

変換係数による堆積地盤での計測震度の推定法

古本 吉倫¹・杉戸 真太²・能島 暢呂³・鈴木 貴詞⁴

¹正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

²正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

³正会員 博士(工学) 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

⁴正会員 (株)シーテック (〒467-8520 名古屋市瑞穂区洲雲町 445)

工学的基盤レベルで与えられる計測震度に対応する堆積地盤での計測震度を、地盤の応答解析をすることなく簡便に推定する方法を提案した。堆積地盤の地盤パラメータとしては、表層地盤の軟弱さを表す定量的指標 S_n を用いた。種々のレベルの基盤地震動時刻歴波形をシミュレーションによりもとめ、種々の地盤特性を有する強震観測点の地盤モデルを対象として地盤応答解析を行い、その結果に基づいて、最大加速度、最大速度、実効加速度の工学的基盤から堆積地盤への変換係数をモデル化した。さらに、実効加速度の変換係数を用いることにより計測震度を変換するモデルを提案した。

Key Words : Conversion factor, JMA seismic intensity, ground motion amplification, Bed rock and soil surface strong motion, Nonlinear amplification effect

1. はじめに

地震動の時刻歴波形から算出される気象庁計測震度は、地震発生直後における地震被害を把握するための指標として、さらには、地域地震防災計画での想定地震による地震動強度として活用される機会が多くなりつつある。地震動の強度は、ごく表層付近の地盤特性に大きく依存することがよく知られており、したがって、広域における地震動の分布を推定するためには、表層地盤に関する大量のデータが必要になる。計測震度が時刻歴波形から算出するものであるため、震度分布を密にしかも広域で求めるためには、大量の数値計算が必要となる。

この場合、通常入手可能な簡単な地盤パラメータにより、震度の違いを簡便に推定する手法が有効である。そこで、表層地盤の地震応答解析をすることなく基盤レベルで与えられる計測震度などの地震動強度を堆積地盤上での地震動強度に変換する簡易推定法について検討した。すなわち、工学的基盤での地震動強度を Y_r 、対応する堆積地盤での地震動強度を Y_s とし、与えられる Y_r より次式により Y_s を推定するモデルを考える。

$$Y_s = \beta \cdot Y_r \quad (1)$$

ここに、 β は変換係数であり、表層地盤に関するパラメータおよび基盤相当の地震動強度 Y_r の関数としてモ

デル化する。これにより、入力地震動強度に依存する地盤の非線形性の影響を変換係数 β に取り入れることができる¹⁾。

2. 地盤パラメータ

表層地盤に関するパラメータには、表層地質区分のような定性的なものから速度構造のように詳細なものまで様々なものがある。都市域など広域な範囲においてある密度でもって一様に得られる地盤パラメータとなると、たとえば 500m メッシュ程度ごとの地質区分や自治体の被害想定で使われるメッシュに対応した N 値分布モデルがある。

ここでは、 N 値分布から連続量として定義される地盤の軟弱さの指標 S_n ²⁾ や工学的基盤までの深さ dp をとりあげ、計測震度の簡便な推定法に取り入れることを考える。

地盤の軟弱さの指標 S_n は、地表面下 15~20m 程度の軟弱さを連続量で表現したもので、わが国の強震記録に基づいて地震動強度の地盤特性によるばらつきを最もよく説明するように以下のように算定される。

$$S_n = 0.264 \int_0^{d_p} \exp\{-0.04N(x)\} \exp(-0.14x) dx - 0.885 \quad (2)$$

表1 強震観測地点の地盤パラメータ

サイト名	Sn値	dp(m)	サイト名	Sn値	dp(m)	サイト名	Sn値	dp(m)
日吉	0.880	31.00	山下変S	0.418	35.00	大分S	-0.013	12.50
藤沢	0.852	35.00	知多	0.359	20.32	釧路事S	-0.034	52.00
南砂	0.758	103.00	総合技術研究所	0.256	97.00	八戸S	-0.048	180.00
品川S	0.725	28.90	高砂発電所	0.168	100.00	横川	-0.054	12.00
越中島	0.699	100.00	海南港変電所	0.152	66.50	宮古S	-0.135	11.60
新大田	0.640	39.20	豊田	0.141	20.45	御前崎M	-0.152	6.60
阿久根	0.610	19.95	寒川	0.128	55.00	小名浜事S	-0.232	8.30
青山	0.567	21.50	蒲郡	0.099	20.34	飛田給	-0.257	17.00
塩釜工場S	0.527	16.75	山下第6S	0.083	20.22	津和野	-0.304	9.80
板島橋	0.514	16.50	宮崎M	0.041	15.90	出水	-0.391	10.00
与野	0.479	41.00	豊橋	0.015	20.50	長篠	-0.417	17.35
作手	0.467	20.45	十勝M	0.013	16.20	藤岡	-0.435	6.70
細島S	0.466	51.00	室蘭S	0.006	14.50	釜石M	-0.639	4.30
下鶴間	0.459	53.00	名古屋	-0.013	20.38	宮之城	-0.653	11.80

また、せん断波速度で 400~600m/sec 程度のいわゆる工学的基盤までの深さ dp も表層地盤特性を表す一つのパラメータとして用いられることが多い。

以上の2つの地盤パラメータ S_n および dp の変換係数 β への適用性について検討することとした。

3. 工学的基盤での強震動シミュレーションと地盤震動解析

表-1 に示す種々の地盤において様々な強度レベルの地震動入力による地盤応答解析を行い、そのシミュレーションの結果に基づいて、工学的基盤で与えられる地震動強度を簡便に堆積地盤上の強度に変換するモデルを提案する。基盤での地震動シミュレーションには、筆者らが提案した工学的基盤での非定常強震動シミュレーションモデル³⁾を用いた。図-1 に示すマグニチュード M と震源距離 R に対応する基盤地震動を算出した。これらは、 $M=5.0 \sim 8.0$ 、 $R=10 \sim 300\text{km}$ の範囲で 56 組あり、各組み合わせに対し、一様乱数で与えられる非定常スペクトルの 7 種の初期位相角による合計 392 成分のサンプル波を得た。

得られた基盤地震動を、表-1 に示す地盤への入力地震動とし、それぞれの地点における地盤構造モデルに対して地盤応答解析を行った。解析には、等価ひずみの周波数特性を考慮した修正等価線形化法 FDEL⁴⁾を用いた。図-2 には、最大加速度、気象庁計測震度の算定に用いる実効加速度、さらに計測震度について工学的基盤での値に対する堆積地盤での値の比を示した。各図の横軸は、解放基盤での地震動強度を表している。図-2(a)は、表層が比較的堅く基盤が浅い地盤（小名浜事-S 地盤）、図-2(b)は、表層が比較的軟弱で基盤が深い地盤（品川-S 地盤）における例である。両地点において、基盤での地震動強度のレベルが高くなるに従い堆積地盤への増幅率（ここ

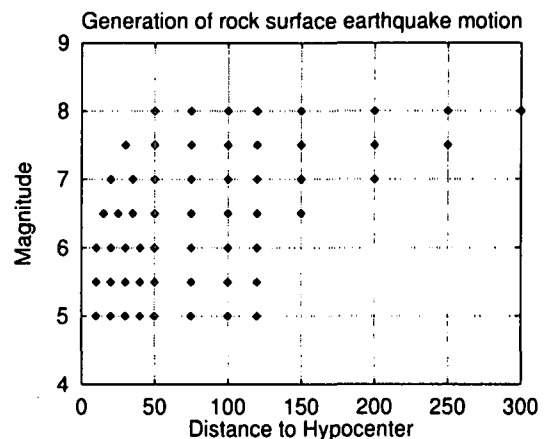


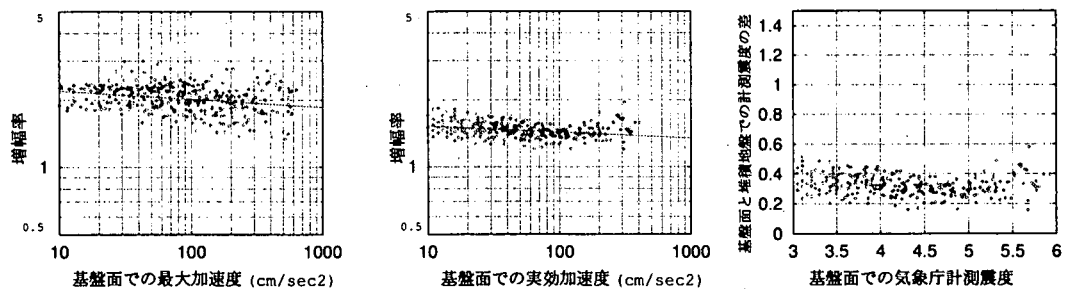
図-1 基盤地震動をシミュレーションの対象としたマグニチュード M 、震源距離 R の分布

では変換係数)が低下することがわかる。また、表層が軟弱な図-2(b)の場合では、基盤での最大加速度、実効加速度の増加に伴う増幅率の低下がより著しく、軟弱地盤での非線形性の特徴がうかがわれる。図-2(a)、(b)の右の図は、実効加速度から得られる計測震度について、基盤での計測震度を横軸に、基盤と対応する堆積地盤での計測震度の差を縦軸に示したものである。

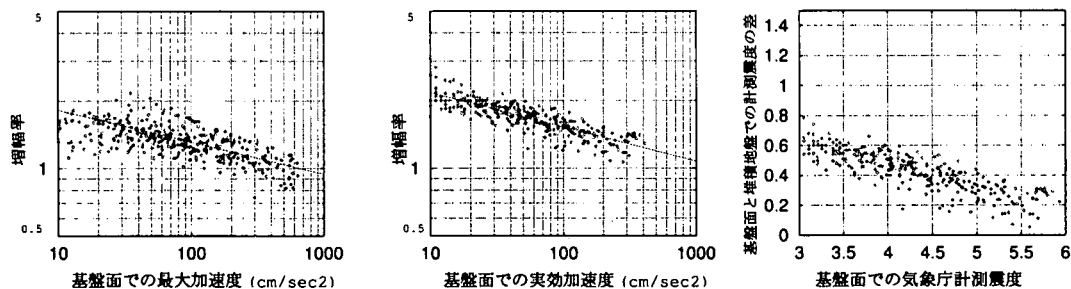
4. 変換係数のモデル化

以上のシミュレーション結果に基づき式(1)に示す変換係数 β を以下の手順によりモデル化した。

(1)各地点毎に得られる地震動強度（最大加速度、最大速度、実効加速度）の増幅率は、図-2 に見られるように地震動強度が大きいほど減少する傾向にあり、それは地盤条件によって異なる。そこで、図-2 の各図中に示されるように、地点毎にまた地震動強度毎に増幅率を地震動強度の 1 次関数として最小二乗法により直線で近似

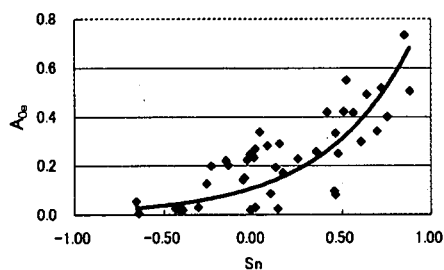


(a) 比較的堅固な地盤 (小名浜事-S, $S_n = -0.232$)

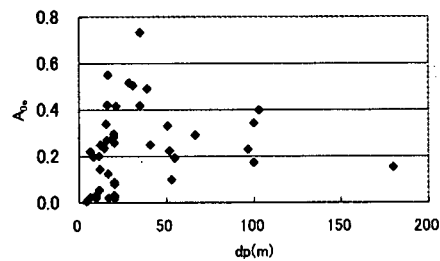


(b) 比較的軟かい地盤 (新大田, $S_n = 0.640$)

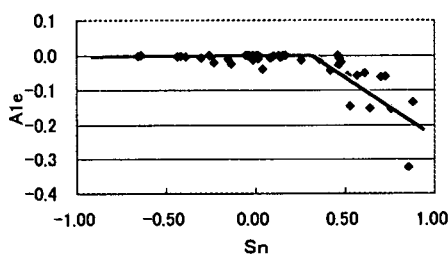
図-2 基盤での地震動強度に対する堆積地盤での地震動強度の比の分布



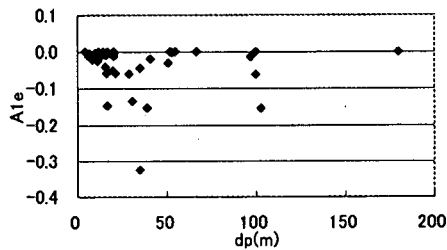
(a) S_n と A_{0e} の関係



(b) dp と A_{0e} の関係



(c) S_n と A_{1e} の関係



(d) dp と A_{1e} の関係

図-3 変換係数の回帰直線の定数項、傾きと地盤パラメータとの関係(実効加速度の場合)

表 2. 各地震動強度の変換係数

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

β_{ae} : 実効加速度についての変換係数, β_a : 最大加速度についての変換係数, β_v : 最大速度についての変換係数,

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,

する。したがって、各地点毎、さらに各地震動強度毎に増幅率の直線近似式が得られる。

(2)このようにして得られた回帰直線の定数項 A_0 および傾き A_1 と、地盤パラメータ S_n および dp との関係を検討した結果、定数項と傾きがともに地盤パラメータ S_n とは相関があるが基盤深さ dp とは系統的な関係が見出せなかった。図-3 は、実効加速度の定数項および傾きについて、地盤パラメータ S_n および dp との関係を示したものである。

(3)以上のことから、最大加速度、最大速度、実効加速度の定数項 A_0 を S_n の2次曲線で最小二乗法により近似した。図-3(a)に、その例を示した。また、傾き A_1 については、図-3(c)に見られるように S_n がある値までは一定値を取り、表層地盤がある程度以上軟弱になると減少する傾向がみられるため、2本の直線により近似した。

以上のモデル化により、最大加速度、最大速度、実効加速度は、基盤レベルで与えられるそれぞれの地震動強度とその地盤の S_n 値から堆積地盤での値に変換される。また、計測震度 I は実効加速度 A_e の関数として次式により与えられる。

$$I = 2 \log A_e + K \quad (3)$$

ここに、 K は定数である。

したがって、堆積地盤における計測震度 I_s は基盤レベルでの計測震度 I_r およびそれに対応する実効加速度の変換係数 β_{ae} から次式により推定される。

$$I_s = I_r + 2 \log \beta_{ae} \quad (4)$$

表-2 に、各地震動強度の変換係数を求める式を示した。なお、図-2 における縦軸は、解放基盤と堆積地盤における地震動強度との比を表しており、これらをモデル化したものを変換係数と呼ぶことにした。

5. 兵庫県南部地震における記録との比較

兵庫県南部地震における鉛直アレー観測点の記録と、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図-4 に示した。ただし、図-4(a), (b)は、表層近傍における飽和砂層で液状化現象が見られた地盤の例であり、液状化による増幅率の著しい低下により、モデルによる変換係数から大きく離れている。一方、図-4(c)のように液状化していない地盤の場合では、この場合良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、K-net、阪神高速道路公団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。

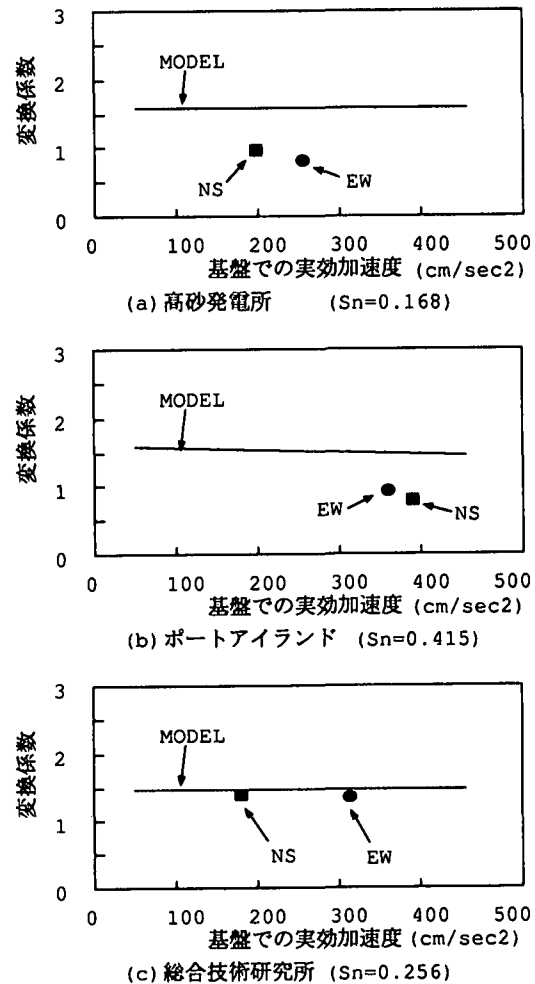


図-4 実効加速度におけるモデルと実記録の比較

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・洪積地盤の地震動の変換係数, 一表層地盤の非線形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. of Third International Microzonation Conference, Seattle, Vol. III, pp.1463-1474, 1982.
- 3) 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 (B), pp.550-551, 1998.
- 4) 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/III-27, pp.49-58, 1994.