

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

A Study on the effect of the characteristics between earthquake ground motion and ground structure on non-linear amplification in a soil deposit

中村 晋
Susumu Nakamura

工博，日本大学助教授，工学部土木工学科(〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

The objective of this report is to make clear the essential parameters for representing the amplification of earthquake ground motion caused by the non-linear behavior of soil. Among the parameters about the ground characteristics and the earthquake ground motion, it is noticed that the relationship between the natural period and specific period for frequency characteristics of earthquake ground motion affects to the amplification in addition to the usual parameters such as the distribution of shear wave velocity with depth, the wave form, and the maximum amplitude of earthquake motion. Seismic response analysis considering non-linearity of soil based on the equivalent linear method is carried out for the ground structure models based on the parameters mentioned above by use of three seismic records. It is found that the relationship and both parameters are important role for the amplification.

Key Word: Maximum Index of Earthquake Ground Motion, Amplification Factor, Non-Linearity of Soil, 1D Seismic Response Analysis, Energy Index

キーワード：地震動の最大値指標，増幅率，非線形，1次元地震応答解析，エネルギー指標

1.はじめに

設計用入力地震動や地震被害想定に用いる想定地震動を評価する際，対象とする構造物に応じ，地表，地中または基盤位置でその特性を評価することが必要となる．地震動の特性を構成する3要素（震源・伝播・増幅）のうち増幅特性，特に表層地盤の増幅特性には，良く知られているように地盤材料の非線形挙動の影響が大きい．このことから，表層地盤内で地震動を直接推定することは，既往の強震記録を直接活用する場合や距離減衰式などを用いた方法などを除き困難となっている．よって，その推定には，まず，対象地点近傍の工学的基盤上での地震動を震源，地点依存の解析法を用いて評価し，次いで，その基盤上の表層地盤における非線形増幅を評価するという2段階の過程による手法が一般に用いられている．

表層地盤における地震動増幅の評価手法には，モード解析や地震応答解析などの数値解析による方法と地盤や地震動の条件に基づき簡易的に評価する手法の2つに大別される．後者の手法は，欧米ではEurocode8¹⁾，我が国では改訂された建築基準法などの建築物関連の基準類²⁾³⁾で用いられている．個別構造物を対象とした設計を行う場合には，得られる条件と要求される性能に応じていずれかの手法を適切に選択すること可能である．また，地震被害推定，特に地震直後の地震被害の即時推定を行うためには，面的，つまり多点推定を即時的に実施する必要がある，簡易手法を選択する

ことが現実的である．簡易手法は，強震記録または数値解析により得られた増幅特性の統計処理により得られたモデルを用いていることから，精度面では対象サイトの諸特性を直接考慮可能な前者の手法に比べ劣ると考えられる．しかし，その手法は簡易性が最大の利点であり，推定精度の向上が図られれば，地震直後の即時被害推定への活用，さらに設計面での活用が期待される．

簡易手法の精度は，非線形応答を支配する地盤特性や地震動特性に関するモデルとそのパラメーターに大きく依存していることはいうまでもない．そのモデルのうち観測記録を用いる手法として，最大加速度，また最大速度の増幅率と表層地盤の平均せん断波速度との回帰モデルによる手法⁴⁾，距離減衰式にサイト増幅特性と関連するダミー変数を導入し，それと微地形を関係づける手法⁵⁾などがある．また複数の地盤モデルを用いた非線形地震応答解析に基づく解析結果の統計処理に基づくモデルとして，増幅率を入力地震動のみの関数⁶⁾，入力地震動と表層地盤の固有周期⁷⁾，また入力地震動と表層地盤の微地形や固有周期区分⁸⁾と関連づける手法などがある．地盤材料の非線形性は入力地震動の特性，例えば最大振幅や周波数特性，と地盤の構造や周波数応答特性との相対関係に依存する．このことから，地盤の非線形挙動を考慮した増幅特性のモデル化には，両者の相対関係を適切に表すパラメーターの選定と，適切なモデルの構築が必要となる．地震観測に基づく手法では，現時点で，地震動の振幅レベルに応

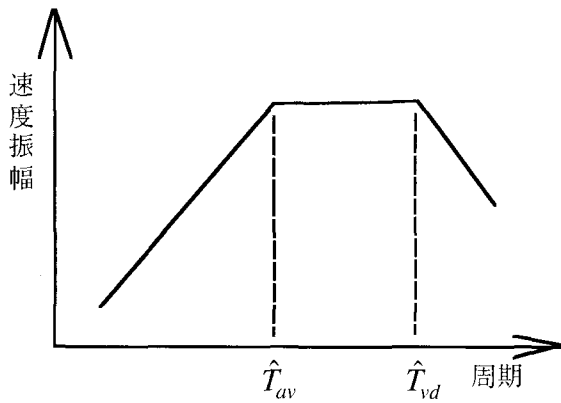


図-1 地震動の速度成分のフーリエスペクトルモデル

じた増幅率の回帰モデルを評価するために必要な地震記録が十分に得られていない。このことから、数値解析に基づくモデル化は有用となる。その手法は、いずれも入力地震動の最大振幅をパラメーターとし、卓越周期また微地形などを直接又間接の地盤特性を表すパラメーターとしている。しかし、いずれのモデルも、入力地震動の周波数特性は解析結果には含まれているもののその評価パラメーターとしては考慮されていないため、入力地震動と地盤との応答特性の相対関係を直接考慮するには至っていない。

ここでは、入力地震動の振幅レベルはもとより、両者の周波数特性、さらに地盤の構造に着目し、地震動の最大振幅に関する増幅率を簡易に推定するモデルを構築するために有意な地震動および地盤構造特性パラメーターを把握するため、それらパラメーターと増幅率との関係を数値解析に基づき明らかにする。地盤モデルには、深度方向のS波速度分布形状の異なる4種類の地盤構造を用い、さらに、それぞれの表層地盤の固有周期もパラメーターとするため、表層地盤のせん断波速度を所要の固有周期に応じて変化させた。入力地震波には、周波数特性の異なる3種類の観測記録を用いた。また、表層地盤の非線形地震応答解析には、従来より設計で用いられている等価線形化法を用いた非線形地震応答解析法⁹⁾を用いた。

2. 表層地盤における地震動の増幅率とその評価パラメーター

地震動の増幅率 α は式(1)に示す様に表層地盤の基盤位置 A_{but} および地表 A_{surf} における地震動の最大振幅の比と定義する。なお、 A_{but} は基盤位置における複合波の最大振幅を表している。

$$\alpha = \frac{A_{surf}}{A_{but}} \quad (1)$$

また、地震動の最大振幅として、従来よりの設計指標である最大加速度および構造物被害などと関連性が指摘されている最大速度、それに加え著者が構造物被害

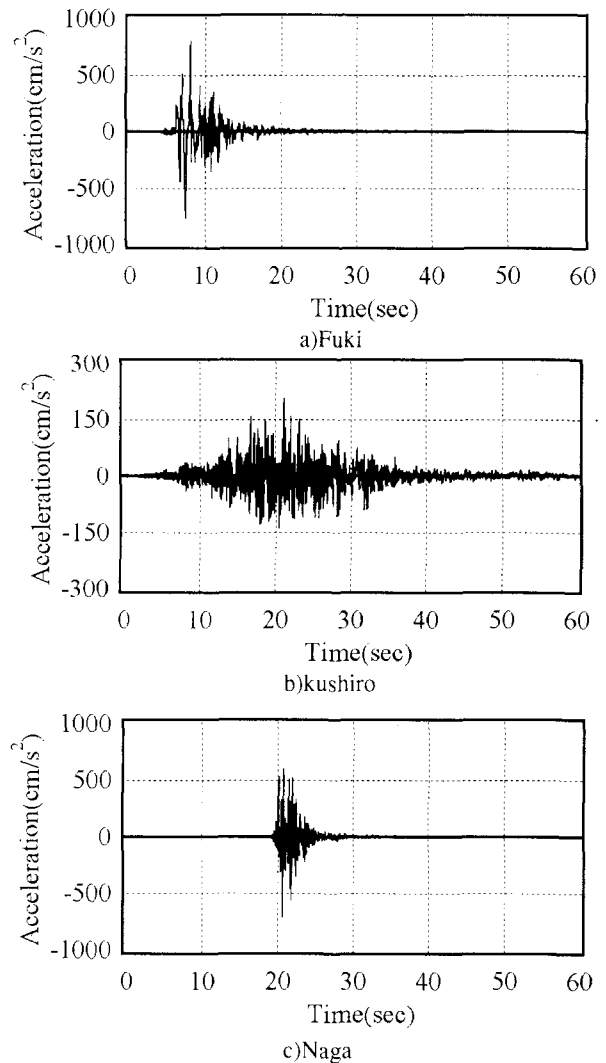


図-2 入力地震動の加速度時刻歴

害との関連性を有する指標として提案¹⁰⁾している地震動のエネルギー指標に着目する。さらに、地震動の周波数特性として、神山¹¹⁾により提案された図-1に示すフーリエスペクトルのモデルより、地盤の非線形挙動に影響を及ぼすと考えられる速度成分のフーリエスペクトル形状を規定する次式に示す2つの周期 $\hat{T}_{av}$ 、 $\hat{T}_{vd}$ を対象とした。

$$\left. \begin{aligned} \hat{T}_{av} &= 2\pi \frac{v_{max}}{a_{max}} \\ \hat{T}_{vd} &= 2\pi \frac{d_{max}}{v_{max}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 a_{max} 、 v_{max} 、 d_{max} はそれぞれ入力地震動の最大加速度、最大速度、最大変位を表す。著者により提案されているエネルギー指標 I_{av} は、最大加速度と最大速度の積 ($a_{max} \cdot v_{max}$) と周期指標 T_{av} ($= 2\pi \cdot v_{max} / a_{max}$) により構成され、周期は式(2)における $\hat{T}_{av}$ と対応し、地震動の周波数特性も内在する指標であるといえる。

次に、地盤の特性を表すパラメーターとして、せん断波速度構造および1次固有周期 T_g の2つを対象とした。

以上の様に、地震動は最大振幅および2つの周期、地

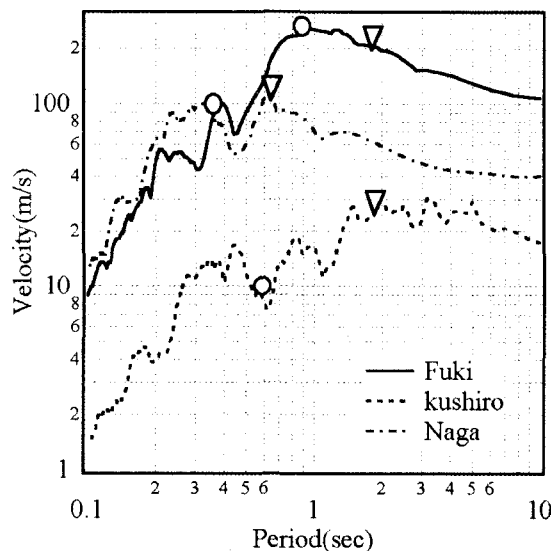


図-3 入力地震動の速度応答スペクトルの比較(h=5%)

表-1 入力地震波の周波数特性を表す周期の比較

	Fuki	kushiro	Naga
$a_{\max} (cm/s^2)$	802.26	203.96	714.56
$v_{\max} (cm/s)$	100.28	19.56	40.46
$d_{\max} (cm)$	30.25	5.94	3.90
$\hat{T}_{av} (sec)$	0.79	0.60	0.35
$\hat{T}_{vd} (sec)$	1.90	1.90	0.61

盤はせん断波速度構造および1次固有周期の2つと合わせて5つのパラメーターについて地震動の増幅率との関係を明らかにする。

3.入力地震動および解析地盤モデル

解析には、既往の観測記録より選択した周波数特性や波形などの異なる3種類の記録を入力地震波として用いた。それらは、1995年兵庫県南部地震の際、葺合で観測された記録のNS成分(以後、Fukiと呼ぶ)、1993年釧路沖地震の際、厚岸で観測された記録のNS成分(以後、kushiroと呼ぶ)および1998年岩手県内陸北部地震の際、長山¹²⁾で観測された記録のNS成分(以後、Nagaと呼ぶ)の3つである。それらの加速度時刻歴を図-2に示す。さらに、図-3にそれらの速度応答スペクトルを示す。図には、式(2)で示した地震動の速度成分のフーリエスペクトルを規定する2つの周期のうち $\hat{T}_{av}$ を○、 $\hat{T}_{vd}$ を▽で示している。また、それらの周期を地震波毎に表-1に示している。概ね、両周期は地震動の周波数特性を規定する周期と見なしてよいことが分かる。それら3つの入力地震波を入射波成分として入力した。さらに、入力波の最大加速度振幅(2E)は、ほぼ線形応答を示す $0.1m/s^2$ と $0.5m/s^2$ 以降、 $0.5m/s^2$ 毎に $12.5m/s^2$ までの24ケースについて解析を実施した。本来、地震動の周波数特性は地震の規模に応じて異なり、最大振幅の大きさに

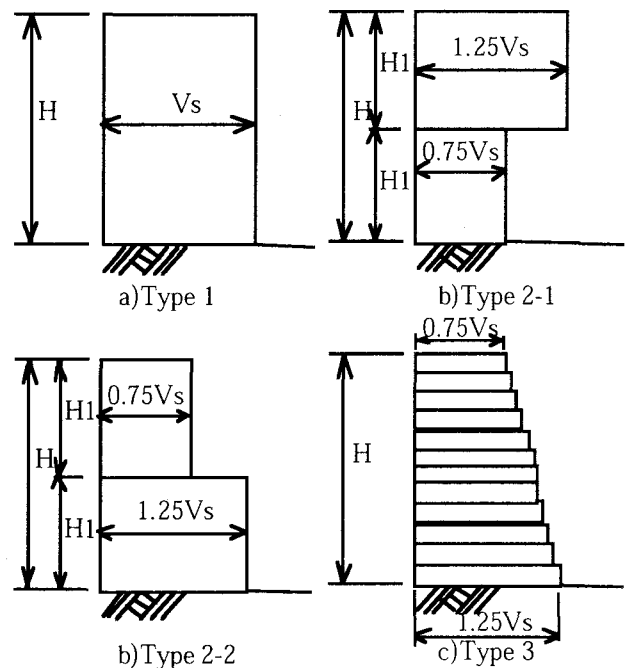


図-3 解析地盤モデル

応じて異なることになる。本論では入力地震動と地盤の周波数特性の相対関係が重要な着眼点であることから、入力地震動の周波数特性に関するパラメーターである強震記録の周波数・位相特性は変えず、その最大振幅のみを変化させた。

次に、解析に用いた地盤構造モデルは表層および基盤層で構成され、表層地盤のせん断波速度(V_s)構造モデルを図-4に示す。図に示す様に表層が一樣なせん断波速度を有する地盤タイプをType1、表層がその速度構造で大きく2つの層に分けられ、地表に近い層に比べ基盤上の層のせん断波速度が小さい地盤タイプをType2-1、その逆で基盤上の層のせん断波速度が大きい地盤タイプをType2-2、さらに地表から基盤層に向けて、せん断波速度が深度に比例して増加する地盤タイプをType3とする4つの地盤モデルを用いた。Type2およびType3における各層のせん断波速度構造は、それぞれの比率を図-3に示す値に固定している。これは、表層地盤の不均質性の定義に関する既往の研究³⁾をふまえ、表層地盤の平均せん断波速度と各層のせん断波速度との差が平均せん断波速度に対して0.2程度の比率となるように設定している。

次に、それら地盤モデルの地盤特性のうち、単位体積重量は、表層地盤が $17.6kN/m^3$ 、基盤層が $19.6kN/m^3$ とし、基盤層のせん断波速度は $500m/s$ とした。表層地盤のせん断波速度は、各層のせん断波速度を用い、4分の1波長則に基づき算出した表層地盤の1次固有周期が所定の固有周期となるように設定した。所要の1次固有周期は、0.2秒から0.2秒間隔で1.6秒までの8ケースとした。さらに、表層地盤の層厚Hは30mを基本としたが、1次固有周期が0.2秒および0.4秒の場合のみ20mとした。

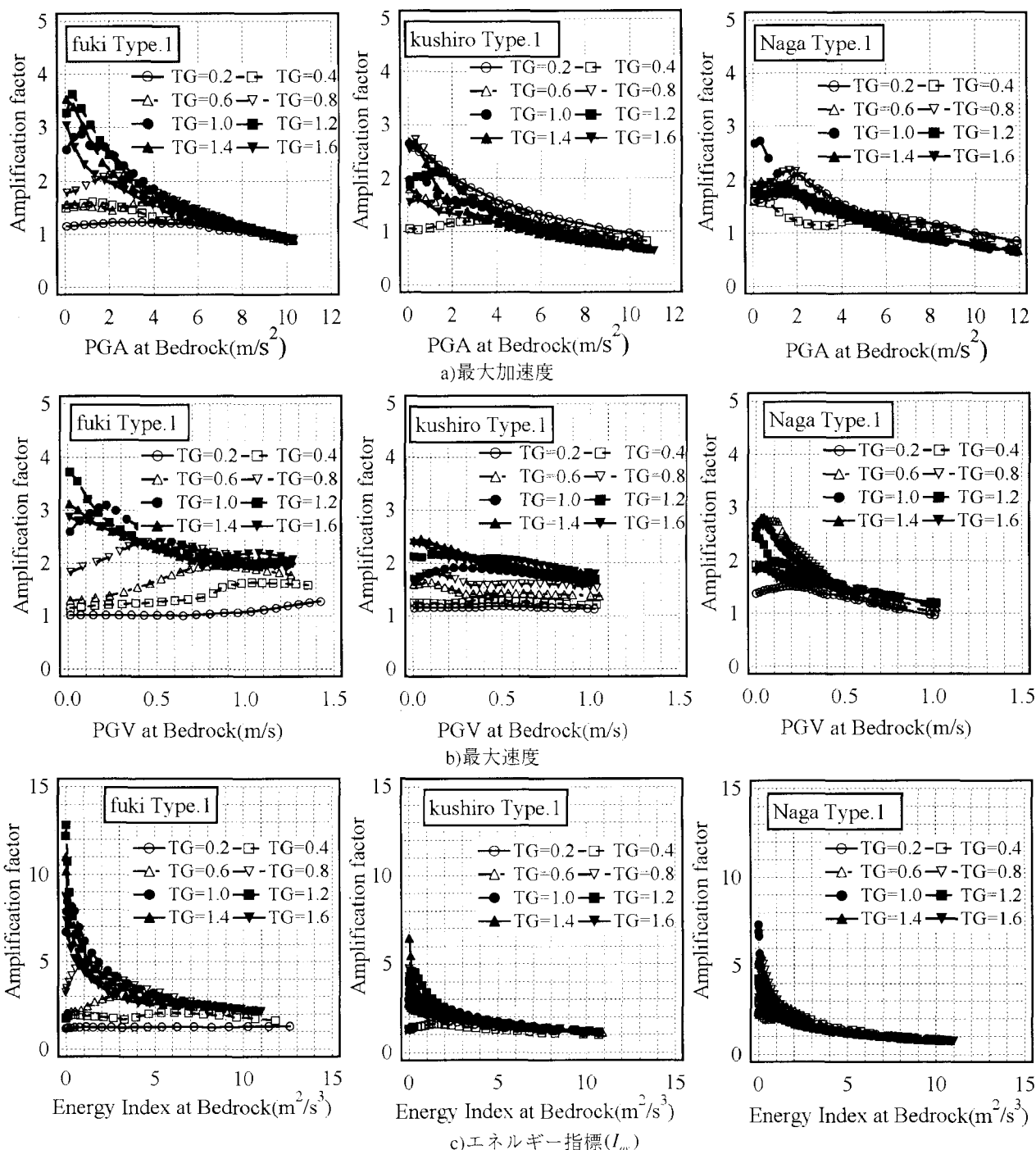


図-4 入力地震波に応じた基盤位置での地震動の最大振幅と増幅率の関係(Type1)

また、解析モデルの地層分割は、層厚が1.0mとなるように実施した。

最後に、地盤材料の非線形モデルには、双曲線モデルを用い、表層地盤の強度定数として内部摩擦角を30度と設定した。また、減衰定数のひずみ依存特性は、載荷時の履歴法則としてMasing則を用いて算出した。

4.入力地震動および地盤条件に応じた地震動の増幅率

4.1入力地震動に応じた地震動の増幅率

まず、数値解析に基づく増幅率を表すために用いら

れている入力位置での地震動の最大振幅と増幅率との関係を、地盤タイプがType1における各固有周期の地盤モデルについて、入力地震波および地震動の最大振幅の指標に応じ図-4に示す。

基盤位置での地震動の最大振幅が小さい場合、いずれも表層地盤の固有周期に応じて増幅率が異なっているが、その差異の程度は入力地震波によって異なっている。また、最大加速度の応答倍率についてみると、基盤位置での地震動の最大振幅が大きくなるにつれ、増幅率は表層地盤の固有周期によらずある値に収束す

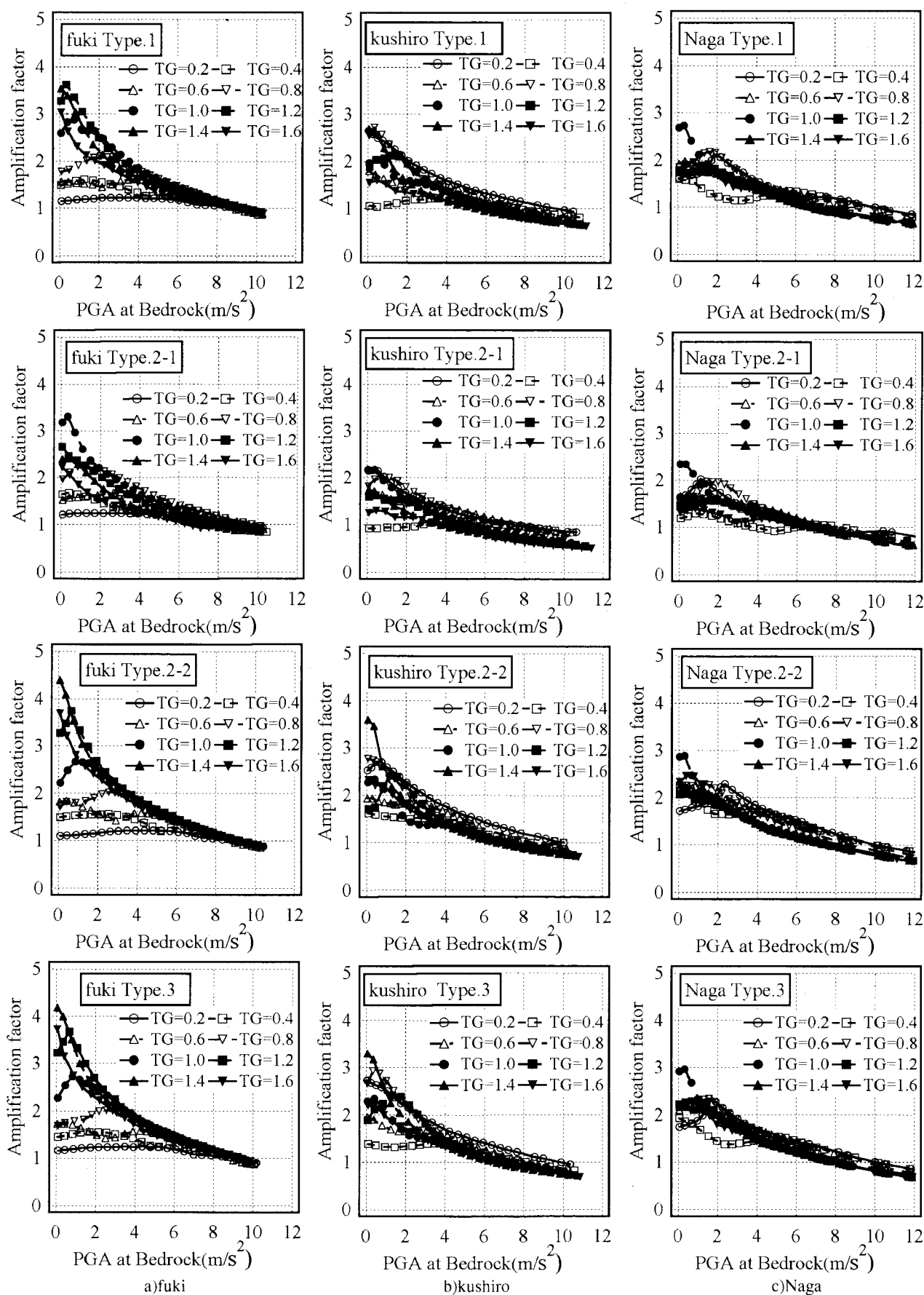


図-5 入力地震波に応じた基盤位置での地震動の最大加速度とその増幅率の関係

る傾向が認められる。また、最大速度についてみると、Fuki波やkushiro波については基盤位置での地震動の最大振幅が大きくなっても、表層地盤の固有周期による増幅率の差異がみとめられる。Naga波については最大加速度と同様の傾向が認められる。エネルギー指標 (I_w) は最大加速度と最大速度の特徴を合わせた特徴を有しているとともに、最大加速度、最大速度に比べ基盤位置での地震動の最大振幅に対する増幅率の感度が著しく大きくなっている。

次に、地盤タイプが基盤位置での最大振幅と増幅率の関係に及ぼす影響を、最大加速度の増幅率について図-5に示す。入力地震波によらず、Type2-1は他の地盤タイプに比べ、増幅率が小さな値となっていることが分かる。他の地盤タイプについては、地盤タイプによらずよく似た傾向を示していることが分かる。

以上より、入力地震波の差異、その最大振幅および地盤のタイプに加え、既往の簡易手法⁷⁾⁽⁸⁾にも用いられている表層地盤の固有周期は増幅率を評価する上で重要なパラメーターであることが確認された。

4.2 地盤と地震動の周波数特性に応じた地震動の増幅率

ここでは、表層地盤の固有周期と入力地震動の周波数特性との相対関係に着目し、増幅率と基盤位置での地震動の最大振幅の関係の検討を行う。図-6に、地盤タイプがType1について、入力地震波とその最大振幅に応じた表層地盤の固有周期と増幅率の関係を地震動の最大振幅の指標毎に示す。図には、表-1に示した入力地震波の速度成分のフーリエスペクトルモデルを規定する2つの周期を図-3と同じ記号で示している。また、図中の増幅率は、図-4、5と異なり、基盤位置における各指標に関する入力地震動の最大振幅を図中の値となるように振幅調整を行い求めたものである。

これより、fuki波およびkushiro波については、その2つの周期の間に表層地盤の固有周期がある場合、増幅率が入力地震動の最大振幅に応じ、顕著に変化している。しかし、周期 $\hat{T}_{w1}$ より短周期側に表層地盤の固有周期がある場合、前述のその2つの周期帯に表層地盤の固有周期がある場合に比べ、地震動の最大振幅に関する指標によらず、入力地震動の最大振幅に応じた増幅率の変化は大きくないことも分かる。また、Naga波では他の2つの入力地震波に比べ、いずれの指標の増幅率も表層地盤の固有周期に応じ有意に変化していることが分かる。その変化は、2つの周期のうち周期の長い $\hat{T}_{w2}$ より長周期側に大きいことが分かる。この様な2つの周期間の増幅率の変化に関する他の2つの入力地震動との差異は、図-3に示したNaga波の速度応答スペクトルより、2つの周期の間のスペクトル振幅が、その2つの周期の長・短周期側での値より小さく、増幅が顕著に顕れなかったものと考えられる。

次に、その2つの周期帯における増幅率と表層地盤の固有周期の関係に及ぼす入力地震動の最大振幅の影響についてみる。基盤位置での地震動の最大振幅が小さい場合、最大加速度および最大速度の増幅率は入力地震波の周波数特性の影響を受け入力地震波毎に両者の関係、さらに増幅率自体も異なっている。エネルギー指標の増幅率は、fuki波が他の2つの入力地震波に比べ値が大きいものの、他の2つの入力地震波については基盤位置での地震動の最大振幅ごとの値が同程度となっている。さらに、その指標は、地盤の固有周期によらず、基盤位置での地震動の最大振幅に応じ、比較的規則的に変化していることが分かる。定性的ではあるが、地震動の最大値指標のうち、エネルギー指標は表層地盤における地震動の非線形増幅を求める指標として、入力地震波の振幅レベルの増加に対する感度が高いことが分かる。このことから、エネルギー指標は、地震動と構造物の応答などを関連づけるという観点で他の指標に比べ優れていると言える。さらに、エネルギー指標は、他の指標に比べ、表層地盤に固有周期に応じた変化がなめらかとなっている。このことは、任意固有周期における増幅率の推定を内挿により行う際、その値は内挿に用いた固有周期における値と同程度の精度を有している可能性が高いと推測される。

5. 地震動の非線形増幅を支配するパラメーターと今後の課題

前章では、地盤特性に関するパラメーターとして、地盤のS波速度構造、表層地盤の1次固有周期、入力地震波のパラメーターとして、入力地震波、その最大振幅およびその速度成分のフーリエスペクトルを規定する2つの周期と表層地盤における地盤材料の非線形化に応じた地震動の増幅率との関係を把握するため、地震応答解析を実施した。その際、増幅率評価の対象とする地震動の最大振幅成分は、最大加速度、最大速度に、両者の積により表されるエネルギー指標 (I_w) を加えた3つである。

ここで検討の対象としたパラメーターのうち、本論で着目した表層地盤の固有周期と入力地震波のスペクトル特性を規定する2つの周期は、表層地盤における地震動の増幅率を支配する因子としての有意性が明らかとなった。後者の2つの周期は、入力地震波の特性の差異を表す指標としての役割を果たすことが今後期待される。しかし、fuki波とkushiro波の2つの入力地震波に対する各指標の増幅率は異なっているにもかかわらず、表-1に示した両波の2つの周期は $\hat{T}_{w1}$ に多少の差異はみられるものの、同程度の値となっている。両波の差異を表す周波数特性として、 $\hat{T}_{w1}$ が有意であることを明らかにするため、類似の周波数特性を有する入力地震波に対する評価を実施することが必要であろう。また、

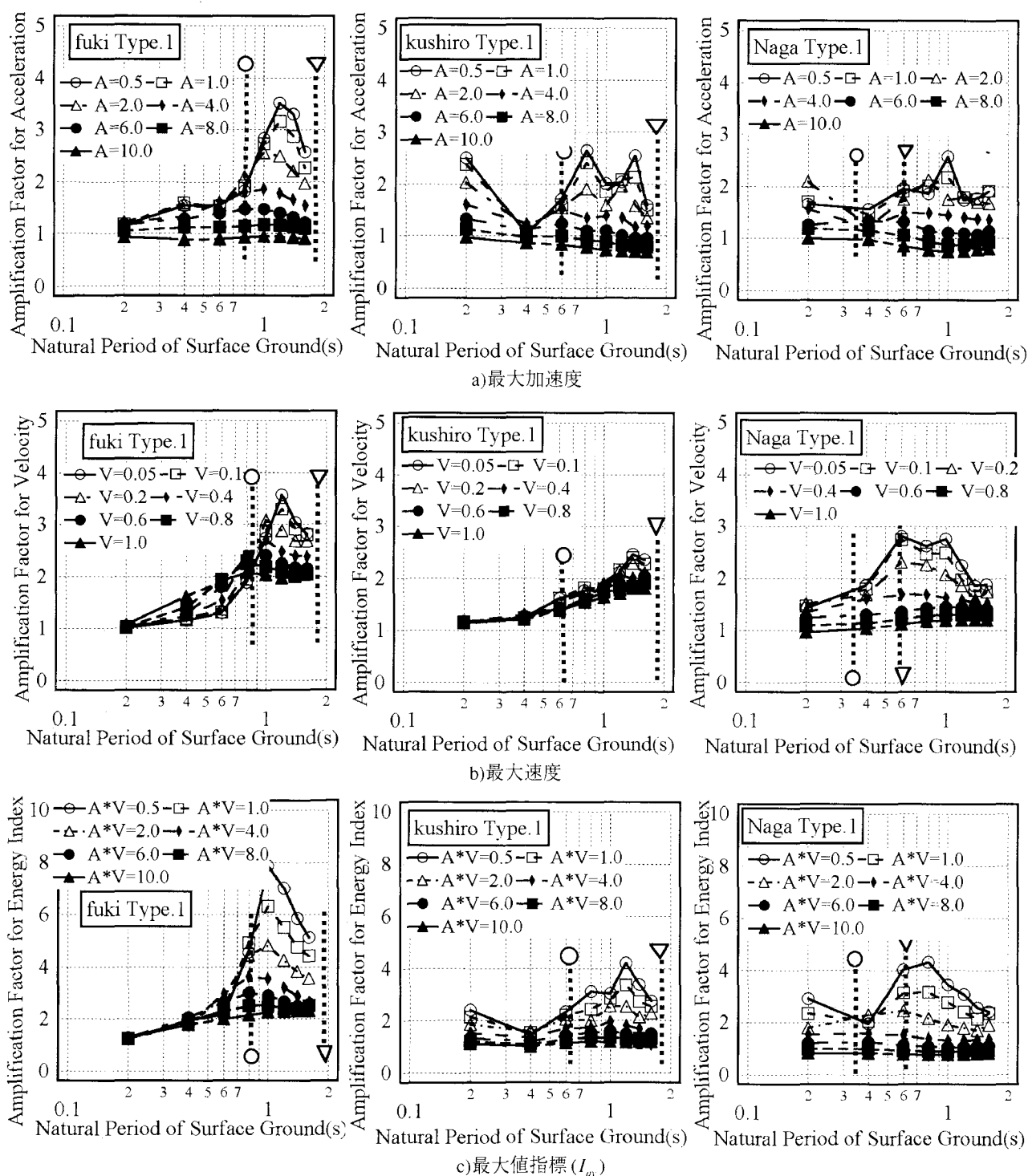


図-6 入力地震波に応じた表層地盤の固有周期毎の増幅率と基盤位置での地震動の最大振幅の関係(Type1)

表層地盤のS波速度構造分布は、地震動の最大振幅の非線形増幅という観点から、Type1, Type2-2およびType3からなるグループ1とType2-1のグループ2の2つに分類されることも明らかとなった。

さらに、最大加速度、最大速度のような地震動自体の最大振幅に比べ、両者の積で表されるエネルギー指標 (I_m) は、入力地震波の最大振幅が小さい線形応答レベルからその振幅の大きな非線形応答に至る際の増幅率の変化も大きく、表層地盤に固有周期に応じた増

幅率の変化がなめらかであることなどから、優れていると言える。しかし、エネルギー指標 (I_m) は地震被害想定、設計に際して考慮される複数の地震動より設計で考慮すべき地震動の選定などへの活用が期待されるものの、現時点でエネルギー指標 (I_m) より、最大加速度また最大速度といった地震動の成分を直接評価することができない。今後、地震動成分の直接評価への適用も含み、エネルギー指標 (I_m) の増幅率の定量評価を行うことが必要である。

5.あとがき

ここでは、表層地盤において地盤材料が非線形化した際の地震動の最大振幅に関する増幅率と有意に関連し、入力地震動および地盤特性の周波数特性などの相対的な関係を表すパラメーターの評価を実施した。その際、4種類のS波速度構造を有する地盤モデル、それぞれについて表層地盤の固有周期が8種類となるようにせん断波速度を定め、周波数特性の異なる3種類の地震観測記録を入力地震波とする非線形地震応答解析を実施した。その解析は、等価線形法に基づく周波数領域での解析法である。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)着目した表層地盤の1次固有周期と入力地震波の速度成分のフーリエスペクトルを規定する2つの周期の関係は、地盤のS波速度構造、および、入力地震波、その最大振幅などの従来より考慮されてきた増幅率の評価パラメーターに加えることが期待される因子である。
- (2)地震動の増幅率を表す地震動の最大値指標として、最大加速度と最大速度の積で表されるエネルギー指標は、最大加速度と最大速度の増幅率に比べ、入力地震波の振幅変化への感度や表層地盤の固有周期に応じた増幅率の変化がなめらかであることなどから、精度の高い推定モデルを構築できる可能性が高い。

ここでは、表層地盤における非線形増幅を支配するパラメーターの把握を目的としていたため、地盤内に発生するひずみが1%を越える様な強非線形応答の評価に適用上の課題を有する等価線形化法による非線形地震応答解析を実施している。そのことは、本論で得られた線形から非線形に至る過程をも含む解析結果の考察より得られたパラメーターの評価に影響を及ぼすものではないと考える。しかし、それらパラメーターを用いた強非線形域を含む地震動の増幅率の定量評価を行う際、ここで得られた解析結果の精度の検討は従来の数理モデルの有用性の検討も含め、今後の課題としたい。

参考文献

- 1)CEN: Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resitance, 1998
- 2)平成12年5月31日、建設省告示第1457号：Td, Bdi, 安全限界変位, Ts, Bsi, Fh及びGsを求める方法並びに屋根ふき材等の構造耐力上の安全を確かめるための構造計算の基準を定める件
- 3)設計用入力地震動研究委員会編，設計用入力地震動作成手法技術指針(案)・同解説，平成3年成果報告書，建築研究資料，No.83，付録1，p77，1992
- 4)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.71-78，1994
- 5)大西淳一，山崎文雄，若松加寿江，気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類の関係，土木学会論文集，No.626/I-48，pp.79-91，1999
- 6)濱田禎，杉田秀樹，金子正洋，地震時特性値分布の即時予測手法に関する研究，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.193-196，1997
- 7)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点間の地震動推定手法，第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp.85-88，1999
- 8)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，京都大学博士論文，2001
- 9)吉田望，末富岩雄：DYNEQ-等価線形化法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム，佐藤工業(株)技術研究所報，pp.61-70,1996
- 10)中村晋，室野剛隆，芦谷公稔，地震動のエネルギーの評価指標に基づく非線形地震応答の推定に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.399-412，2002
- 11)M. Kamiyama, SPECTRAL CHARACTERISTICS OF STRONG GROUND MOTION IN TERMS OF PEAK VALUES, J.S.C.E., Structure Engineering and Earthquake Engineering., Vol.12, No.3・No.4, pp.79-93, 1996
- 12)中村晋，大角恒雄，福元俊一，岩手県内陸北部地震(1998.9.3)で観測された地震記録の特性とそのシミュレーション解析，構造工学論文集，Vol.48A，pp.555-566，2002.3

(2003年9月12日受付)