

地表面で得られた距離減衰式から 工学的基盤面での地震動を推定する簡易手法

坂井公俊¹・室野剛隆²

¹正会員 工修 （財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工博 （財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

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^{例えは1)~4)}。この距離減衰式は、想定する地震規模、震源深さ、断層からの距離などの少ないパラメータから最大加速度PGAや最大速度PGV、応答スペクトルを推定可能であり、扱いが容易で、かつ計算量も少ないという利点がある。そのため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と考えられる。

この距離減衰式は基本的に既往の地震観測記録を基にして作成されているため、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。例えば、司・翠川による最大加速度距離減衰式³⁾も、地表面位置における地震記録に基づいて作成されている。そのためこの距離減衰式を用いて推定される地震動は、地表面位置での地震動であると考えることが出来る。

地震動は地点直下の地盤構造の影響を強く受けることがわかっており、設計などの場面でもこれら地盤条件の良否の差によって入力地震動も異なるものを考慮している^{5),6)}。しかしながら上述したように一般的な距離減衰式から得られる地震動強度は、地表面位置での値であり、これをそのまま用いると、地盤条件による地震動強度の差を表現することは不可能である場合が多い。そのため地盤条件による地震動の差を表現する際には、地表面位置での地震動にある定数を乗ずることで一旦工学的基盤（ $V_s=400\text{m/s}$ 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することで再度地表面位置での地震動として設定する必要がある。

この際の地表面の地震動から基盤位置での地震動

を推定する際に考慮する定数としては、 $1/1.4$ が用いられることが多い。これは過去の地震観測記録に基づいて設定された値である^{1),3),7),8)}。ところがこの $1/1.4$ という増幅を設定した場合、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、逆に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、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）について検討を実施する。

なお、本検討において、地表面と工学的基盤面での地震動最大値を頻繁に用いるため、それぞれを以下のように定義する。

- ・地表面での最大加速度，速度：PGA，PGV
- ・工学的基盤面での最大加速度，速度：PBA，PBV

2. 全国の「平均的な」地盤の推定

距離減衰式は全国の地震観測記録にもとづいて設定されており、この結果より得られるPGA，PGVは各地点の地盤増幅の影響を含んだ全国の平均的な結果であると言える。つまり全国の平均的な地盤における増幅、減衰の影響を受けた地震動となっている。本研究の目的は、距離減衰式より推定されるPGA，PGVを基盤位置でのPBA，PBVに補正することである。つまり、全国の平均的な地盤において、入力地震動の変化に応じた増幅率を算定するということがある。そこで以下の手続きによって、全国の「平均的な」地盤を推定した。なお、ここで言う「平均的な」とは、全国の地盤構造の厳密な平均を意味しているのではなく、地盤増幅として観測記録の平均を

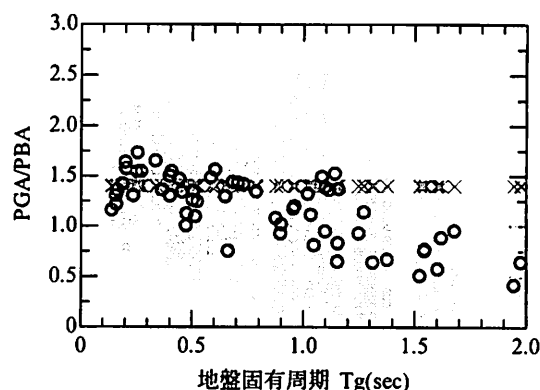
満足する地盤，という意味である。

- ・ まず，工学的基盤位置で観測された地震記録を収集する．今回は，地盤のせん断弾性波速度 V_s が300m/s以上の地盤で観測された38記録（76成分）を選定した．これを「平均的な」地震記録と考える．
- ・ 次に，多数のモデル地盤を作成する．今回は，既往の地盤調査結果などを参考に，60地盤を選定した．
- ・ 上記の地盤，地震動を用いた地盤応答解析を実施する．今回は，76（地震数） $\times$ 60（地盤数）=4560ケース実施した．
- ・ 地盤応答解析によって得られたPBA, PBV, PGA, PGVから求まる増幅率と一般的に用いられている加速度，速度増幅率を比較する．一般的な増幅率としては，PBAからPGAへは前述した1.4，PBVからPGVへはそれぞれの地盤のAVS30より評価した増幅率⁸⁾を用いる．
- ・ 一般的な増幅率（観測記録にもとづく）と今回の増幅率（地盤応答解析にもとづく）が一致する地盤を「平均的な」地盤として選定する．

地盤応答解析としては，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⁹⁾を用いることとし，動的変形特性は，多数の三軸圧縮繰返し試験結果をもとに設定された一般的な値^{10),11)}をもとに設定している．与える減衰としては，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¹²⁾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¹³⁾．

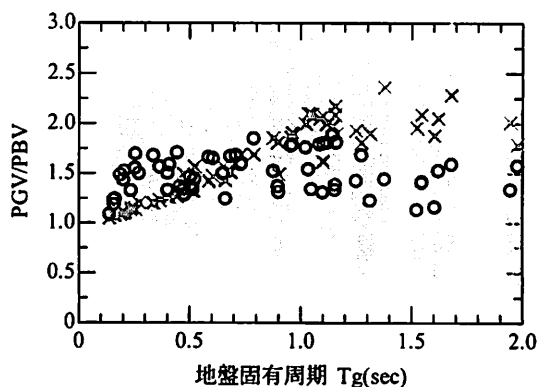
以上の条件を用いて得られた地盤増幅度算定結果を図-1に示す．それぞれの増幅率（薄い○印）は大きくばらついている．結果の解釈を容易にするために，各地盤ごとに増幅率の平均値を算定した結果も示している（濃い○印）が，この結果を見ると全体的な傾向として，地盤の固有周期が長くなると，加速度増幅率は小さくなっていることが分かる．さらに速度増幅率については地盤の周期によらず概ね一定であるが，周期1秒程度でピークとなるような上に凸の形状をしていることが分かる．一般的な地盤増幅（×印）は，加速度の場合，地盤の周期によらず1.4，速度はAVS30にもとづき地盤の周期が長くなるに従い大きくなっている．そのため，今回の地盤応答解析結果と比較すると，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．

周期が1秒よりも長いような地盤は，鉄道構造物を設計する際の地盤種別⁶⁾においてもG6, G7地盤と



地盤応答解析結果（全結果）
○ 地盤応答解析結果（地盤ごと平均）
× 一般的な増幅（1.4）

(a) PGA/PBA算定結果



地盤応答解析結果（全結果）
○ 地盤応答解析結果（地盤ごと平均）
× 一般的な増幅（AVS30より）

(b) PGV/PBV算定結果

図-1 地盤増幅率算定結果

いう軟弱地盤に分類され，埋立地等の特殊な地盤であると考えられるため，地震観測記録としては相対的に少ないものと考えられる．そのため距離減衰式という平均的な値を求める際には，これら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．そこで，「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値を用いることとした．こうすることにより，既往の検討により得られている平均的な地盤増幅（加速度の場合は1.4）とおおむね一致する．

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

本節では，地震動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．前節の検討により，周期1秒よりも短い地盤増幅の平均値が「平均的な」地盤増幅であると定義した．ただし参考と

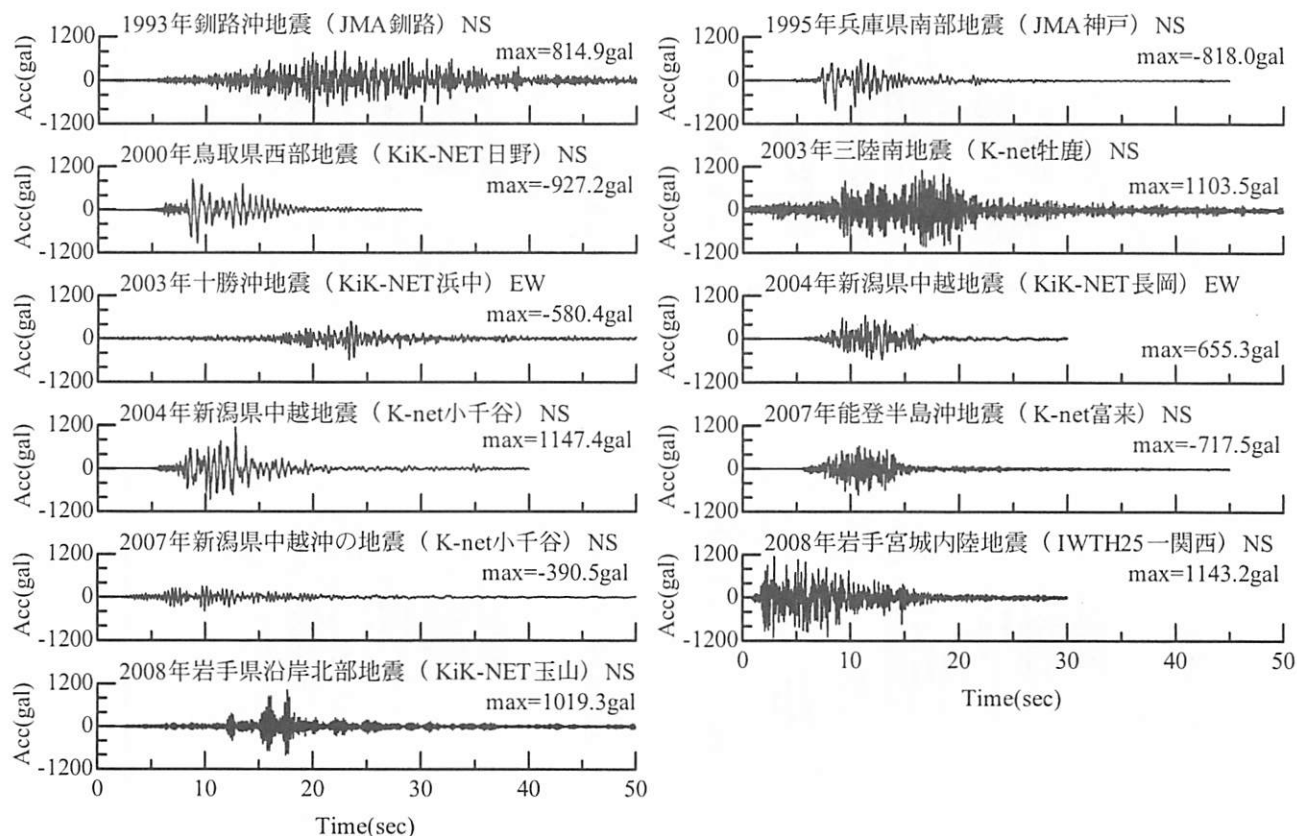


図-2 入力地震動

して「平均的な」地盤以外の地盤群についても地盤応答解析を実施している。

入力地震動としては、図-2に示す11波を基本とした。これは、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。この10波形を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。全解析ケース数としては、60(地盤)×11(地震波)×14(最大値)×2(PBA, PBV)=18480ケース実施した。また、地盤応答解析の条件は前節と全て同様として実施した。

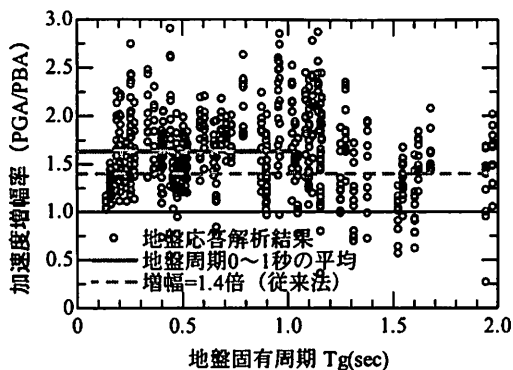
今回の検討に用いる入力地震動が含む主な問題点としては、地表面の記録を用いていることと、観測記録の加速度レベルを作為的に調整していることが挙げられる。これによって地震動の周波数特性が実現象とは異なり、その影響で地盤増幅も多少異なる結果となる可能性が考えられる¹⁴⁾。ただし比較的大きな地震動レベルにおける地盤増幅を求めることを本研究での主な目的としているため、大加速度の地震動を用いた今回の結果は、目的を達するには十分であると考えている。今回の入力地震動の問題を解決するには、入力地震動として観測記録を用いるだ

けでなく、シナリオ地震動を用いることも有効な手法であると思われる。

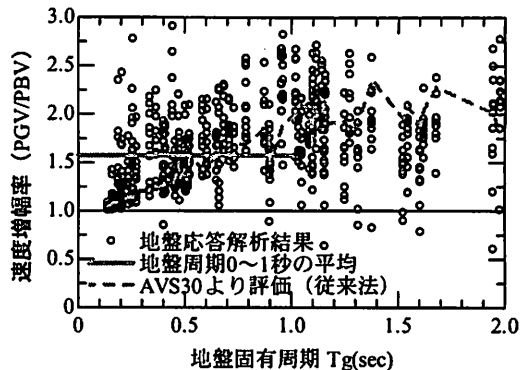
得られた結果の例として、入力基盤加速度PBA=10, 100, 500, 1000gal, 入力速度PBV=1, 10, 50, 100kineの場合の加速度、速度増幅率算定結果を図-3に示す。これらの結果より以下のことが言える。

まず、それぞれの結果は大きくばらつくが、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る。この変化は速度よりもむしろ加速度において顕著に見られ、塑性化によって短周期側の応答倍率が低減したものと考えられる。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。以上の結果は、これまでの観測記録などによる知見と一致している。

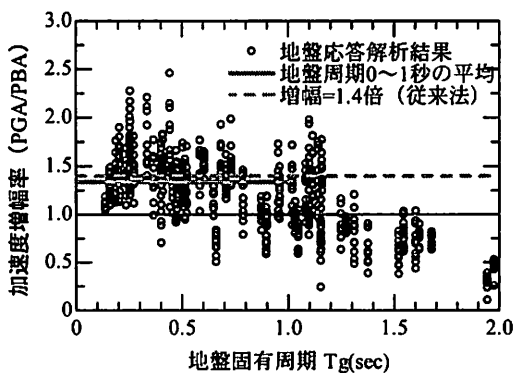
また図-3には、従来より用いられている一般的な増幅率(加速度:1.4倍, 速度:AVS30より評価)も示しているが、これらの増幅は、入力レベルとして100gal, 10kineよりも小さなレベルを用いた場合の増幅と概ね一致することが分かる。これは、観測記録に基づいて工学的基盤から地表面までの増幅を算定する際に、比較的小さなレベルの記録を多数用いて検討を行っているため、平均的には地震動レベルが小さく、地盤の塑性化の影響が小さな範囲での結



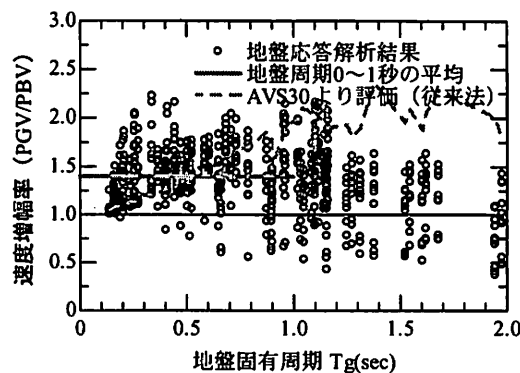
(a) 加速度増幅率 (PBA=10gal)



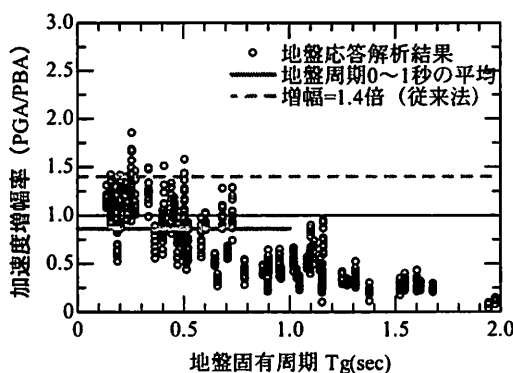
(e) 速度増幅率 (PBV=1kine)



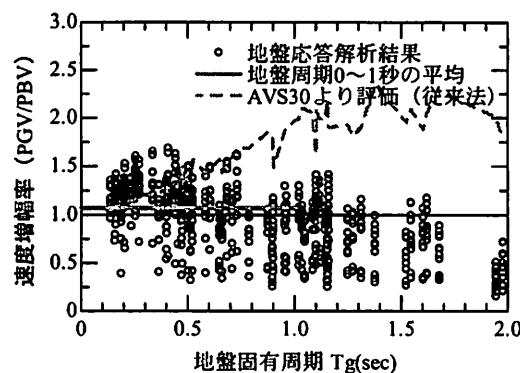
(b) 加速度増幅率 (PBA=100gal)



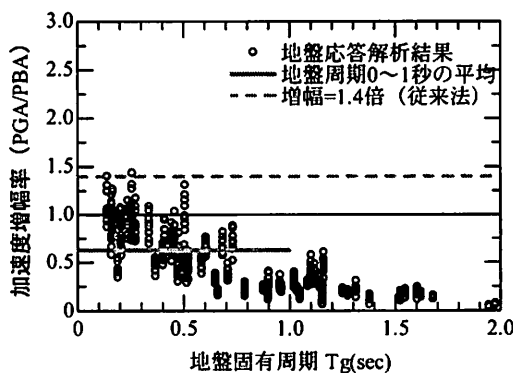
(f) 速度増幅率 (PBV=10kine)



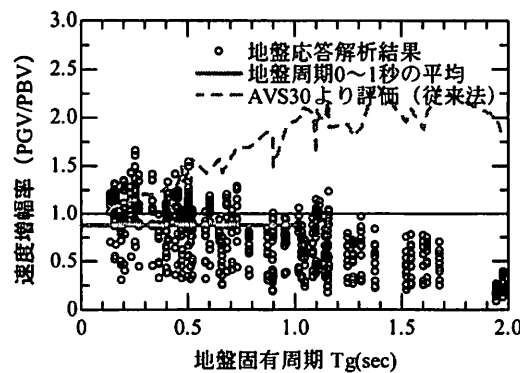
(c) 加速度増幅率 (PBA=500gal)



(g) 速度増幅率 (PBV=50kine)

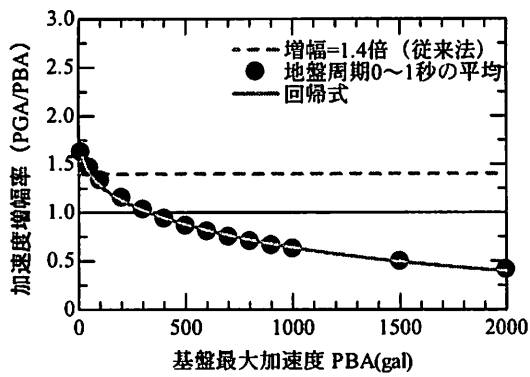


(d) 加速度増幅率 (PBA=1000gal)

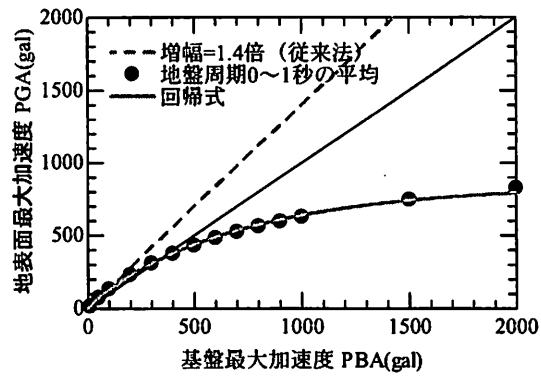


(h) 速度増幅率 (PBV=100kine)

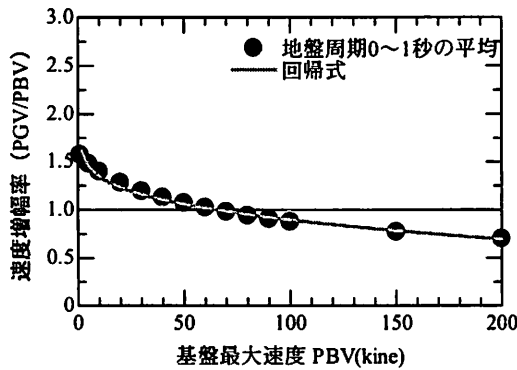
図-3 地震動レベルを変化させた地盤応答解析結果の例



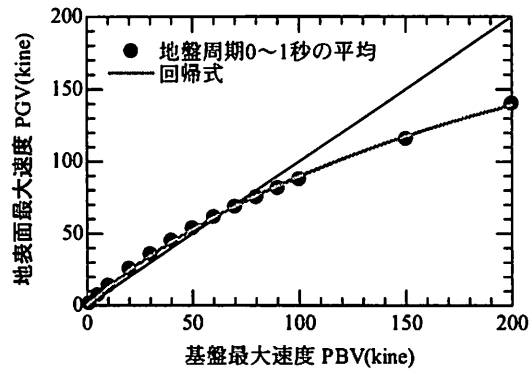
(a) 加速度増幅率



(b) PBA と PGA の関係



(c) 速度増幅率



(d) PBV と PGV の関係

図-4 地震動レベルを変化させた地盤応答解析結果の例

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、従来の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。

続いて「平均的な」地盤増幅を求めるために、地盤の固有周期0～1秒の37地盤における増幅率の平均値を算定した。その結果も図-3に示しているが、入力が大きくなるにつれて、増幅が小さくなっている。さらに入力として、100gal、10kine程度を想定した場合に、既往の増幅率と一致することが分かる。

4. 「一般的な」地盤増幅率算定式の提案

前節の検討により、各入力レベルごとの「平均的な」地盤増幅が推定された。そこでこれらの結果をまとめて簡易な式として表現することを目指す。図-3において得られた各地震動レベルごとの加速度、

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

速度増幅率をまとめて図-4 (a), (c) に●印で示す。さらに図-4 (b), (d) には、基盤地震動 (PBA, PBV) に対応する地表面地震動 (PGA, PGV) の関係も示している。これらの結果を再現する回帰式として次式を設定した。

$$PGA, PGV = a \times (1 - \exp(b \times PBA, PBV)^c) \quad (1)$$

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-4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-4にグレーの実線で示す。

回帰式より推定される増幅率、地表面加速度、速度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と等しくなっており、

前節での考察と同様の結果を得ている。さらに、既往の観測記録に基づく報告によると、基盤位置での地震動レベルとして、300~400gal程度の場合に地表面位置でほぼ同程度、それよりも大きな加速度が入力すると、PGAがPBAを下回るという報告がある^{15)~17)}。今回の結果はこの報告とも調和的であり、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。

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

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。従来の補正方法は、地震動レベルによらず一定の補正係数を用いており、地盤塑性化の影響を無視していた。今回得られた結果は、地盤塑性化の影響を含んでいる。また過去の観測記録によって得られている地盤挙動の知見とも調和的であった。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、本結果はあくまで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。今回の地盤増幅率算定結果からは、入力レベルだけでなく、地盤の固有周期によっても大きく変化することが分かっている。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) Fukushima, Y. and Tanaka, T. : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 80, pp. 757-783, 1990.
- 2) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹 : 気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.161-164, 1997.
- 3) 司宏俊, 翠川三郎 : 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 523, pp. 63-70, 1990.
- 4) 内山泰生, 翠川三郎 : 震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No. 606, pp. 81-88, 2006.
- 5) (社) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編), 2002.
- 6) (財) 鉄道総合技術研究所 : 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 1999.
- 7) Midorikawa, S., M. Matsuoka and K. Sakugawa : Site Effects on Strong-Motion Records Observed During The 1987 Chiba-ken-toho-oki, *Japan Earthquake, The 9th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Vol.3, pp.85-90, 1994.
- 8) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一 : 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第442号, pp.71-78, 1992.
- 9) 室野剛隆, 野上雄太 : S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力-ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, 2006.
- 10) 安田進, 山口勇 : 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542, 1985.
- 11) 野上雄太, 室野剛隆 : S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 土木学会地震工学研究発表会論文集, 30, 2009.
- 12) 福島美光, 翠川三郎 : 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的なQ-1値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 460, pp. 37-46, 1994.
- 13) 坂井公俊, 室野剛隆 : 地震基盤深度を考慮した距離減衰式の補正係数, 土木学会地震工学研究発表会論文集, 30, 2009.
- 14) 末富岩雄, 吉田望 : 地震動の周波数特性が地盤の非線形挙動に及ぼす影響に関する一検討, 第51回土木学会年次学術講演会講演論文集, 第1部, pp.352-353, 1996.
- 15) Idriss, I. M. : Response of Soft Soil Sites during Earthquakes, *Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium*, Vol.2, pp.273-289, 1990.
- 16) Suetomi, I. and Yoshida, N. : Nonlinear behavior of surface deposit during the 1995 Hyogoken-nambu earthquake, *Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu earthquake*, No.2, pp.11-22, 1998.
- 17) 吉田望 : 表層地盤と地震動の性質, 日本地震工学会誌, No.9, pp.6-11, 2009.