

地盤全体系の強度と地震動レベルに基づく 地震増幅率の高精度評価法

坂井公俊¹・野上雄太²

¹正会員 博士（工学） 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 博士（工学） ジェイアール東日本コンサルタンツ（〒171-0021 東京都豊島区西池袋1-11-1）

1. はじめに

広範囲の地震動分布を簡易に評価する方法として、地盤増幅率に基づく手法が数多く提案^{例えは1)~9)}され、広域を対象とした各種の地震動マップ等に活用されている^{例えは10),11)}。この際の地盤増幅率は、地盤条件に応じて変化するもの^{例えは7)}、地盤条件と地震動の振幅に応じて変化するもの^{例えは5)}、これに加えて地盤と地震動の卓越周期の関係によって変化するもの⁹⁾等様々なパラメータを用いた表現が試みられている。これらの各手法は、地盤条件の変化に伴う地震増幅特性の変化を考慮しているものがほとんどであるが、この時に用いられる地盤の指標としては、固有周期 T_g やある深さまでの平均S波速度 AVS など、せん断弾性波速度や初期せん断剛性等の弾性時の物性情報から得られる指標に基づいている。しかしながら、各種施設の地震被害発生有無の評価や防災行動等を考える際に重要となる大規模地震の発生に伴う地震動を考えた場合には、表層地盤は比較的大きな非線形挙動を示すことが予想され、弾性時の地盤条件のみを用いた評価が適切ではない可能性も考えられる。具体的には、仮に同一の固有周期 T_g を有する地盤であっても、塑性化しやすい地盤では、塑性化しにくい地盤と比較すると地表面位置の加速度振幅がそれほど大きくならないことも考えられる。

こうした中で筆者らは、表層地盤を対象とした静的非線形解析法を提案¹²⁾するとともに、この結果から地盤全体系を対象とした強度に関する指標（地盤強度比 K_f ）を算定する手法¹³⁾を提案している。さらにはこの地盤強度比 K_f と固有周期 T_g の両者を用いて地表面地震動を分類することで、従来の固有周期のみを指標とした場合と比較して、振幅レベルの大き

な地震動を対象とした場合には各分類における応答のバラツキを大幅に低減できることを確認している¹⁴⁾。そのため、地盤増幅率を評価する際にもこの地盤強度比 K_f を指標として加えることによって、地盤の非線形挙動の大きさを考慮した上での評価が可能となり、地表面地震動の推定精度向上が期待される。そこで本検討では、筆者らが過去に提案した地震増幅率の簡易評価法⁹⁾に地盤全体系の強度を指標として加えることで、地盤の非線形化の程度を考慮した上での増幅率評価手法の提案を行う。さらに、今回提案する手法を用いることで、従来法と比較して地表面地震動の推定精度が向上していることを確認する。

なお本検討では、ひとまず加速度増幅率 Z_A のみを対象とした評価を実施したので、その結果について報告を行う。速度増幅率 Z_V も含めた評価結果については、別途報告する予定である。

2. 地震増幅率の表現として地盤強度比を考慮することの有効性

本章では、弾性時の地盤情報と地震動レベルを考慮した地震増幅の簡易評価法⁹⁾に、地盤強度比 K_f を考慮することによる精度向上の可能性を確認する。検討に用いるデータは、従来の地震増幅評価に用いた多数の地盤、地震動を用いた地盤応答解析結果とする。既往の検討ではこれを地震動の入力レベル毎（基盤最大加速度 PBA 、基盤最大速度 PBV ）に、横軸を地盤の固有周期 T_g と地震動の卓越周期 T_b との比、縦軸に増幅率（加速度増幅率 Z_A 、速度増幅率 Z_V ）を取った図にプロットすることで整理を行っている。

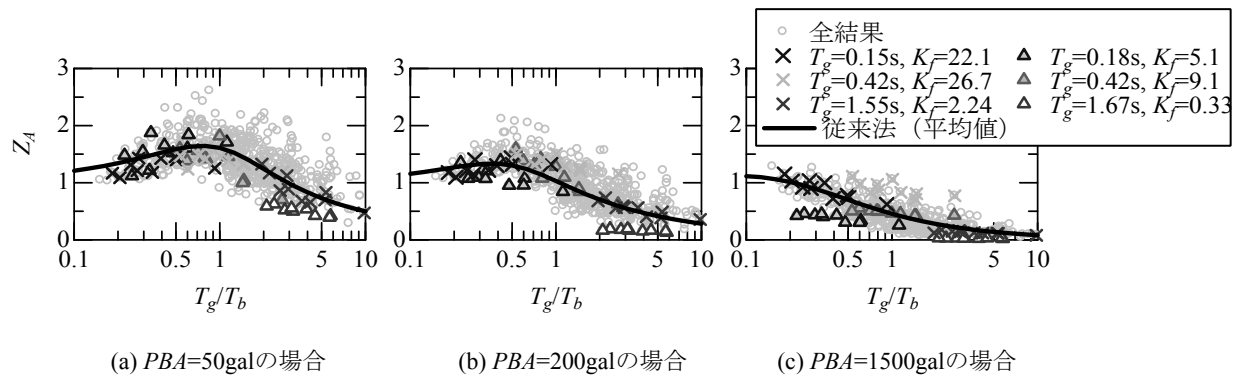


図-1 入力地震動レベル毎の加速度増幅率 Z_A の変化

このように整理を行うことで、地盤の非線形化の影響に加えて地盤と地震動の共振現象も加味した評価が可能となり、地表面地震動推定の高精度化を可能としている。

これらのデータのうち、 $PBA=50\text{gal}$, 200gal , 1500gal とした場合の加速度増幅率 Z_A の評価結果を図-1に示す。これらの図には、地盤の固有周期 T_g が概ね同程度で、地盤強度比 K_f が異なる地盤の組み合わせを三種類抽出し、これらの地盤による結果を色付けて示している (K_f が大きい地盤を×印で表示し、 K_f が小さい地盤を△印で表示)。また、地盤と地震動の周期比を考慮した地震増幅率の平均値⁹⁾も参考として示している。

これらの結果を見ると、入力レベルの変化に伴う共振周期の変化、応答倍率の低減の傾向は、増幅率推定式⁹⁾によって適切に評価できていることが分かる。また、地盤強度比 K_f の大小と増幅の大小の関係についてみると、まず $PBA=50\text{gal}$ 程度の比較的小さな入力の場合 (図-1 (a)) には、全体の傾向として K_f と増幅の間には明瞭な関係は見られない。一方で $PBA=1500\text{gal}$ の場合 (図-1 (c)) では K_f が大きな地盤の方が、 K_f が小さな地盤と比較して加速度増幅率 Z_A が大きくなっている。これは、非常に大きな地震動が入力された場合には、地盤の強度で応答が頭打ちになり、それ以上の地震動を地表面に伝えることができず、結果的に強度の大きな地盤の方が相対的に増幅が大きくなったためであると考えられる。そのため、大振幅の地震動による増幅を考える場合には、地盤の固有周期 T_g 等の従来から一般的に用いられている指標に加えて、地盤強度比 K_f もパラメータとして加えることで、より適切な評価が可能となると考えられる。これと類似の内容が、地盤分類の高度化に関する検討¹⁴⁾においても指摘されている。また、図-1(a)の固有周期 $T_g=1.6\text{s}$ 程度の加速度増幅率 Z_A では、

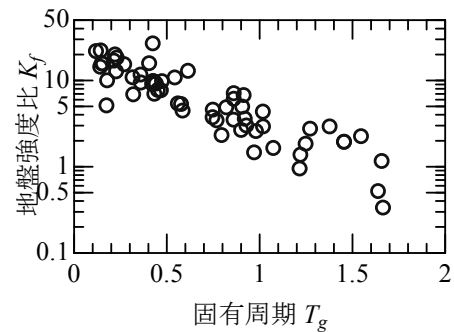


図-2 検討に用いた 60 地盤の固有周期 T_g 、地盤強度比 K_f の分布

強度の大小に伴う増幅の大小が明瞭に見られる。そのため仮に入力レベルが小さい場合でも、相対的に K_f が小さい地盤においては強度が増幅に影響を与えることが分かり、入力地震動の振幅によらず地震増幅評価に K_f の影響を考えることの有効性が確認できる。

3. 地盤強度比と最大加速度を考慮した地震増幅率の高度化

(1) 入力レベルを変化させた地震増幅率の評価

本章では、地震増幅率の評価に地盤強度比 K_f を考慮した手法の提案を行う。検討に用いる地震動の情報は、多様な地盤条件、入力地震動条件を網羅的に組み合わせた地盤応答解析によって構築することとし、具体的には以下の手順により整備した。これは基本的には従来の地震増幅率⁹⁾の評価時と概ね同一の条件であるが、入力地震動の振幅レベルは、最大加速度 PBA をある一定値に揃えるのではなく、次式によって得られる最大加速度 PBA と地盤強度比 K_f の比 ρ を一定値に揃えることとした。

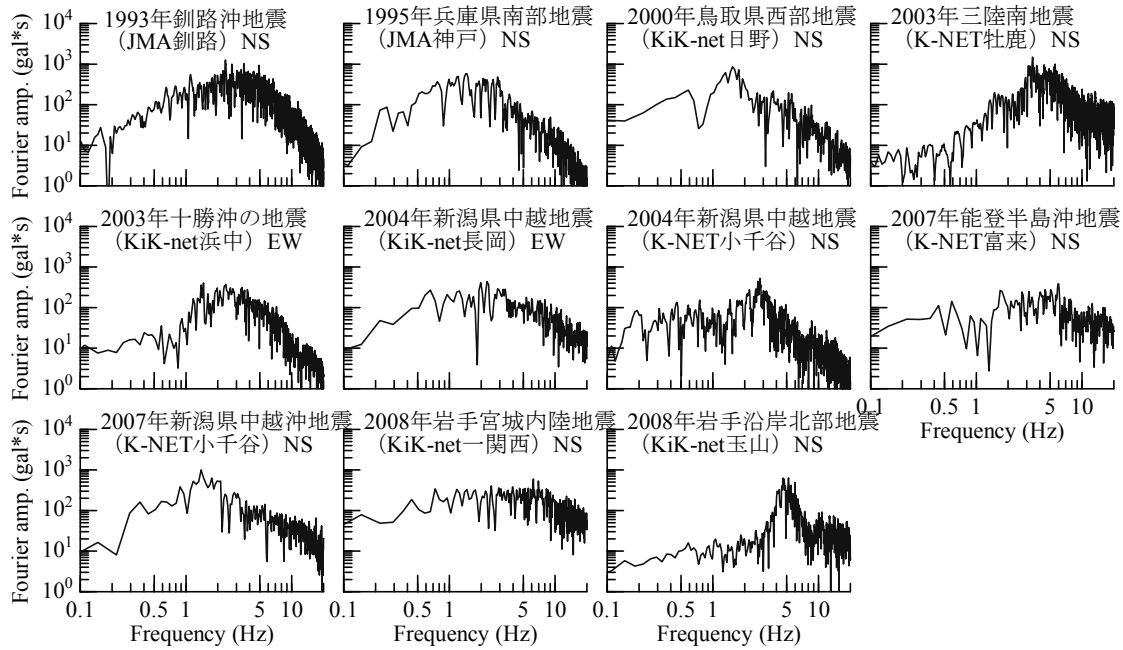


図-3 検討に用いた入力地震動のフーリエ振幅スペクトル

$$\rho = \frac{PBA}{K_f} \quad (1)$$

- ・地盤条件：多様な層構成，周期特性を有する60地盤¹⁵⁾（固有周期 T_g ，地盤強度比 K_f の分布を図-2に示すが，比較的良好な地盤から軟弱な地盤までを網羅している）
- ・入力地震動：様々なスペクトル特性を有する11地震波（図-3）を振幅調整（ $\rho=0.1\sim1000$ まで20段階に調整）
- ・解析条件：上記の地盤，地震動を組み合わせた1次元の逐次非線形解析

ここで，地震動の振幅を最大加速度 PBA と地盤強度比 K_f の比によって変化させた根拠について補足を行う．地盤強度比 K_f は，地盤の固有周期 T_g と規準変位 δ_r （地盤全体系の剛性が初期の0.5倍となる地表面変位）から次式¹³⁾によって算定される．

$$K_f = \frac{1}{T_g^2} \times \delta_r \quad (2)$$

これは，地盤要素におけるせん断強度 τ_b ，橋梁・高架橋における降伏震度 k_{by} と同一の性質を有している指標であり，対象とする地盤が地表面位置に伝えることのできる最大の力（加速度）に関連する指標である．例えば橋梁・高架橋においては，入力地震動の最大加速度 PGA と降伏震度 k_{by} の比によって整理することで，構造物の応答を適切に分類できることが確認されている¹⁶⁾．式(1)は，これを地盤への入力 PGA と系の強度 k_f に置き換えたものと解釈できる．

さらに式(1)のように整理することで，前章の図-1(a)において見られたような，同一の入力条件を与えている場合にも，対象とする系の強度の大小による，非線形挙動の程度を明瞭に評価できることが期待される．そこで本検討では，入力の大さを表現する指標として，最大加速度 PBA だけでなく，これと地盤強度比 K_f の比率 ρ を用いることとした．

以上の条件に従って多数ケースの地盤応答解析（60地盤 $\times$ 11地震動 $\times$ 20振幅=13,200ケース）を実施することで，地表面位置の地震動波形を算定した．この最大加速度 PGA を入力値の最大値（ PBA ）で除することにより，加速度増幅率 A_f を評価した．得られた結果を従来の検討と同様に横軸を周期比 T_g/T_b として整理したものを図-4に示す．これらの結果にはある周期比の範囲内での増幅率の平均値も示している．

これらの結果見ると，基本的な傾向は従来の整理結果（図-1）と同様である．具体的には，入力レベルが小さい領域では， $T_g/T_b=1$ 付近で増幅が大きくなり，それ以外では徐々に増幅率が小さくなっている．これは，地盤が概ね線形挙動している範囲では地盤と地震動の周期が一致することによる共振現象の影響で， $T_g/T_b=1$ の周辺で増幅が多くなったものと考えられる．続いて入力レベルが大きくなるにつれ，地盤の非線形挙動の影響が大きくなるために，共振する領域が左側にずれるとともに，履歴減衰の増大に伴って全体的な増幅が小さくなっている．

また，入力レベルが大きい領域においては，従来の結果と比較すると増幅のバラツキが小さくなって

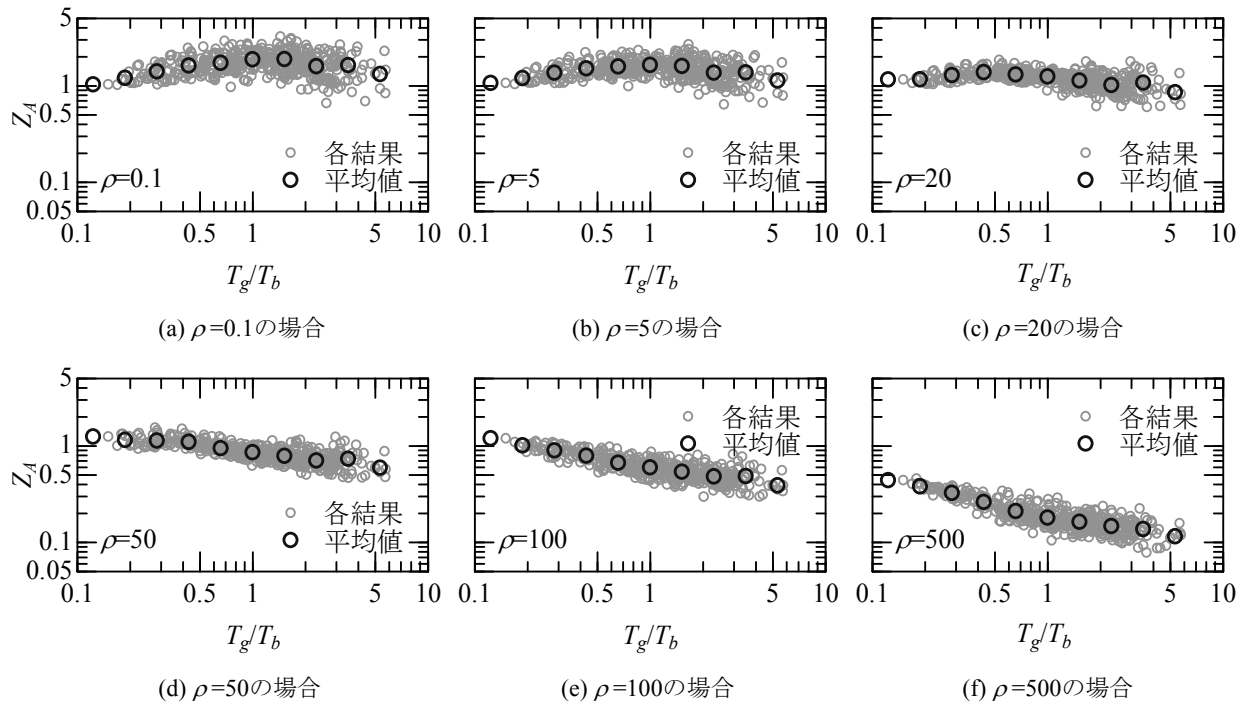


図-4 PBA/K_f毎の加速度増幅率 Z_A の変化

いる．具体的には，例えば $K_f=15$ 程度の地盤を考えた場合，図-4(e)と図-1(c)の結果は同一条件であると考えることができ，このとき前者の方が全体的なバラツキが明らかに小さくなっていることが分かる．この結果から，入力と地盤強度の比 ρ によって整理することの妥当性が確認された．

(2) 地盤強度比 K_f を考慮した地震増幅率の推定式の構築

ここでは，上記(1)で得られた地震増幅率の整理結果を簡易かつ適切に推定可能な手法の提案を行う．前述したように，横軸を T_g/T_b として加速度増幅率 Z_A を整理した結果は，従来の入力地震動の振幅レベル毎に整理した場合⁹⁾と基本的には同様の傾向であった．そこで地震増幅率の推定式も従来と同様に，次式で示される1自由度系の調和振動の理論増幅率にパラメータを加えた式による評価を試みることとする．

$$Z_A = \sqrt{\frac{1 + 4h^2 \left\{ \alpha (T_g/T_b)^\beta \right\}^2}{\left[1 - \left\{ \alpha (T_g/T_b)^\beta \right\}^2 \right]^2 + 4h^2 \left\{ \alpha (T_g/T_b)^\beta \right\}^2}} \quad (3)$$

ここで， Z_A ：加速度増幅率， T_g ：地盤の固有周期， T_b ：入力地震動の固有周期， α, β, h ：回帰係数である．この回帰係数 α, β, h は，それぞれの入力レベル ρ 毎に評価することとし，非線形の最小二乗法によって最適なパラメータを探索した．ただし減衰の大きさに関連する指標である h は，極端に大きくなった

場合にも全体の増幅率に与える影響が限定的であるため， $h \leq 2$ という制約条件を設けている．その結果得られた各回帰係数をまとめて図-5に示す．これを見ると，入力レベル ρ が大きくなるにしたがって，各係数は単調に増加していることが分かる．この傾向はつまり，地盤の非線形挙動の進展に伴い，共振周期が小さくなるとともに，全体系の減衰が上昇していることを示しており，これまでの考察とも整合する結果となっている．式(3)と3つの同定されたパラメータによって評価される増幅率 Z_A を算定した結果を図-6に水色の実線で示すが，わずかに3つのパラメータによっても，詳細な動的解析結果の平均的な傾向を適切に表現できていることが分かる．

続いて，入力レベル ρ 毎に得られた回帰係数 α, β, h を拡張し，任意の入力レベルに対しても増幅率を推定可能とする．それぞれの回帰係数は，次式に示すように簡易な4次関数によって表現することとし，各係数を最小二乗法により評価した．

$$\alpha, \beta, h = \sum_{n=0}^4 x_n \cdot \rho^n \quad (4)$$

ここで， ρ ：式(1)で表される基盤位置の最大加速度 PBA と地盤強度比 K_f の比， x_n ：各係数 α, β, h を表現するための係数 ($n=0, 1, 2, 3$) である．このとき全体の減衰を表す h は，ある ρ から頭打ちの傾向を示すため，回帰係数 x_n を算定する際には $\rho \leq 300$ の範囲のみを対象とするとともに， $x_4=0$ とすることで， ρ が大きな範囲で単調増加する表現とした．得られた各係

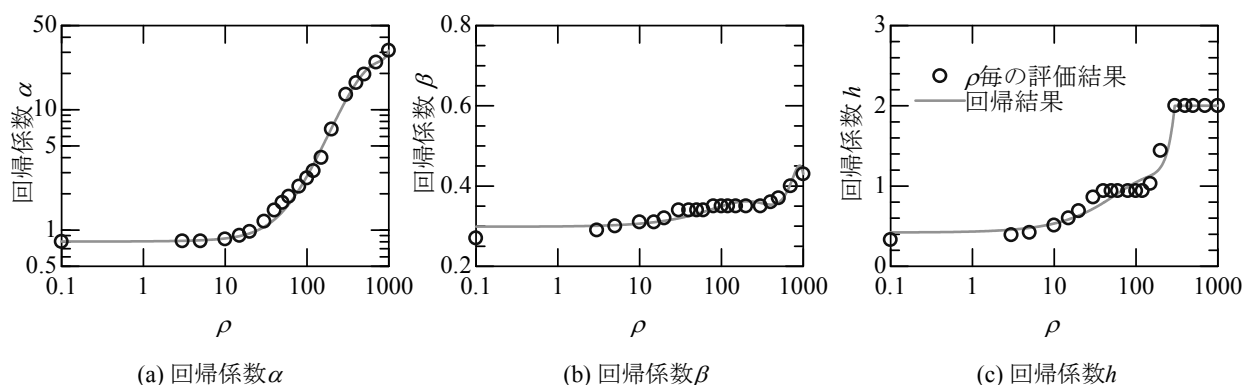


図-5 回帰係数の評価結果

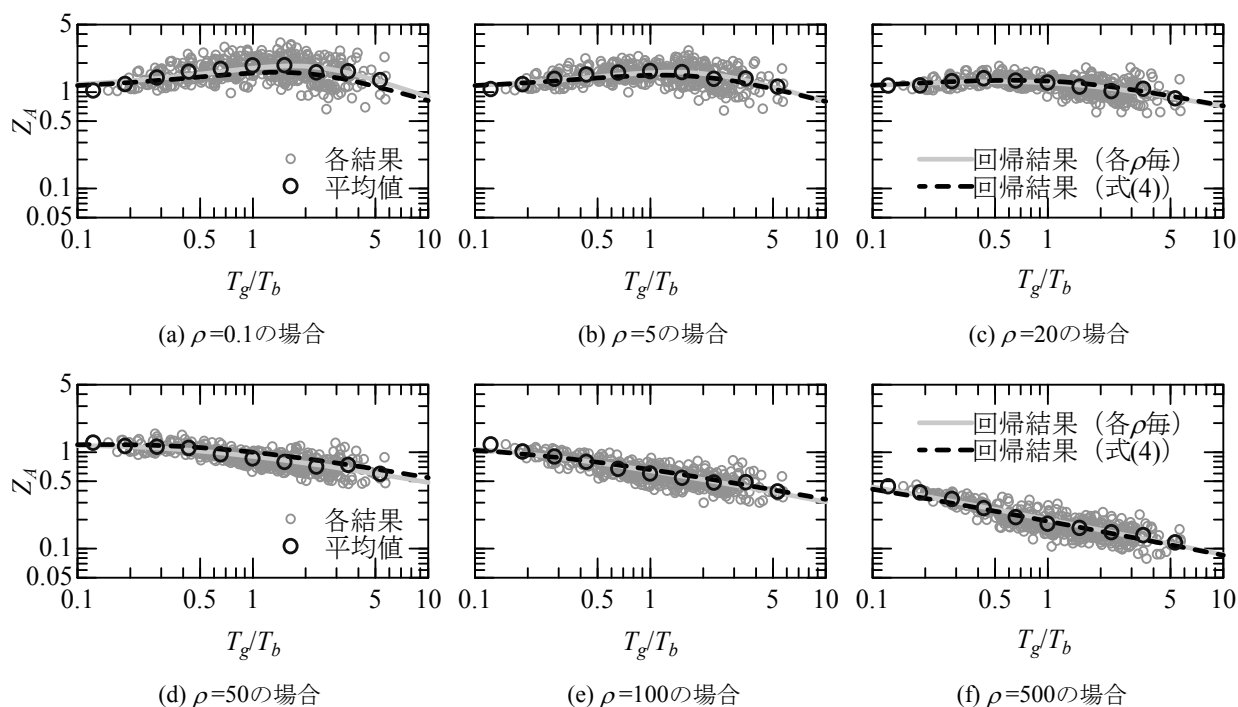


図-6 加速度増幅率 Z_A の推定結果

数をまとめて表-1に示すとともに、これによって表現される α , β , h を図-5に実線で示す。さらに、この α , β , h を用いて評価される増幅率を図-6に黒点線で示す。これを見ると、式(4)によって ρ の増加に伴う各係数 α , β , h の変化を概ね適切に再現できているとともに、この係数を用いた加速度増幅率 Z_A も全体の平均的な傾向を適切に再現しており、これを用いることで地震動レベルによらず任意の地震動、地盤条件に対して増幅率を評価可能であることが確認された。

4. 提案法による精度向上の確認

前章で構築した地震増幅率評価の有効性を検証するため、詳細な地盤応答解析による Z_A 評価結果の再

表-1 式(4)の回帰係数 x_n の評価結果

n	α	β	h^*
0	8.0336E-01	2.9874E-01	4.2143E-01
1	2.8639E-03	7.9672E-04	1.1977E-02
2	2.0528E-04	-3.3634E-06	-7.4713E-05
3	-3.5222E-07	5.3494E-09	1.7574E-07
4	1.7430E-10	-2.6523E-12	0.0000E+00

※ $h \geq 2.0$ の場合は $h=2.0$ とする。

現性を従来の手法による推定結果と比較して示す。検討に用いるデータは、3章において実施した多数の地盤応答解析の結果（13,200ケース）とした。まず、地盤応答解析による増幅率 Z_A を横軸に、簡易推定式による増幅率 Z_A を縦軸にとり、全結果をプロットした結果を図-7に示す。これより、今回提案した手法は、概ね1:1の直線に乗っている。また従来の手法と比較すると、地盤応答解析による増幅が大き

な領域（ $Z=1\sim 2$ 程度の範囲）では、両者のばらつきはそれほど変わらないが、提案手法の方が良好な結果を得ている．一方で、増幅が小さな領域（ $Z<1$ の範囲）では、提案法を用いた方が、明らかにばらつきが小さくなっていることが分かる．

続いて地震動レベルの変化に伴う増幅推定の有効性を確認するために、動的解析による増幅と簡易推定法による地震動最大値の比 R を次式により算出した．

$$R_{PGA} = \frac{PGA^{est}}{PGA^{cor}} \quad (5)$$

ここで、 R_{PGA} ：動的解析と簡易推定法による地震動最大値の比、 PGA^{cor} ：地盤応答解析による地表面地震動の最大加速度、 PGA^{est} ：簡易推定式による地表面地震動の最大加速度、である．これを入力地震動の最大加速度 PBA に対してプロットした結果を図-8に示す．これより、地震動レベル毎の平均値は、提案法の方が1.0に近く、今回の提案式の方がより良好な結果であることが確認できる．また、基盤位置での入力加速度 $PBA=10\sim 100\text{gal}$ 程度の範囲では、ばらつきの大きさは従来法と提案法でそれほど変わらない．これよりも入力レベルが大きくなると、徐々に従来法のばらつきが大きくなる一方で、提案法では入力レベルによらずバラツキは小さくなっており、地盤の強度を考慮することにより、大地震時の増幅を適切に推定出来ていることが確認できる．また、図-1で示した入力の地震動レベル PBA 毎に加速度増幅 Z_A を整理した結果に、今回提案した手法による結果の例を重ねたものを図-9に示すが、地盤強度比 K_f が小さくなることによって地盤塑性化の影響が顕著になり、共振周期が長周期化するとともに、全体の応答が低減している様子を適切に表現できていることが分かる．

このように、提案法は従来の地震増幅率評価に必要な情報（基盤位置での地震動最大値 PBA 、 PBV 、地盤固有周期 T_g ）に加え、地盤強度比 K_f をパラメータとすることで、地盤の塑性化のしやすさ、程度を適切に考慮した上での地表面地震動の推定が可能である．また地盤強度比 K_f を評価するためには、詳細な地盤情報を用いた静的非線形解析による方法だけでなく、地盤分類と地盤重量のみからある程度適切な推定を行う方法も提案¹³⁾されている．さらに地盤の固有周期 T_g のみから大まかに推定することも可能¹²⁾であり、仮に T_g のみの情報しか分からない場合にはこれを用いることで、従来と同程度の精度による増幅評価も可能である．このように本手法は、使用可能な地盤情報の多寡に応じて適切な結果を得ること

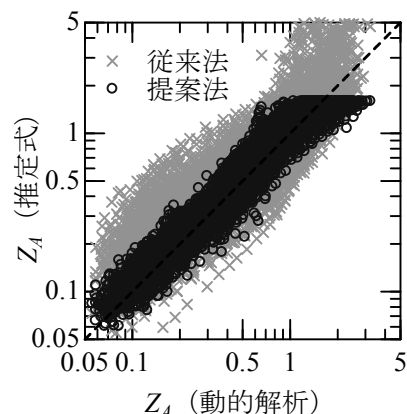


図-7 提案法の有効性確認
(詳細な動的解析による増幅率との比較)

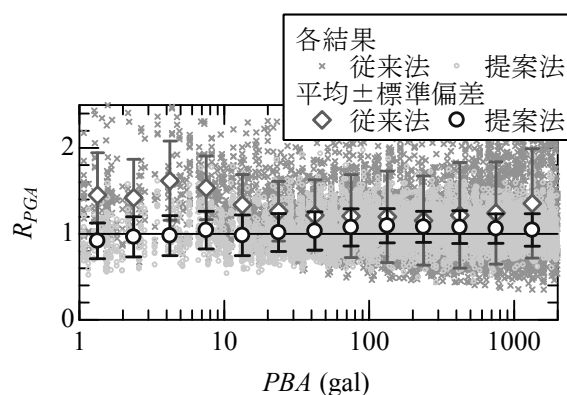


図-8 提案法の有効性確認
(地震動レベル毎の詳細な動的解析との比較)

が期待されるため、適用範囲を制限することなく、広範囲に渡る地表面地震動分布を推定可能であるという利点を有している．

5. まとめ

本検討では、地盤全体系の強度と入力地震動の最大加速度を考慮した表層地盤の地震増幅評価法の提案を行った．具体的には、地震増幅率を評価する際の情報として、従来から一般的に用いられている地震動最大値（ PBA 、 PBV ）と表層地盤の固有周期 T_g に加え、地盤強度比 K_f を指標とすることによって、地盤全体としての塑性化の程度を考慮した上での増幅評価を可能とした．本検討により得られた知見を以下に示す．

- (1) 筆者らが過去に検討した、地盤の固有周期 T_g と地震動の卓越周期 T_b の比（ T_g/T_b ）を指標とした地震増幅評価時のデータをもとに、地盤強度比

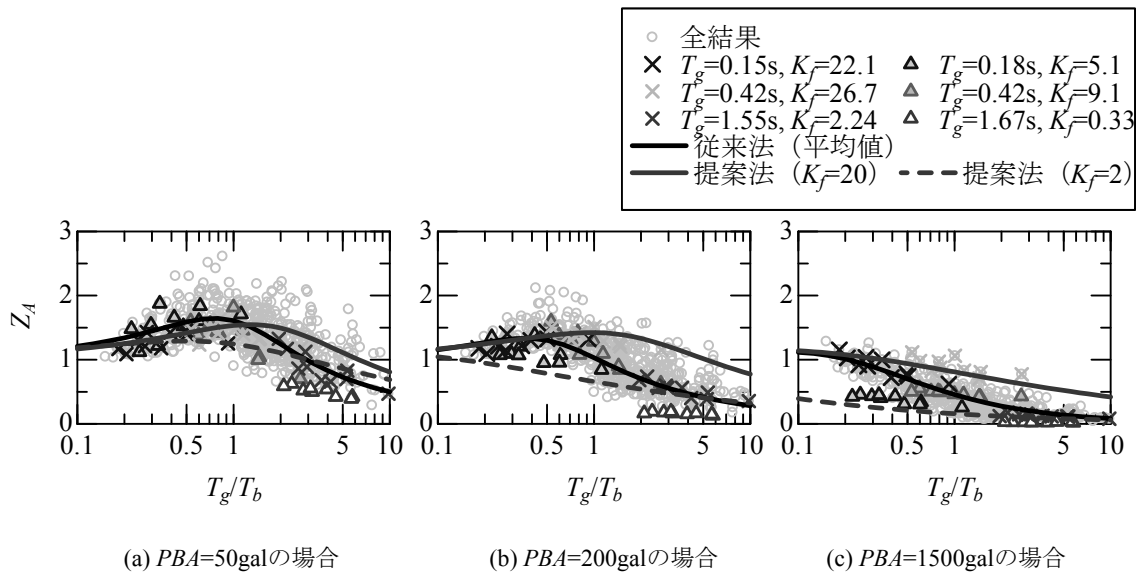


図-9 入力地震動レベル毎の加速度増幅率 Z_A の変化 (提案法と従来法の比較)

K_f の大小による地震増幅率の大小を確認した。その結果、入力地震動のレベルが大きくなると、 K_f が大きな地盤では地震増幅が大きく、 K_f が小さな地盤では地震増幅が小さくなっている。つまり地震動レベルが大きくなると、地盤全体系の強度の大小が地表面地震動の大小に影響を与えるために、これを指標として加えることで、地震増幅率評価の高精度化が期待される。

- (2) 上記(1)の結果を踏まえ、基盤位置での最大加速度 PBA と地盤強度比 K_f の比 ρ を指標とした地震増幅率の簡易評価法を構築した。本手法は、従来の地震増幅推定式⁹⁾と同様の表現形式となっており、かつ必要な情報も従来法に地盤強度比 K_f を加えただけである。本手法によって地表面地震動を推定することで、幅広い地震動レベルに対して精度が向上することを確認した。また仮に詳細な地盤情報が存在しない場合においても簡易に K_f を推定することが出来るため、得られる情報量に応じた適切な地表面地震動推定が簡易に実施可能である。

本手法では、地表面地震動を比較的高い信頼性で評価する手法の一つである逐次非線形解析による解析結果に基づいて構築している。そのため、今回提案した手法の結果は、詳細な地盤応答解析の結果を適切に再現可能なものとなっている。逐次非線形解析を用いることで、地表面位置での地震動を適切に表現できることは、様々な事例によって検証されているため、本手法による結果はある程度の信頼性を有しているものと考えられる。一方で、近年では比

較的規模の大きな地震が頻発しており、地盤の非線形挙動が顕著な条件での記録も複数得られている。今後は、これらの地震観測記録に対して本手法を適用することで、提案法の有効性、信頼性を確認する必要がある。

謝辞：本検討では、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netの観測記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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報告集, 第 442 号, pp.71-78, 1992.
- 2) 松岡昌志: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第 22 回地盤震動シンポジウム, pp.23-34, 1994.
- 3) 古本吉倫, 杉戸真太, 能島暢呂, 鈴木貴詞: 変換係数による堆積地盤での計測震度の推定法, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.25, pp.57-60, 1999.
- 4) 石井晃, 石田寛, 大保直人, 永田茂, 塩崎信久: 震源情報と地盤の非線形増幅特性を考慮した観測地点間の地震動推定方法, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.25, pp.85-88, 1999.
- 5) 末富岩雄, 強震時における地動分布特性の即時推定に関する研究, 佐藤工業技術研究所報, 別冊, 2000.
- 6) 中村晋, 地震動指標の非線形増幅に及ぼす地盤特性と地震動特性の影響に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.449-456, 2004.
- 7) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.1, pp.11-22, 2006.
- 8) 翠川三郎, 駒澤真人, 三浦弘之: 横浜市高密度強震

計ネットワークの記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度との関係, 日本地震工学会論文集, Vol.8, No.3, pp.19-30, 2008.

- 9) 野上雄太, 坂井公俊, 室野剛隆, 盛川仁: 表層地盤と入力波の周期特性を考慮した表層地盤での地震増幅率の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.191-201, 2012.
- 10) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 全国地震動予測地図 (手引・解説編 2010 年版), 2010.
- 11) 中央防災会議: 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告), 2012.
- 12) 坂井公俊, 室野剛隆: 地盤の等価 1 自由度モデルを用いた非線形動的解析法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.3, pp.341-351, 2015.
- 13) 坂井公俊, 井澤淳, 室野剛隆, 日野篤志: 地盤全体系の強度指標の提案とその簡易推定法に関する検討, 日本地震工学会論文集, Vol.15, No.7, pp.22-33, 2015.
- 14) 坂井公俊, 井澤淳, 室野剛隆: 地盤全体系の強度と固有周期を用いた耐震設計のための地盤分類法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 投稿中.
- 15) 川西智浩, 室野剛隆, 佐藤勉, 畠中仁: 土質区分の影響を考慮した地盤種別の分類に関する検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.187-196, 2007.
- 16) 室野剛隆, 野上雄太, 宮本岳史: 簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.3, pp.535-546, 2010.