

地盤の非線形性を考慮した堆積地盤での気象庁計測震度の簡易推定法

岐阜大学工学部 正会員 古本吉倫 杉戸真太 能島暢呂 鈴木貴詞

1. はじめに 地震動波形により求められる気象庁計測震度は、個々の地点の地震動強度を表すだけでなく、地震被害を把握するための指標として、防災計画上の見地からも今後の利用が期待されている。一方、一般の沖・洪積地盤において地震動予測を行い、多数の地点において気象庁計測震度を求める場合、想定された基盤地震動から、重複反射理論により地表地震動を個々の地点ごとに計算するには、応答解析のための地盤構造が必要となり大変煩雑である。このような場合、比較的容易に得られる表層の地盤特性を考慮した変換係数を掛けることにより、基盤レベルでの計測震度を簡単に地表での計測震度に変換する手法が有効である。本研究では、地盤構造が得られているわが国における強震観測点を選定し、種々の入力レベルの地震動による地震応答解析の結果に基づいて、基盤計測震度から堆積地盤表面での計測震度を得るための変換係数をモデル化した。

3. 地盤パラメータ^{[2],[3]} 地表面下 15 ~ 20m 程度の軟弱さを連続量で表す指標 S_n は、以下のように N 値により与えられる。

$$S_n = 0.264 \int_0^{d_s} \exp\{-0.04N(x)\} \exp(-0.14x) dx - 0.885 \quad (1)$$

ただし、 $N(x)$:深さ $x(m)$ における N 値、 d_s :ボーリング資料の深さである。また、せん断波速度が 400 ~ 600m/sec 程度のいわゆる工学的基盤までの深さを $d_p(m)$ とする。ごく表層付近の地盤の状態は S_n で、さらに深部の概略的な特性は d_p でそれぞれ表されることから、この 2 つのパラメータにより異なる振動数の地盤震動の特徴を把握できるものと考えられる。表 1 には解析対象とした 53 地点の地盤モデルのパラメータうち、実際にモデル化に使用したものを示した。

3. 工学的基盤での非正常地震動シミュレーション 沖・洪積地盤とその真下の基盤面での強震記録は、徐々に蓄積されつつあるとはいえ、比較的大きな地震による記録が少ないのが現状である。そこで、筆者らが提案した工学的基盤面での地震動データに基づく非正常地震動予測モデル (EMPR)^[4] を用いて、工学的基盤面でのシミュレーション地震動を算出する。算出した地震動を種々の地盤特性を有する沖・洪積地盤の基盤への入力とし、周波数依存性を考慮した等価ひずみによる等価線形化手法 (FDEL)^[5] により、地表地震動を算出した。このようにして得られたシミュレーション地震動に基づき、基盤面と地表面での計測震度の変換係数を求める。図 1 に、基盤地震動を算出するマグニチュード M 、震源距離 R の組合せを示した。シミュレーションは、 $M=5.0 \sim 8.0$ 、 $R=10 \sim 300$ km の範囲で 56 組とし、各組合せごとに初期位相角の組合せを変化させた 7 成分ずつ合計 392 成分のサンプル波を得た。

4. 工学的基盤での計測震度の堆積地盤面への変換 ここでは文献 [1] の方法に従い、工学的基盤面での地震動強度と堆積地盤での地震動強度の応答倍率を、変換係数 β と定義し、堆積地盤での地震動強度 X_s を工学的基盤での地震動強度 X_r および変換係数 β により $X_s = \beta \cdot X_r$ の形で推定するモデルを検討する。図 2,3 には、シミュレーション波形により求めた計測震度、実効加速度 (対数関数による定義式によって、計測震度と等価とみなせる)、ならびに最大加速度により、代表的な条件の地盤について、基盤面から地表面への変換係数を求めた例を示す。図中それぞれ横軸は、最大加速度、実効加速度、計測震度であり、縦軸は、最大加速度および実効加速度については、地盤応答解析により得られる堆積地盤でのそれぞれの地震動強度の応答倍率 (変換係数 β)、計測震度に関しては堆積地盤での計測震度と基盤での計測震度の差を示している。図 2 は比較的堅固な地盤、図 3 は比較的軟弱な地盤の例である。

軟弱な地盤 (図 3) においては、入力地震動強度に依存した地盤の非線形性が現れる。すなわち、基盤入力地震動のレベルが小さい場合には実効加速度の変換係数 β が大きく、反対に基盤入力地震動のレベルが大きい場合には変換係数 β が小さくなり、堅固な地盤の場合とそれほど変わらなくなることがわかる。

表 1. 強震観測地点の地盤パラメータ

地点名	S_n	$d_p(m)$
日吉	0.880	31.00
藤沢	0.852	35.00
南砂	0.758	103.00
品川-S	0.725	28.90
越中島	0.699	100.00
新大田	0.640	39.20
青山	0.567	21.50
板島橋	0.514	16.50
釧路	0.486	27.30
与野	0.479	41.00
細島-S	0.466	51.00
ポートアイランド	0.415	83.00
知多	0.359	20.32
総合技術研究所	0.256	97.00
高砂発電所	0.168	100.00
豊田	0.141	20.45
寒川	0.128	55.00
室蘭-S	0.006	14.50
東神戸大橋	-0.046	37.50
御前崎	-0.152	6.60
小名浜-事-S	-0.232	8.30
飛田給	-0.257	17.00
出水	-0.391	10.00
長篠	-0.417	17.35
宮之城	-0.653	11.80

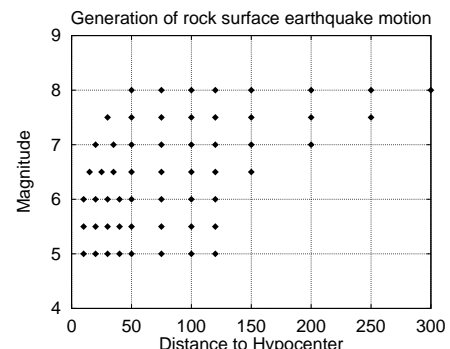


図 1. EMPR による地震動シミュレーションの M と R の分布

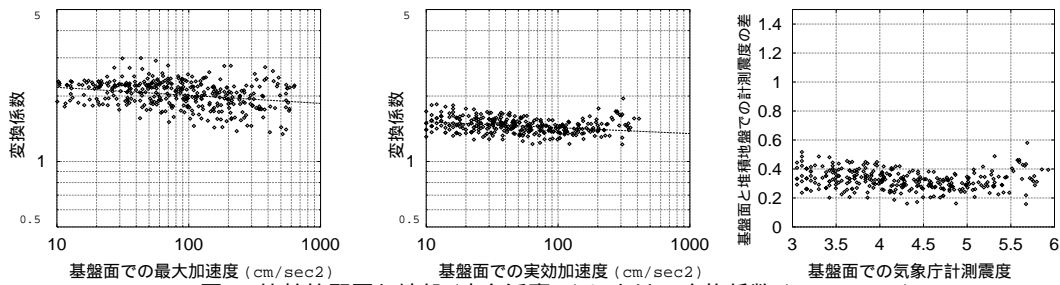


図 2. 比較的堅固な地盤 (小名浜事-S) における変換係数 ($S_n = -0.232$)

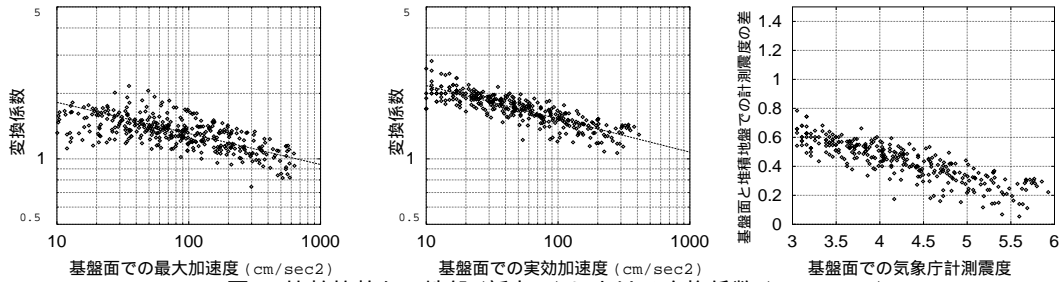


図 3. 比較的軟かい地盤 (新大田) における変換係数 ($S_n = 0.640$)

5. 変換係数のモデル化 以上のシミュレーション結果に基づき、変換係数をモデル化した。図 2,3 における直線で示される変換係数 β の回帰直線を各地点ごとに求め、地盤パラメータ S_n および dp と回帰直線の定数項とその傾きとの関係を検討した。その結果、各地震動強度において定数項および傾きと地盤パラメータ S_n とは強い相関が見られたが、 dp との相関はほとんどなかった。従って、変換係数のモデル化に用いる地盤のパラメータとして S_n のみ考慮することとした。表 2 に各地震動強度の変換係数を得るための式を示した。

表 2. 各地震動強度の変換係数

$\beta_{ae} = 10^{A_{0e} + A_{1e} \log A_{er}}$	$A_{0e} = 0.11 e^{2.09 - S_n}$	$A_{1e} = 0.0 (S_n < 0.34), A_{1e} = -0.35 S_n + 0.12 (S_n \geq 0.34)$
$\beta_a = 10^{A_{0a} + A_{1a} \log A_r}$	$A_{0a} = 0.15 e^{0.95 - S_n}$	$A_{1a} = 0.0 (S_n < 0.17), A_{1a} = -0.18 S_n + 0.03 (S_n \geq 0.17)$
$\beta_v = 10^{A_{0v} + A_{1v} \log V_r}$	$A_{0v} = 0.07 e^{2.40 - S_n}$	$A_{1v} = 0.0 (S_n < 0.24), A_{1v} = -0.21 S_n + 0.05 (S_n \geq 0.24)$
$\beta_d = 10^{A_{0d} + A_{1d} \log D_r}$	$A_{0d} = 0.03 e^{2.24 - S_n}$	$A_{1d} = 0.0 (S_n < 0.44), A_{1d} = -0.09 S_n + 0.04 (S_n \geq 0.44)$

β_{ae} : 実効加速度に関する変換係数, β_a : 最大加速度に関する変換係数, β_v : 最大速度に関する変換係数, β_d : 最大変位に関する変換係数。

A_{er} : 基盤面での実効加速度, A_r : 基盤面での最大加速度, V_r : 基盤面での最大速度, D_r : 基盤面での最大変位。

I_r を基盤での計測震度, I_s を堆積地盤での計測震度とすると、表 2 の実効加速度の変換係数を用いることにより、計測震度の変換式が次式で得られる。

$$I_s = I_r + 2 \log \beta_{ae} \quad (2)$$

6. 実記録との比較 図 4 に兵庫県南部地震における鉛直アレー観測地点での記録と、ここで提案した実効加速度の変換係数のモデルとの比較を示した。図 4 (a), (b) は表層近傍で液状化現象がみられた地盤の例であり、このように液状化してしまうような場合には、実際の記録よりも、変換係数による推定値の方が過大になるが、図 4(c) のように液状化していない地盤の場合ではよく対応していることがわかる。

謝辞 本研究で用いた地盤モデルは、運輸省港湾技術研究所、建設省土木研究所、関西電力、東京電力、神戸市開発局、北海道開発局、K-net、阪神高速道路公園ならびに震災予防協会データベースに収録されている強震観測地点での地盤資料に基づいたものである。記して深謝の意を表する次第である。

参考文献 [1] 杉戸真太, 亀田弘行, 後藤尚男, 廣瀬憲嗣: 工学的基盤と沖・洪積地盤面の地震動の変換係数-表層地盤の非線形特性を考慮した推定モデル- 土木学会構造工学論文集 Vol.32A pp.789-799, 1986. [2] Kameda, H., Sugito, M. and Goto, H.: Microzonation and Simulation of Spatially Correlated Earthquake Motions, Proc. Third International Microzonation Conference, Seattle, Vol. III, pp.1463-1474, 1982. [3] 杉戸真太, 亀田弘行: 地震動予測における地盤条件の影響について, 土木学会第 38 回年次学術講演会, I-418, 1983. [4] 洞谷元司, 杉戸真太, 古本吉倫, 杉山武: 非定常スペクトル重ね合わせによる強震動予測法の再検討, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集 I(B), pp.550-551, 1998. [5] 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/II-27, pp.49-58, 1994.

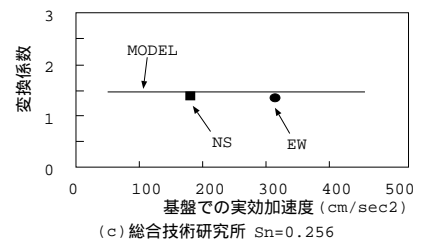
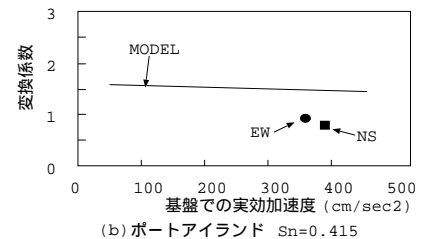
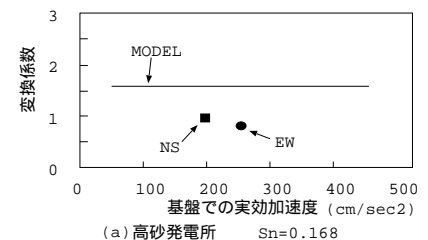


図 4. 実効加速度におけるモデルと実記録の比較