

(35) 実測強震記録に基づく基盤地震動の推定法に関する検討

建設省土木研究所 正員 田村敬一
長野県 “ 黒岩 敏
建設省土木研究所 “ 相沢 興

1. はじめに

現在までの強震観測は地表面上における観測を主体としており、観測記録をもとにした地震動の距離減衰式¹⁾、再現期待値の推定法²⁾等の地表面上における地震動を工学的に予測する方法が提案されている。一方、近年の構造物の大型化、軟質地盤における建設事業の推進に伴い、耐震設計においては基盤面上での入力地震動（基盤地震動）を設定する事例が増えてきている。基盤地震動を設定する方法としては、地表面地震動の振幅を単純に低減させる方法から地盤の地震応答解析による方法まで各種の方法が考えられるが、簡便でかつ精度よく基盤地震動を推定する方法は確立されていないのが現状である。そこで、本報文では、地表-地中地震観測記録をもとに、地表面地震動および当該地点の地盤条件から工学的な基盤面上における地震動を推定する方法について検討した。ここで、工学的な基盤面は各地点について統一的にせん断波速度が300m/s以上もしくはN値が50以上の土層の上面とし、地中地震観測点の位置が工学的な基盤面と一致していない場合には地盤の地震応答解析により基盤地震動を算出した。基盤地震動の推定は、耐震設計上重要な加速度応答スペクトルを各固有周期ごとに推定することにより行った。地盤条件を表す指標としては基盤面までの深度、表層と基盤層のインピーダンス比等を考慮した。これらの指標を説明変数として地表面の加速度応答スペクトルから基盤面の加速度応答スペクトルを推定する回帰式を提案した。

2. 解析対象地点・記録

解析対象とした地点は、地中地震観測が実施されている駿河湾沿岸の高密度強震観測地点（13地点）³⁾、東京湾沿岸の地中地震観測地点（3地点）⁴⁾および土木研究所構内の高密度強震観測地点（2地点）⁵⁾の合計18地点である。図1は解析対象地点における地盤の特性値⁶⁾の頻度分布を示したものであり、地盤の特性値が0.6秒程度以上の比較的軟質地盤が多いことがわかる。解析対象記録は、18地点で得られた合計80組の地表-地中地震記録である。図2に地表面における最大加速度の頻度分布を示す。図2より解析対象記録の大部分は最大加速度が100gal以下の比較的加速度レベルの低い記録であることがわかる。

3. 地盤の地震応答解析

地表面および1. で定義した工学的な基盤面上において実測記録が得られている場合には、実測記録から直接求めた加速度応答スペクトルを検討対象とした。地表面もしくは基盤面のいずれかにおいて実測記録が得られていない場合、または、地中地震観測地点が工学的な基盤面よりも下方に位置する場合には地盤の地震応答解析を行い、地表-地中記録を算出した。地震応答解析には、一次元の重複反射理論に基づく解析プログラムSHAKE⁷⁾を使用した。地震応答解析の一例として駿河湾沿岸の相良地区高密度強震観測場No. 8地点における解析結果を示す。当該地点の地盤条件は図3に示すとおりである。強震計は地表面上および地表面下36mの2箇所に設置されている。工学的な基盤

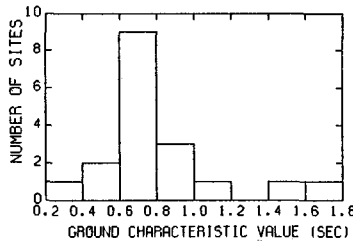


図1 地盤の特性値の頻度分布

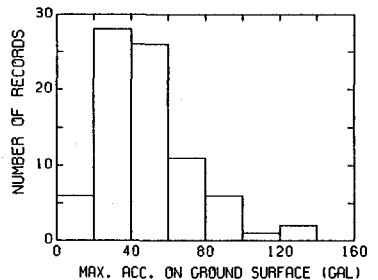


図2 最大加速度の頻度分布

面はせん断波速度が345m/sであるD_g層の上面、すなわち地表面下24.5mに設定することにした。図4は、1983年11月24日静岡県西部沿岸の地震（マグニチュード5.0、震央距離45km）の記録に対する最大加速度の深度分布を示したものである。ここで、地震動の入力位置は地表面とした。図4からわかるように、地中地震計が設置されている最下層における最大加速度の解析値は実測値とよく一致している。図5は、地表面および工学的な基盤面における減衰定数0.05の加速度応答スペクトルを示したものである。図5より固有周期0.3～0.7秒程度の範囲における加速度応答スペクトル値の増幅が大きいことがわかる。

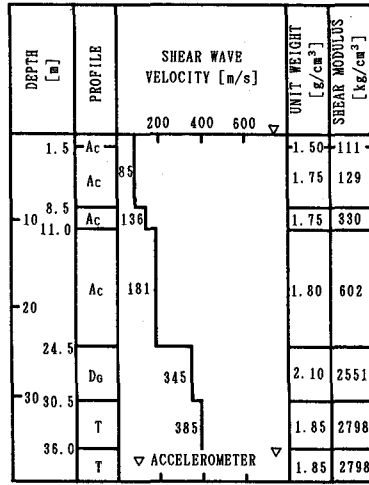


図3 相良地区高密度強震観測場No. 8地点の地盤条件

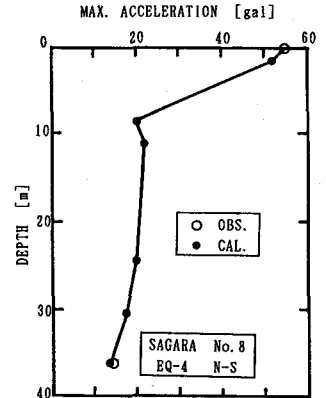


図4 最大加速度の深度分布（相良No. 8地点）

4. 基盤地震動の推定

地表面記録および基盤面記録の各々について0.1～5秒の11個の固有周期に対して減衰定数0.05の加速度応答スペクトル値を算出し、両者の関係に及ぼす地盤条件の影響について検討した。図6に固有周期0.2秒および1秒の場合の地表面加速度応答スペクトル S_s [gal]と基盤面加速度応答スペクトル S_B [gal]の関係を示す。地盤条件を表す指標としては、地盤の特性値 T_G [s]、基盤までの深度 D_p [m]、基盤に対する最上層のインピーダンス比 R_s 、基盤に対する表層地盤の平均インピーダンス比 R_u の4種類を考慮した。 R_s および R_u は次式で算出するものとした。

$$R_s = \frac{w_1 v_1}{w_B v_B} \quad R_u = \frac{(w_1 v_1 h_1 + w_2 v_2 h_2 + \dots) / (h_1 + h_2 + \dots)}{w_B v_B} \quad (1)$$

ここで、

w_i, v_i, h_i : 地表面から第*i*層の単位体積重量, せん断波速度
層厚

w_B, v_B : 基盤層の単位体積重量, せん断波速度

S_s から S_B を求める推定式としては次の回帰式を想定した。

$$S_B = \frac{a \times D_p^b \times R_s^c}{a \times R_u^b} \times S_s^d \quad (2) \quad S_B = \frac{a \times D_p^b \times R_s^c}{a \times D_p^b \times R_u^c} \times S_s^d \quad (3)$$

ここで a, b, c, d は係数である。重回帰分析により上記の回帰式の重相関係数を求めた結果によれば式(2)については T_G 、式(3)については D_p および R_u を説明変数とする場合の相関が高くなる事が認められた。図7に固有周期ごとの重相関係数の変動状況を示す。図8は T_G を説明変数とした場合の回帰式の各係数を固有周期ごとに示したものである。図8より次の事項が指摘される。1) 式(2)を変形すれば、各固有周期ごとの基盤面と地表面の間の加速度応

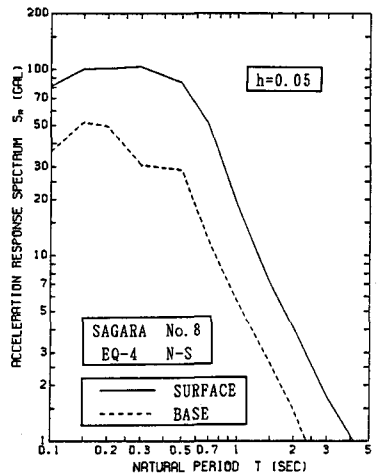


図5 加速度応答スペクトル（相良No. 8地点）

答スペクトルの増幅率 S_s / S_B は次式で表される。

$$S_s / S_B = a^{-1} \times T_G^{-b} \times S_s^{1-c} \quad (4)$$

図8によれば、係数 b は固有周期 0.7秒以下では正、0.7秒以上では負となる。すなわち、固有周期 0.7秒以下の領域においては表層地盤が軟質な程 (T_G が大きい程) 加速度応答スペクトルの増幅率は小さくなり、固有周期 0.7秒以上では表層地盤が軟質な程応答スペクトルの増幅率が大きくなる。固有周期 3、5秒については係数 b は 0 に近く、長周期成分の増幅には T_G の影響が小さいことがわかる。 2) 係数 c は固有周期 0.5~1秒の範囲を除いて 1 以上の値をとる。すなわち、地表面における加速度応答スペクトル値 S_s が大きくなる程、応答スペクトルの増幅率は小さくなる。

図9は D_p および R_u を説明変数とした場合の回帰式の各係数を示したものである。図9より次の事項が指摘される。 1) 式(4)と同様に、式(3)を変形すれば、加速度応答スペクトルの増幅率 S_s / S_B は次のように表される。

$$S_s / S_B = a^{-1} \times D_p^{-b} \times R_u^{-c} \times S_s^{1-d} \quad (5)$$

図9(b) および (c) より、 D_p および R_u に係わる係数 b および c は、いずれも、固有周期 0.7秒を境として符号が反転している。例えば、固有周期 0.7秒以上の領域 ($b < 0$ 、 $c > 0$) では表層地盤厚が厚く、かつ、表層地盤が軟質な程、加速度応答スペクトルの増幅率が大きくなる。固有周期 3、5秒については係数 b および c の両者とも 0 に近く応答スペクトルの増幅に及ぼす D_p および R_u の影響が小さいことがわかる。これらの結果は T_G を説明変数とした回帰式の場合と整合している。 2) 係数 d は 0.7~1秒の固有周期範囲を除いて 1 以上の値をとる。この結果も T_G を説明変数とした回帰式の場合と整合している。

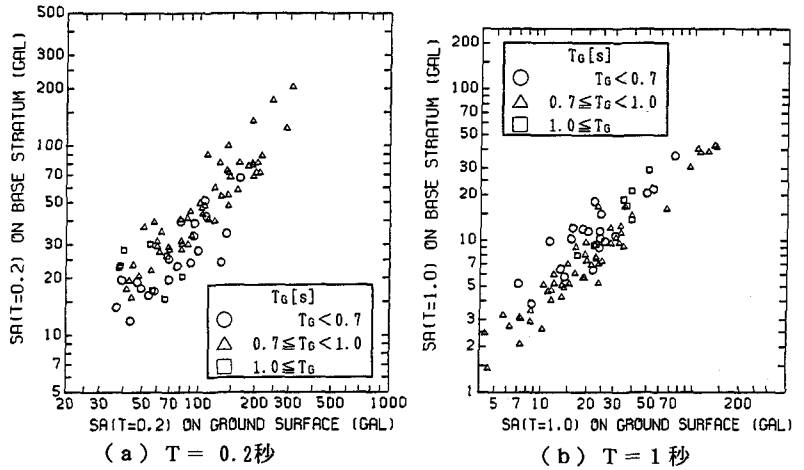


図6 地表面-基盤面加速度応答スペクトル値の関係

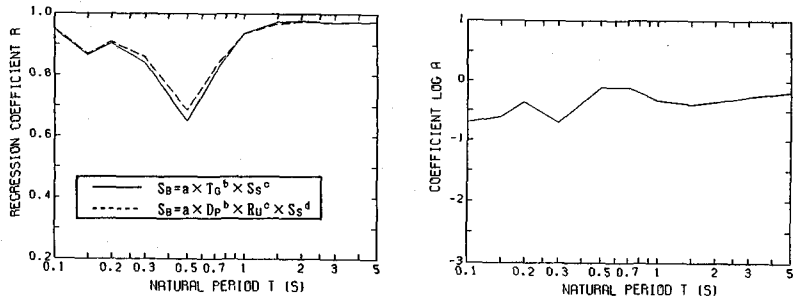


図7 重相関係数

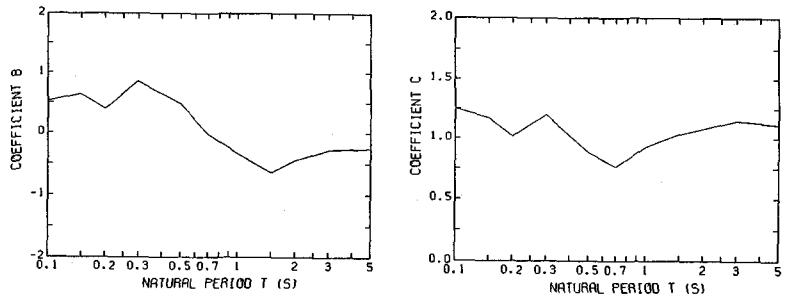


図8 T_G を説明変数とする回帰式の係数

T_G を説明変数とした回帰式(2)を用いて、地表面加速度応答スペクトル値 S_s を種々変化させ、基盤面加速度スペクトル値 S_B と S_s の比 S_B/S_s を求めると図10に示すようになる。ここで、 T_G は0.7秒とした。 S_B/S_s の変動状況は、概ね次の3つの固有周期範囲に区分できる。すなわち、固有周期0.1~0.2秒では固有周期の増加に伴い、 S_B/S_s は低下する。低下の度合いは S_s が大きい程大きい。固有周期0.2~0.7秒では、若干の変動は認められるものの、 S_B/S_s は0.3~0.4程度の値をとる。固有周期0.7秒以上では S_s の大きさによらず、 S_B/S_s の値は固有周期の増加に伴い、概ね単調に増加する。

次に、 D_p および R_u を説明変数とした回帰式(3)を用いて、 S_B/S_s を求める。ここで、 D_p および R_u は、それぞれ、30mおよび0.65とした。図10に示した T_G を説明変数とする回帰式の場合と比較して、 S_B/S_s の値は固有周期0.7秒以下の範囲では若干小さくなっているが、固有周期に対する全般的な S_B/S_s の変動状況はよく類似している。

5. まとめ

耐震設計上重要な加速度応答スペクトルを対象として、地表面地震動および当該地点における工学的な基盤面までの深度、表層と基盤層のインピーダンス比等の地盤条件から基盤地震動を推定する簡便な回帰式を提案した。現時点では、解析対象記録の加速度レベルが低いこと、一部の固有周期範囲において回帰式の相関係数が必ずしも高くない、といった問題が残されているが、本報文中で提案した手法は構造物の耐震設計における入力地震動の設定に資するものと考えられる。

【参考文献】 1)土木研究所報告 166号, 2)土木研究所資料1992号, 3)土木研究所資料2546号, 4)土木研究所資料1718号, 5)土木研究所資料2270号, 6)道路橋示方書耐震設計編, 7)土木研究所資料1778号

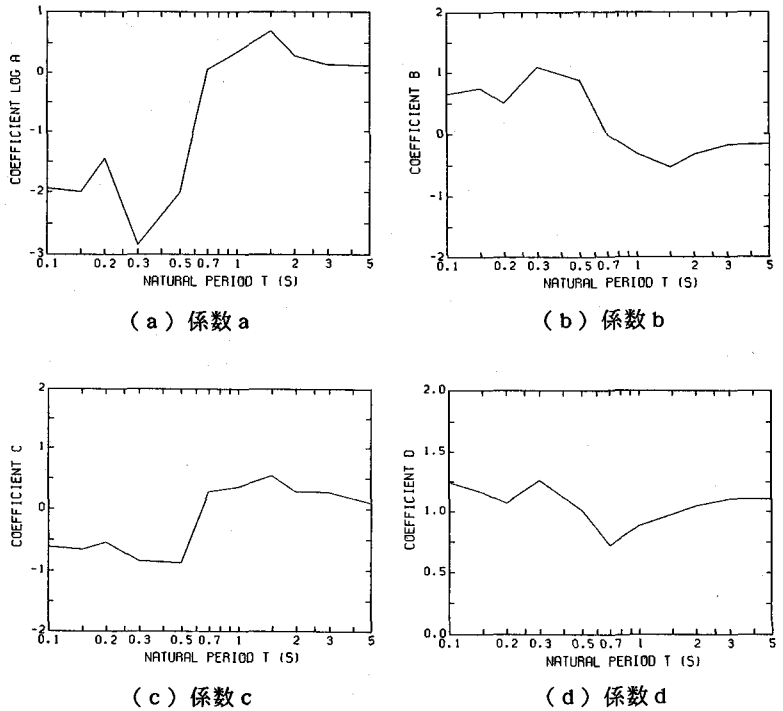


図9 D_p および R_u を説明変数とする回帰式の係数

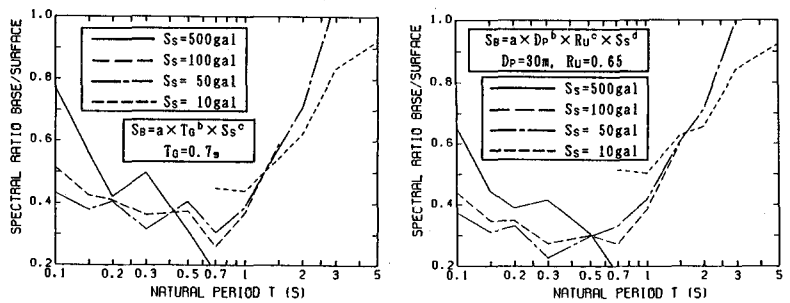


図10 基盤地震動の推定
($T_G=0.7$ 秒)

図11 基盤地震動の推定
($D_p=30$ m, $R_u=0.65$)