不整形地盤上に建設される構造物の折れ角の算定にあたっては、地盤の2次元FEM解析を逐一実施しているのが現状であり、設計実務でも簡易に適用できるような不整形地盤上の折れ角算定方法を検討することが求められている。ここでは、折れ角に大きな影響を及ぼすと考えられる水平方向伝播波の影響を加味した折れ角の算定式に関して、基礎的な検討を行う。

(1) 検討の前提

ここでは、以下に示す項目を前提として、折れ角算定方法の検討を行うものとする。

- ・ 2. で示したように、不整形地盤において複雑に伝播する地震波を、鉛直方向伝播波と水平方向伝播波に分離して考える。
- ・ 構造物は弾性と仮定する。したがって、
(不整形地盤における構造物の応答)
= (鉛直方向伝播波による構造物の応答)
+ (水平方向伝播波による構造物の応答)
と考えることができる。
- ・ 議論を簡単にするために、各地点に到達する鉛直方向伝播波は同一とする。つまり、(鉛直方向伝播波による構造物の応答)は各地点で同一である。
- ・ 水平方向伝播波は、卓越周期で振動する正弦波地震動であると仮定する。また、それぞれの波の卓越周期は、各地点で同一と仮定する。
- ・ 各橋脚の固有周期は、すべて同一とする。

(2) 折れ角算定式の検討

(1)の前提のもとで、図-5に示すようにP1～P3橋脚がある場合、ある時刻 t における各橋脚の変位をそれぞれ $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$ とすると、

$$y_1(t) = \delta_{s1}^{(h)} \sin\{p^{(h)}(t - \Delta t_{s1}^{(h)}) - \varphi_s^{(h)}\} + \delta_s^{(v)} \quad (2)$$

$$y_2(t) = \delta_{s2}^{(h)} \sin\{p^{(h)}(t - \Delta t_{s2}^{(h)}) - \varphi_s^{(h)}\} + \delta_s^{(v)} \quad (3)$$

$$y_3(t) = \delta_{s3}^{(h)} \sin\{p^{(h)}(t - \Delta t_{s3}^{(h)}) - \varphi_s^{(h)}\} + \delta_s^{(v)} \quad (4)$$

となる。ここで、

$\delta_{s1}^{(h)}, \delta_{s2}^{(h)}, \delta_{s3}^{(h)}$: 水平方向伝播波のみが入力された場合のP1～P3橋脚の最大応答変位

$\delta_s^{(v)}$: 鉛直方向伝播波のみが入力された場合の橋脚の最大応答変位

$\Delta t_{s1}^{(h)}, \Delta t_{s2}^{(h)}, \Delta t_{s3}^{(h)}$: P1～P3橋脚地点に到達する水平方向伝播波の到達時間遅れ

$\varphi_s^{(h)}$: 水平方向伝播波のみが入力された場合の橋脚の応答による位相遅れ

である。また、

$$p^{(h)} = \frac{2\pi}{T^{(h)}} \quad (5)$$

であり、 $T^{(h)}$ は水平方向伝播波の卓越周期である。

このとき、時刻 t におけるP2橋脚での折れ角は、次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1}{S_1} (y_2(t) - y_1(t)) - \frac{1}{S_2} (y_3(t) - y_2(t)) \\ &= \frac{1}{S_1} [\delta_{s2}^{(h)} \sin\{p^{(h)}(t - \Delta t_{s2}^{(h)}) - \varphi_s^{(h)}\} - \delta_{s1}^{(h)} \sin\{p^{(h)}(t - \Delta t_{s1}^{(h)}) - \varphi_s^{(h)}\}] \\ &\quad - \frac{1}{S_2} [\delta_{s3}^{(h)} \sin\{p^{(h)}(t - \Delta t_{s3}^{(h)}) - \varphi_s^{(h)}\} - \delta_{s2}^{(h)} \sin\{p^{(h)}(t - \Delta t_{s2}^{(h)}) - \varphi_s^{(h)}\}] \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、

$$t' = p^{(h)}(t - \Delta t_{s2}^{(h)}) - \varphi_s^{(h)} \quad (7)$$

とおくと、

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1}{S_1} [\delta_{s2}^{(h)} \sin t' - \delta_{s1}^{(h)} \sin\{t' - p^{(h)}(\Delta t_{s1}^{(h)} - \Delta t_{s2}^{(h)})\}] \\ &\quad - \frac{1}{S_2} [\delta_{s3}^{(h)} \sin\{t' - p^{(h)}(\Delta t_{s3}^{(h)} - \Delta t_{s2}^{(h)})\} - \delta_{s2}^{(h)} \sin t'] \end{aligned} \quad (8)$$

と表すことができる。

θ が最大となるとき、

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt'} &= \frac{1}{S_1} [\delta_{s2}^{(h)} \cos t' - \delta_{s1}^{(h)} \cos\{t' - p^{(h)}(\Delta t_{s1}^{(h)} - \Delta t_{s2}^{(h)})\}] \\ &\quad - \frac{1}{S_2} [\delta_{s3}^{(h)} \cos\{t' - p^{(h)}(\Delta t_{s3}^{(h)} - \Delta t_{s2}^{(h)})\} - \delta_{s2}^{(h)} \cos t'] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

となる。これを解くと、

$$t' = \tan^{-1} \frac{\frac{1}{S_1} [\delta_{s2}^{(h)} - \delta_{s1}^{(h)} \cos\{p^{(h)}(\Delta t_{s1}^{(h)} - \Delta t_{s2}^{(h)})\}] + \frac{1}{S_2} [\delta_{s2}^{(h)} - \delta_{s3}^{(h)} \cos\{p^{(h)}(\Delta t_{s3}^{(h)} - \Delta t_{s2}^{(h)})\}]}{\frac{\delta_{s1}^{(h)}}{S_1} \sin\{p^{(h)}(\Delta t_{s1}^{(h)} - \Delta t_{s2}^{(h)})\} + \frac{\delta_{s3}^{(h)}}{S_2} \sin\{p^{(h)}(\Delta t_{s3}^{(h)} - \Delta t_{s2}^{(h)})\}} \quad (10)$$

となる。したがって、(10)式を(8)式に代入することにより、最大折れ角を求めることができる。

(3) 試算例

a) パラメータの設定

まず、(8),(10)式による折れ角の算定に必要なパラメータは、以下のように設定する。

- ・ $p^{(h)} (= 2\pi / T^{(h)})$

水平方向伝播波の卓越周期 $T^{(h)}$ は、3. および4. における検討から、「水平方向伝播波のairy相の周期」で設定することとする。ここでは、図-4に示し

た水平方向伝播波 $f'(t)$ から直接算出したairy相の周期を用いる。

・ $\Delta t_{s1}^{(h)}, \Delta t_{s2}^{(h)}, \Delta t_{s3}^{(h)}$
これは、隣接する橋脚間における、水平方向伝播波の到達時間差を示している。水平方向伝播波が、スパン S を進むのにかかる時間 Δt は、

$$\Delta t = \frac{S}{C(\omega)} \quad (11)$$

で表すことができる。ここで、 $C(\omega)$ は水平方向伝播波の位相速度を示している。ここでは、図-4に示した水平方向伝播波 $f'(t)$ から直接算出した $C(\omega)$ を用いて、(11)式により水平方向伝播波の到達時間差を算出する。

・ $\delta_{s1}^{(h)}, \delta_{s2}^{(h)}, \delta_{s3}^{(h)}$
ここでは、構造物への入力波として、正弦波を仮定していることから、

$$\left. \begin{aligned} \delta_{s1}^{(h)} &= a_{s1}^{(h)} \delta_{g1}^{(h)} \\ \delta_{s2}^{(h)} &= a_{s2}^{(h)} \delta_{g2}^{(h)} \\ \delta_{s3}^{(h)} &= a_{s3}^{(h)} \delta_{g3}^{(h)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

となる。ここで、 $a_{s1}^{(h)}, a_{s2}^{(h)}, a_{s3}^{(h)}$ は絶対変位応答倍率を示しており、

$$a_{sj}^{(h)} = \beta \times \frac{1 + 4h^2 \left(\frac{p^{(h)}}{\omega_j} \right)^2}{\sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{p^{(h)}}{\omega_j} \right)^2 \right\}^2 + 4h^2 \left(\frac{p^{(h)}}{\omega_j} \right)^2}} \quad (13)$$

$$\omega_j = \frac{2\pi}{T_j} \quad (j=1,2,3) \quad (14)$$

で表される。 T_j は構造物の固有周期、 h は減衰定数である。また、 β は振幅の補正係数であるが、ここでは $\beta=1.0$ とする。

次に、 $\delta_{s1}^{(h)}, \delta_{s2}^{(h)}, \delta_{s3}^{(h)}$ は水平方向伝播波の地表面での最大変位を示しており、ここでは、図-4 に示した水平方向伝播波 $f'(t)$ の最大変位を用いる。

b) 計算結果

ここでは一例としてCase1について、基盤傾斜端部位置($x=0$)と基盤傾斜端部から100m位置($x=100$)における最大折れ角を(8),(10)式を用いて算定し、2次元FEM解析結果を用いて算定した折れ角との比較を行った。その結果を図-13に示す。

基盤傾斜端部から100m位置($x=100$)に着目すると、以下のような傾向があることがわかる。

- ・ 構造物の固有周期が短周期の場合、折れ角算定式による計算結果は、2次元FEM解析結果を用い

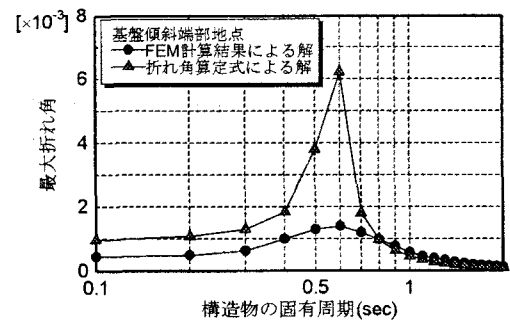
た折れ角を概ね再現できている。

- ・ 構造物の固有周期が約0.4~0.7(sec)の範囲（構造物が共振する範囲）では、折れ角算定式を用いて算定した最大折れ角の方が、2次元FEM解析結果を用いた折れ角に比べて大きくなっている。
- ・ 構造物の固有周期が長周期の場合、折れ角算定式を用いて算定した最大折れ角の方が、2次元FEM解析結果を用いた折れ角に比べてやや小さくなっている。

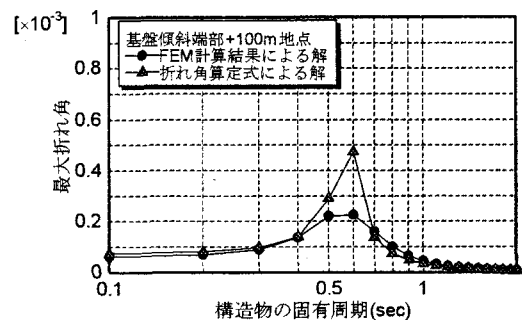
構造物が共振するような周期帯域では、Ricker Wavelet波を入力した場合の応答値が、(12),(13)式による正弦波定常入力の場合の変位応答の理論解に比べて小さくなり、また構造物の固有周期が比較的長周期の場合には過渡応答となり、理論解よりも大きな応答となる。

また、基盤傾斜端部地点では、構造物の固有周期が短周期の場合にも、折れ角算定式を用いて算定した最大折れ角の方が、2次元FEM解析結果を用いた折れ角に比べて大きくなっている。これは、基盤傾斜部では波動が複雑に伝播していることが原因であると考えられる。

しかし、図-13を見ても構造物の固有周期と最大折れ角との関係は概ね捉えられている。したがって、応答値を補正する係数 β の値を適切に設定することにより、設計実務上は(12),(13)式により高架橋軌道



(a)基盤傾斜端部地点($x=0$)



(b)基盤傾斜端部から100m地点($x=100$)

図-13 最大折れ角の算定結果の比較(Case1)

面の折れ角を概ね算定することが可能であると考えられる。

6. まとめ

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、不整形地盤上に橋脚を建設した場合について高架橋軌道面の折れ角を算定することにより、構造物の固有周期と最大折れ角との関係について調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- ・ 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。
- ・ 基盤傾斜部では、基盤の傾斜角が軌道面の折れ角に及ぼす影響はあまり大きくないが、基盤傾斜部から離れた地点では、基盤の傾斜角が大きくなるほど、軌道面の折れ角が大きくなる。
- ・ 表層地盤の層厚が厚くなるほど、軌道面の折れ角が大きくなる。
- ・ 表層と基盤のインピーダンス比が小さくなるほど、軌道面の折れ角が大きくなる。
- ・ 設計実務で簡易に折れ角を算定できるように、水平方向伝播波の特性を利用した折れ角算定方法の定式化を行い、基礎的な検討を行った結果、高架橋軌道面の折れ角を概ね算定することが可能で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、それに伴って構造物の固有周期と最大折れ角と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

- 1) (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) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 今村年成，室野剛隆，畠中仁，棚村史郎，室谷耕輔：土の非線形性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。
- 8) 佐藤泰夫：弾性波動論，岩波書店，1978。