深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度を 深さの浅いデータから推定する方法について

翠川三郎¹⁾、野木淑裕²⁾

- 1) 正会員 東京工業大学総合理工学研究科人間環境システム専攻、教授 工博
e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp
- 2) 学生会員 東京工業大学総合理工学研究科人間環境システム専攻、大学院生
e-mail : nogi.y.aa@m.titech.ac.jp

要 約

地盤の増幅度を推定するためのパラメータとしてよく用いられる深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度 V_{S30} を深さの浅いデータから推定する方法について、日本の都市域でのデータを中心とした 2099 地点での S 波速度検層結果を用いて検討した。浅い深さまでを対象とした平均 S 波速度と深さ 30m までの値との関係にはかなりのばらつきがみられることから、対象とした深さの最深部の S 波速度の影響も考慮した関係式を求めたところ、既往の式に比べ、推定誤差が小さく、より汎用的な式を得た。

キーワード： 地盤のS波速度、 V_{S30} 、地盤増幅

1. はじめに

地盤の増幅度を推定するための簡潔な物理指標として、深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度 V_{S30} がよく用いられている。例えば、広域の震度分布評価では V_{S30} に基づく地盤増幅率がしばしば用いられ、米国の建築物の耐震基準では V_{S30} に基づく地盤分類により設計用地震動スペクトルが規定されている¹⁾。この V_{S30} を得るためには、深さ 30m までの S 波速度が必要となるが、K-NET 強震観測点のように、それより浅いところまでしか S 波速度のデータが得られていない場合が少なくない。そこで、深さの浅いデータから V_{S30} を推定する方法が検討され、30m よりも浅い深さ z までの地盤の平均 S 波速度 V_{SZ} から V_{S30} を推定する式が提案されている²⁾⁻⁵⁾。

これらの推定式を導出する際に、日本のデータとして KiK-net 観測点でのものが用いられている³⁾⁻⁵⁾が、KiK-net 観測点は岩盤ないし岩盤に近い場所に設置されており、都市部の堆積地盤上でのデータではない。そこで、より一般性の高い推定式を得るためには、様々な堆積地盤上のデータを含んだデータにより検討することが必要と考えられる。また、深さの浅いデータからの推定では推定誤差が大きくなることも指摘されており^{4),5)}、 V_{SZ} というひとつのパラメータから V_{S30} を推定する方法に限界があることが示唆される。

そこで、本研究では、KiK-net 観測点のデータに加えて都市域の多数の地点での S 波速度検層結果を用いて、 V_{S30} と V_{SZ} の関係や浅い地盤データから得られる他のパラメータの影響を検討し、より信頼性の高い V_{S30} の推定式を提案することを目的とする。

2. 用いたデータ

用いたデータは深さ 30m 以深まで測定されている S 波速度検層結果で、藤本・翠川(2003)⁹⁾で用いたデータに都市域でのデータを追加した 2099 地点でのデータである。なお、KiK-net 観測点のデータには深さ 30m までの層数が 1 や 2 のものがあり、これらは測定間隔が粗いために速度構造を正確に表していないと判断されることから、深さ 30m までの層数が 3 以上の 417 地点でのものを用いた。データが得られた地点の分布は、図 1 に示すように、首都圏をはじめとする 3 大都市圏に多いが、全国に分布している。これらのデータの V_{S30} の分布は、図 2 に示すように、150~400m/s の値のものが全体の約 8 割を占める。一方、図の灰色で示した KiK-net 観測点のデータは 400m/s 前後のデータが多く、分布の形状は異なる。

図 1 用いたデータの地点分布

図 2 用いたデータの V_{S30} の分布

3. 深さ 30m までとより浅い深さまでの地盤の平均 S 波速度の関係

図 3 に V_{S30} と V_{S10} の関係を示す。両者の関係には相関がみられ、対数でほぼ直線関係にある。しかし、かなりのバラツキもみられ、 V_{S10} のみから V_{S30} を推定するにはある程度の誤差を伴うことを示している。一般に地盤の S 波速度は深くなるにつれて増大する。そこで、データの最深部での S 波速度がそれより深い地盤の S 波速度と相関がより高いものと予想される。また、深さの浅いところで、ある程度固い地層が現れると、その深さで地盤調査は終了となる場合が多く、その場合にそれ以深ではその地層がある程度連続している可能性が考えられる。したがって、深さの浅いデータからより深い V_{S30} を推定するには、データの最深部 z での S 波速度 ${}_zV_S$ も重要なパラメータのひとつとなる可能性がある。

そこで、図では深さ 10m での S 波速度 ${}_{10}V_S$ の値に応じて印を変えて示している。この ${}_{10}V_S$ が速いほど、 V_{S10} に比べて V_{S30} は大きくなっており、 ${}_{10}V_S$ を考慮することで V_{S30} をより精度良く推定できる可能性を示している。図 4 に同様に V_{S30} と V_{S20} の関係を示す。両者の関係のバラツキは図 3 に比べて小さくなっているものの、 ${}_{20}V_S$ が速いほど、 V_{S20} に比べて V_{S30} は大きくなる傾向はみられる。これらのことは、最深部の S 波速度がそれより深い地盤の S 波速度と相関が強いために、より深い地盤の平均 S 波速度を推定する際に重要なパラメータのひとつとなるという前述の仮説を支持している。予備的解析から V_{S30} に対する V_{SZ} や ${}_zV_S$ の関係がそれらの対数で線形関係にあることを確認し、 V_{SZ} および ${}_zV_S$ による V_{S30} の推定式として(1)式のような関数型を仮定して、最小自乗法により係数 a, b, c を求めた。

図3 V_{S30} と V_{S10} の関係

図4 V_{S30} と V_{S20} の関係

$$\log V_{S30} = a \log V_{SZ} + b \log zV_S + c \pm \sigma \quad \cdot \cdot \cdot (1)$$

なお、本研究で用いた深さ 30m 以深まで S 波速度が測定されているデータセットでは、図 5 に示す Z=15m の例のように、 zV_S が小さなデータの割合が多くなり、データに偏りが生ずる。しかし、実際の深さが浅いデータは、前述したように、その深さである程度固い地盤となるために調査がそこで終了した場合が少なくないので、 zV_S がある程度大きな値となる割合はより多いものと考えられる。そこで、 zV_S が 450m/s 以上のデータに 2 倍前後の重みをつけて、 zV_S の分布が均等に近づくようにして係数の値を求めた。

結果を表 1 と図 3 および 4 の実線に示す。深さ z が浅い場合ほど係数 b は大きく最深部の S 波速度 zV_S の影響が大きいことを示している。例えば、図 4 の V_{S30} に対する V_{S20} の関係に比べて図 3 の V_{S30} に対する V_{S10} の関係の方が zV_S の値による違いが大きくなっている。比較のため、 zV_S を考慮しない場合、すなわち $b=0$ と固定した場合の係数も表 1 に示している。図 6 に両者の対数標準偏差の比較を示す。深さ z が浅い場合ほど、 zV_S を考慮した場合の誤差はより小さくなっており、例えば、 z が 10m の場合、推定された V_{S30} の対数標準偏差は zV_S を考慮しない場合で 0.095 から、 zV_S を考慮した場合で 0.071 に減少しており、 zV_S を考慮することである程度推定精度が向上していることがわかる。

図 5 zV_S の頻度分布(Z=15m の場合)

図 6 zV_S を考慮した場合としない場合の標準偏差の比較

表 1 係数 a, b, c および標準偏差

Depth (m)	a	b	c	σ	Depth (m)	a	b	c	σ
10	0.58	0.38	0.183	0.071	20	0.81	0.18	0.049	0.023
	1.008	-	0.134	0.095		1.010	-	0.038	0.038
11	0.60	0.36	0.170	0.061	21	0.83	0.16	0.045	0.019
	1.015	-	0.125	0.088		1.009	-	0.031	0.034
12	0.63	0.34	0.140	0.056	22	0.85	0.14	0.042	0.017
	1.018	-	0.090	0.081		1.008	-	0.025	0.029
13	0.65	0.32	0.131	0.048	23	0.86	0.13	0.037	0.014
	1.018	-	0.080	0.074		1.004	-	0.040	0.026
14	0.69	0.29	0.104	0.046	24	0.88	0.11	0.035	0.012
	1.019	-	0.070	0.068		1.003	-	0.034	0.022
15	0.69	0.28	0.118	0.042	25	0.91	0.09	0.009	0.009
	1.017	-	0.057	0.063		1.003	-	0.028	0.018
16	0.73	0.25	0.091	0.039	26	0.93	0.07	0.007	0.007
	1.015	-	0.048	0.058		1.002	-	0.022	0.014
17	0.75	0.23	0.086	0.034	27	0.95	0.05	0.006	0.005
	1.012	-	0.063	0.053		1.002	-	0.016	0.010
18	0.76	0.22	0.080	0.030	28	0.96	0.04	0.002	0.003
	1.012	-	0.055	0.048		1.001	-	0.011	0.007
19	0.79	0.2	0.052	0.026	29	0.98	0.02	0.001	0.001
	1.010	-	0.045	0.043		1.000	-	0.005	0.003

4. 既往研究との比較

図3および4に、比較のため、カリフォルニアの135地点のデータやKiK-net観測点の689地点のデータから得られた推定式⁵⁾も示している。図3の V_{S10} との関係では、カリフォルニアのデータからの式は本データのほぼ中心に、KiK-netのデータからの式は本データの上側に位置している。一方、図4の V_{S20} との関係では、カリフォルニアのデータからの式とKiK-net観測点のデータからの式の違いは小さく、本データのほぼ中心に位置している。カリフォルニアのデータの多くは V_{S30} が150~500m/sに分布しているのに対して、KiK-net観測点のデータの多くは150~1000m/sとより大きな値に分布しており⁵⁾、 zV_s も大きな値の割合が多いものと推測される。したがって、既往の2式の関係が V_{S10} と V_{S20} の場合で異なるのは、 $_{10}V_s$ では zV_s の影響が大きいものに対して、 $_{20}V_s$ では小さくなるためとして説明でき、Boore et al.(2011)⁵⁾が指摘しているように、2式の違いが地域特性ではなく用いたデータでのS波速度の分布の違いによるものと考えられることが本データからも確認できる。

本研究の提案式との比較では、本研究の提案式の方が V_{SZ} の係数が小さく、傾きが小さいが、これは zV_s を考慮したために V_{SZ} の寄与分が減ったことによるものと考えられる。本研究の提案式は、カリフォルニアのデータからの式に比べて、より大きな V_s の分布を持つKiK-net観測点のデータからの式が同じ V_{SZ} に対して大きな V_{S30} を与えるという結果を説明でき、データの分布に依存しないより汎用性の高い関係式であると判断できる。

5. 結論

従来の研究で日本のデータとして用いられてきたKiK-net観測点のデータに、日本の都市域でのデータを加えた2099地点でのS波速度測定結果を用いて、深さの浅いデータから深さ30mまでの地盤の平均S波速度 V_{S30} を推定する方法について検討した。浅い深さ z までしか対象としない平均S波速度 V_{SZ} と深さ30mまでの値 V_{S30} との関係にはかなりのばらつきがみられるため、対象深さの最深部のS波速度 zV_s の影響も考慮した関係式を求めたところ、推定誤差が小さくなることを示した。提案式は、カリフォルニアのデータからの式に比べて、より大きなS波速度の分布を持つKiK-net観測点のデータからの式が同じ V_{SZ} に対して大きな V_{S30} を与えるという既往の結果も説明でき、より汎用性の高いものと考えられる。

謝 辞

地盤のS波速度データ収集の際に防災科学技術研究所を始めとする関係各位よりご協力いただいた。

参考文献

- 1) Borchardt, R.: V_{S30} – A Site-Characteristics Parameter for Use in Building Codes, Simplified Earthquake Resistant Design, GMPE's, and Shake Maps, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Paper#173, 2012, 8pp.
- 2) Boore, D. M.: Estimating $V_s(30)$ (or NEHRP Site Classes) from shallow velocity models (depths < 30 m), Bull. Seism. Soc. Am., Vol.94, 2004, pp.591-597.
- 3) Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, 2006, pp.879-89.
- 4) Cadet, H. and A. Duval: A Shear Wave Velocity Study Based on the KiK-net Borehole Data: A Short Note, Seism. Res. Lett., No.80, 2009, pp.440-445.
- 5) Boore, D. M., E. M. Thompson, and H. Cadet: Regional correlations of V_{S30} and velocities averaged over depths less than and greater than 30 m, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.101, 2011, pp.3046-3059.
- 6) 藤本一雄・翠川三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定、日本地震工学会論文集、第3巻、第3号、2003年、pp.13-27.

(受理：2015年1月30日)

(掲載決定：2015年2月26日)

Estimation of V_{S30} from Shallow Velocity Profile

MIDORIKAWA Saburoh ¹⁾ and NOGI Yoshihiro ²⁾

1) Member, Professor, Department of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng

2) Member, Graduated Student, Department of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology.

ABSTRACT

A method for estimating the average shear-wave velocity to 30m (V_{S30}) from a shallow velocity profile is examined by using data from 2,099 boreholes in Japan. Correlations between V_{S30} and shallower average velocity show dependence of the shear-wave velocity at the deepest layer of the shallow profile, and empirical equations to estimate V_{S30} are proposed as a function of shallower average velocity and velocity at the deepest layer.

Keywords: Shear-wave Velocity of Ground, V_{S30} , Site Amplification