

常時微動による表層層厚と基盤 および表層地盤のS波速度の推定

西永雅行¹・上田 均²・大山 薫³・中村 豊⁴

¹正会員 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186 東京都国立市中 1-18-41 栄ビル)

^{2,3}西日本旅客鉄道株式会社 (〒732 広島県広島市東区二葉の里 3-8-21)

⁴正会員 工博 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186 東京都国立市中 1-18-41 栄ビル)

常時微動を用いた表層地盤の卓越振動数と増幅倍率を基にして、既に提案した方法により表層地盤の層厚と基盤および表層地盤のS波速度の推定を行った。推定結果を同位置のボーリング調査と比較して推定方法の有効性と適用限界を明らかにする。

Key Words: microtremor, h/v spectral ratio, QTS, S wave velocity, Thickness, surface/basement layer

1. はじめに

合理的な地震対策を策定するには、対象とする施設や基礎地盤の地震動特性を的確に把握することが基本となる。しかし、鉄道は、種々さまざまな構造物や地形・地盤が連続する長大な線状施設であり、その地震動特性を的確に把握するのは容易ではない。ボーリング調査は有益な情報を提供してくれるが、多くの人手と時間を必要とし、莫大な経費がかかるのが一般的である。ここでは、経費をそれほど要しない現場調査手法である、中村らによる常時微動を用いた表層地盤特性の推定手法¹⁾について、その精度・有効性・適用限界など検討したので報告する。

2. 常時微動を用いた表層地盤特性の推定手法³⁾

表層地盤の地震動特性は常時微動の水平上下スペクトル比 (h/v spectral ratio) により推定できる²⁾。以後、このスペクトルを疑似伝達関数 (Quasi-Transfer Spectra) QTS と呼ぶ。表層地盤を1層でモデル化できれば、QTS から推定される表層地盤の固有振動数 F と増幅倍率 A は、表層地盤の厚さ h 、表層地盤内のS波伝播速度 V_s 、基盤内のS波伝播速度 V_b を用いてそれぞれ次のように表すことができる。

$$F = V_s / (4h) \quad (1a)$$

$$A = V_b / V_s \quad (1b)$$

$$\text{したがって、} V_s = 4 \times h \times F \quad (2a)$$

$$= V_b / A \quad (2b)$$

$$h = V_s / (4F) \quad (3a)$$

$$= V_b / (4F \times A) \quad (3b)$$

$$V_b = A \times V_s \quad (4a)$$

$$= 4F \times A \times h \quad (4b)$$

すなわち、表層地盤の層厚 h 、S波速度 V_s 、または基盤のS波速度 V_b のうち、いずれかひとつがわかれば他のふたつは F と A を用いて推定することができる。 h 、 V_s 、 V_b のうち前2者は場所により大いに異なるが、最後の V_b は比較的安定した値であることが期待される。中村ら³⁾によれば、関東地区の東海道新幹線沿線地盤については概ね、 $V_b=600\text{m/s}$ である。

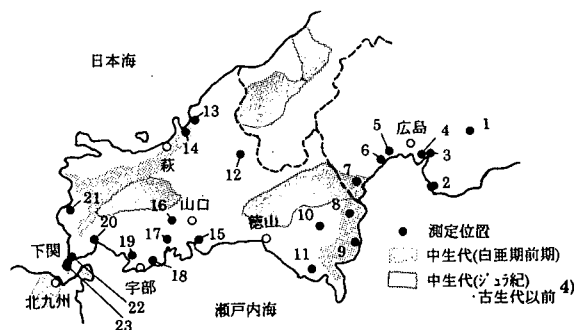


図1 測定位置図

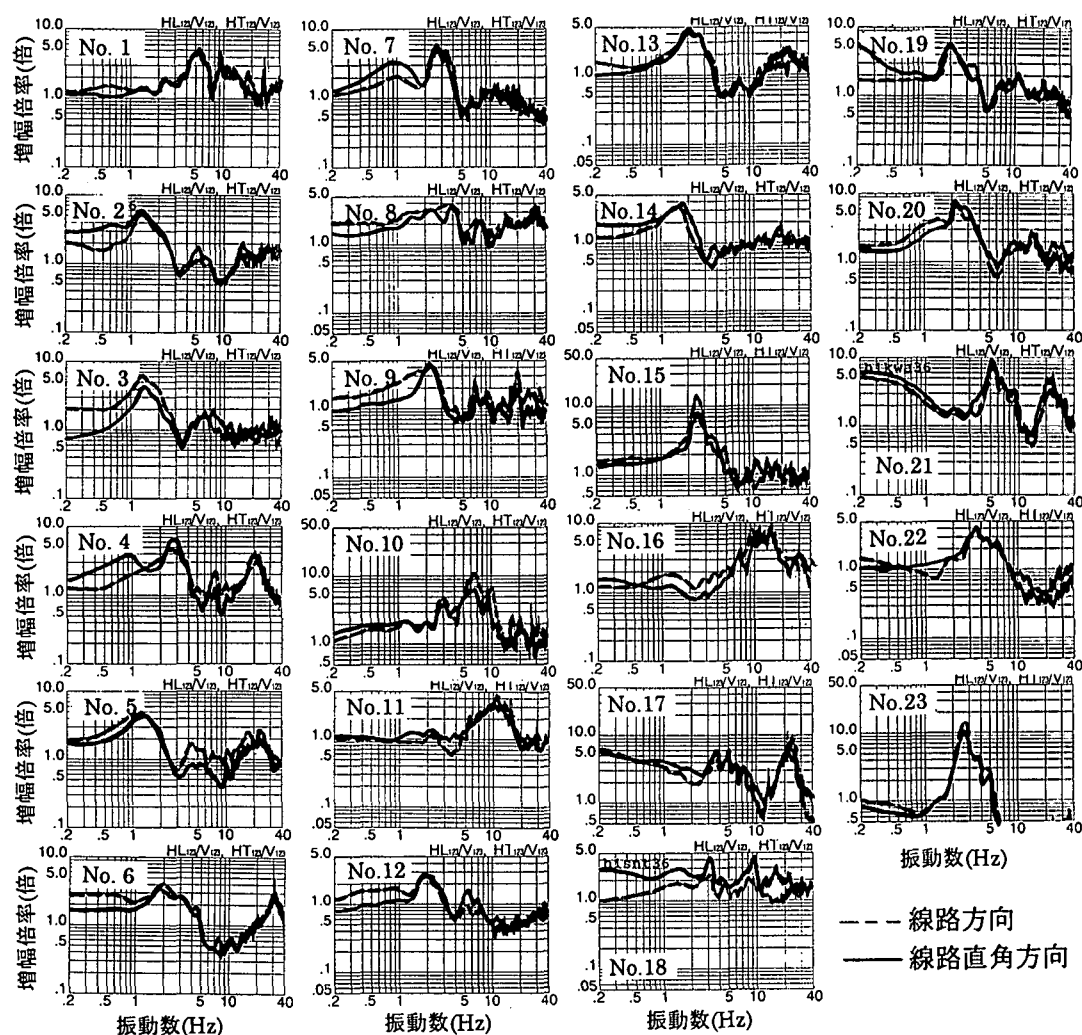


図2 Q-Tスペクトル図

3. 常時微動の測定方法と分析方法

前節で説明した簡便な表層地盤特性の推定手法の精度・有効性・適用限界などを明らかにするため、広島・山口地区でJR沿線のボーリング調査資料がある市街地・山間部から無作為に23箇所選択して常時微動を測定した。図1に広域に拡がる常時微動測点の分布を示す。なお、交通量の多い市街地も静かな山間地も測定はすべて昼間に実施した。

測定にはPIC91を使用した。センサをアスファルトまたは土の上に設置し、水平2方向(線路方向と線路直角)と上下方向の3方向成分を同時に測定した。1回の測定時間は約41秒間(4096データ)で1測点で3回ずつ測定している。計測データのフーリエスペクトルは、ハニングウィンドウを80回かけて平滑化(最終的なウィンドウのバンド幅は約0.4Hz)した3つのスペクトルを平均して推定した。QTSは、平滑化した水平成分と上下成分のフーリエスペクトル比を測定毎に求

め、3回平均して算定した。表層地盤の卓越振動数Fと増幅倍率Aは、算定されたQTSから読み取った。

4. 測定結果と考察

図2に広島・山口地区23地点で計測した常時微動のQTSを示す。QTSは線路方向を破線で、線路直角方向を実線で表示している。水平2方向のQTSの形状が類似し、卓越振動数が一致していることから、測定した地点付近では大きな基盤傾斜は無いと判断される。また、各QTSには明瞭なピークが現れている。図3は常時微動のQTSのピークから読み取った卓越振動数Fと増幅倍率Aの関係を示したもので、ボーリング調査で判明した表層地盤の厚さで区分している。これによると、卓越振動数は1.2Hz～9.9Hz(平均3.8Hz)、増幅倍率は2.2倍～12.6倍(平均5.4倍)に分布している。これらの卓越振動数と増幅倍率の関係は、卓越振動数が小さいと増幅倍率は大きくなり、卓

卓越振動数が大きいと増幅倍率は小さくなる傾向がある。つまり、軟らかい地盤は揺れやすく、硬い地盤は揺れにくい。

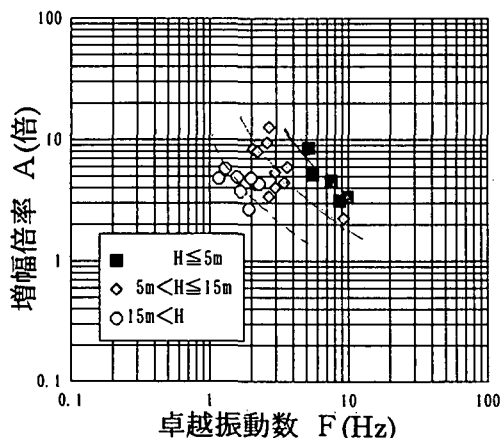


図3 各測点の卓越振動数と増幅倍率の関係

図4は、ボーリング調査による表層地盤の厚さと、QTS から読み取った卓越振動数および増幅倍率との関係を示したものである。これによると、卓越振動数と表層地盤の厚さには相関が認められるが、増幅倍率と表層地盤の厚さには相関が認められない。SH 波の重複反射を考えれば、卓越振動数は表層地盤の厚さに反比例し、その増幅倍率は表層地盤厚には関係なく表層地盤と基盤のインピーダンス比に関係する。

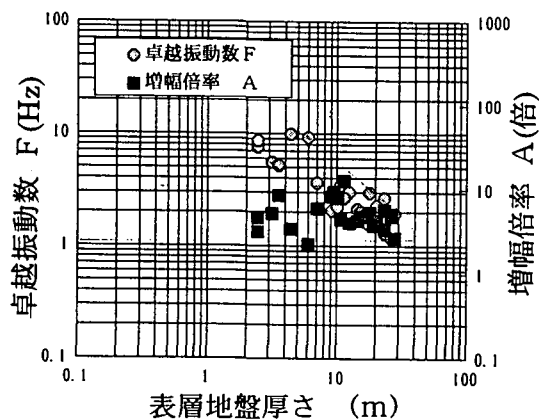


図4 表層地盤深さと卓越振動数
と増幅倍率の関係

以下の考察では、次式により推定した表層地盤の S 波速度をボーリング調査に基づく推定としている³⁾。

$$V_{sn} = 91.0 \times N^{0.337} \quad (5)$$

ここに、 V_{sn} は表層地盤の S 波速度(m/s)、 N はボーリング調査による表層地盤部分の N 値の平均値である。また、基盤の S 波速度 V_{bn} は、次式で計算される換算 N 値を採用して、式(5)により算定している。

$$N = (30/\delta) \times 50 \quad (6)$$

ここで、 δ は 50 回の打撃での貫入量 (cm) である。

(1) S 波速度の推定

N 値から推定される S 波速度 V_{sn} と、層厚を既知として常時微動から推定される S 波速度 V_{sm} を比較する。図5は横軸に V_{sm} をとり、縦軸に V_{sn} をとって両者を比較したものである。表層地盤に関するものを○印で、基盤に関するものを■印で表示した。

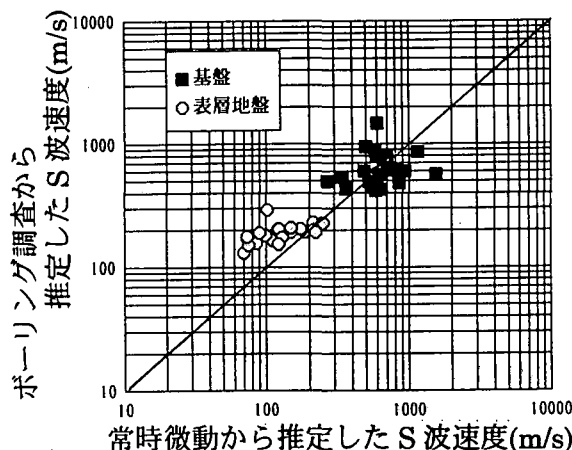


図5 ボーリング調査結果と常時微動測定により推定された S 波速度の相関

表層地盤の V_{sn} および V_{sm} の間には、相関が認められる。S 波速度 200m/s 程度では両者ほぼ一致しているが、S 波速度が小さくても、 V_{sn} は 100m/s を下回ることなく、 V_{sm} より大きくなる。 N 値は通常、整数値として計測されるため、その平均値は 1 を上回る。軟弱な地盤でも、1 を下回る N 値は計測不能で、式(5)で算定される V_{sn} は、必然的に 100m/s 程度より大きい値に規制され、 V_{sm} と乖離してしまうものと推測される。

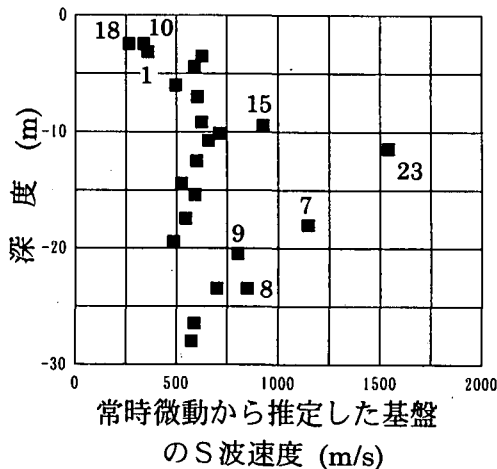


図6 推定基盤 S 波速度と深度の関係

基盤については、いずれの推定値も概ね 300m/s～1000m/s に分布し、多くのデータが 600m/s 付近に集中しているのが認められる。通常のボーリング調査では打撃回数 50 回で貫入試験を止めてしまうため、貫入量 30cm に相当する換算 N 値を算出して V_{bn} を求めている。したがって、換算 N 値が 50 を大きく上回る場合の V_{bn} は推定誤差が大きいと考えられる。

図 6 は常時微動から推定した基盤の S 波速度 V_{bm} と表層地盤厚さ h の関係を示したものである。表層厚さ h はボーリング調査から得られるもので、3.1～29.0m まで分布している。この h と常時微動測定結果とから推測される基盤の S 波速度 V_{bm} は、270～1500m/s の広い範囲に分布しているが、図 5 にみられるのと同様、そのほとんどは 600m/s 付近に集中している。大きな S 波速度が推定されている地点は、図 1 で網掛けした地域であり、古生代・中生代の古い岩帯に属する地域である。したがって、一般的には、基盤 S 波速度を 600m/s としても大過ないと判断される。

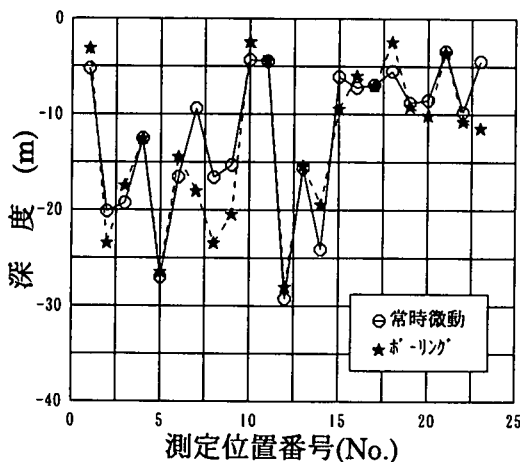


図 7 ボーリング調査結果と常時微動測定により推定した基盤深度の比較

(2). 表層厚さの推定

図 7 は $V_b=600\text{m/s}$ と仮定して推定された表層厚さ h_e とボーリング調査で得られた洪積層または新第三紀層群(N値 ≥ 50)までの表層厚さ h を測定点毎に示したものである。多くの地点でかなりよい一致を示しており、600m/s の仮定が概ね妥当と推測される。推定値が大きく異なっているのは、基盤速度が 600m/s を大きく上回ると判断される地域であり、基盤 S 波速度についての情報があれば、表層地盤厚さをかなり正確に推測できることを示唆している。

4. おわりに

表層地盤の常時微動の QTS から読み取られる卓越振動数 F と増幅倍率 A を使って、表層地盤の層厚 h と S 波速度 V_s 、基盤の S 波速度 V_b などを簡便に推定する方法の精度を調査した。この結果、 h 、 V_s および V_b のうちひとつをなんらかの方法で知ることができれば、他のふたつは簡単な常時微動測定で比較的正確に推定することができることがわかった。また、 V_b を 600m/s に設定すれば、表層地盤の厚さ h や S 速度 V_s を大まかに推定することも再確認された。

今回の測定では、測定地点の地質構造が仮定した二層構造と大きく異ならなかったため、良好な結果を得ることができたが、今後は、表層地盤が互層構造をしている場合、極端な基盤傾斜をしている場合などについて、簡便手法の精度と限界を検討していきたい。

参考文献

- 1) 中村：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定、鉄道総研報告、1998 年 4 月
- 2) 土質工学会編：土質調査法、1982 年 12 月、p.121
- 3) 中村、滝沢：地表面の常時微動観測結果に基づく表層層厚と基盤 s 波速度の推定、第 20 回地震工学研究発表会、1989 年 7 月、pp.125-128
- 4) 日本列島の地質編集委員会編：日本列島の地質、1996 年 12 月、p.44