

地表面での距離減衰式から基盤での地震動を推定する簡易な手法

鉄道総合技術研究所 正会員 坂井 公俊

正会員 室野 剛隆

ジェイアール東日本コンサルタンツ 正会員 ○桐生 郷史

**1. はじめに** 広域の地震動を簡便に推定する手法として、距離減衰式が用いられることが多い<sup>(例えば1),2)</sup>。この距離減衰式は、少ないパラメータから地表面のPGAやPGV、応答スペクトル等を推定可能であり、広範囲の地震動を簡易に推定する場合などには有効な手法である。一般的な距離減衰式は、地震計の設置が容易な地表面位置における地震記録に基づく結果である場合が多い。そのため地盤条件による地震動強度の差を表現するには、地表面位置での地震動にある定数(PGAの場合、1/1.4 が用いられることが多い<sup>3)</sup>)を乗じて工学的基盤 ( $V_s=400\text{m/s}$ 程度の硬質地盤)位置に引き戻し、その後地盤条件に応じた増幅率を考慮して再度地表面位置での地震動として設定する必要がある。ところがこの方法では、基盤に引き戻す際に地盤の塑性化の影響を無視しており、地震動レベルが小さい場合には増幅を過小評価し、地震動レベルが大きい場合には過大評価してしまっている可能性がある。

そこで本検討では、多数の地盤応答解析結果に基づいて、地表面位置で推定される距離減衰式を地盤の塑性化の影響を考慮して工学的基盤位置に引き戻す際の増幅率(低減率)について検討を行う。

**2. 全国の「平均的な」地盤の推定** 距離減衰式より推定されるPGA, PGVを基盤位置でのPBA, PBV(基盤最大加速度, 速度)に補正するため、全国の「平均的な」地盤を推定する。なお、ここで言う「平均的」とは、地盤増幅として観測記録の平均(1.4倍)を満足する地盤という意味である。地盤応答解析は、時刻歴逐次非線形解析を用いた。地盤の非線形構成則としては、GHE-Sモデル<sup>4)</sup>を用いることとし、動的変形特性は、多数の三軸圧縮繰り返し試験結果をもとに設定された一般的な値<sup>5)</sup>をもとに設定している。減衰としては、地盤のせん断弾性波速度、土質分類をパラメータとして周波数依存性を考慮したQ値の提案式<sup>6)</sup>に出来る限り一致するようなレーリー減衰を設定している。

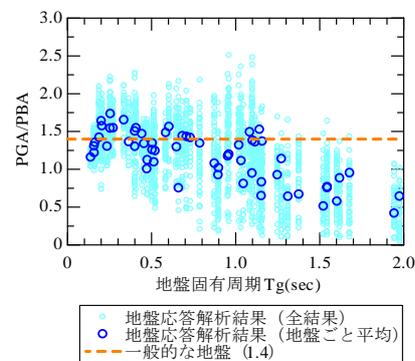


図-1 地盤増幅率算定結果 (PGA/PBA)

入力地震波(76記録)、地盤条件(60地盤)を用いて網羅的に応答解析を実施し、得られた地盤増幅(PGA/PBA)を図-1にまとめて示す。それぞれの増幅率(薄い○印)の結果の解釈を容易にするために、60地点の地盤ごとに増幅率の平均値を算定した結果を示している(濃い○印)。全体的な傾向として、地盤の固有周期が長くなると、加速度増幅率は小さくなっている。一般的な地盤増幅(破線、1.4倍)と今回の地盤応答解析結果を比較すると、固有周期が1秒よりも長い領域で一般的な増幅率が大きくなっている。これは速度についても同様な傾向である。よって距離減衰式という平均的な値を求める際には、周期が1秒よりも長いような軟弱地盤の影響はほぼ無視された結果になっていると予想されることから、「平均的な」地盤として、今回用いた地盤のうち周期1秒よりも短いものの平均を用いることとした。

**3. 地盤塑性化の影響を考慮した「平均的な」地盤増幅率の算定** 続いて入力レベルを変化させた地盤応答解析を実施し、地震動レベルの変化に伴う平均的な地震動増幅の変化について検討を行う。入力地震動としては、近年得られた比較的大きな地震における記録であり、卓越周期や継続時間として様々な特徴を持ったもの(11波)である。基本的に観測は地表面でされているが、今回はこれをそのまま工学的基盤位置での地震動(2E波)として扱った。加速度増幅率算定時には、PBA=10~2000galまで14段階、速度増幅率算定時には、PBV=1~200kineまで14段階に調整したものを使用する。また、地盤応答解析の条件は前節と全て同様であり、「平均的な」地盤以外の地盤群についても参考として地盤応答解析を実施している。図-2には、加速度増幅率算定結果の例(入力100gal, 1000gal)を示す。全体の傾向として、入力レベルが大きくなると、増幅率は小さくなっている。これは地盤の塑性化の影響であると推察され、塑性化によって短周期側の応答倍率が低減したと考えられる。さらに、地盤の固有周期が長くなるほど、地盤塑性化の影響が顕著になり、増幅が小さくなっている。また、一般的な増幅率(加速度:1.4倍)と比較すると、入力レベルとして100galを用いた場合の増幅と概ね一致することが分かる。これは、観測記録に基づい

キーワード 距離減衰式, 加速度増幅率, 速度増幅率

連絡先 〒171-0021 東京都豊島区西池袋 1-11-1 ジェイアール東日本コンサルタンツ(株) TEL03-5396-7246

て工学的基盤から地表面までの増幅を算定する際に、比較的小さなレベルの記録を多数用いて検討を行っているため、平均的には地震動レベルが小さく、地盤の塑性化の影響が小さな範囲での結果になっているためではないかと考えることが出来る。そのため、入力として比較的大きな地震動に対する地盤増幅は、地盤の塑性化の影響がより大きくなるために、従来一般的な増幅よりも小さくなっている。このことは、距離減衰式によって得られる地表面地震動から基盤地震動を求める際、地震動レベルが比較的大きい場合には増幅を過大に評価してしまうことによって、基盤地震動を小さく見積もる可能性があることを示唆している。なお、速度増幅率(AVS30より評価)も同様の結果が得られていることを付記しておく。

**4. 地盤増幅率算定式の提案** 図-2において得られた「平均的な」地盤における、各地震動レベルごとの加速度、速度増幅率(今回用いた地盤のうち、周期 0~1 秒の増幅の平均)をまとめて図-3(a), (b)に●印で示す。これらの結果を再現する回帰式として次式を設定した。

$$PGA, PGV = a \times \left(1 - \exp(b \times PBA, PBV)^c\right) \tag{1}$$

ここで、 $a, b, c$ は回帰係数である。加速度、速度それぞれにおいて、図-3の地盤応答解析結果を最も再現する $a, b, c$ を求めた。得られた回帰係数を表-1に示す。さらにこれらの回帰係数を用いて得られる増幅率算定結果を図-3に実線で示す。

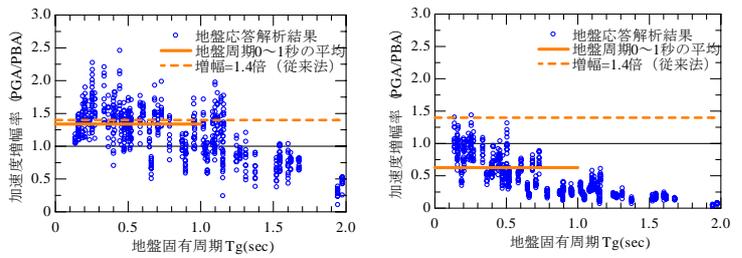
回帰式より推定される加速度、速度増幅率はいずれも地盤応答解析結果を良好に満足していることが分かる。また、PBA=100gal程度で既往の一般的な加速度増幅率である1.4と等しくなっている。さらに、入力が300~400gal程度の場合に地表面位置で加速度増幅率はほぼ1.0、それよりも大きな加速度が入力すると、PGAがPBAを下回るという今回の結果は、既往の観測記録に基づく報告<sup>7)</sup>とも調和的であり、本提案式によってある程度妥当な地盤増幅を評価できるものと期待される。さらに本研究の主な目的である、地表面位置において作成された距離減衰式を基盤位置での値に補正するには、次式によってPGA, PGVを修正すればよい。

$$PBA, PBV = \frac{1}{b} \times \log_e \left(1 - \left(\frac{1}{a} \times PGA, PGV\right)^{1/c}\right) \tag{2}$$

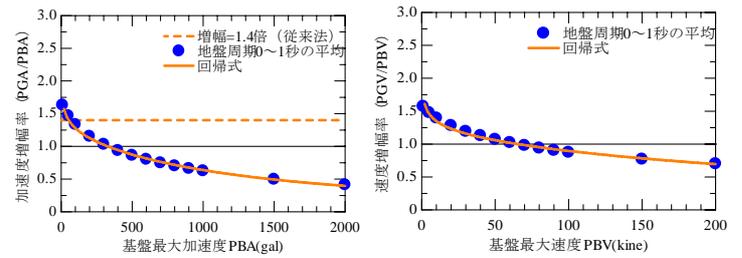
**5. まとめ**

本研究では、主に地表面位置で推定されている距離減衰式を工学的基盤位置での結果に補正する簡便な手法を提案した。本手法を用いることで、地盤の塑性化を考慮した基盤地震動の推定が可能である。なお、本結果は地表面位置における平均的な地震動から基盤位置における平均的な地震動を推定する際に用いるものであり、個々の地盤情報に応じた地盤増幅を求めることを目的としていないことに注意を要する。今後は本結果を用いて推定された基盤位置での平均的な地震動を地点ごとの地盤情報を用いて地表面に持ち上げる際の地盤増幅についても検討を行う予定である。

**参考文献** 1) 司宏俊, 翠川三郎, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 523, pp. 63-70, 1990. 2) 内山泰生, 翠川三郎, 日本建築学会構造系論文集, No. 606, pp. 81-88, 2006. 3) Midorikawa, S., M. Matsuoka and K. Sakugawa, *Japan Earthquake, The 9<sup>th</sup> Japan Earthquake Engineering Symposium*, Vol.3, pp.85-90, 1994. 4) 室野剛隆, 野上雄太, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, 2006. 5) 野上雄太, 室野剛隆, 土木学会地震工学研究発表会論文集, 30, 2009. 6) 福島美光, 翠川三郎, 日本建築学会構造系論文集, 460, pp. 37-46, 1994. 7) 吉田望, 日本地震工学会誌, No.9, pp.6-11, 2009.



(a) 加速度増幅率(PBA=100gal) (b) 加速度増幅率(PBA=1000gal)  
 図-2 地震動レベルを変化させた地盤応答解析結果の例



(a) 加速度増幅率 (b) 速度増幅率  
 図-3 地震動レベルを変化させた地盤応答解析結果と回帰式の例

表-1 回帰パラメータ算定結果

	加速度	速度
a	850	220
b	-0.0013	-0.0046
c	0.9	0.9