

地震防災に向けた常時微動の活用例

常時微動のアレイ観測を用いた表層地盤の平均S波速度の推定方法

紺野克昭

KONNO Katsuaki

正会員 工博 芝浦工業大学助教授 工学部土木工学科

長尾 毅

NAGAO Takashi

正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸防災研究室長

過去の震災例からもわかるように、地震被害は地盤の悪いところに集中する傾向にある。地震に対する地盤の良し悪しは、表層地盤の平均S波速度（せん断波の伝わる速さ）を用いて評価できるが、S波速度の実測にはPS検層が必要であり、ボーリング

を伴うためコストが高く、大量に実施することは難しい。ボーリングを行わずに低コストで平均S波速度を推定する方法として、常時微動のアレイ観測を用いる方法が提案されており、その方法の概要と適用例を紹介する。

地震防災と常時微動

地震防災にあたっては、地震被害想定を適切に行うことが重要である。地震被害想定の流れを2つに大別すれば、各地点における地震動の評価、その地震動に対する構造物の損傷度評価、となる。このうち地震動については、場所がわずかに数十メートル離れただけで、地震動の強さが大きく異なることも珍しくない。このような地震動の空間的変動の要因として、表層地盤構造（S波速度構造）の空間的変動があげられる。一般に、S波速度が遅いほど地盤は揺れやすく、地盤が揺れやすいほど被害が生じやすい。表層30mの平均S波速度（ $V_S 30$ ）と地盤の揺れやすさには、おおむね逆比例の関係があることが指摘されており¹⁾、地震被害想定を精度を上げるためには、 $V_S 30$ など表層地盤構造の推定を空間的に高密度で行うことが有効である。

さらに、欧米においてはこの $V_S 30$ を耐震設計における地盤種別の分類や地震荷重の設定に利用する動きがあり、今後 $V_S 30$ は世界標準的な指標として耐震設計に用いられることが予想される。このため、 $V_S 30$ などの平均S波速度を低コストで精度よく推定する方法の確立が、地域地震防災の観点からも、耐震設計の信頼性向上の観点からも強く求められる。

$V_S 30$ の実測にはPS検層を実施する必要があるが、コスト面での制約から、大量に実施することは難しい。N値から $V_S 30$ を

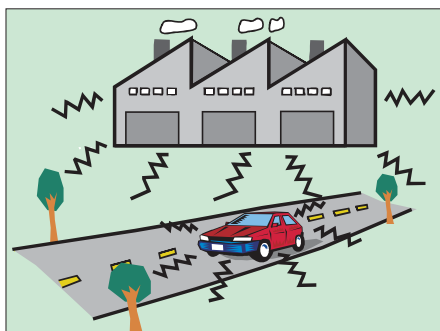


図-1 常時微動発生源

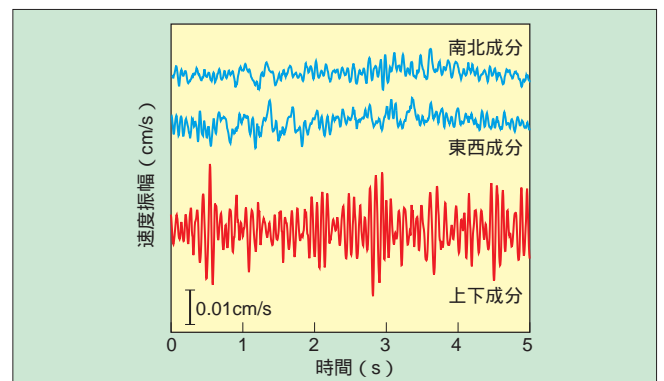


図-2 常時微動の波形例（芝浦工大田町キャンパス）

推定する場合には、後述のように誤差が大きく含まれる可能性のあることを覚悟しなければならない。そこで、常時微動の登場となる。

常時微動とは交通振動や工場振動など人間活動に伴い発生している振動のことで、一般には感じるできないほどの小さなレベル（速度振幅にして0.001～0.01 cm/s程度）の振動で地盤中を四方八方に伝わっている（図-1）。芝浦工大田町キャンパスで得られた常時微動の波形例を図-2に示す。振幅は小さく、複雑な振動をしているが、この中には工学的に有益な地盤情報が多く含まれている。

振動源が主に地表面にあることから、常時微動には表面波（地表面付近を伝播する波）が卓越している場合が多い。今回紹介する方法は表面波のひとつであるレイリー波の性質を利用する。なお、常時微動の工学的利用は金井清博士によって始められており、世界に誇れる日本発進の技術分野だということを付け加えておきたい。

地盤の平均S波速度の推定方法

レイリー波の位相速度と地盤の平均S波速度の関係

レイリー波の伝播速度（位相速度）は周期によって異

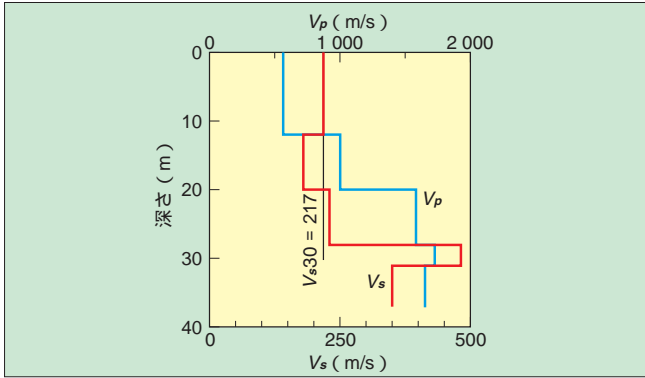


図-3 地下構造の例（羽田空港内）

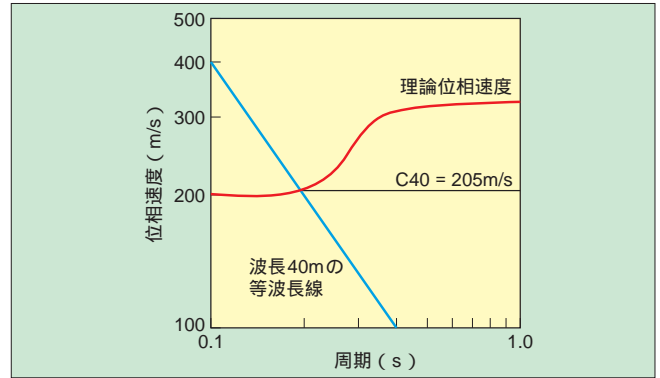


図-4 理論位相速度

なり，地下構造（S波速度，P波速度，密度）から理論的に計算することができる．例として，図-3の地下構造に対する理論位相速度を図-4に示す．図-4から，位相速度は短周期側では表層のS波速度，長周期側では基盤のS波速度に近づく性質があるなど，地盤のS波速度に強く依存する．このことは，位相速度を調べることによりS波速度構造が推定できることを示唆している．

次に，レイリー波の深さ方向の振幅と位相速度の関係を考えてみる．レイリー波の位相速度は，振幅の大きい領域の平均的なS波速度に対応するという性質をもつ．一方，レイリー波の振幅は，地表面付近で大きく，ある深さから急激に小さくなるという性質をもつ．この深さはレイリー波の波長に依存する．例えば，波長40mにおけるレイリー波の振幅は，深さ30m程度までは大きな振幅をもつが，これより深いところでは，その振幅は非常に小さくなるのが統計的に確かめられている²⁾．以上のことから，波長40mにおけるレイリー波の位相速度から表層30mの平均S波速度が求められることが予想される．このことを確かめるため，図-4には波長40mの等波長線が示してある．この直線と位相速度との交点が波長40mにおける位相速度であり，これをC40とよぶことにする．図からC40は205m/sである．また，図-3から得られる V_{s30} は217m/sであり，C40と V_{s30} は近い値をとることがわかる．次に，このことが一般的なことかどうかを調べてみる．図-5に東京近辺の85地点の地下構造に対して計算したC40と V_{s30} の関係を示す²⁾．両者にはばらつきはあるもののほぼ一対一の関係があることがわかる．したがって，任意の地点で常時微動に含まれているレイリー波の波長40mにおける位相速度が推定できれば，簡単に V_{s30} が推定できる．

常時微動に含まれるレイリー波位相速度の推定方法

常時微動に含まれるレイリー波の位相速度を推定するには，地表面にいくつかの上下方向の地震計を配置した

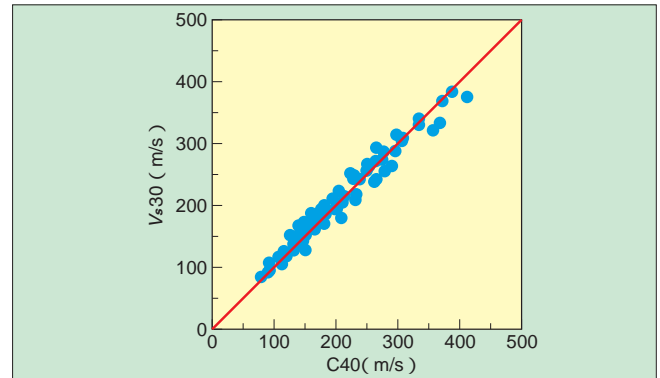


図-5 C40とVs30の関係（85地点）

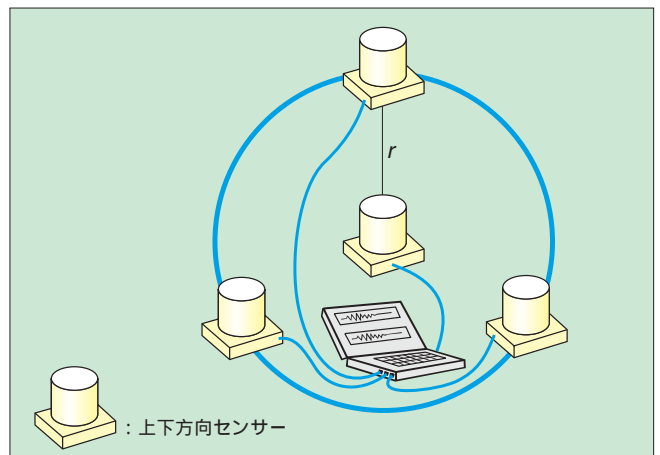


図-6 アレイ観測

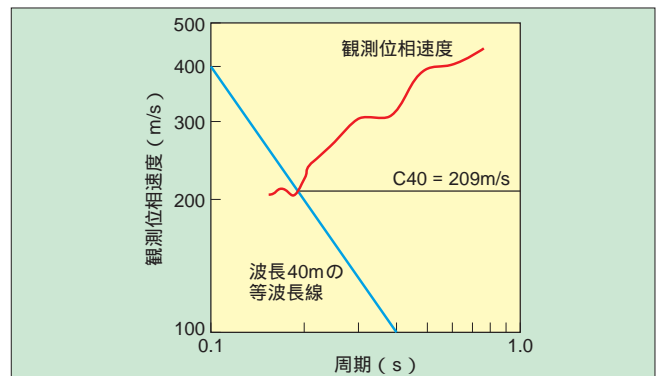
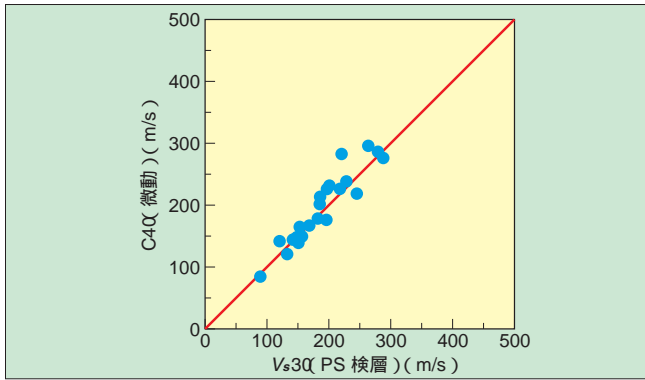
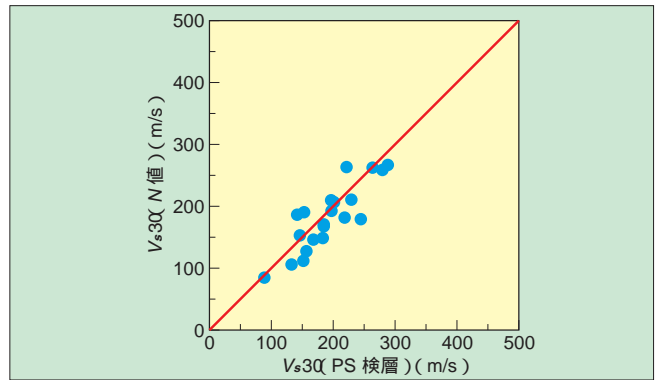


図-7 観測位相速度（羽田空港内）



(a) C40とVs30の関係



(b) Vs30NとVs30の関係

図-8 Vs30の推定精度

アレイ観測 (図-6) を行う必要がある。なお、常時微動の水平成分にもレイリー波は含まれているが、もう一つの表面波であるラブ波 (上下成分はない) も含まれているため、位相速度推定の目的では常時微動の上下成分だけが利用されている。観測された微動記録から位相速度を推定する方法は、いくつか提案されているが、少ない数の地震計でも適用でき、解析理論も簡単な空間自己相関 (SPAC) 法が最も利用しやすい。SPAC 法とは大まかに言えば、地震計間の距離と地震計間の微動の到来時刻のずれとの関係から位相速度を求めるものである³⁾。実際の計算も、比較的簡単なスペクトル解析を行う程度である。図-6 は SPAC 法で通常用いられるアレイ観測形状を示している。アレイ半径 r で推定できるレイリー波の波長範囲は $2r$ から $5r$ 程度であり、適用波長範囲を広げるため、同一地点でアレイ半径を変えた観測が通常行われる。レイリー波は、前述のとおり、波長にほぼ対応する深さまでの地盤の S 波速度情報を含んでおり、大きなアレイほど、より深い S 波速度情報を得ることができる。

適用例

常時微動のアレイ観測を羽田空港内で行った。図-7 に図-3 の地点で得られた観測位相速度を示す。アレイ半径は 3, 10, 18 m の 3 通りに変えたが、今回はわかりやすいように、波長の適用範囲と位相速度の連続性を考慮して 1 つの曲線で表示した。波長 40 m の等値線と観測位相速度との交点から C 40 を読み取ると 209 m/s となる。一方、前出の図-3 に示した PS 検層から得られる $V_s 30$ は 217 m/s であったので、両者はほぼ一致していることがわかる。

PS 検層が行われている全国 22 地点でも常時微動観測を行っている⁴⁾。図-8 (a) には、常時微動から得られた C 40 (微動) と PS 検層から得られた $V_s 30$ (PS 検層)

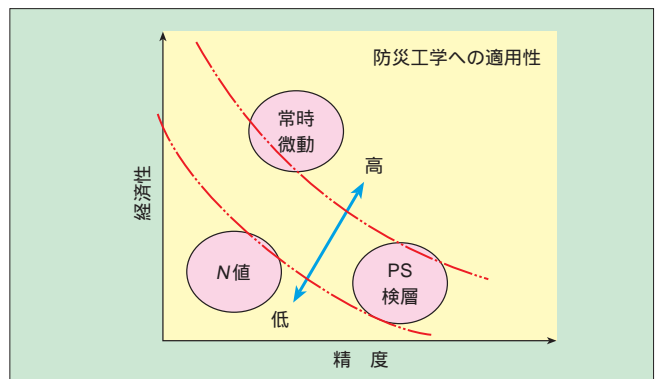


図-9 地域地震防災への適用性

の関係を示してある。一方、図-8 (b) には、このうち標準貫入試験 (SPT) も併せて実施されている 21 地点について、道路橋示方書で用いられている N 値から S 波速度への変換式を用いて求めた表層 30 m の平均 S 波速度 $V_s 30$ (N 値) と $V_s 30$ (PS 検層) の関係を示してある。図から常時微動のアレイ観測を用いた方法の方が SPT によるよりも推定精度は高いといえる。コスト面を考えると、PS 検層や SPT では表層 30 m の調査を行うためには 100 万円程度のボーリング費用に加え 60 ~ 80 万円程度の試験費用が必要となるが、常時微動に必要な費用は 30 万円程度の試験費用のみである (以上の費用は参考値であり、条件によって変動がある)。高密度な地盤情報が求められる地域地震防災への適用性については、コスト面を考えると常時微動の適用性は PS 検層よりも高いとさえいえるのではないだろうか (図-9)。

今後の課題と展望

本手法は、常時微動のアレイ観測、SPAC 法による位相速度の推定、波長 40 m の位相速度 C 40 を $V_s 30$ とみなす、の 3 段階に分けられる。以下では、本手法の課題のいくつかについて述べてみる。

アレイ観測の省スペース化

市街地ではアレイ観測の場所を確保するのは意外と難しく、観測の省スペース化も重要な課題となる。この解決策としてL字形アレイ観測のSPAC法への適用(L-SPAC法)が提案されている³⁾。L-SPAC法は、T字路や十字路などの歩道部で容易に実施できるため、観測場所の確保のしやすさは格段に向上する。今後、精度面での検証が急がれる。

解析手法の規格化

スペクトル解析の手法や使用する波形区間の選定など、解析手法の規格化はまだ進んでいないため、解析者によって推定結果が異なる可能性がある。これを防ぐためには、解析手法の規格化が必要である。その他に、観測波形記録(デジタルデータ)をインターネット上で公開するなどをして、推定結果だけの一人歩きを避けることも重要だと考える。

不整形地盤における適用性

地下構造が不整形な場合、推定精度がどの程度なのかは、まだほとんどわかっていない。実測および数値シミュレーションを行うことにより解決していく必要がある。

常時微動を用いた本手法は、これらの問題を解決することにより、地震防災のための強力な武器となっていくと考えている。また、建設分野への応用として、構造物の支持基盤層までの深さを推定する方法として、本手法を拡張することも考えている。

ところで、日本は、 N 値至上主義的なところがあるのではないだろうか。 N 値のデータベースはきわめて膨大であり、当然、有効に使うのは重要である。しかし、「振動のことは振動(常時微動)で知る」が筆者らの考えである。

参考文献

- 1 - 翠川三郎・松岡昌志・作川孝一：1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価，日本建築学会構造系論文集，No.442，pp.71-78，1992
- 2 - 紺野克昭・片岡俊一：レイリー波の位相速度から地盤の平均S波速度を直接推定する方法の提案，土木学会論文集，No.647/I-51，pp.415-423，2000
- 3 - 紺野克昭：地下構造推定に用いる2点間および3点間空間自己相関法に関する理論的検討，土木学会論文集，No.654/I-52，pp.367-375，2000
- 4 - 長尾 毅・紺野克昭：常時微動アレイ観測に基づく表層地盤の平均S波速度推定精度に関する研究，土木学会論文集(投稿中)