

(167) 盛土の地震動特性と常時微動を用いた盛土のせん断波速度の推定

(財) 鉄道総合技術研究所 中村 豊  
(株) 福山コンサルタント 西永雅行

1. はじめに

地震対策上構造物の震動特性を把握することは重要である。また、構造物の健全度を判断する資料としてその物性値を把握することは、地震防災上のみならず構造物の管理上からも有益である。こうした観点から手軽に測定できる常時微動を用いて地盤や構造物の地震動特性を的確に把握する手法の開発を行っている<sup>1)</sup>。

代表的な土構造物である盛土について、その固有振動数や平均的なせん断波伝播速度  $V_E$  などを推定する方法を提案した<sup>2)</sup>が、その検証は十分ではなかった。ここでは、FEMによる解析などをつけ加えて  $V_E$  の推定方法を改善するとともに、列車振動を用いて  $V_E$  を直接的に測定して提案手法の妥当性を検証したので報告する。

2. 盛土の固有振動数

鉄道盛土の線路直交方向の振動は、台形状の片持梁の振動と考えることができる。台形状の片持梁について検討する前に、より単純なくさび形の片持梁(図1の破線)の振動について検討する。くさび形片持梁の1次固有振動数は次式で与えられる。

$$F = \frac{V_E}{4 H_1} \cdot \gamma \quad (1)$$

せん断変形のみを考慮する場合には、

$$\gamma = \gamma_s = 1.5309^3 \text{ となる。}$$

また、曲げ変形のみを考慮する場合には、 $\gamma$  はベルヌーイ・オイラーの梁理論により次式で与えられる。

$$\gamma = \gamma_B = \frac{B}{H_1} \cdot \frac{5.315}{\pi} \sqrt{\frac{2(1+\nu)}{3}} \quad (2)$$

ただし、 $\nu$  はポアソン比である。

実際の振動はせん断変形と曲げ変形が混合した曲げせん断振動であり、その場合の  $\gamma = \gamma_{BS}$  は、図2で与えられる<sup>4)</sup>。図2は  $\gamma_{BS}$  と  $B/H$  の関係を示したもので、 $\nu$  をパラメータにしている。また、この図には、せん断のみを考慮した場合の  $\gamma_s$  や曲げ変形のみを考慮した場合の  $\gamma_B$  も示している。

鉄道盛土の法面勾配は、法面の安定を確保するために、通常1:1.5に設定されている。したがって、天端幅を0mと考えても、底面幅Bは高さ  $H_1$  の3倍大くなっている。この場合、 $\gamma_{BS}/\gamma_s = 0.95$ 程度であり、概ねせん断振動のみを考慮すればよいことがわかる。実際の鉄道盛土に対応した台形状片持梁の場合には、くさび形片持梁よりせん断変形の影響が大きくなると考えられるので、せん断変形のみを考慮することとする。

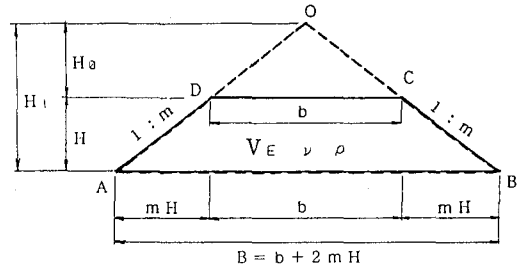


図-1 くさび形及び台形モデル

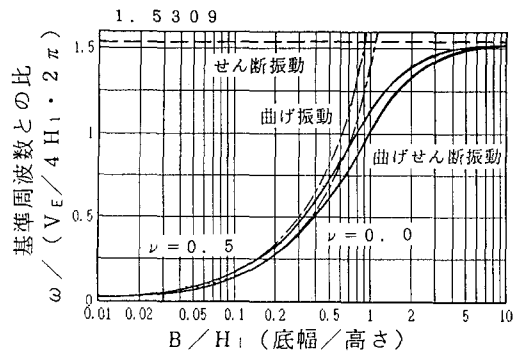


図-2 曲げせん断振動をするくさび形片持梁の1次固有振動数

台形状の片持梁（図-1の台形あBCD）のせん断1次固有振動数は次式で与えられる。

$$F_{E0} = \frac{V_E}{4H} \cdot \beta \quad (3)$$

$$\text{ここに、} \beta = \frac{Z}{\pi} \cdot (1 - \alpha), \quad \alpha = \frac{H_0}{H_1} = \frac{b}{b + 2mH} = \frac{b}{B}$$

ただし、Zは次式を満たす最小値である。また、b：盛土天端幅、m：法面勾配、H：盛土高さ、B：盛土底面幅である。

$$J_1(\alpha Z) Y_0(Z) - J_0(Z) Y_1(\alpha Z) = 0$$

ただし、JはBessel関数、YはNeumann関数である。添字は次数を現わす。

図3はβの値をαに対して図示したものである。これによれば、α=0のとき、β=γsとなり、F<sub>E0</sub>はくさび形片持梁のせん断1次固有振動数と一致する。また、α=1のとき、β=1となってF<sub>E0</sub>は矩形片持梁のせん断1次固有振動数と一致する。なお 鉄道盛土の場合、α=0.3前後と見積られる。以後盛土の固有振動数を(3)式により計算することとする。

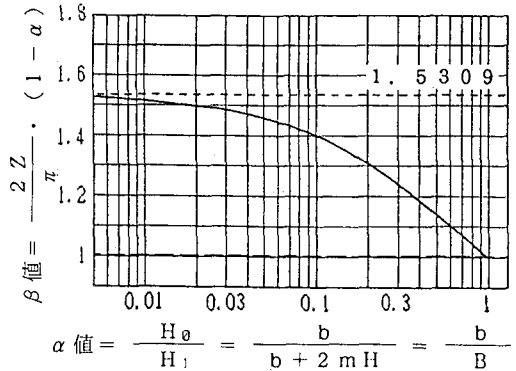


図-3 α値とβ値の関係

### 3. 常時微動を用いた盛土のS波速度V<sub>E</sub>の推定

常時微動を用いて鉄道盛土の震動特性を推定した結果によれば、盛土と比較して基礎地盤が十分に硬い場合は盛土独自の応答が現われ、また逆の場合は盛土が剛体のように挙動し、その応答が小さくなる<sup>1)</sup>。

こうした影響を見積るために、高さ3mと6mの盛土について、さまざまな盛土のS速度V<sub>E</sub>と基礎地盤のS波速度V<sub>s</sub>の組合せに対してFEMを用いた応答解析を行った。これにより、盛土の卓越振動数Fに及ぼす基礎地盤のS波速度V<sub>s</sub>の影響を検討した。FEMの解析条件を表1にまとめて示す。以下の検討では、基礎地盤の影響度を、剛基礎上の盛土の固有振動数F<sub>0</sub>を基準にして、F/F<sub>0</sub>で表現する。

図4は、卓越振動数比(F<sub>E</sub>/F<sub>0</sub>)とS波速度比(V<sub>s</sub>/V<sub>E</sub>)の関係を示したものである。この関係は、基礎地盤の層厚や盛土のS波速度によって影響されないが、盛土の高さによって影響されることがわかる。すなわち、盛土が高ければ、基礎地盤の影響が大きくなる。

表-1 解析条件

盛土高さ m	基礎地盤の厚さ m	盛土のS波速度 m/s	地盤のS波速度 m/s
3	1.0	100	60, 80, 100
6	3.0	200	150, 200, 300 400, 600, 800

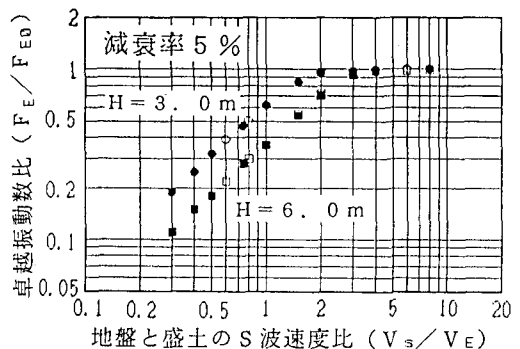


図-4 卓越振動数比とS波速度比の関係

図5は、増幅倍率 ( $A_E$ ) とS波速度比 ( $V_s/V_E$ ) の関係を示している。これも  $F/F_0$  の場合と同様に、基礎地盤や盛土のS波速度には影響されないが、盛土高さの影響を受けることがわかる。増幅倍率とせん断波速度比の関係はほぼ  $A_E = 2 V_s/V_E$  で表わされる直線の回りにばらついているが、盛土が高くなるほど増幅倍率が小さくなる傾向が認められる。

図6は、卓越振動数比 ( $F_E/F_{E0}$ ) と増幅倍率 ( $A_E$ ) の関係を示したものである。この関係は盛土高さの影響を受けていない。これによると、盛土の増幅倍率が小さい場合は卓越振動数比も小さくなり、基礎地盤の影響で盛土の卓越振動数が低くなるのがわかる。また、増幅倍率が大きくなるほど、卓越振動数は剛基礎上の盛土の固有振動数に漸近する。

盛土の卓越振動数と増幅倍率がわかれば、図6により増幅倍率から卓越振動数比を推定することができ、測定された卓越振動数とあわせて剛基礎上の盛土の固有振動数を推定することができる。したがって、盛土の寸法諸元がわかれば、

(3) 式により盛土中のS波速度を推定することができる。また、卓越振動数比は盛土高さと一緒に合わせて、図4によりS波速度比を知ることができるので、基礎地盤のS波速度を推定することもできる。

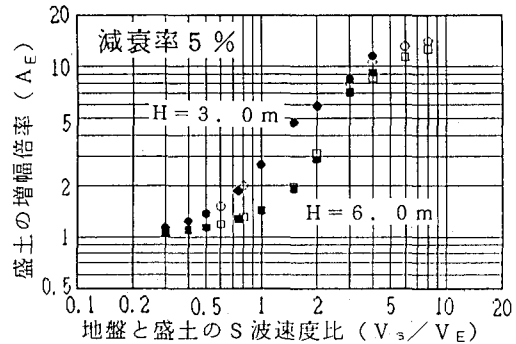


図-5 増幅倍率とS波速度比の関係

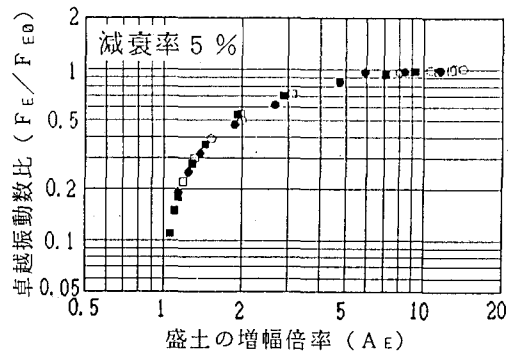


図-6 卓越振動数比と増幅倍率の関係

#### 4. 盛土のS波速度の推定例と他の方法によるS波速度測定値との比較

常時微動測定によりS波速度を推定した2地点について、列車振動を使って盛土のS波伝播速度を測定し、比較した。列車振動を使った盛土中のS波伝播速度の測定は次のようにしておこなった。

図7に示すように法肩Aと法尻Bに測点を設置して、測点が置かれた側の線路を列車が通過するときの振動を測定する。線路方向の振動成分について、A点とB点の測定波形を重ねてみて時間的なずれを測定する。これがS波がA点からB点に伝播する時間であるとしてAB間の距離からS波速度を算出する。反対側の法面についても同様の測定をしてS波速度を推定し、両者を平均する。

図7に、列車振動の測定波形とこれから推定した盛土のS波速度、および常時微動測定に基づいて推定した盛土の震動特性とこれから推定したS波速度を例示する。これによると、常時微動による推定S波速度  $V_E = 196\text{m/s}$  に対し、平均  $204\text{m/s}$  (上り側  $211\text{m/s}$ 、下り側  $196\text{m/s}$ ) が測定されている。他の箇所での測定結果は、常時微動による推定S波速度  $247\text{m/s}$  に対して、平均  $238\text{m/s}$  (上り側  $230\text{m/s}$ 、下り側  $245\text{m/s}$ ) であった。

常時微動により推定したS波速度は、列車振動を用いて測定したS波速度とよい一致を示しており、妥当なものと考えられる。

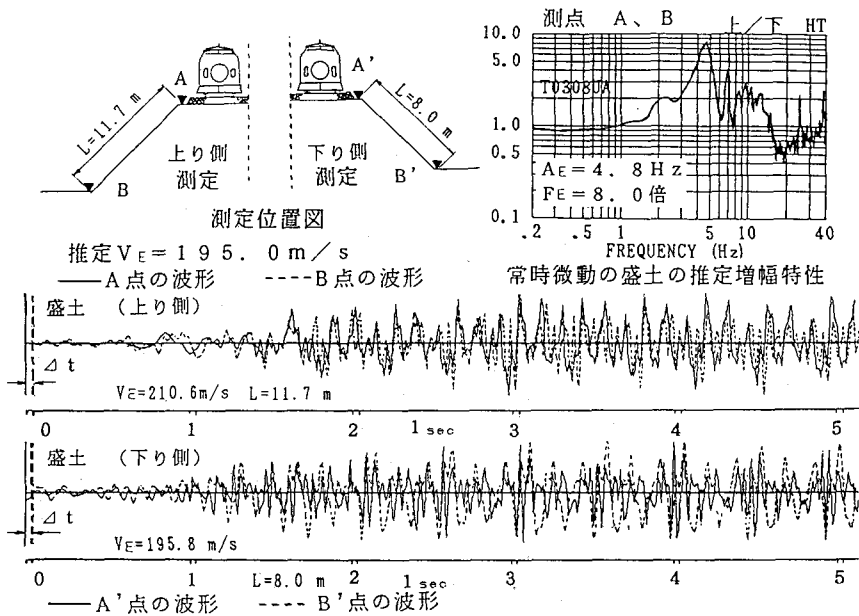


図-7 列車振動波形

## 5. おわりに

ここでは、さきに提案した常時微動を用いた盛土のS波速度の推定方法を改善するとともに、推定精度の確認をおこなった。その結果、次の成果を得た。

- (1) 盛土の固有振動数の推定方法を、使いやすく、より適用範囲の広いものに改めることができた。
- (2) 高さの異なる盛土の震動特性に及ぼす基礎地盤の影響をFEM解析を用いて検討し、基礎地盤の存在によって盛土の卓越振動数が低下する程度は、盛土の増幅倍率のみで評価できることを確認した。すなわち、増幅倍率が大きいほど剛基礎上の盛土の状態に近い。
- (3) 常時微動により推定したS波速度が、盛土のS波速度を列車振動を用いて測定した結果とほぼ一致することを確認した。

今後、本手法により各線区の盛土について $V_E$ を推定してデータを蓄積するとともに、盛土の健全度推定手法の確立に努力したい。

謝辞：常時微動測定や列車振動測定などの便宜を図っていただいたJR東海の関係者に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 中村・滝沢：「常時微動を用いた鉄道盛土および基礎地盤の地震動特性の推定」、第20回地震工学研究発表会講演概要集、1989年7月  
 中村・滝沢：「常時微動による盛土の地震動特性の推定」、土木学会第44回年次学術講演概要集I、1989年10月  
 中村・滝沢：「常時微動による盛土と基礎地盤のせん断波速度の推定」、土木学会第45回年次学術講演概要集I、1990年9月
- 2) 中村・中野：「盛土の形状に伴う固有振動数の変化の解析と物性値の推定法」、土木学会第43回年次学術講演概要集I、1988年
- 3) 松村孫治：「地震動による土堰堤の変形」、土木試験所報告第28号、1934年
- 4) 国生剛治他：「フィルタイプダムの動特性」、電力中央研究所技術第2研究所報告 依頼報告72505、1972年7月