

(35) 表層地盤による最大加速度増幅率の予測方法

東電設計 (株) 藤井直樹、安中 正
東京電力 (株) 野沢是幸

1. まえがき 解放基盤面における波形 (基盤における入射波形の振幅を自由表面での反射を考慮して2倍にしたもの、以下基盤波形と呼ぶ) の最大加速度が表層地盤によりどの程度増幅されるかは基盤波形の性質と表層地盤の伝達特性の組み合わせにより決定される。S波の鉛直入射を仮定すれば1次元波動理論により基盤波形から地表波形を推定することも、逆に地表波形から基盤波形を推定することも可能である。本研究では最初に、東京電力 (株) の地震観測点の記録を用い、地表波形から基盤波形を推定し、表層地盤による各波形の最大加速度増幅率を決定する。次に、基盤波形の加速度フーリエスペクトルのコーナー周波数(f_c)とカットオフ周波数(f_{max})を用いると、表層地盤の伝達関数の振幅スペクトルの f_c から f_{max} の範囲の平均値により最大加速度増幅率を予測することが可能であり、 f_c と f_{max} を地震のマグニチュード、震源深さを用いて予測することにより地震の諸元が与えられた場合に特定地点の最大加速度増幅率を予測することが可能になることを示す。

2. データおよび基盤波形の推定 「地震基盤」 (S波速度約3 km/s) あるいは「工学的基盤」 (S波速度約700 m/s) は関東地方では通常かなり深い位置にある。このため耐震設計の入力地震動を与える設計基盤としてはS波速度が300 m/s以上あるいはN値が50以上の層を用いることが多く、地盤データがあるのも通常その深さまでである。本研究ではこの設計基盤から地表までの表層地盤による増幅率を検討する。

検討の対象としたのは地表のS波速度が300 m/s未満の28地点である。基盤のS波速度は地点により違っているが、300 m/sから600 m/sの範囲にある地点が多い。28地点の内の23地点で地表と地中の同時観測が行われており、観測記録を用いて地盤モデルが検証されている¹⁾。各地点の地盤モデルを用い、1971年から1986年までに発生した震源深さが100 km未満の45個の地震の記録から1次元波動理論により461成分の基盤波形を推定した。減衰は1 Hz以上で $Q=4f$ 、1 Hz以下では $Q=4$ で一定としている。地盤物性の歪み依存性は1983年8月8日山梨県東部地震の静岡県駿東郡の観測点の記録の場合のみ考慮している。¹⁾

基盤波形の推定には減衰の不確かさの影響をうけにくいことから地表波形を用いている。すなわち、地中波形を用いた場合には減衰により基盤波形の最大加速度がかなり変化するのに対し、地表波形を用いた場合には減衰を変えても基盤波形の最大加速度があまり変わらないのである。その1例を表-1に示す。減衰の大きさを1桁変えているにもかかわらず地表波形を用いた場合には基盤波形の最大加速度はあまり変化していない。地中波形を用いた場合に減衰の影響を受けやすいのは、地中波形と基盤波形のスペクトル比の谷の形が減衰により大きく変わるためである (図-1参照)。

3. 最大加速度増幅率の特徴 地盤種別²⁾により分類し最大加速度増幅率 (基盤波形の最大加速度に対する地表波形の最大加速度の比) の頻度分布を示したのが図-2である。地盤種別毎の平均増幅率は、第1種が1.56倍、第2種が1.84倍、第3種が

表-1 減衰による基盤波形の最大加速度の変化

減衰 入力	$Q=25$	$Q=4f$	$Q=250$	$Q=50f$
地表NS	198 gal	196 gal	186 gal	186 gal
地中NS	182 gal	176 gal	209 gal	231 gal
地表EW	320 gal	331 gal	313 gal	314 gal
地中EW	393 gal	335 gal	522 gal	541 gal

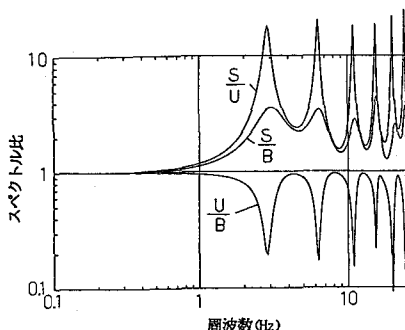


図-1 1次元波動理論により計算した地表波形 (S)、地中波形 (U)、基盤波形 (B) のスペクトル比の例

1.48倍、第4種が1.52倍であり、全データの平均は1.56倍である。第2種地盤の増幅率が最も大きく、その他はほぼ同じ程度である。

図-3は各地点毎に平均増幅率と平均±標準偏差の範囲を示したものである。平均及び標準偏差は対数正規分布として決定している。

同じ地盤種別に含まれる地点でも平均増幅率の違いがかなりあり、地盤種別だけで増幅率を予測するのは困難と考えられる。また、増幅率の標準偏差の大きさも地点によりかなり変化している。地盤種別のような簡単な分類を用いたのでは限界があることから、以下の検討では表層地盤の伝達関数の振幅スペクトル $A(f)$ を用いることを考える。表層地盤の伝達関数は基盤波形に対する地表波形の伝達関数を意味しており、図-1の S/B が $A(f)$ の例である。

表層地盤の伝達関数の振幅スペクトル $A(f)$ の f_1 から f_2 までの平均値を

$$Am(f_1, f_2) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} A(f) df}{(f_2 - f_1)} \quad (1)$$

と表現する。地震動の加速度記録で卓越する周波数が通常1Hzから10Hz程度の範囲であることから、各地点の $Am(1, 10)$ と最大加速度の平均増幅率との関係を調べてみた。その結果を図-4に示す。両者の相関係数は0.819であり、かなり高い。図-4に示した式を用いれば、各地点の $A(f)$ から平均増幅率を予測することが可能である。

増幅率の標準偏差が $A(f)$ の形と関係していることを示したのが図-5であり、縦軸に増幅率の標準偏差を、横軸に $A(f)$ を2Hzのバンド幅で平滑化したスペクトルの1Hzから10Hzの範囲の最大値と最小値の比の対数をとっている。ただし、図-5で用いているデータは増幅率のデータが10個以上ある地点のものである。両者の相関係数は0.747であり、かなり良い相関がある。各地点の増

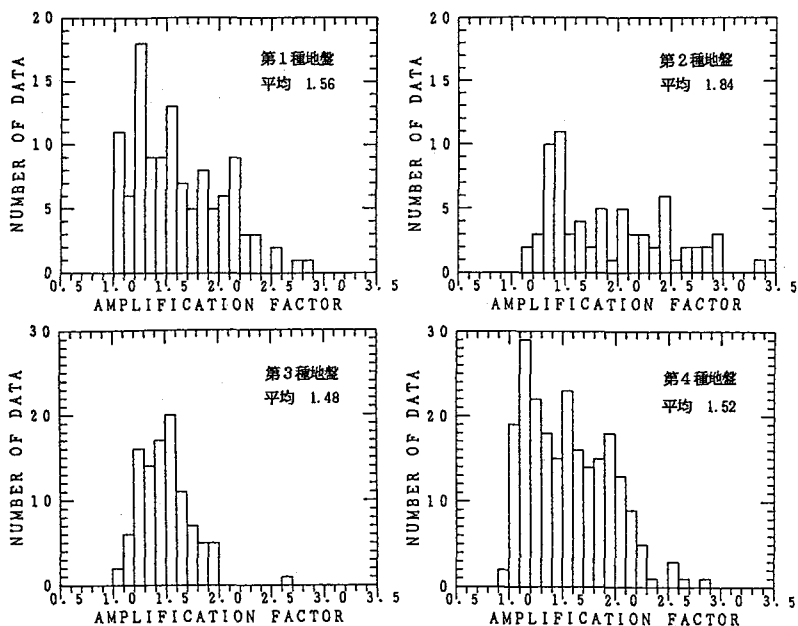


図-2 地盤種別毎の最大加速度増幅率の頻度分布

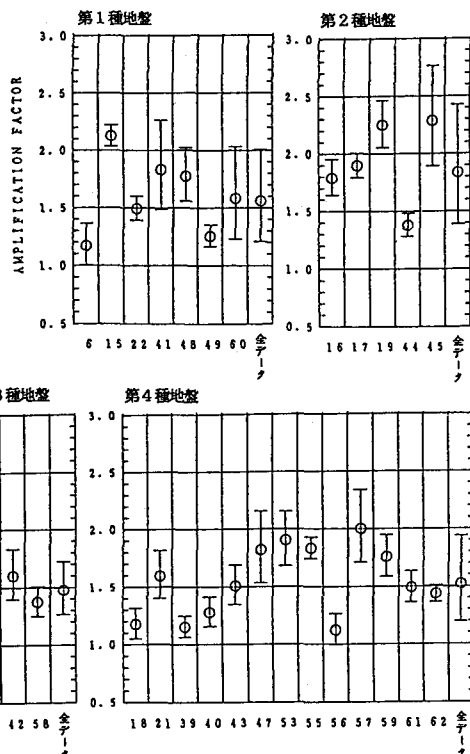


図-3 各地点毎の最大加速度増幅率の平均 (O) と平均±標準偏差の範囲 (上下の線)

幅率の標準偏差は振幅スペクトル $A(f)$ の凹凸に関係していると考えられる。

以上は各地点の全体的な傾向に関するものである。以下では、(1)式を用いて各波形毎の増幅率を個別に予測するという

問題を検討する。

4. f_c と f_{max} を用いた最

大加速度増幅率の予測 図-6に示したように、基盤波形の加速度フーリエスペクトルの基本的な特性はコーナー周波数 f_c とカットオフ周波数 f_{max} で表現することができる³⁾。スペクトルは f_c から f_{max} の間でほぼ平坦であり、 f_c より低周波数側、 f_{max} より高周波数側で減少する。この例のように、基盤波形のスペクトルから f_c と f_{max} を決定することが可能である。

f_c から f_{max} の範囲で基盤波形のスペクトルが平坦であることから、この範囲の周波数成分の平均的な増幅率 $A_m(f_c, f_{max})$ と最大加速度増幅率はかなり密接に関係していると考えられる。各波形の f_c と f_{max} から(1)式を用いて決定した $A_m(f_c, f_{max})$ と最大加速度増幅率 A_f の関係を示したのが図-7である。両者の間にはかなりよい相関があり、相関係数は 0.843 である。最小2乗法により関係式を決定すると

$$A_f = 1.016A_m(f_c, f_{max}) + 0.126 \quad (2)$$

となる。基盤波形の f_c と f_{max} が与えられた場合には(1)(2)式を用いて最大加速度増幅率を予測することが可能である。

5. 地震の諸元が与えられた場合の最大加速度増幅率の予測

地震の諸元が与えられた場合に $A_m(f_c, f_{max})$ を用いて最大加速度増幅率 A_f を予測するためには f_c と f_{max} を地震のマグニチュード M 、震源深さ H (km)、震央距離 Δ (km) 等を用いて推定する必要がある。

f_c と M の関係を図-8に示す。 M が6以下の範囲では M が大きくなると f_c が小さくなる傾向が明らかであるが、 M が6以上の範囲では M によりあまり変化していない。そこで、 M の2次式を用いて f_c を回帰した。回帰式は、

$$\log f_c = 0.057M^2 - 0.921M + 3.234 \quad (3)$$

となり、重相関係数は 0.733 である。

f_{max} と M の関係を図-9に示す。図-8に比べ M による変化は小さいが、 M が大きくなると f_{max} が小さくなるという傾向はみられる。説明変数として M と H を用いた場合の式は次のとおりである。

$$\log f_{max} = -0.144M - 0.0012H + 1.428 \quad (4)$$

重相関係数は 0.573 であり、 f_c ほど高くない。なお、(3)(4)式に

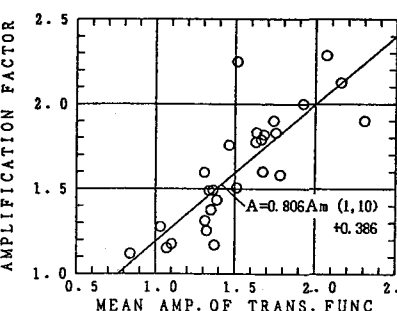


図-4 各地点の最大加速度の平均増幅率 A と伝達関数の振幅スペクトルの平均値 $A_m(1, 10)$ の関係

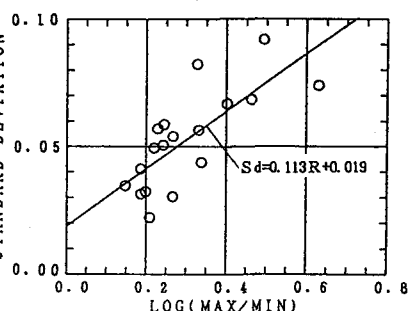


図-5 各地点の増幅率の標準偏差 S_d と 2Hz のバンド幅で平滑化した振幅スペクトルの最大値と最小値の比 R の関係

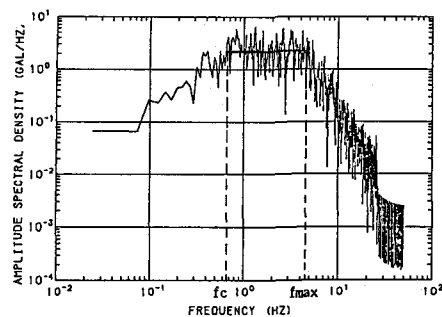


図-6 基盤波形の加速度フーリエスペクトルの例

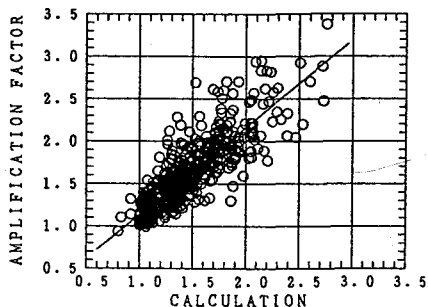


図-7 各波形の最大加速度増幅率 A_f と伝達関数の振幅スペクトルの平均値 $A_m(f_c, f_{max})$ の関係

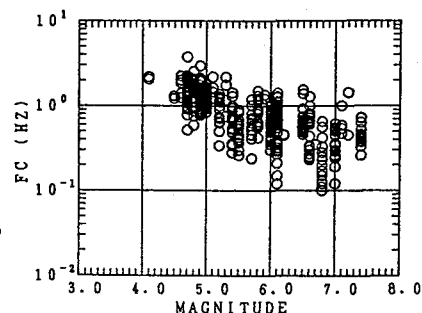


図-8 コーナー周波数とマグニチュードの関係

において他の説明変数を追加しても重相関係数はあまり変わらなかった。

(1)(3)(4)式を用いて決定した $A_m(f_c(M), f_{max}(M, H))$ と最大加速度増幅率の関係を図-10に示す。

図-7に比べ A_m と A_f の相関は悪くなっている。 A_m から(2)式を用いて計算した最大加速度増幅率と A_f の相関係数は0.606である。予測精度が十分でないのは f_{max} の推定精度が悪いためと考えられる。

図-11は、(1)-(4)式を用いた場合に各地点の増幅率がマグニチュードによりどのように変化するかを示したものであり、地盤種別により分けている。ただし、 H は0kmとしている。(3)(4)式から明らかなように増幅率に対してはマグニチュードの影響が支配的であるため、図-11の傾向は各地点の増幅率とマグニチュードの関係をほぼ示していると考えられる。図-12はその1例であり、増幅率のデータの傾向は予測曲線の傾向と比較的よくあっている。

6. あとがき 最大加速度増幅率について基盤波形の加速度フーリエスペクトルの特性と表層地盤の伝達関数の振幅スペクトルを組み合わせた予測方法を提案した。予測精度を更

に向上させるためには f_{max} の推定精度を向上させることが必要と考えられる。また、本研究では地盤物性の歪み依存性の影響を考慮していないが、この点については歪み依存性の性質も含めてさらに検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 野沢是幸・大木晴雄・安中正(1987)第19回地震工学研究発表会(投稿中)
- 2) 日本道路協会(1980)道路橋示方書・同解説V耐震設計編
- 3) Hanks, T. C. (1982) Bull. Seism. Soc. Am., 72, 1867-1879

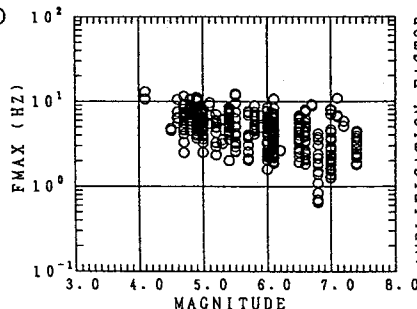


図-9 カットオフ周波数とマグニチュードの関係

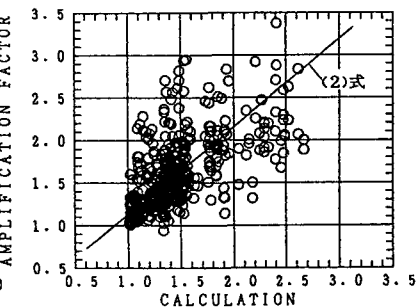


図-10 各波形の最大加速度増幅率 A_f と地震の諸元を用いて計算した $A_m(f_c, f_{max})$ の関係

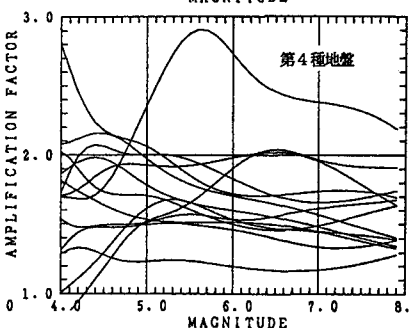
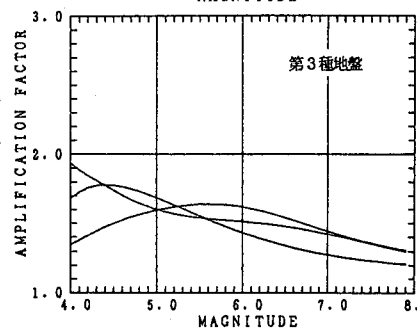
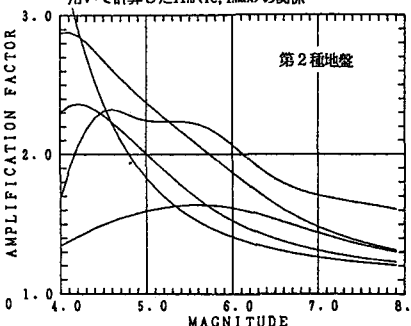
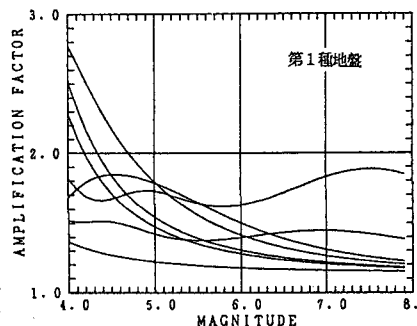


図-11 各地点の最大加速度増幅率とマグニチュードの関係 ($H=0$ kmの場合)

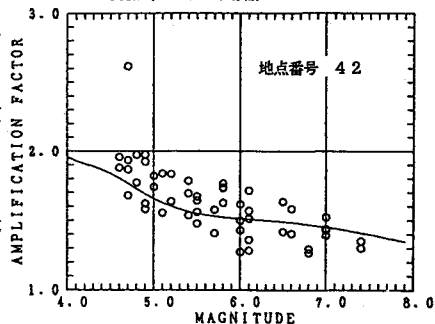


図-12 地点毎の増幅率とマグニチュードの関係の例。実線は予測式による結果 ($H=0$ kmの場合)