

平均S波速度と木造家屋応答の関係 —京都府舞鶴市を対象とした検討—

西川 隼人¹・加登 文学²・高谷 富也³・宮島 昌克⁴

¹正会員 舞鶴工業高等専門学校 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234番地)

E-mail: nisikawa@g.maizuru-ct.ac.jp

²正会員 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234番地)

E-mail: kato@maizuru-ct.ac.jp

³正会員 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234番地)

E-mail: takatani@maizuru-ct.ac.jp

⁴正会員 金沢大学 理工研究域環境デザイン学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

本研究では地震動による木造家屋被害の推定に表層地盤情報を活用することを目的として、表層30mの平均S波速度($AVS30$)と木造家屋応答の関係を調べた。検討は京都府舞鶴市を対象とし、市内のボーリング地点におけるS波速度構造の評価や等価線形化法による地盤応答解析を実施した。各対象地点において地盤応答解析で得られた地表波の加速度応答スペクトルと木造家屋の最大応答変形角 R の関係を評価したところ、降伏せん断力係数 C_y が大きくなるほど、短周期の加速度応答スペクトルが R に影響を及ぼすことが分かった。最後に $AVS30$ と R の関係を調べたところ、 $C_y=0.1, 0.3$ の場合は両者に相関関係があることが明らかになった。

Key Words : $AVS30$, seismic response of wooden house, equivalent linear method, Maizuru City

1. はじめに

近年、地震動予測において重要な役割を果たす表層地盤構造に関する情報、例えば表層30mの平均S波速度($AVS30$)¹⁾やボーリング柱状図のデータが全国規模で整備されており、Web上で公開されている(例えば^{2), 3)}。 $AVS30$ は木造家屋の大きな被害に影響を及ぼす周期帯の増幅スペクトルと相関が高い⁴⁾ことから、木造家屋被害を推定する上で有効な指標であると考えられる。しかし、これまでの研究では $AVS30$ を地盤増幅特性の評価に利用しているものの、木造家屋被害の推定に用いた例はほとんど見られない。全国を対象に整備された $AVS30$ によって木造家屋被害の推定が可能となれば、想定地震に対する広域被害予測の上で有益であると考えられる。

本研究では、表層地盤情報を広域的な木造家屋被害推定に活用する際の基礎的な知見を得るために、京都府舞鶴市を例に挙げ、 $AVS30$ と強震時の木造家屋応答の関係を調べた。舞鶴市は全国の主要活断層の一つである上林断層帯を対象とした強震動予測において最大震度6強の揺れが推定されている⁵⁾ことから、この地震の被害予測

を行う上でも本研究は有用であると考えられる。検討において、まず、舞鶴市内のボーリングデータを収集、整理して地盤応答解析に適したものを抽出し、それに基づき対象地点のS波速度構造を求めた。

続いて、求めたS波速度構造から $AVS30$ を計算するとともに、地盤応答解析によって各対象地点の地表面の地震動を評価した。なお、表層地盤による地震動の違いを知る必要があるため、基盤への入力地震動は全ての対象地点で同じと仮定した。基盤と地表面の地震波から求めた加速度応答スペクトルの比を取ることで、地盤の増幅スペクトルを評価した。また、周期ごとに $AVS30$ との相関関係を調べることで、増幅スペクトルにおいて $AVS30$ が影響を及ぼしやすい周期を調べた。

最後に、地表面の加速度応答スペクトルと性能等価加速度応答スペクトル⁶⁾によって、各対象地点の木造家屋の最大応答変形角 R を求め、 $AVS30$ との相関関係を調べた。

2. 地盤データ

(1) ボーリングデータ

本研究では、舞鶴市が収集したボーリングデータを用いて解析を行った。ボーリングデータは、N値50以上の岩(砂岩、泥岩など)まで到達しているものを解析対象とした。その結果、今回、対象とするデータは104個となった。

図-1に舞鶴市内のボーリング位置の分布を示す。ボーリング情報はN値や土質区分、打撃回数、深度などから成っている。この情報に基づき、以下の経験式⁷⁾によってボーリング地点の深さ方向のS波速度分布を求めた。

$$V_s = 62.48 N^{0.218} \cdot H^{0.228} \cdot F \quad (1)$$

ここで、 V_s はS波速度(m/s)、 N はN値、 H は深度(m)、 F は土質区分に関する係数であり、砂の場合は1.073、粘性土は1、礫は1.199である。最下層の基盤のS波速度は一律で600m/sとした。

(2) 平均S波速度

地盤特性を表す指標として地表から深さ30mまでの平均S波速度($AVS30$)が広く用いられていることから、本研究でも $AVS30$ を検査に用いた。

$$AVS30 = 30 / \sum_i d / V_s \quad (2)$$

ここで、 d は各層の層厚(m)である。図-2に $AVS30$ の分布図を示す。ボーリング地点は内山、翠川⁸⁾の研究を参考に表-1の5つのグループに分類した。分布図を見て明らかなように、市東側の方が $AVS30$ の小さい地点が多い。

3. 地盤応答解析

(1) 地表面の地震動評価

2章でまとめた各ボーリング地点の地盤構造を用い、等価線形化法に基づく地盤応答解析手法⁹⁾によって地表面の地震動を評価した。応答解析の際に対象地点各層の密度が必要となるので、 V_s と以下の式¹⁰⁾によって密度 ρ (t/m^3)を求めた。

$$\rho = 0.67\sqrt{V_s/1000} + 1.4 \quad (3)$$

また、地盤材料の非線形特性(ひずみと減衰定数、せん断剛性比の関係)は各層の土質区分に応じて、今津・福武¹¹⁾の研究結果を利用した。

地盤応答解析の際に必要な基盤への入力地震動として平成12年建設省告示第1461号¹²⁾で定められた地震波(以降, 告示波)を用いた. 告示波は式(4)で表される応答スペクトル(図-3)を目標にして, ランダム位相を持つ模擬波に図-4に示すJenningsの包絡曲線¹³⁾を掛けて作成した.

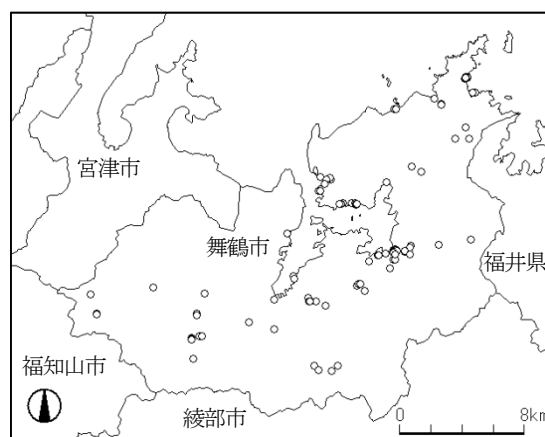


図-1 ボーリング地点の分布

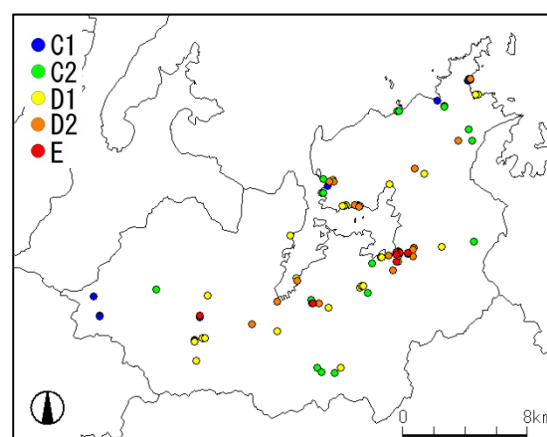


图-2 AVS30 分布

表-1 AVS30による地盤分類

分類	$AVS30(m/s)$	データ数
C1	$460 < AVS30 \leq 760$	10
C2	$360 < AVS30 \leq 460$	20
D1	$250 < AVS30 \leq 360$	38
D2	$180 < AVS30 \leq 250$	25
E	$AVS30 \leq 180$	11

包絡曲線は式(5)で与えられる。なお、告示波と本研究では基盤のS波速度が異なるので、増幅度を補正するための係数 $\sqrt{(0.4 \times 1.82)/(0.6 \times 1.92)}$ を告示波のスペクトル(告示スペクトル)に乗じた。

$$S_a(T) = \begin{cases} (320 + 3000T) & T < 0.16 \\ 800 & 0.16 \leq T < 0.64 \\ \frac{512}{T} & 0.64 \leq T \end{cases} \quad (4)$$

$$E(t) = \begin{cases} 0 & (0 \leq t \leq t_a) \\ ((t-t_a)/(t_b-t_a))^2 & (t_a \leq t \leq t_b) \\ 1 & (t_b \leq t \leq t_c) \\ \exp(-B(t-t_c)) & (t_c \leq t \leq t_d) \end{cases} \quad (5)$$

式(4)の $S_d(T)$ は減衰定数5%の加速度応答スペクトル(cm/s/s), T は固有周期(秒)である. また, 式(5)の $E(t)$ は包絡曲線,

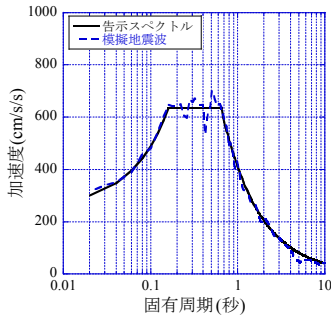


図-3 告示スペクトル

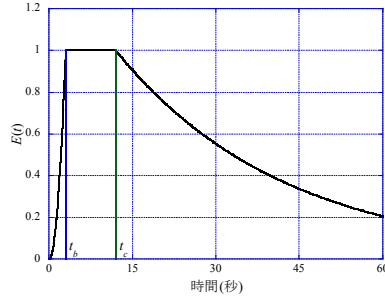


図-4 包絡曲線

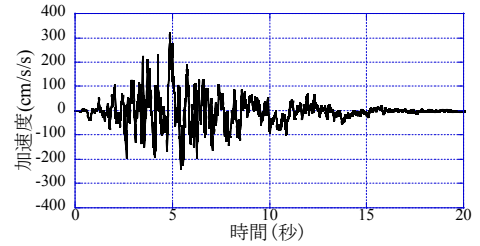


図-5 告示波(模擬地震波)

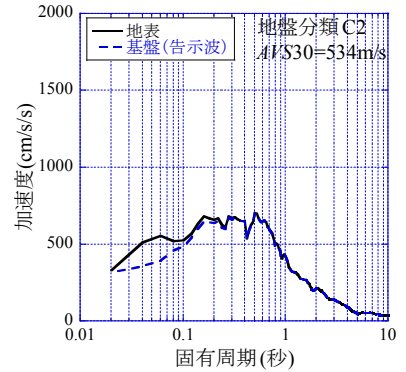
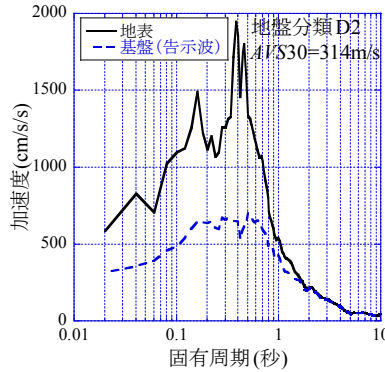
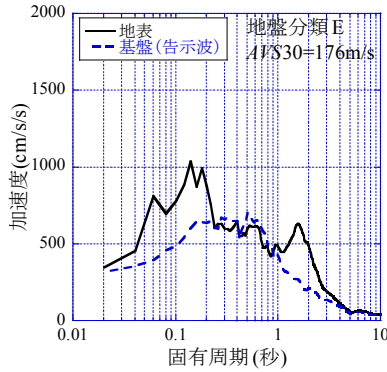


図-6 基盤(告示スペクトル)と地表の加速度応答スペクトル

t は時間(秒)である。 t_b は包絡曲線の主要動部までの時刻、 t_c-t_b は主要動継続時間、 t_d は地震波の継続時間、 B は $-\ln(0.1)/(t_d-t_c)$ である。 t_c-t_a と t_d-t_c は気象庁マグニチュード M_{JMA} と震源距離 X をパラメータとする経験式¹³⁾によって求めた。

$$\begin{aligned}\log_{10}(t_c-t_a) &= 0.212M_{JMA} + 0.161\log_{10} X - 1.071 \\ \log_{10}(t_d-t_c) &= 0.040M_{JMA} + 0.319\log_{10} X + 0.312\end{aligned}\quad (6)$$

本研究では、主要動の継続時間(t_c-t_b)は(t_b-t_a)の3倍とし、 $M_{JMA}=7$ 、 $X=10\text{km}$ とした。

図-5に図-3の告示スペクトルをターゲットに作成した模擬地震波を示す。最大加速度は300cm/s²を超える大きな値となっている。また、図-3の模擬波によるスペクトルを見ると、告示スペクトルとよく対応していることが分かる。

図-5の告示波を基盤への入力地震動として用い等価線形化法によって求めた地表面地震波の加速度応答スペクトルの一例を図-6に示す。入力地震動は同じであるが、S波速度によって地表面の応答スペクトルが大きく異なることが分かる。

(2) 増幅スペクトル

各対象地点について基盤から地表にかけて、どの周期がどれほど増幅したかを見るために、基盤と地表面の地

震波から計算した加速度応答スペクトルの比(以降、増幅スペクトル $G(T)$)を求めた。増幅スペクトルの計算の際には入力地震波の大きさによる地盤応答の違いを見るために、告示波の振幅を1/1000に調整した地震波を基盤への入力として応答解析を行った場合についても計算を行った。

図-7に図-6で示した観測点を対象に求めた増幅スペクトルを示す。地盤分類EとD2の場合は振幅1倍の増幅スペクトルが1/1000倍に比べて全体的に長周期側にシフトしており、大きな入力に起因する地盤の非線形化の影響が現れていると考えられる。1次固有周期を見ると地盤分類Eは0.5から1.78秒、D2は0.2から0.44秒に伸びている。一方、地盤分類C2の増幅スペクトルは振幅による違いは小さく、1次固有周期もほとんど変わらない。

このように図-6、7で例として示した地点では $A/V S30$ による地盤分類と1次固有周期に対応が見られることが分かる。また、 $A/V S30$ が小さいほど増幅スペクトルの長周期成分が大きい傾向にある。このような傾向を解析対象とした全地点について調べた。

図-8に全対象地点の $A/V S30$ と1次固有周期、図-9に $A/V S30$ と増幅スペクトルの対応の一例を示す。図-9には以下の式で表される $A/V S30$ と増幅スペクトルの関係式による値(図中の実線)を合わせて示す。

$$\log_{10} G(T) = c_1 \log_{10} A/V S30 + c_2 \quad (7)$$

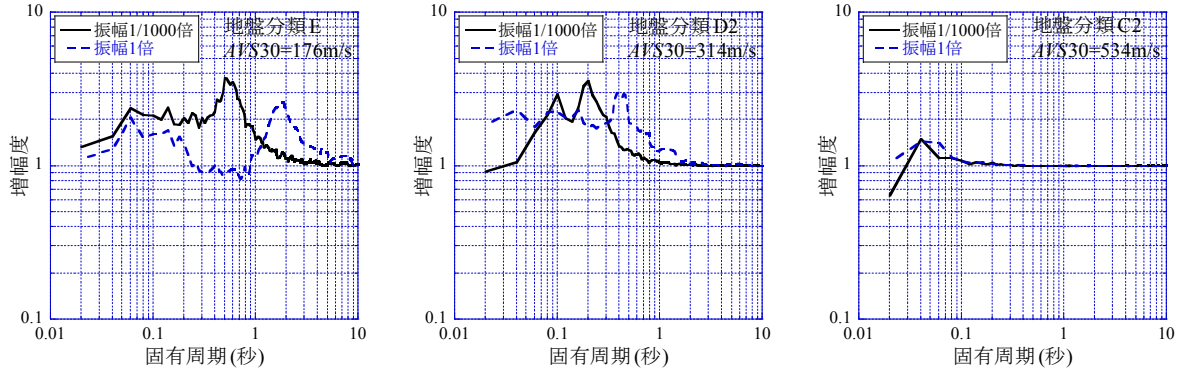


図-7 増幅スペクトル

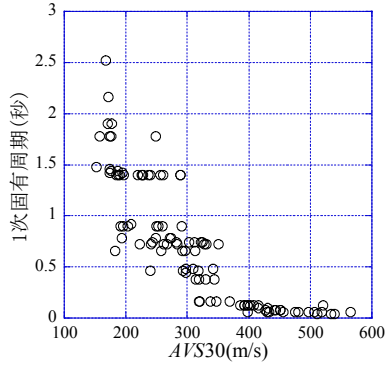


図-8 AI/S30と1次固有周期

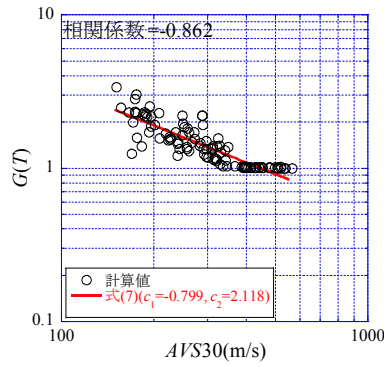


図-9 AI/S30と増幅スペクトルの対応
(固有周期 $T=1.5$ 秒)

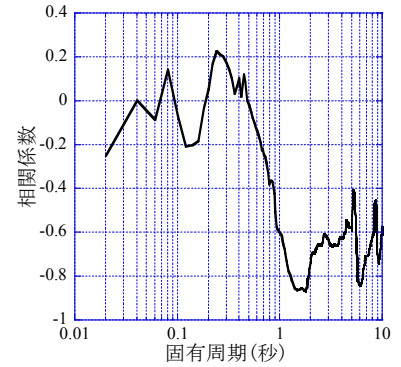


図-10 増幅スペクトルの計算値と
予測値の相関係数

$G(T)$ は固有周期 T の増幅スペクトル、 c_1 、 c_2 は回帰係数である。図-9の計算値は地盤応答解析によって得られた増幅スペクトルである。

図-8を見ると、AI/S30が360m/s以上では1次固有周期のばらつきが小さいが、360m/sよりも小さいとばらつきが大きくなっている。次に図-9を見るとAI/S30と増幅スペクトル $G(T)$ の間には明瞭な相関が見られ、計算値と式(7)から求めた予測値の相関係数は-0.862となっている。

図-10に固有周期0.02～10秒を対象に求めた $G(T)$ の計算値と式(7)による予測値の相関係数を示す。同図を見ると固有周期0.02～0.7秒までは相関係数が-0.2～0.2であり、相関が低い、周期1秒以上では多くの周期で相関係数が-0.8～-0.6の範囲にあり、AI/S30と $G(T)$ に相関があることが分かる。

4. 木造家屋応答の評価とAI/S30との対応

(1) 木造家屋の最大応答変形角の評価

木造家屋の最大応答変形角 R は、更谷ら⁶⁾やHayashi et al¹⁵⁾が提案している性能等価加速度応答スペクトルによって評価した。性能等価加速度応答スペクトルは以下の式で計算される。

$$S_{ae} = (2\pi H_e R / T_e)^2 / F_h \quad (8)$$

ここで S_{ae} は性能等価加速度応答スペクトル、 H_e は木造家屋の等価高さ、 R は最大応答変形角、 T_e は等価周期、 F_h は加速度応答スペクトルの逓減率である。 T_e は降伏時の応答変形角 R_y の値に応じて、以下の式で与えられる。

$$T_e = 2\pi \sqrt{\mu R H_e / C_y g} \quad (R > R_y) \quad (9)$$

$$T_e = 2\pi \sqrt{\{(1 + 9(R / R_y)^{0.7}) / 10\} \mu R_y H_e / C_y g} \quad (R \leq R_y) \quad (9)$$

μ は等価質量と質量の比、 C_y は降伏せん断力係数である。また、 F_h と減衰定数 h は以下の式で与えられる。

$$F(h) = 1.5 / (1 + 10h) \quad (10)$$

$$h = 0.05 + 0.2(1 - (1 / \sqrt{R / R_y})) \quad (11)$$

μ と H_e は更谷らの研究⁶⁾に基づき、それぞれ0.9と4.5mとする。 C_y は0.1, 0.3, 0.5とし、それぞれの C_y に対する S_{ae} を計算した。

図-11に図-6の地表の加速度応答スペクトル $S_d(T)$ と S_{ae} の対応を示す。 $S_d(T)$ と S_{ae} の交点はその地震波に対する最大応答変形角 R となる。 S_{ae} を見ると C_y が小さくなるにつれて、値が大きくなるとともに短周期側にシフトしてい

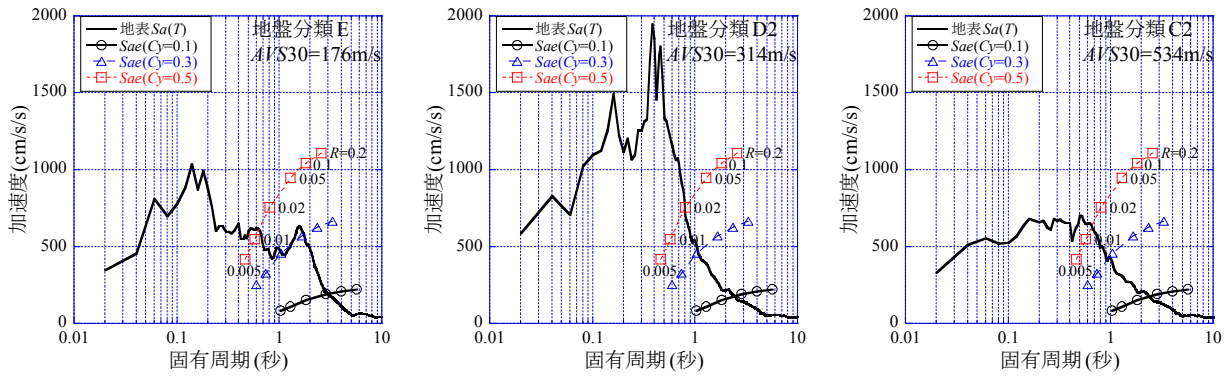


図-11 加速度応答スペクトル $S_a(T)$ と性能等価加速度応答スペクトル S_{ae}

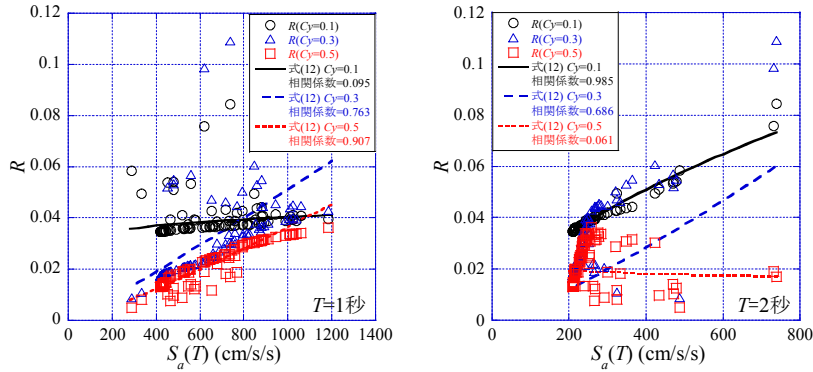


図-12 $S_a(T)$ と R の対応

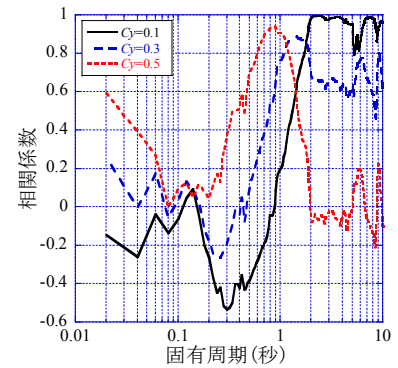


図-13 R の計算値と式(12)による予測値の相関係数

る。図-11を比較すると $C_y=0.1$ の場合は R に大きな差はないが、 $C_y=0.3$ では固有周期1～2秒の加速度が大きい地盤分類Eの R が他よりも明らかに大きい。 $C_y=0.5$ の場合は S_{ae} がさらに短周期側に移動するので、地盤分類D2の R が最も大きくなっており、 C_y によって R に影響を及ぼす $S_a(T)$ の固有周期が変化することが分かる。

全対象地点に対して $S_a(T)$ の固有周期の違いが R に及ぼす影響を調べるために、固有周期ごとに $S_a(T)$ と R の相関関係を調べた。この際、以下に示す $S_a(T)$ と R の関係式を求め、 $S_a(T)$ と S_{ae} から求めた R (計算値) と関係式による予測値の相関係数を求めた。

$$\log_{10} R = c_1(T) \log_{10} S_a(T) + c_2(T) \quad (12)$$

ここで $c_1(T)$ 、 $c_2(T)$ は固有周期 T に対する回帰係数である。

図-12に固有周期1秒と2秒の $S_a(T)$ と R の対応を示す。図中の線は式(13)による予測値であり、凡例には R の計算値と予測値の相関係数を示している。固有周期 $T=1$ 秒の $S_a(T)$ と R を見ると、 C_y が大きくなるほど相関係数が高くなっているが、 $T=2$ 秒では逆に C_y が小さいほど相関係数が高い。

図-13に対象とした全固有周期の R の計算値と式(13)による予測値の相関係数を示す。 $C_y=0.1$ は固有周期1.5秒以上ではほとんどで相関係数が0.8を超える高い値となっ

ている。 $C_y=0.3$ は固有周期1～2秒で相関が高く、 $C_y=0.5$ では固有周期0.6～1.2秒で相関係数が0.8を超える高い値になっており、 C_y による S_{ae} の変化に伴い、 $S_a(T)$ と R の相関の高い周期が短周期側に移動していることが分かる。

(2) AI/S30と最大応答変形角の関係

続いて、AI/S30と木造家屋の最大応答変形角 R の関係を調べた。図-14にAI/S30と R の対応を示す。同図にはAI/S30と R の相関を調べるために求めた式(13)による予測値を合わせて示した。

$$\log_{10} R = c_1 \log_{10} AI/S30 + c_2 \quad (13)$$

図-14を見ると $C_y=0.1$ の場合、AI/S30が200m/s以下では R の変化が緩やかであるが、200m/sよりも小さくなると R が急激に大きくなっている。 $C_y=0.3$ の場合はAI/S30が360m/sよりも小さくなると R が大きくなり、200m/s未満では0.1を超えるものも見られる。 $C_y=0.1$ に比べると全体的に見て R の変動が大きく、AI/S30によって R に違いが生じることが分かる。 $C_y=0.5$ の場合、 $C_y=0.3$ と同様にAI/S30=360m/sを境にAI/S30と R の対応が異なっている。ただし、AI/S30が360m/sよりも小さい場合の状況は異なり、 R のばらつきが大きく、AI/S30と R にほとんど相関が見られない。

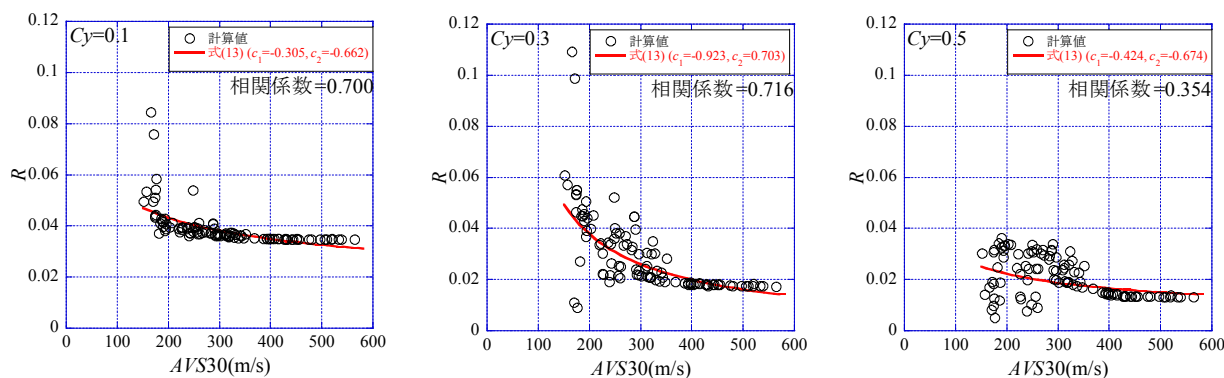


図-14 $A/V S30$ と R の関係

図-10に示すように $A/V S30$ は固有周期1秒以上の増幅スペクトルと相関があることから、この周期帯で $S_d(T)$ と R の相関が高い $C_y=0.1, 0.3$ の場合、 $A/V S30$ と R に相関が見られるものと考えられる。一方、 $C_y=0.5$ の場合、 $S_d(T)$ と R は固有周期0.6～1.2秒で相関が高いが、この周期帯では $A/V S30$ と増幅スペクトルの相関が低い周期も含まれるため、 $A/V S30$ と R の相関が低いものと考えられる。

以上の検討結果より、 $C_y=0.1, 0.3$ の場合、 $A/V S30$ と R に相関が見られることから、これらの耐力を有する木造家屋の被害予測において $A/V S30$ は有効な指標になると期待される。ただし、今回の検討は舞鶴市のボーリングデータに基づくものであるため、今後は他の地域のボーリングデータを用いて検討を行う予定である。また、本研究では告示波を基盤への入力地震動として用いたが、異なる入力地震動を用いた場合についても検討を行う。

5. まとめ

本研究では、表層地盤情報を広域的な木造家屋被害の推定に活用する際の基礎的な知見を得るために、Web上で容易に情報を入手できる $A/V S30$ と強震時の木造家屋応答の関係を京都府舞鶴市を対象に調べた。

検討において、まず、舞鶴市内のボーリングデータを収集、整理して解析に適したものを抽出し、それに基づいて対象地点のS波速度構造を求め、 $A/V S30$ を評価した。次に、地盤応答解析によって各対象地点の地表面の地震動を評価するとともに、基盤波と地表波の応答スペクトルの比(増幅スペクトル $G(T)$)を求め、 $A/V S30$ との相関関係を調べた。その結果、周期1秒以上では $A/V S30$ と増幅スペクトルの相関が良い傾向が見られた。

続いて、全対象地点について地表面の加速度応答スペクトル $S_d(T)$ と性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} から木造家屋モデルの最大応答変形角 R を評価した。その結果、降伏せん断力係数 C_y が大きくなるほど、 S_{ae} は短周期側にシフトした。また、 C_y が大きいほど $S_d(T)$ の短周期成分

が R に影響を及ぼすことが明らかになった。

最後に、全地点の $A/V S30$ と R の相関関係を評価し、 $A/V S30$ が木造家屋の被害推定に利用できるかどうかについて調べた。解析の結果、 $C_y=0.1, 0.3$ の場合、 $A/V S30$ と R に相関が見られたが、 $C_y=0.5$ の場合は両者の相関が低いことが明らかになった。この要因は $C_y=0.1, 0.3$ の場合、 $A/V S30$ と増幅スペクトル、 $S_d(T)$ と R の相関の高い周期帯が概ね対応するが、 $C_y=0.5$ の場合は対応しない周期もあり、その結果、 $A/V S30$ と R の相関が低くなったものと考えられる。

本研究では舞鶴市のみを検討対象としたが、今後は他の地域のボーリングデータを用いて解析を行う予定である。また、今回、告示波を基盤への入力地震動として用いたが、異なる入力地震動を用いた場合についても検討を行うつもりである。

謝辞：本研究では舞鶴市から提供して頂いたボーリングデータを利用させて頂きました。ここに記してお礼申し上げます。

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報告集, No.442, pp.71-78, 1992.
- 2) 地震ハザードステーション(J-SHIS): <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 3) ジオ・ステーション(Geo-Station): <http://www.geostn.bosai.go.jp/jps/>
- 4) 翠川三郎, 駒澤真人, 三浦弘之: 横浜市高密度強震計ネットワークの記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度との関係, 日本地震工学会論文集, 第8巻, 第3号, pp.19-30, 2008.
- 5) 京都府: 京都府地震被害想定調査委員会資料, 2007.
- 6) 更谷安紀子, 森井雄史, 林 康裕: 木造住宅の経年劣化を考慮した最大地動速度に対する損傷確率曲線, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.150-153, 2006.
- 7) 太田 裕, 後藤典俊: 横波速度を推定するための実験式とその物理的背景, 物理探鉱, 第31巻, 第1号, pp.8-17,

- 1978.
- 8) 内山泰生, 翠川三郎: 地震記録および非線形応答解析を用いた地盤分類別の地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, No.571, pp.87-93, 2003.
 - 9) 吉田 望, 末富岩雄: DYNEQ・等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株)技術研究所報, pp.61-70, 1996.
 - 10) 阿部康彦, 小林喜久二, 大島 豊, 真下 貢, 小林啓美: 地震動の上下動・水平動スペクトル振幅比の特性とその応用に関する研究—その 3 上下動・水平動スペクトル振幅比に基づく深部地下構造の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B- I , pp.403-404, 1991.
 - 11) 今津雅紀, 福武毅芳: 動的変形特性のデータ処理に関する一考察, 第 21 回土質工学研究発表会, pp.533-536, 1986.
 - 12) 建設省: 超高層建築物の構造計算の基準を定める件(平成 12 年建設省告示第 1461 号), 2000.
 - 13) Jennings, P. C. and Housner, G. W. and Tsai, N. C. : Simulated earthquake motions, Technical Report, *E. E. R. L.*, Pasadena, 1968.
 - 14) 佐藤智美, 片岡正次郎, 奥村俊彦: K-Net強震記録に基づく工学的基盤における加速度応答スペクトルと経時特性の推定式の検討, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp.615-620, 2002.
 - 15) Y. Hayashi, A. Nii, and T. Morii : Evaluation of building damage based on equivalent-performance response spectra, Proceedings of the 14th WCEE, 2008.

(2012. 9. 21 受付)

RELATIONSHIP BETWEEN AVERAGE SHEAR WAVE VELOCITY AND SEISMIC RESPONSE OF WOODEN HOUSE -A CASE STUDY IN MAIZURU CITY, KYOTO PREFECTURE-

Hayato NISHIKAWA, Yoshinori KATO, Tomiya TAKATANI and Masakatsu MIYAJIMA

This study examines a relationship between average shear velocity in the upper 30m($A/S30$) and seismic response of wooden house, in order to take advantage of information of subsurface structure for the evaluation of a damage of wooden house. We evaluated shear wave structures of subsurface and ground motions at surface by ground response analysis based on equivalent linear method at boring point in Maizuru City, Kyoto Prefecture. A relationship between acceleration response evaluated from ground motion at surface and maximum drift angles of wooden house(R) is investigated. It was found that acceleration response with short period influence R as base shear coefficient(C_y) of the house becomes large. Finally, it is clarified that $A/S30$ is correlate to R for C_y is equal to 0.1 or 0.3.