

### 不整形地盤上における鉛直フーリエスペクトル比の変動に関する検討

(公財) 鉄道総合技術研究所	正会員	田中 浩平
(公財) 鉄道総合技術研究所	正会員	坂井 公俊
東京工業大学	正会員	盛川 仁
東京大学	正会員	飯山 かほり

#### 1. 背景・目的

工学的基盤が傾斜する地点では、地震動が局所的に増幅する可能性があり、鉄道構造物の耐震設計でも傾斜が 1:10 以上の地点は地盤不整形性の影響を考慮する必要がある<sup>1)</sup>。近年、Zhang ら<sup>2)</sup>は、2 点の同時微動観測記録から評価した鉛直フーリエスペクトル比を用いて、2 点間のグリーン関数を同定する理論を提案している。この手法では、常時微動の鉛直フーリエスペクトルの 2 点間の比は、(1) 式のように数値解析から得られる IOG 比に一致する。

$$\frac{S_{jj}(\omega)}{S_{00}(\omega)} = \frac{\Im[G_{zz}(X_j, X_j, \omega)]}{\Im[G_{zz}(X_0, X_0, \omega)]} = \frac{IOG(j)}{IOG(0)} \tag{1}$$

ここで、添字  $j$  は評価地点番号、 $S_{jj}(\omega)$  は  $j$  地点における鉛直フーリエ振幅スペクトル、 $G_{zz}(X_j, X_j, \omega)$  は  $X_j$  地点で鉛直方向に対して単位インパルス加振を行ったときの  $X_j$  地点の応答 (グリーン関数)、 $IOG(j)$  は  $G_{zz}(X_j, X_j, \omega)$  の虚部 (Imaginary part Of Green function) である。数値解析において、評価地点  $X_0, X_j$  でそれぞれ鉛直方向のインパルス加振を行い、その結果得られる鉛直方向の応答波形のフーリエスペクトルの虚数部が  $IOG(0), IOG(j)$  である。この 2 点間の比 ((1) 式右辺) が 2 地点間の鉛直フーリエスペクトル比 ((1) 式左辺) に対応する。

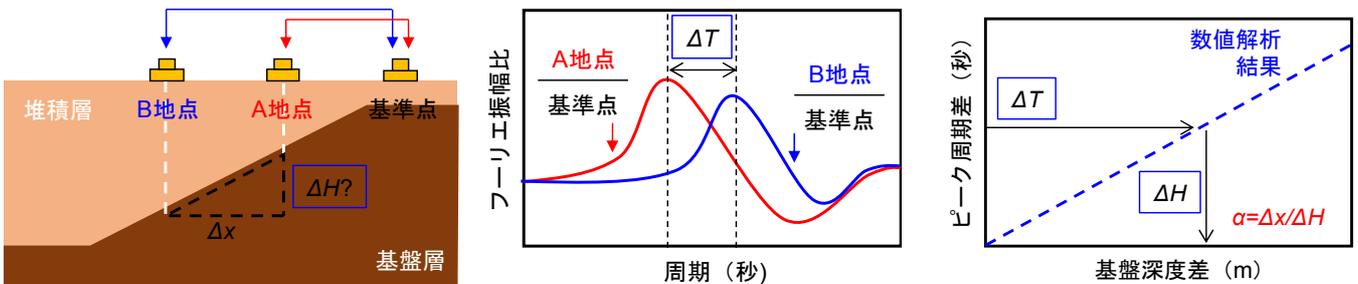
田中ら<sup>3)</sup>では、この手法を適用することで、常時微動観測に基づき基盤傾斜角を簡易に推定する手法を提案している。1:10 の基盤傾斜角を有する不整形地盤に対して IOG 比を評価する数値解析を実施し、2 点間の IOG 比のピーク周期差と基盤深度差の間に明瞭な関係がみられることを確認している。本論文では、基盤傾斜角や堆積層の  $V_s$  を変化させた様々な条件で数値解析を実施し、これらの条件が変化しても、ピーク周期差と基盤深度差に明瞭な関係がみられることを確認する。

#### 2. 基盤傾斜角の推定手法の概要

田中ら<sup>3)</sup>で提案している基盤傾斜角の推定手法のフローについて、概念図を図 1 に示す。各フローにおける詳細について以下に説明する。

- ① 地表面において、基準点と同時の鉛直方向の常時微動観測を複数セット実施する (図 1(a))。
- ② 観測波形から、各地点 A, B における基準点からの鉛直フーリエスペクトル比を評価する (図 1(b))。
- ③ 2 セットの鉛直フーリエスペクトル比におけるピーク周期差  $\Delta T$  を評価する (図 1(b))。
- ④ 別途実施した数値解析から、2 点間のピーク周期差  $\Delta T$  と基盤深度差  $\Delta H$  の関係を評価する (図 1(c))。この関係を用いて、 $\Delta T$  から 2 点間の基盤深度差  $\Delta H$  を評価する。 $\Delta H$  と観測点距離  $\Delta x$  から基盤傾斜角(1: $\alpha$ )を求める。

ここで、①～③の結果は常時微動観測により得られるものである。本論文では、④におけるピーク周期差と基盤深度差の関係を明らかにすることを目的として、様々な条件での数値解析を実施した。



(a) 2 点同時の常時微動観測 (b) 鉛直フーリエスペクトル比 (c) ピーク周期差と深度差の関係  
 図 1 常時微動観測に基づく基盤傾斜角の評価フロー

キーワード 地震動評価, 地点増幅特性, 不整形地盤, 常時微動観測  
 連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL042-573-7394

3. 数値解析の概要

図2に示すような地層境界に傾斜を有する3次元有限要素解析モデルによる動的解析を実施した。地盤は堆積層と基盤層の2層からなるものとする。堆積層、基盤層ともに単位体積重量は20kN/m<sup>3</sup>とし、基盤層のせん断弾性波速度V<sub>s</sub>は400m/s、堆積層のV<sub>s</sub>は100, 200m/sの2種類である。数値解析ケースの条件として、基盤の傾斜角度と堆積層V<sub>s</sub>を表1のように変化させた7ケースの解析を実施した。モデル下方は、基盤層が半無限に連続するものとして、ダッシュポットにより境界を設定する。解析モデルのサイズは、長さ1200m×高さ60m×奥行き幅200mに設定した。メッシュ間隔は2m×2m×2mとし、解析保証周波数として10Hzを満足するようにした。地層境界の表現は、ボクセル要素による表現ではなく、図2の傾斜形状を可能な限り再現したメッシュ分割とする。

応答波形の評価点は、図2に示す地表位置で、1200m区間に20m間隔の61点、もしくは10m間隔の121点(Case5-1のみ)を設定した。評価点における加振は、各加振位置のノードにおいて鉛直方向にインパルス波形を入力することで行う。解析時間は10.24秒とし、解析時間刻みは0.005秒とした。また、動的解析時の減衰は、0.5Hzと10Hzで3%となるレイリー減衰を設定した。

4. 解析結果・考察

各地点で評価されたIOG比のピーク周期について、解析ケースごとに整理を行った。評価地点の基盤深度とIOG比のピーク周期の関係を図3に示す。このプロットは基盤傾斜地点直上の評価地点の結果を示しており、傾斜しない地点ではIOG比のピーク周期に変化がみられなかった。堆積層のV<sub>s</sub>が同じ場合には、傾斜角に関係なく同一の直線上にプロットされる。堆積層V<sub>s</sub>が大きいほど直線の傾きは小さくなる。続いて、図3に示した地点から、2点を組み合わせ、IOG比のピーク周期差ΔTと基盤深度差ΔHを評価した(図4)。これらの関係には、基盤傾斜角による違いはみられず、(2)式に示す線形関係で概ね表現できることが分かった。

$$\Delta T = 1.9 \cdot \Delta H / V_s \tag{2}$$

この結果は傾斜基盤上の様々な2点の組合せから得られており、観測点直下の基盤傾斜の状況が事前に把握できない場合にも活用できる。常時微動観測から2点間のピーク周期差ΔTが得られれば、基盤深度の差ΔHが評価できる。

5. おわりに

不整形地盤上の鉛直スペクトル比の変動を把握するために、基盤傾斜角と堆積層V<sub>s</sub>を変化させた数値解析を実施し、基盤傾斜角によらず、鉛直スペクトル比のピーク周期差と基盤深度差に明瞭な関係がみられることを確認した。

参考文献 1) 鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計,p.270,2012.9,丸善, 2) Zhang X., Morikawa H.:A new significance on the vertical component ratio of the power spectra between two sites in the application of array methods, J. Seismol., Vol.20(1), pp.185-196, 2016, 3) 田中浩平, 坂井公俊, 盛川仁, 飯山かほり: 常時微動観測に基づく基盤傾斜角の簡易推定法の提案, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.

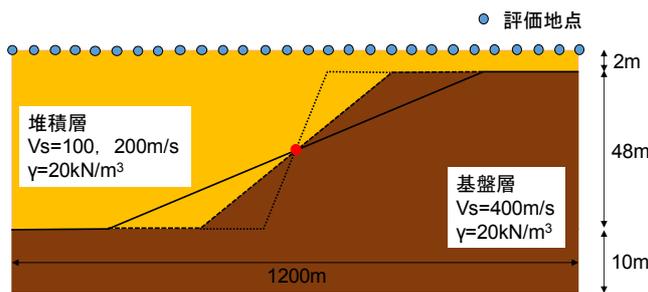


図2 解析モデルと評価地点

表1 数値解析ケース

	傾斜角度	堆積層Vs
Case1-1	1:20	100m/s
Case1-2	1:20	200m/s
Case2-1	1:15	100m/s
Case3-1	1:10	100m/s
Case4-1	1:8	100m/s
Case5-1	1:5	100m/s
Case5-2	1:5	200m/s

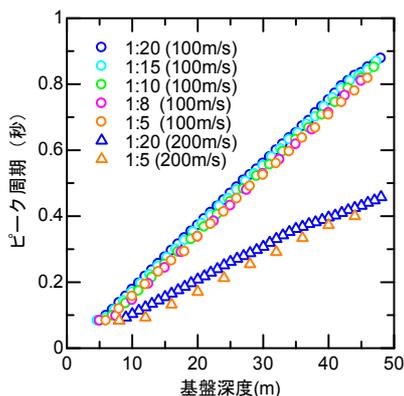


図3 IOG比のピーク周期と基盤深度の関係

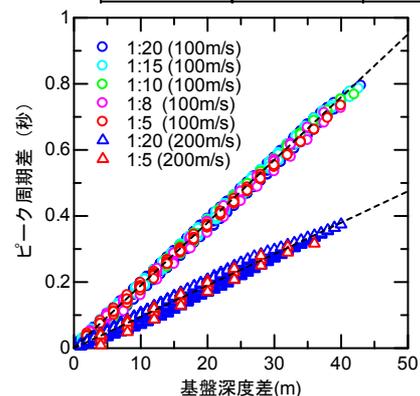


図4 IOG比のピーク周期差と基盤深度差の関係