

1 地点の伝達関数とボーリングデータを併用した不整形地盤抽出の可能性

鉄道総合技術研究所 正会員 ○坂井公俊, 室野剛隆
 京都大学防災研究所 正会員 澤田純男, 後藤浩之

1. はじめに

地震の地中—地表同時観測に基づき算定される伝達関数から地盤構造を同定する試みは、古くより多数実施されている^{例えば¹⁾}。このとき、計算を容易にするための仮定として、地盤を水平成層、地震動を鉛直下方入射とした1次元モデルの構造評価を行う場合がほとんどである。しかし、工学的に重要なVs400m/s程度よりも浅い地盤を考えた場合、堆積構造の局所的な変化に伴い、これらの仮定が成立しない場合も多いと考えられるが、基盤の傾斜と地震動の斜め入射が、観測される伝達関数と、この伝達関数から推定される1次元地盤構造に与える影響について必ずしも確認されているとは言い難い。そこで本検討では、まず地盤の傾斜に着目し、これが伝達関数に与える影響を解析的に評価するとともに、この伝達関数に基づいた地盤構造の逆解析を行うことで、傾斜地における地盤構造、地震応答評価の問題点を整理する。最後に伝達関数とボーリングデータを併用することで地盤傾斜を抽出する可能性についても言及する。

2. 解析条件

解析モデルの概要を図1に示す。今回は、工学的基盤を含む単純な3層モデルを対象とした2次元有限要素による時間領域の動的解析を実施する。メッシュサイズは、有効振動数を10Hzまで確保することを念頭に、1m程度を最大に分割している。地盤は線形弾性体として扱い、減衰は5Hzで3%となる全体剛性比例型の減衰を与える。境界条件は、底面を粘性境界(Vs400m/s相当)、側方は水平ローラーとする。入力は、モデル下端にランダム波を水平方向に一様入力する。基盤の傾斜角 θ_1 は、 0° (水平成層)、 3° 、 5° 、 10° 、 15° の5ケース変化させ、それに伴い最表層下面も傾斜させている。なお基盤が傾斜した場合にも、解析領域中心の1次元地盤構造は水平成層構造の場合と同一であり、この場所のみでボーリング調査を実施した場合には全てのケースで同一地盤条件と判定される。

以上の条件に基づき動的解析を実施し、解析領域中心の工学的基盤位置(深度50m、図1の観測点2)と地表(観測点1)間のフーリエ振幅比を算定することで、地盤の傾斜に伴う伝達関数の変化を評価する。

3. 地盤の傾斜に伴う伝達関数の変化

伝達関数の評価結果の例を図2に示す。まず、 $\theta_1=0^\circ$ の場合は理論伝達関数(地点直下の1次元構造を仮定)と一致しており、解析精度の有効性が確認できる。続いて、基盤の傾斜に伴い、1次ピークの振動数が徐々に高振動数側に移動するとともに、ピーク値が小さくなっている。また、2次モードのピークは徐々に不明瞭となるが、3次モード以降への影響はそれほど大きくない。以前から指摘されていることではあるが、傾斜角が 15° 程度となる不整形地盤においては、単点のボーリング調査等に基づき地盤応答を評価すると、地震動の卓越振動数を見誤る可能性があることが分かる。

4. 伝達関数から推定される1次元地盤構造

図2の伝達関数を用いて、水平成層、鉛直下方入射を仮定した場合の地盤構造を逆解析により評価する。目的関数は次式とし、未知数は層境界深度と5Hzにおける減衰定数 h のみ(各層の速度、密度は既知)とする。

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left[\frac{\log A^{obs}(f_i)}{f_i} - \frac{\log A^{cal}(f_i)}{f_i} \right]^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

ここで、 $A^{obs}(f_i)$: 図2の伝達関数、 $A^{cal}(f_i)$: ある1次元地盤構造と鉛直下方入射を仮定した場合の理論伝達関数、不整形地盤、ボーリング、減衰定数、卓越振動数

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 耐震構造 TEL042-573-7394

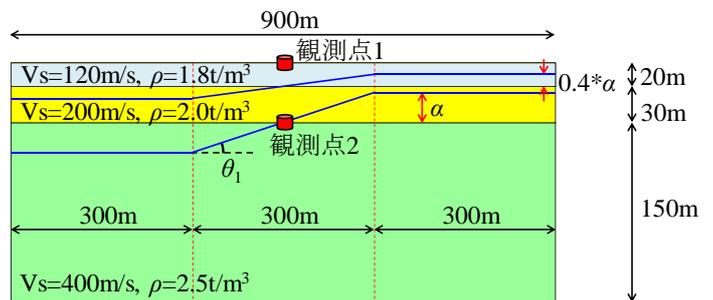


図1 解析モデルの概要

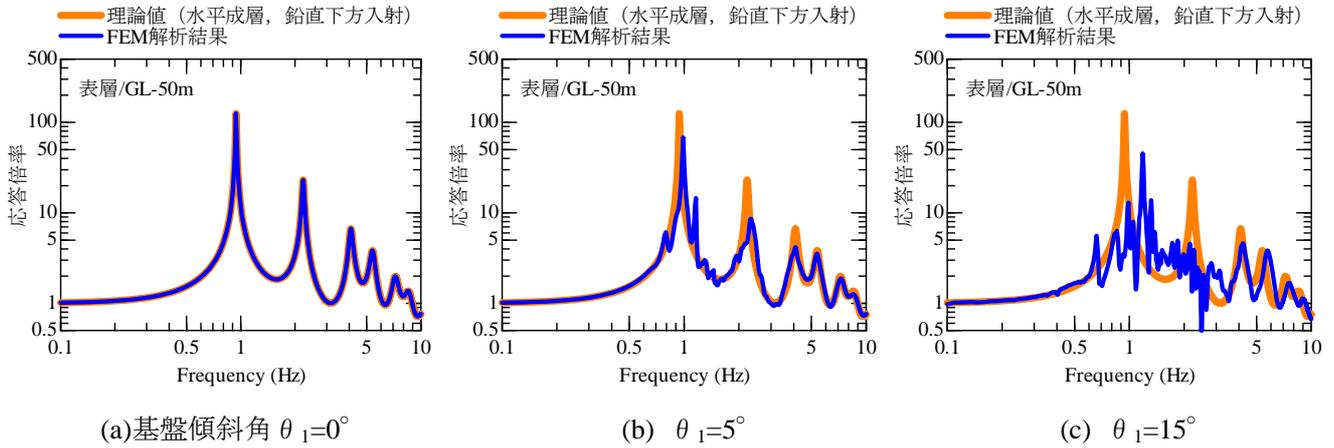


図2 基盤の傾斜に伴う伝達関数の変化

関数, f_i : i 番目の振動数, である. 最適化を行う対象周波数は $0.5 \sim 3\text{Hz}$ とし, 遺伝的アルゴリズム (例えば²⁾ (個体数 10, 世代数 5000, 交叉確率 0.7, 繰り返し数 10 回) によって式(1)を最も満足する構造を推定した.

以上の条件に基づいて推定された地盤構造を図 3 に示す. まず, $\theta_1=0^\circ$ の場合は直下の 1 次元構造を推定できており, 最適化条件に問題ないことが確認できる. 続いて, 基盤傾斜に伴って推定される地盤構造は, 層境界の深度を浅く, 減衰を大きく評価してしまっている. その傾向は基盤の傾斜角 θ_1 が大きくなるほど顕著である. つまり, 地盤の傾斜地点において伝達関数に基づく地盤構造評価を行うと, 実際の地点直下の地盤とは異なる速度構造, 減衰が推定されてしまうことが分かる.

5. 単点の伝達関数とボーリングデータによる不整形地盤抽出の可能性

これまでの検討から, 基盤が傾斜していると, ①伝達関数のピーク振動数が地点直下の地盤を水平成層仮定した場合の固有振動数よりも高くなること, ②伝達関数から同定される減衰定数が, 水平成層での値よりも大きくなることが確認された. この関係を基盤傾斜角 θ_1 に対して整理した結果を図 4, 図 5 に示す. この結果は, ①地点直下のボーリング調査に基づく固有振動数と伝達関数のピーク振動数の差分, ②水平成層と見なせる地点 (もしくは推定される減衰の最も小さな地点) における減衰と, 伝達関数から同定される地盤の減衰の差分, を把握することで, 基盤傾斜の有無や傾斜の程度が評価できる可能性を示唆している. 今後, 地震動の斜め入射の影響について同様の検討を行った後, 実観測点において手法の適用性, 妥当性の確認を行う予定である.

参考文献 1) Satoh, T., Fushimi, M., Tatsumi, Y.: Inversion of strain-dependent nonlinear characteristics of soils using weak and strong motions observed by borehole sites in Japan, *Bul. Seism. Soc. Am.*, Vol.91, No.2, pp.365-380, 2001. 2) 長尾智晴: 最適化アルゴリズム, 昭晃堂, 2000.

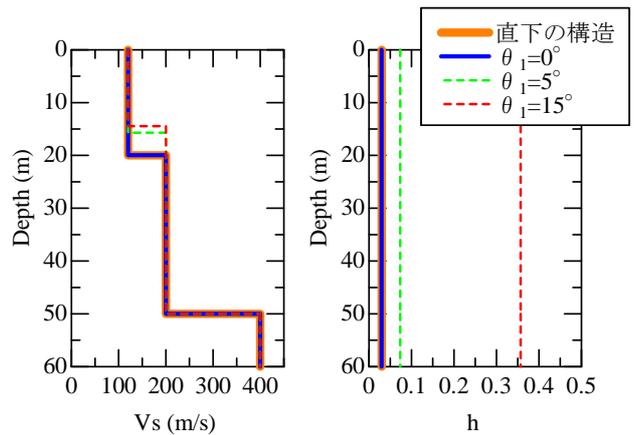


図3 地盤構造の推定結果

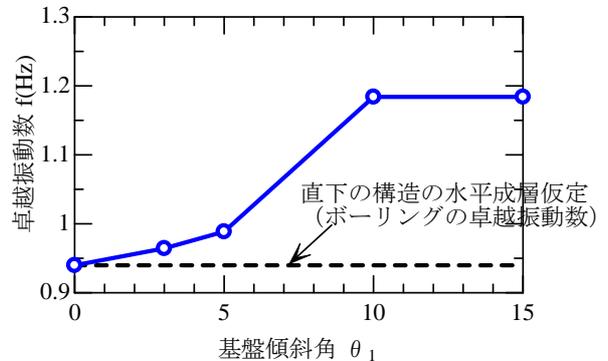


図4 基盤傾斜角の変化に伴う卓越振動数の変化

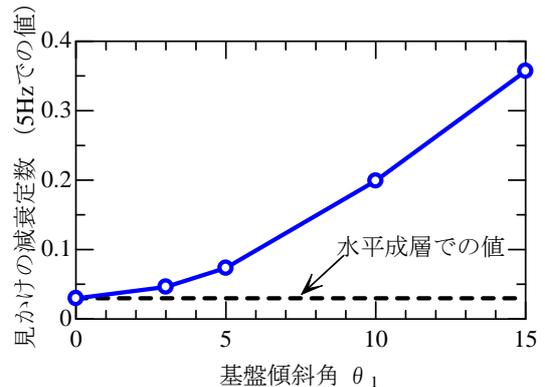


図5 基盤傾斜角の変化に伴う見かけの減衰の変化