

常時微動のQTSに基づく地盤特性推定結果と 実被害データ他各種調査資料との比較

西永雅行¹・佐藤 勉¹・中村 豊²

¹正会員 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

²正会員 工博 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

本報告は、著者の一人が提案している方法(常時微動の QTS)に基づいて推定した表層地盤特性と各種の調査データを比較検討して、その有効性を改めて確認するものである。

兵庫県南部地震は、神戸市周辺に甚大な被害をもたらした。最近、これまでに調査された神戸市内の表層地盤の調査データがまとめられ、一般も利用できる状況になってきた。また、神戸市内では数多くの常時微動計測が実施されている。そこで、本報告では、常時微動の計測結果を提案手法により解析し表層地盤特性を抽出して、対応する地盤データや実際の被害調査データと比較検討することにより、提案手法の妥当性をより定量的に明らかにした。

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

1. はじめに

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、種々さまざまな構造物や地形・地盤が連続する中で、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、一般に多くの人手と時間を必要とし、莫大な経費がかかるという問題がある。

一方、これまでに調査された神戸市内の表層地盤の調査データや被害情報がまとめられ¹⁾、誰でも利用できる状況になってきた。そこで、廉価な現場調査手法のひとつである常時微動を用いた表層地盤特性の推定手法による結果を、こうした調査や被害情報と比較検討することにより、その精度・有効性・適用限界などを明らかにすることを試みる。

2. 検証する地盤特性推定項目

中村²⁾によれば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。以後、このスペクトルを疑似伝達関数 (Quasi-Transfer Spectra) QTS と呼ぶ。QTS から推

定された概値の地盤の卓越振動数F、増幅倍率Aを用いて地盤特性を表1に示した方法で、推定しその確からしさを検証する。

表1(1) 検証項目と方法

検証項目	検証方法
表層地盤厚 h	【推定方法】 $h = Vs/(4F) = V_B/(4FA)$ V_B は 300m/s と仮定した。
	【検証方法】 ボーリング調査から洪積層で N 値 ≥ 50 、となる地層までの深さを h とし比較する。
表層地盤のせん断波速度 V_s	【推定方法】 $V_s = V_B/A$ ³⁾ V_B を 300m/s と仮定した。
	【検証方法】 ボーリング調査による表層地盤の平均N値を $V_s = 91.0 \times N^{0.337}$ ⁵⁾ に換算して比較する。
基層地盤のせん断波速度 V_B	【推定方法】 $V_B = 4FAh$ ³⁾ ボーリング調査から洪積層で N 値 ≥ 50 となる地層までの深さを h とした。
	【ボーリング調査から推定】 ボーリング調査による基盤の N 値を $V = 91.0 \times N^{0.337}$ ⁵⁾ により V_B に換算した。

表 1 (2) 検証項目と方法

検証項目	検証方法
地震被害 判定指標 「Kg 値」	【推定方法】 $\gamma = A^2/F \times C \times \alpha_B$ $= K_g \times C \times \alpha_B$ $K_g = A^2/F$ ここの、$C=1/(\pi^2 V_B)$、α_Bは基盤加速度、 $\gamma \leq 1 \times 10^{-4}$ 弾性的に挙動 $1 \times 10^{-4} \leq \gamma \leq 1 \times 10^{-2}$ 弾塑性の特性を示し亀裂・不等沈下が生ずる 常時微動の結果を用いて K_g 値を算定。
	【検証方法】 地震被害と比較する。

3. 比較検討した地域と常時微動の測定

比較検討の対象は「神戸 JIBANKUN」のカバーエリアである神戸市街地とする。図 1 に神戸市街地の常時微動の測定地域と測点分布を示す。なお、常時微動は測定はすべて昼間に測定した。

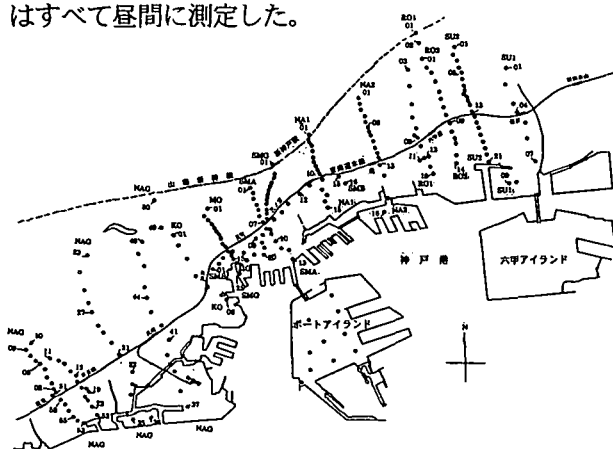


図 1 神戸市内の測定位置図

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。

4. 測定結果と検証結果

(1) 測定された QTS とボーリング調査結果の比較

神戸市街地の実測された QTS は様々な形状を示すが、QTS の形状を被害の帯の山側、帯地帯、海側の 3

タイプ(①丘陵地・②平地・③海岸付近)に分け、典型的な実測 QTS 例とボーリング柱状図を図 2 に比較する。

神戸市の地形は、丘陵部から海岸に向かって急激に変化している。丘陵地は表層地盤が 10m 以下と薄く基盤が出ている所もある。海岸付近は、表層地盤が 15m 以上と厚い軟弱地盤である。表層地盤は、沖積層のレキまじりの砂質土または洪積層の粘性土で構成されている。スペクトルの特徴は、表層地盤の固有振動数付近で表層地盤と基礎地盤のインピーダンス比に相当する部分で大きな値となった後、1 を大きく下回り、さらに高い振動数になるに従い、1 に近づいていく。1 を下回る部分の QTS の形状は、レイリー波によるものと推測される。ここで、F、A は、増幅倍率が最大となる卓越振動数を F とし、この時の増幅倍率を A としてよみとった(図中に▽で表示)。図 2(a)の場合は、増幅倍率が 1 以下にさがる手前の場所を選択した。

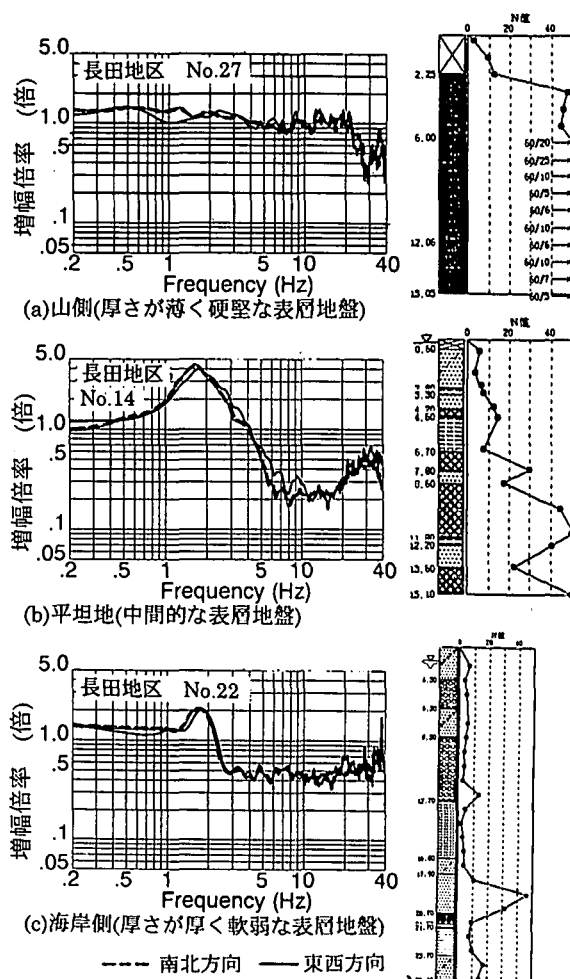


図 2 QTS と土質柱状図

図 3 は、ボーリング調査による表層地盤の厚さと、QTS から読取った卓越振動数 F および増幅倍率 A との関係を示したものである。卓越振動数は表層地盤の厚さの増大とともに小さくなる傾向が認められるが、増幅倍率には SH 波の重複反射を考えれば、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と考えられる。

卓越振動数は、0.2Hz ～19.5Hz に分布し、増幅倍率は、1.2 倍～5.1 倍(平均値 1.8 倍)に分布している。卓越振動数が変化しても増幅倍率は、ほぼ一定値を示し、卓越振動数が 2Hz 前後のときに増幅倍率は 3 倍～5 倍と若干大きくなる。

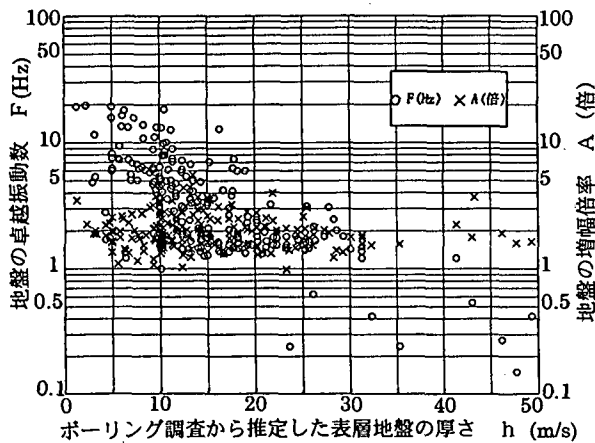


図3 表層地盤の厚さと F、A の関係

(2) 表層地盤厚さ h の推定結果と検証

図4は $V_B=300\text{m/s}$ と仮定して推定した表層厚さ h とボーリング調査で得られた洪積層(N 値 ≥ 50)までの表層厚さ h の対比である。表層地盤厚さは 1.2～43m まで分布している。海岸付近では、表層地盤厚さが深く丘陵部になるに従って浅くなる。多くの地点でかなりよい一致を示しており、神戸市地域では $V_B=300\text{m/s}$ の仮定が概ね妥当と推測される。ただし、ボーリング調査による表層地盤厚さが 8～20m の間で推定値が小さくなるものについては基盤速度が 300m/s を上回る地域と考えられ、基盤のせん断波速度についての情報があれば、表層地盤厚さを正確に推測できるものと考えている。

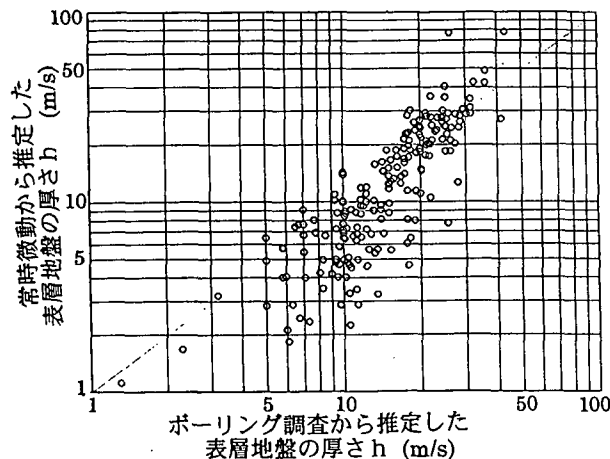


図4 ボーリング調査結果と常時微動測定により推定された表層地盤厚さの関係

(3) 表層地盤の S 波速度 V_S の検証

図5は、常時微動から推定した表層地盤のせん断波速度 V_{sm} とボーリング調査の N 値から $V_{SN} = 91.0 \times N^{0.337}$ により推定した表層地盤のせん断波速度 V_{SN} の関係を示したものである。値がせまい範囲にしかなく相関性がないが、ボーリング調査の N 値を換算した結果の方が大きな値となっている。その理由は $V_B=300\text{m/s}$ の仮定が過小のためと思われる。文献⑨にしたがって $V_B=600\text{m/s}$ とすると概ね両者の分布域は一致する。表層地盤厚 h の推定と V_B の仮定が異なることになるが、この原因については今後調査したい。

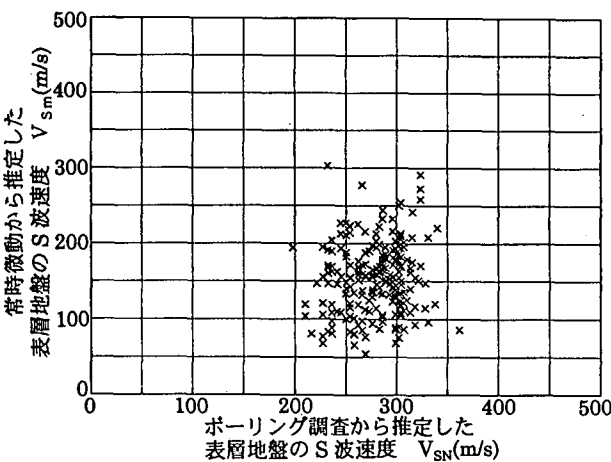


図5 ボーリング調査結果と常時微動測定により推定された表層地盤の S 波速度の関係

(4) 基盤地盤の S 波速度 V_B の推定

図6は、常時微動から推定した基盤の S 波速度 V_B と海岸線からの距離の関係を示したものである。常時微動から推定した基盤の S 波速度 V_B は、200～1400m/s(中心値 350m/s)の広い範囲に分布している。

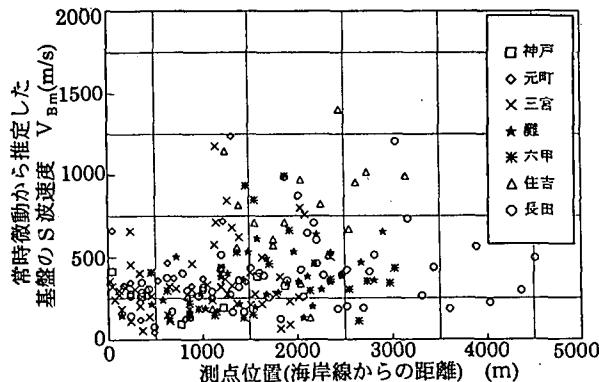


図6 測定位置毎の常時微動測定により推定された基盤地盤の S 波速度

海岸付近の表層地盤が厚い場所は、300m/s 以下の小さな値で、丘陵地は、500m/s 以上の大きな値になっている。六甲山から海岸線に向かって基盤の S 波速度 V_B

が変化している。14 側線全てにおいて海岸付近で 200m/s 程度から六甲山に向かって 500m/s 以上の大きな値となる。元町、三宮や住吉地区は、海岸からの距離が短いがその傾向は変わらず六甲山に向かって大きくなる。ポートアイランドでの PS 検層結果によれば $V_B=300\text{m/s}$ と考えられ常時微動による推定結果は概ね妥当と考えられる。

(5) 地震被害判定指標「Kg 値」と被害との比較

図 7 は、各観測点ごとの Kg 値と被害を重ね合わせたものである。上から順に長田地区、神戸・元町・三宮地区、灘・六甲道・住吉地区の結果を表している。被害の大きさは、建物の全壊率⁶⁾を 5 段階に分け、1 : 全壊無し、2 : 0~12.5%、3 : 12.5~25%、4 : 25~50%、5 : 50~100%とした。

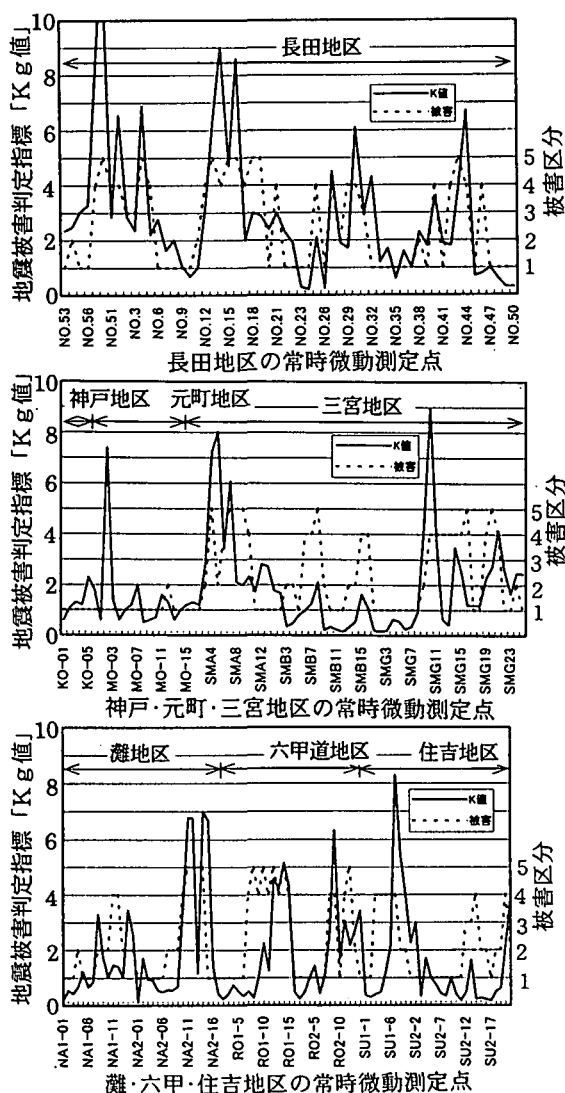


図 7 地震被害判定指標「Kg 値」と被害の比較

この図から、Kg 値の大きさと被害の大きさが、それぞれの地区、観測点で比較的良好一致をしていることがわかる。特に、長田地区では、その様子が顕著に

見られ、改めて Kg 値の有効性が確認できる。また、全体的に Kg 値の大きさと被害の関係をみると、 $Kg > 2$ で何らかの被害が発生している。これは、神戸市街地周辺に発生した基盤の最大加速度が 200~300gal、基盤での S 波速度を 200~600m/s と仮定すると、地震時に発生したせん断歪が $\gamma > 1 \sim 2 \times 10^{-3}$ となり、概ねこれは被害の結果と整合する。しかし、観測点によっては、Kg 値の大きさと被害がそれほど対応していない箇所もある。これは、QTS からの F、A のよみとりが困難であったことなどが原因の一つと考えらるが、今後の課題としたい。

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 については、 V_B の仮定は地質によって変更が必要であるが、簡単な常時微動測定から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、表層地盤の物性値(表層地盤深さ・S 波速度)が明確でなくても、F と A から求めた Kg 値は家屋の倒壊率や地盤変状とよく対応しており、Kg 値は地震時の災害予測などに有効であることが再確認された。

今後は、今回の調査で課題となったもののほか、表層地盤が互層構造をしている場合や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。

謝辞：神戸市街地の常時微動測定について鉄道総合研究所の関係者にご協力とご支援を賜っています。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 神戸の地盤研究会：GIS 統合システム「神戸 JIBANKUN」、1999 年 3 月
- 2) 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
- 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) 石原研而：「土質力学の基礎」、鹿島出版社、1987 年 1 月、p.2
- 5) 土質工学会編：土質調査法、1982 年 12 月、p.121
- 6) 建設省建築研究所：「平成 7 年兵庫県南部地震被害調査最終報告書」、1996 年 3 月、兵庫県南部地震建物被災状況図