

# ボーリングデータから推定された浅部地盤モデルの 地震動増幅特性評価に関する研究

金子 政輝

## 1. はじめに

建物の被害に直結する地震動の増幅に大きな影響を及ぼす浅部の地下構造モデルを広域かつ高密度に構築するためには、S波速度構造を簡易的に推定する必要がある。そのため比較的入手の容易なボーリングデータのN値に基づくS波速度の推定式は既往の研究<sup>1)~6)</sup>などにより多数提案されている。しかし、土質分類の粗さや地域によるデータの偏りなど、必ずしも十分に検討されているとは言えず、推定式の違いが地盤増幅特性にどの程度影響を及ぼすか検討している研究も少ない。そこで本研究では、全国のボーリングデータをもとにS波速度推定式の構築を行い、推定式の違いが地盤増幅特性へ及ぼす影響について検討を行う。

## 2. データセット

使用するボーリングデータは、全国の防災科学技術研究所のK-NET観測点(計1011本)<sup>7)</sup>、およびジオ・ステーション(計152本)<sup>8)</sup>、財団法人日本建築センターのビルディングレター(計346本)<sup>9)</sup>による。本研究ではこの内、N=0のデータはデータセットから除外している。また、標準貫入試験は通常N値が50に達した時点で工学的基盤とみなして調査を終えることが多く、N $\geq$ 50と表記された層のN値については正確な値とは言い難い。そこで、本研究ではN<50の層とN $\geq$ 50の層でそれぞれS波速度の推定手法の構築を行う。なお、PS検層結果において同一のS波速度を持つ層のN値、深さはそれらの平均値を用いる。K-NETでは土質をF(表土)、FI(埋土・盛土)、G(礫)、GF(礫質土)、S(砂)、SF(砂質土)、M(シルト)、C(粘性土)、O(有機質土)、V(火山灰質土)、Pt(高有機質土)、R(岩盤)に分類しているが、FとFI、GとGF、SとSF、CとMについては土質の分類方法の簡略化について検討した結果、同一の土質とみなし、本研究ではそれぞれ単にF、GF、SF、Cと表記する。また、Vについて、この土質が見られる観測点に偏りが大きいいため、北日本、中日本、西日本の3種類にさらに細分化し、合計10種類に分類する。K-NET以外のボーリングデータにおいても同様に土質を10種類に分類し、それぞれの土質ごとに回帰分析を行う。なお、N $\geq$ 50

の層においてO、Pt、Vはデータ数が少ないため、これらの土質をCとみなし検討を行う。各土質のデータ数を表1に示す。

回帰分析を行うに当たり各土質分類においてデータをランダムに二等分し、一つを推定式導出用(データセットA)、もう一つを検証用(データセットB)とした(交差検定)。なお、両データセットに含まれるデータに大きな偏りがないことは別途確認している。また、データ数が少ないO、Pt、V、Rについては、データの分割はせず、全てのデータを推定式導出用とした。

## 3. S波速度の推定式の導出

### 3.1 N<50の層の検討

本研究では、まず既往の研究<sup>4)</sup>に倣い、以下の式のようにN値のみを用いて回帰分析を行った。

$$\log V_s = a \log N + b \quad (1)$$

ここで、 $V_s$ はS波速度(m/s)、 $N$ はN値、 $a$ 、 $b$ は回帰係数である。また、PS検層による $V_s$ と得られたS波速度推定式によって求められた $V_s$ の偏差とその層の深さには相関がみられたため、本研究ではさらに深さも加え、以下の式を用いて回帰分析を行った。

$$\log V_s = a \log N + \beta \log D + \gamma \quad (2)$$

ここで、 $D$ は深さ(m)、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は回帰係数である。データセットAに対して式(2)を用いて回帰分析を行った結果を表2に示す。また、同表の誤差 $e$ と相関係数 $R$ は以下の式によって求めている。

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\log V_{SO} - \log V_{SP})^2} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum (V_{SP} - V'_{SP})(V_{SO} - V'_{SO})}{\sqrt{\sum (V_{SP} - V'_{SP})^2 \sum (V_{SO} - V'_{SO})^2}} \quad (4)$$

ここで、 $V_{SO}$ はPS検層によるS波速度(m/s)、 $V_{SP}$ は推定式によって求められたS波速度(m/s)、 $n$ はデータ数、 $V'_{SO}$ と $V'_{SP}$ はそれぞれのデータの平均を表す。

### 3.2 N $\geq$ 50の層の検討

前述のようにN $\geq$ 50の層では得られるN値のデータの精度は低く、N値を必要としないS波速度の推定手法の構築が必要となる。そこで、本研究では深さとS波速度には緩やかに相関がみられることに着目し、以下の式を用いて回帰分析を行った。

$$\log V_s = \alpha' \log D + \beta' \quad (5)$$

ここで、 $\alpha'$ 、 $\beta'$ は回帰係数である。回帰分析の結果を誤差  $e$ 、相関係数  $R$  も併せて表 3 に示す。

#### 4. 既往の研究結果との比較

データセット B を用いて本研究の提案式と既往の研究を比較し、提案式の妥当性を検証する。比較対象は、道路橋示方書<sup>1)</sup>、中央防災会議(2005)<sup>2)</sup>、今井・他(1985)<sup>3)</sup>、太田・後藤(1976)<sup>4)</sup>による推定式である。

土質分類は推定式により異なるが、それぞれ各土質に対応させ 10 分類での比較を行う。なお、精度の比較には式(3)の誤差と式(4)の相関係数を用いる。表 4 に各推定式による誤差、相関係数を示す。全ての土質で本研究の誤差は太田・後藤以外の既往の研究の誤差よりも小さく、相関係数も大きい。一部の土質で、太田・後藤の誤差と相関係数が本研究より良い傾向を示しているが、その差は小さく、V では地域を細分化した本研究の誤差が太田・後藤よりも小さい。以上より本研究の提案式は最も精度が高いといえる。

#### 5. 推定式の違いが地盤増幅特性に及ぼす影響

PS 検層と本研究、太田・後藤、中央防災会議の推定式から求めた S 波速度を用いて 1 次元解析 (SHAKE)<sup>10)</sup>によって算出した工学的基盤に対する地表面の増幅率から、S 波速度推定式の違いが地盤増幅特性に及ぼす影響について検討を行う。本解析に必要な地盤物性値は各層の層厚、S 波速度、密度、減衰定数 (Q 値) であるが、太田・後藤、中央防災会議の推定式では  $N \geq 50$  は適用範囲外であるため、 $N \geq 50$  の層の S 波速度については、本研究で扱うデータセットにおけるそれぞれの土質の  $N \geq 50$  の層の平均値相当の値を使用する。また、本研究では  $N \geq 50$  の岩盤層の S 波速度の平均値である 500 m/s 以上の層を工学的基盤と定義する。密度  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>) についてはボーリングデータの値を使用し、データがない層については以下に示す太田・他による密度と S 波速度との関係式<sup>11)</sup>を用いて算出した。

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{V_s} \quad (5)$$

Q 値については各層の S 波速度の 1/10~1/5 程度の値とし、周波数依存性は考慮していない。

まず、PS 検層による増幅特性と各 S 波速度推定式により推定された浅部地盤モデルの増幅特性の比較を、算出された卓越周波数と卓越周波数における地盤増幅率によって行う。比較対象の観測点は、3 つの S 波速度推定式全てで本研究において工学的基盤と定義した  $V_s = 500$  m/s の層まで推定できた 77 観測点である。図 1 に各推定式の両者の比較を示す。なお、本研究では卓越周波数を第 1 ピークの周波数と定義している。卓

越周波数については、各推定式共にばらつきはあるが、概ね 1 対 1 の線に沿って分布している。本研究と太田・後藤では PS 検層の結果よりも低周波側で第 1 ピークが現れる観測点が多くみられ、中央防災会議では第 1 ピークが高周波側に大きくずれている観測点の一部みられる。また、本研究では PS 検層による第 1 ピーク

表 1 解析に用いた土質ごとのデータ数

| 土質        | データ数   |        | 土質         | データ数   |        |
|-----------|--------|--------|------------|--------|--------|
|           | N < 50 | N ≥ 50 |            | N < 50 | N ≥ 50 |
| 表土・埋土 (F) | 608    | 57     | 高有機質土 (Pt) | 68     | 2      |
| 礫質土 (GF)  | 1243   | 1206   | 火山灰質土 (V)  | 北日本    | 76     |
| 砂質土 (SF)  | 2512   | 778    |            | 中日本    | 201    |
| 粘性土 (C)   | 2486   | 229    |            | 西日本    | 59     |
| 有機質土 (O)  | 102    | 3      | 岩盤 (R)     | 284    | 884    |
| 合計        |        |        |            | 7639   | 3178   |

表 2 N < 50 における S 波速度推定式の回帰係数と誤差、相関係数

| 土質         | $\log V_s = \alpha \log N + \beta \log D + \gamma$ |         |          | $e$   | $R$   |       |
|------------|--|---------|----------|-------|-------|-------|
|            | $\alpha$   | $\beta$ | $\gamma$ |       |       |       |
| 表土・埋土 (F)  | 0.184  | 0.137   | 1.974    | 0.157 | 0.531 |       |
| 礫質土 (GF)   | 0.451  | 0.201   | 1.669    | 0.167 | 0.603 |       |
| 砂質土 (SF)   | 0.385  | 0.108   | 1.783    | 0.134 | 0.677 |       |
| 粘性土 (C)    | 0.338  | 0.143   | 1.838    | 0.136 | 0.616 |       |
| 有機質土 (O)   | 0.337  | 0.087   | 1.863    | 0.145 | 0.726 |       |
| 高有機質土 (Pt) | 0.220  | 0.164   | 1.849    | 0.207 | 0.502 |       |
| 火山灰質土 (V)  | 北日本  | 0.204   | 0.289    | 1.867 | 0.130 | 0.745 |
|            | 中日本  | 0.289   | 0.129    | 1.928 | 0.127 | 0.674 |
|            | 西日本  | 0.313   | 0.121    | 1.931 | 0.172 | 0.551 |
| 岩盤 (R)     | 0.299  | 0.334   | 1.795    | 0.170 | 0.544 |       |

表 3 N ≥ 50 における S 波速度推定式の回帰係数と誤差、相関係数

| 土質        | $\log V_s = \alpha' \log D + \beta'$ |          | $e$   | $R$   |
|-----------|--------------------------------------|----------|-------|-------|
|           | $\alpha'$                            | $\beta'$ |       |       |
| 表土・埋土 (F) | 0.296                                | 2.208    | 0.199 | 0.402 |
| 礫質土 (GF)  | 0.258                                | 2.300    | 0.163 | 0.429 |
| 砂質土 (SF)  | 0.100                                | 2.409    | 0.129 | 0.132 |
| 粘性土 (C)   | 0.171                                | 2.326    | 0.157 | 0.247 |
| 岩盤 (R)    | 0.371                                | 2.322    | 0.201 | 0.317 |

表 4 本研究および既往の研究の誤差、相関係数

|        |     | F     | GF    | SF    | C     | O     |
|--------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 道路橋示方書 | $e$ | —     | 0.195 | 0.151 | 0.152 | 0.156 |
|        | $R$ | —     | 0.475 | 0.642 | 0.559 | 0.683 |
| 中央防災会議 | $e$ | —     | 0.188 | 0.145 | 0.154 | 0.163 |
|        | $R$ | —     | 0.473 | 0.641 | 0.558 | 0.685 |
| 今井・他   | $e$ | 0.185 | 0.184 | 0.145 | 0.153 | 0.152 |
|        | $R$ | 0.403 | 0.474 | 0.641 | 0.558 | 0.684 |
| 太田・後藤  | $e$ | —     | 0.173 | 0.133 | 0.147 | 0.144 |
|        | $R$ | —     | 0.613 | 0.663 | 0.600 | 0.751 |
| 本研究    | $e$ | 0.157 | 0.167 | 0.134 | 0.136 | 0.145 |
|        | $R$ | 0.531 | 0.603 | 0.677 | 0.616 | 0.726 |
|        |     | Pt    | V     |       |       | R     |
| 道路橋示方書 | $e$ | 0.256 | 0.203 | 0.139 | 0.181 | —     |
|        | $R$ | 0.315 | 0.466 | 0.612 | 0.539 | —     |
| 中央防災会議 | $e$ | 0.269 | 0.213 | 0.145 | 0.180 | —     |
|        | $R$ | 0.317 | 0.463 | 0.610 | 0.535 | —     |
| 今井・他   | $e$ | 0.244 | 0.185 | 0.136 | 0.186 | 0.212 |
|        | $R$ | 0.316 | 0.464 | 0.611 | 0.536 | 0.306 |
| 太田・後藤  | $e$ | 0.210 | 0.158 | 0.178 | 0.219 | —     |
|        | $R$ | 0.530 | 0.723 | 0.657 | 0.509 | —     |
| 本研究    | $e$ | 0.207 | 0.130 | 0.127 | 0.172 | 0.170 |
|        | $R$ | 0.502 | 0.745 | 0.674 | 0.551 | 0.544 |

が 10 Hz を超える観測点においてばらつきが大きくなる。一方、太田・後藤と中央防災会議では PS 検層による第 1 ピークが 10 Hz 付近の観測点においてばらつきが大きい。地盤増幅率については、本研究と太田・後藤ではばらつきはあるものの、概ね 1 対 1 の線に沿って分布している。一方、中央防災会議では大半の観測点で地盤増幅率を過小評価している。また、本研究では PS 検層による地盤増幅率が 5 以上の観測点においてばらつきが大きいが、太田・後藤では PS 検層による地盤増幅率が 5 以下の観測点において大きなばらつきが見られる。以上より、各推定式による地盤増幅特性を比較すると、本研究、太田・後藤では PS 検層の結果より低周波側に第 1 ピークがシフトする傾向があり、中央防災会議では地盤増幅率を過小評価する傾向が強いことが推察される。

ここで、推定式の違いによる地盤増幅特性への影響を定量的に検討するために、式(6)より PS 検層と各推定式による卓越周波数および地盤増幅率の偏差を算出する。

$$res = \log obs - \log pre \quad (6)$$

ここで、*obs*は PS 検層による卓越周波数および地盤増幅率、*pre*は各モデルによる卓越周波数および地盤増幅率、*res*は両者の偏差である。卓越周波数については、本研究では偏差が正になる観測点が 72.7%、負になる観測点が 27.3%となり、PS 検層の結果より低周波側に第 1 ピークが現れる観測点が多い。太田・後藤では偏差が正になる観測点が 74.0%、負になる観測点が 26.0%となり、本研究と同様に第 1 ピークが低周波側にずれている観測点が多い。一方、中央防災会議では偏差が正になる観測点が 55.8%、負になる観測点が 44.2%となり、第 1 ピークのずれ方に傾向はあまりみられない。卓越周波数の偏差が±0.2 以内 (0.63~1.58 倍) の観測点は本研究で 76.6%、太田・後藤で 70.1%、中央防災会議で 79.2%となり、中央防災会議による S 波速度推定式を用いた場合に PS 検層による卓越周波数により近い値をとる観測点が多い。地盤増幅率については、本研究では偏差が正になる観測点が 63.6%、負になる観測点が 36.4%となり、地盤増幅率を過小評価している観測点やや多い。太田・後藤では偏差が正になる観測点が 53.2%、負になる観測点が 46.8%となり、地盤増幅率のずれ方には大きな傾向はみられない。中央防災会議では偏差が正になる観測点が 88.3%、負になる観測点が 11.7%となり、ほとんどの観測点で過小評価している。地盤増幅率の偏差が±0.2 以内(0.63~1.58 倍) の観測点は本研究で 80.5%、太田・後藤で 74.0%、

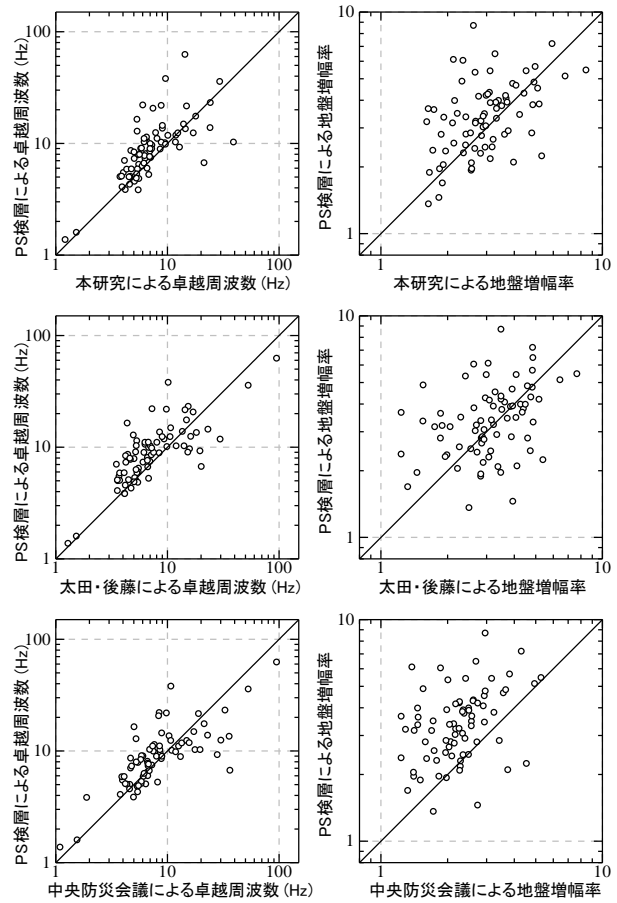


図 1 卓越周波数 (左) と地盤増幅率 (右) における PS 検層と各推定式の関係

中央防災会議で 57.1%となり、本研究による S 波速度推定式を用いた場合に PS 検層による地盤増幅率により近い値をとる観測点が多い。卓越周波数における PS 検層との適合性は中央防災会議による S 波速度推定式を用いた場合が最も高いが、地盤増幅率においてはばらつきが大きく、最も顕著な観測点で PS 検層による地盤増幅率より約 80%小さく算出される。

次に、PS 検層による地盤増幅特性に対して本研究による地盤増幅特性が大きく異なっている観測点と良く一致している観測点の一例として AIC008 と HYG025 の地下構造を各観測点の地盤増幅率も併せて図 2 に示す。なお、S 波速度構造の右外枠の三角マークは PS 検層および各推定式により推定された工学的基盤の位置を示している。AIC008 では PS 検層による卓越周波数と本研究による卓越周波数の偏差が 0.559 と非常に大きい観測点である。AIC008 では深さ 4 m で N 値 50 の岩盤層が現れ、S 波速度は 670 m/s と観測されているが、その地点では深さを考慮した本研究による推定式では 351.3 m/s と推定され、工学的基盤として設定した S 波速度には満たない。以上の要因により、AIC008 では本研究により推定された工学的基盤の位置が PS 検層の結果と比べ大きくずれ、それに伴い地盤増幅特

性が PS 検層と大きく異なる結果となった。このように、深さ 10 m 以浅の浅い層で  $N \geq 50$  の岩盤層が存在する地点では、本研究の S 波速度推定式では工学的基盤の位置が正確に推定できない可能性があるため、地盤増幅特性への適用には留意する必要がある。一方、HYG025 では PS 検層による卓越周波数と本研究による卓越周波数の偏差が -0.010、地盤増幅率の偏差が 0.047 と非常に小さい観測点である。PS 検層による工学的基盤の位置と本研究により推定された工学的基盤の位置では 1 m の誤差はあるが、それ以浅の S 波速度構造は N 値の変動により S 波速度も変動している実際の地盤を良く表現できており、両者の地盤増幅率のスペクトルの形状でも第 1 ピークだけではなく高周波側の形状も多少のずれはあるが両者は似た傾向を示している。以上より、深さ 10 m 以深で  $N \geq 50$  の岩盤層が存在する地点では、本研究による S 波速度推定式は PS 検層の S 波速度構造に近い形で推定でき、PS 検層による地盤増幅特性との適合性が高いと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、全国のボーリングデータに基づいて S 波速度を推定する手法について  $N < 50$  の層と  $N \geq 50$  の層それぞれで検討を行った。  $N < 50$  の層については検討の結果、深さの考慮と土質分類の細分化は S 波速度の推定精度の向上に寄与することが明らかになったため、土質を 10 種類に分類し、それぞれの土質に対して N 値と深さを説明変数とする S 波速度の推定式を提案した。既往の研究との比較を行った結果、提案式の精度は既往の研究よりも高いことを示した。しかし、  $N \geq 50$  の層における推定式は必ずしも十分な精度があるとは言えないため、今後さらなる検討が必要である。次に、推定式の違いによる地盤増幅特性への影響について検討を行った。検討の結果、本研究による推定式を用いた場合では第 1 ピークが低周波側にシフトし地盤増幅率をやや過小評価する傾向にあり、太田・後藤による推定式を用いた場合では第 1 ピークが低周波側

にシフトする傾向が強く、中央防災会議による推定式を用いた場合では地盤増幅率を過小評価する傾向が強いことが推測される。ただし、本研究の S 波速度推定式では、浅層で  $N \geq 50$  の岩盤層が観測される地点では工学的基盤の位置が正確に推定できない可能性があるため、地盤増幅特性への適用には留意する必要がある。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、pp.12-29、2002
- 2) 中央防災会議：地震防災マップ作成技術資料、2005
- 3) 今井常雄・殿内啓司・田中達吉：地震応答解析のための土の動的性質、土と基礎、33(7)、pp. 65-72、1985
- 4) 太田裕・後藤典俊：S 波速度を他の土質的諸指標から推定する試み、物理探鉱、第 29 巻、第 4 号、pp. 429-432、1976
- 5) 加藤巧祐・田守伸一郎：各種土質データに基づく S 波速度推定式の提案、日本建築学会技術報告集、17(36)、pp. 467-471、2011
- 6) 田村勇・山崎文雄：K-NET と横浜市強震計ネットワークの地盤調査データに基づく S 波速度推定式、土木学会論文集、No.696/I-58、pp. 237-248、2002.1
- 7) 防災科学技術研究所：K-NET、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 8) 防災科学技術研究所：ジオ・ステーション、<http://www.geo-stn.bosai.go.jp/>
- 9) 財団法人日本建築センター：ビルディングレター、2002-2014
- 10) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975
- 11) 太田外氣晴、江守勝彦、河西良幸：耐震・振動・制御、共立出版、pp. 339、2001

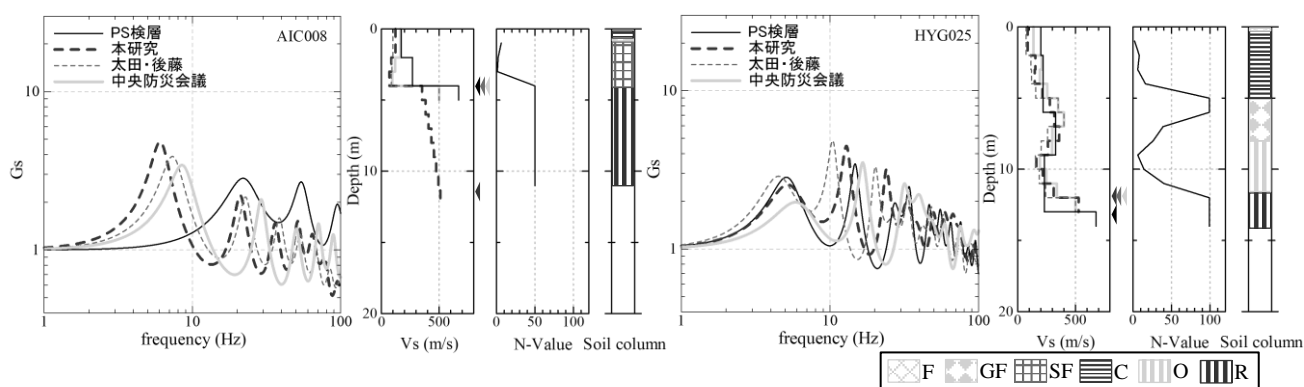


図 2 PS 検層と各推定式による地盤増幅率と地下構造 (左 : AIC008、右 : HYG025)