

地震被害予測に用いる地盤増幅率の 既往提案式に関する考察

青戸 拓起¹・吉川 弘道²

¹正会員 東京都市大学都市基盤工学専攻客員研究員 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)
E-mail: HirokiAoto@gmail.com

²正会員 東京都市大学総合研究所教授 (〒158-0082 東京都世田谷区等々力8-15-1)
E-mail: hyoshika@sc.musashi-tech.ac.jp

地震による構造物の被害予測を実施するには、表層地盤に関する地盤増幅率の評価が重要となる。本論は、この地盤増幅率について、土木・建築分野における主要な評価手法を調査し、算定根拠を整理するとともに、このうち主要5手法については、地盤の1次周期、構造物の固有周期、地盤の材料非線形性による効果に関して、数値シミュレーションを実施し、地盤増幅率を定量的に考察した。主要5手法は、地盤の1次周期と構造物周期の相対関係、および、地盤の材料非線形性をともに反映しているが、後者の影響を小地震から大地震まで、連続的に反映できるものは限られていた。また、微小地震時の地盤増幅率について非常に大きな値を示すものがあり、上限値に対する配慮の必要性をあわせて指摘した。

Key Words :soil amplification, material nonlinear of soil, peak bedrock acceleration, elastic response

1. はじめに

表層地盤の増幅特性は、サイト条件を反映する最も重要なパラメータである。地震による構造物の被害予測に際し、地表面地震動の算定、被災度の推定に大きな影響を及ぼす。

表層地盤の影響を考慮する方法は、大別して、動的非線形解析(時刻歴応答解析、等価線形化法など)によるものと、簡易式・経験式に基づくものがある。前者は、地盤構造と地盤の材料非線形力学特性を直接モデル化して実施する方法である。後者は、一般に地盤増幅率で代表させるもので、煩雑な数値解析を回避することができる。本論では、後者の方法に着眼し、考察するものである。この場合、表層地盤の増幅率は、地震動振幅の最大値に関するもの、工学的に有用な応答スペクトル(=弾性応答)に関するものなど、様々な提案があるため、それらの特性を十分に理解し、目的に適したものを選択することが肝要である。

そこで、本論では、土木・建築分野の主要な手法を網羅し、その基本特性と適用範囲を系統的に整理する。次に、地震による構造物の被害予測に用いる際の視点から、数値的な比較を行う。この時、地盤増幅率の基準となる地盤面を統一し、地盤条件、および、表層地盤の材料非線形性の効果が、地盤増幅率およびその周期特性に与える影響に関して数値的な比較を行い、各手法の特徴を定量的に示すもので

ある。そして、著者らが進めている地震リスク評価¹⁾の枠組みに役立てる際の課題を考察する。

2. 地盤増幅率の定義

(1) 地震時の地盤増幅特性

一般に、地震時の表層地盤の増幅特性は、次のような特性を持つ。

- ・表層地盤が軟弱になるほど大きい。
- ・地震動が大きいほど、表層地盤の材料非線形性が強く表れるため低下する。
- ・構造物の周期特性により影響度が異なる。
- ・地形の不整形(基盤面や地表面の傾斜)に左右される。

従って、地盤増幅率の評価手法には、これらの特性がすべて反映されていることが重要である。

(2) 地盤増幅率の定義

先に述べた特性を全て網羅した、先駆的な技術指針が1992年に公開された²⁾。これは、基盤ならびに地表面の地震動を弾性応答スペクトルで表すのが特徴で、式(1)によって表される。増幅率を3つの項目にて補正したものと見ることができる。

$$S_s(T) = \beta_L(T) \cdot \beta_p(T) \cdot \beta_f(T) \cdot G_s(T) \cdot S_B(T) \quad (1)$$

ここに、

T : 構造物の固有周期(s)
 $S_S(T)$: 地盤面の応答スペクトル(Gal)
 $\beta_L(T)$: やや長周期補正係数
 $\beta_P(T)$: 液状化補正係数
 $\beta_I(T)$: 地形効果補正係数
 $G_S(T)$: 増幅特性係数
 $S_B(T)$: 基準地盤の応答スペクトル(Gal)

である。 $S_B(T)$ は基準地盤表面(一般に、解放工学的基盤面)における地震動特性を表し、 $\beta_L(T)$ とともに、震源特性、伝播経路に関係する。 $G_S(T)$ 、 $\beta_P(T)$ 、 $\beta_I(T)$ は工学的基盤以浅の表層地盤の性状により定まるもので、 $\beta_P(T)$ および $\beta_I(T)$ については、特殊な地盤条件を反映するための係数である。

本論は、 $\beta_P(T)$ および $\beta_I(T)$ に関しては1とし、すなわち、 $G_S(T)$ および $\beta_L(T)$ の特性について議論するものである。従って、本論で扱う地盤増幅率 $\xi(T)$ は、式(2)で定義される。

$$\begin{aligned}\xi(T) &= S_S(T) / S_B(T) \\ &= \beta_L(T) \cdot \beta_P(T) \cdot \beta_I(T) \cdot G_S(T) \\ &= \beta_L(T) \cdot G_S(T)\end{aligned}\quad (2)$$

3. 地盤増幅率の各種提案式と分類

地盤増幅率に関する主要な提案式を、その算出根拠とともに表-1に整理した。これらは、その特徴から、以下に示す分類A～Cの3種類に分けられる。

(1) 分類A：手法a～c

分類Aは、地震動振幅の最大値について、基準地盤面と地表面の比を、地盤増幅率とする手法である。これは、式(2)において、固有周期 T が0秒の場合、すなわち、剛な構造物を対象とした手法と位置づけられる。これまで、簡便な地震被害予測などで、良く用いられてきた手法である^{たとえば¹³⁾}。手法a～cは、いずれも、最大加速度、最大速度に対するものが用意されており、基準地盤(=地盤増幅率を1とする層)が異なっている。

手法aとcは、表層地盤の材料非線形性による効果(=地盤増幅率の低減)を反映できることが、大きな特徴である。ただし、地表面最大加速度 PGA のみに適用されている。

しかし、地震による被害は構造物の固有周期に大きく左右される。本分類の手法は、構造物の周期を考慮していないため、地震による構造物の被害予測に用いるには不十分といえる。

(2) 分類B：手法d, e

分類Bは、基準地盤面における地震動振幅の最大値に対し、地表面地震動による弾性応答最大値との比を、地盤増幅率とする手法である。従って、式(2)で定義される地盤増幅率を直接的に表せないが、表層地盤の材料非線形性の効果と同時に、代表的な構造物の固有周期を反映しており、分類Aの問題点

を改善した手法と位置づけられる。しかし、手法d, eとも、短周期構造を対象にしていること、手法eについては特定の地盤条件で算定された手法であるため、適用可能な構造物や地盤条件が非常に限定されてしまう。

(3) 分類C：手法f～j

分類Cは、基準地盤面における加速度応答スペクトルに対し、地表面の加速度応答スペクトルとの比を、地盤増幅率とする手法である。いずれも、構造物の固有周期を広範囲にカバーし、表層地盤の材料非線形性の効果も盛り込んでいることから、分類AおよびBの手法よりも、適用範囲が広いことが最大の特徴といえる。

広域の地震被害予測では、断層からの距離に応じて、工学基盤面における地震動の強さが対象地点ごとに大小様々変化する。そのため、地盤増幅率には、任意の基盤面地震動強さに対して求められる必要がある。しかし、手法g, hは、特定の2段階の地震動強さ($L1: PBA=0.64\text{m/sec}^2$, $L2: PBA=3.2\text{m/sec}^2$)にしか対応できないため、このような用途への適用が難しい(PBA とは、工学的盤面における最大加速度)。

地盤増幅率の定式化にあたり、観測記録を基にしたもの(手法j)、解析的検討を基にしたもの(手法f, h)、理論的解法を基にしたもの(手法g)と、その算出根拠は多種多様である。また、手法jを除き、基準地盤面における地震動には、実務設計用に平滑化された弾性加速度応答スペクトルを用いている。

手法fは、土木系実務基準の参考値として示している。本手法の引用基準書では、地盤増幅率として利用することはないが、工学的基盤面と地表面の加速度応答スペクトルが示されており、実務で想定している地盤増幅率の特性を把握するために、示すものである。手法gは、経験式ではなく、波動に関する理論解法によって地盤増幅率を求めるものであるが、その際に用いる地盤物性は、等価線形化法による動的解析結果の収斂物性を利用することを原則としており、やや複雑な計算を必要とする手法である。

4. 各種提案式の比較

表-1に挙げた、地盤増幅率に関する各手法について、地盤条件(区分、種別)の影響、表層地盤の材料非線形性の効果、周期特性に関する数値的な比較を行い、式(2)で定義される地盤増幅率 $\xi(T)$ を定量的に考察する。比較に際し、地盤増幅率の基準となる地盤面を、せん断波速度 V_s が400m/sec程度の解放工学基盤面で統一する。なお、分類Aは、 $T=0$ 秒における地盤増幅率として、手法cを取り上げる。分類Bの2つの式は、式(2)で表される地盤増幅率 $\xi(T)$ を表せないため、比較対象から除外する。分類Cの手法jは、日本国内の条件にあわせて手法iをベースに改良したものであり、手法iも比較対象から除外する。よって、ここで比較対象とするのは、手法c, f, g, h, jの5手法である。

(1) 地盤増幅率と地盤条件

図-1は、地盤増幅率 ξ と表層地盤の1次周期 T_G との関係を示したものである(T_{30} は特に地表面から30mまでの地盤構造に基づく周期)。表層地盤の硬さを

地盤の1次周期で代表したもので、軟弱になるほど表層地盤は長周期化し、 T_G および T_{30} は増大することになる。

表-1 地盤増幅率に関する既往の提案式とその算出根拠

本論での分類		A			B	
手法		a	b	c	d	e
文献		福和・荒川ら 1998 ³⁾	大西・山崎ら 1999 ⁴⁾	藤本・翠川 2006 ⁵⁾	荻尾・河村ら 1992 ⁶⁾	佐藤・平川ら 1998 ⁷⁾
増幅率の 対象	PGA^*	○	○	○	—	—
	PGV^*	○	○	○	—	—
	$SA(T)^*$	—	—	—	○ ピーク領域限定	○ $T=0.28\sim0.56$ 秒
表層地盤 情報	地形・地質等 区分	○	—	○	—	—
	平均せん断波 速度	—	○(V_{s30})	—	○	—
	地盤種別・区 分	—	—	—	—	特定地盤(II種相 当)限定
	その他	—	—	—	—	—
基準地盤		$V_s \geq 3000\text{m/s}$	$V_s \geq 400\text{m/sec}$	$V_s \geq 600\text{m/sec}$	$V_s \geq 400\text{m/s}$	$V_s \geq 3000\text{m/s}$
地盤の材料非線形性 による増幅率の低減		○ (PGA のみ)	×	○ (PGA のみ)	△ (L1, L2の2段階)	○
定式化の 条件	基準地盤地震 動の評価	断層モデル(翠 川・小林)	距離減衰式	岩盤上の強震記 録	模擬地震動(4波)	スペクトル適合 波(建築センター 波, 10波)
	地表面地震動 の評価	重複反射理論+等 価線形解析	強震記録	強震記録	地盤モデル14種 等価線形解析	地盤モデル1種 等価線形解析

本論での分類		C				
手法		f	g	h	i	j
文献		鉄道標準 1999 ⁸⁾	建築基準法 2000 ⁹⁾	境ら 2003 ¹⁰⁾	NEHRP 2003 ¹¹⁾	内山・翠川 2004 ¹²⁾
増幅率の 対象	PGA^*	—	—	—	—	—
	PGV^*	—	—	—	—	—
	$SA(T)^*$	○	○	○	○	○
表層地盤 情報	地形・地質 等区分	—	—	—	—	—
	平均せん断 波速度	—	—	—	—	—
	地盤種別・ 区分	○ (T_G)	○ [簡略法]	—	○ (V_{s30})	○ (V_{s30})
	その他	—	α, T_G , 収斂物性(G_{eq} , h_{eq}) [詳細法]	α, T_G	—	やや長周期補正 係数
基準地盤		$V_s \geq 400\text{m/s}$	$V_s \geq 400\text{m/s}$	$V_s \geq 400\text{m/s}$	$V_s \geq 760\sim1500\text{m/s}$	$V_s \geq 760\sim1500\text{m/s}$
地盤の材料非線形性 による増幅率の低減		○	×[簡略法] ○[詳細法]	△ (L1, L2の2段階)	○	○
定式化の 条件	基準地盤地 震動の評価	スペクトル適合波 (標準位相, 1波)	告示スペクトル	告示スペクトル 適合波(ランダム 位相, 10波)		岩盤上の強震記 録
	地表面地震 動の評価	地盤モデル多数 等価線形解析	応答スペクトル 法	地盤モデル50種 等価線形解析		逐次非線形解析 + 強震記録

※ PGA : Peak Grond Acceleration, PGV : Peak Grond Velocity, $SA(T)$: Maximum Accerelation of Elastic Response with period T

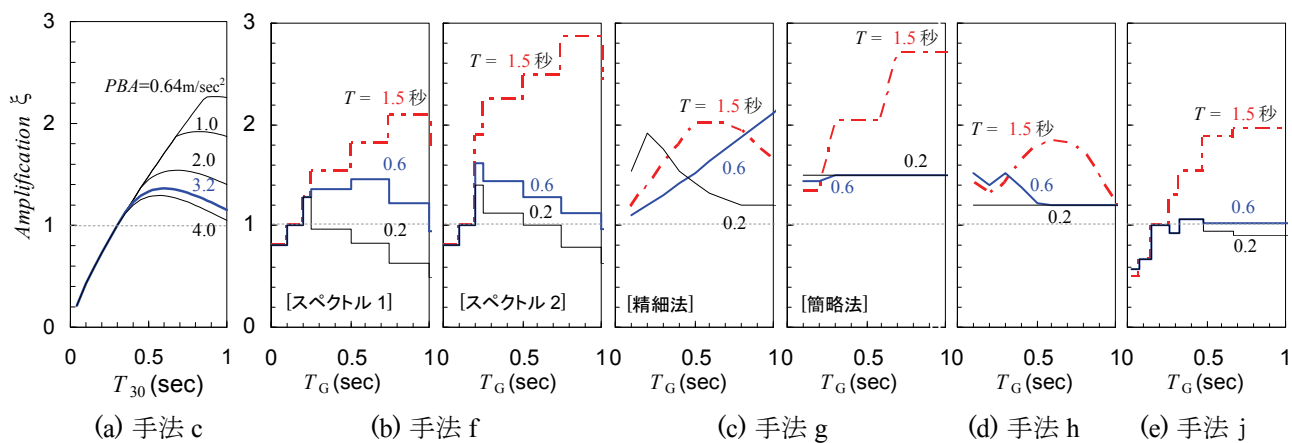


図-1 地盤の1次周期による地盤増幅率の変化($PBA=3.2\text{m/sec}^2$)

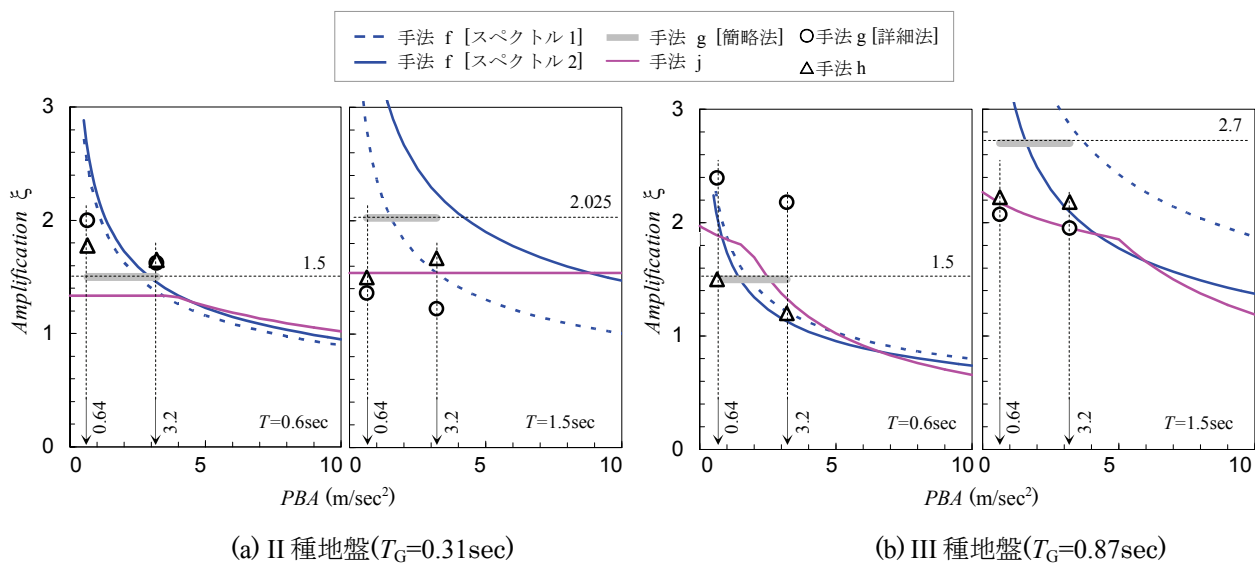


図-2 PBA による地盤増幅率 ξ の変化

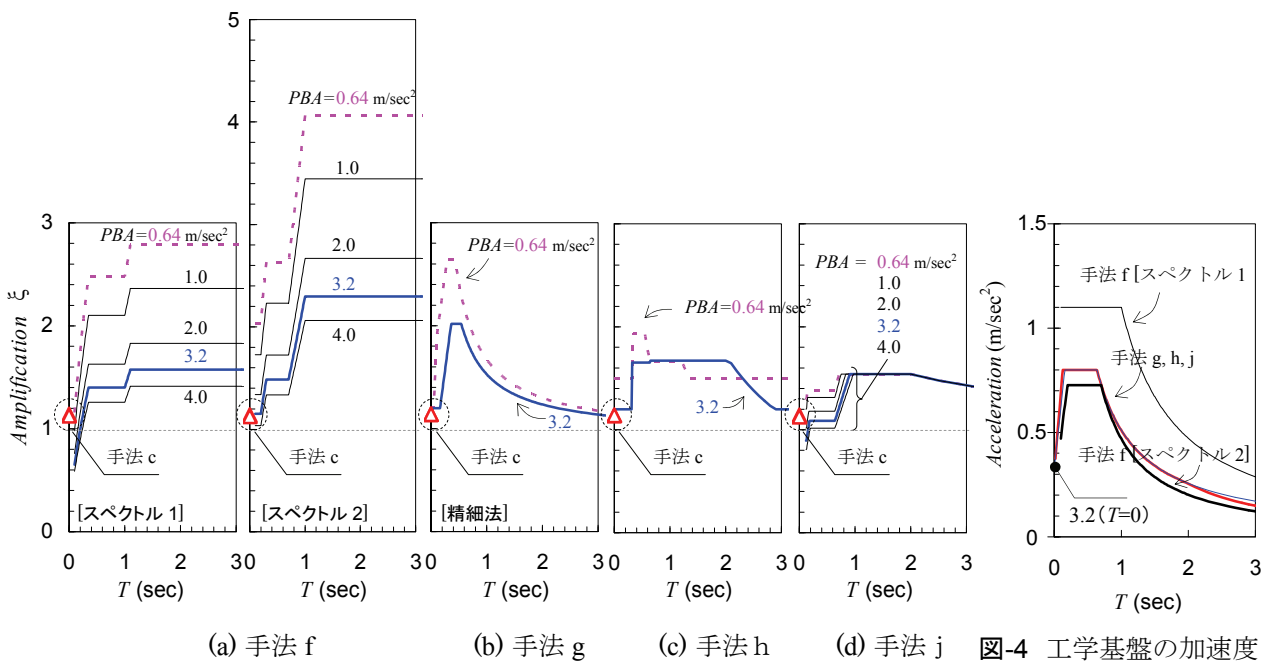


図-3 PBA による地盤増幅率スペクトルの変化(II種地盤)

図-4 工学基盤の加速度
応答スペクトル
($PBA=3.2\text{m/sec}^2$)

同図(a)は、手法cについて、複数の基盤最大加速度 PBA に対する地盤増幅率 ξ を併記したものである。ただし、後に示す手法f～jとの比較のために、 $PBA=15 \cdot PBI^{14)}$ の関係を用いて換算している。同図(b)～(e)は、手法f～jについて、3つの構造物周期($T=0.2, 0.6, 1.5$ 秒)に対する地盤増幅率 $\xi(T)$ を併記したもので、 $PBA=3.2\text{m/sec}^2$ における値を示したものである。

手法c(同図(a))は、 $T=0$ 秒の増幅特性となるが、手法fの最短周期($T=0.2$ 秒)の挙動とよく似ており、ピークを持つのが特徴である。地震動の強さが大きいほど、そのピーク値は低くなり、より固い地盤でも地盤の材料非線形性の効果が表れる。

手法f～jを見ると、 $T=1.5$ 秒の時、地盤が軟弱になるほど地盤増幅率 ξ が増大する傾向が読み取れる。一方、 $T=0.2$ 秒、 0.6 秒の時は、ある周期を境に減少する傾向がある。これは、地盤の卓越周期($\approx T_G$ とみなせる)が構造物の固有周期 T より長く、また大きく乖離するほど、表層地盤の応答が低減する効果を示すものと理解できる。手法g[簡略法]を除き、この効果が見られる。ただし、手法hは、実務上の配

慮により地盤増幅率 ξ の下限値が設定されているため、 ξ が1以下となることはない。

(2) 地盤増幅率と表層地盤の材料非線形性

図-2は、地盤区分毎に地盤増幅率 ξ と PBA の関係を示したもので、各図の左図は $T=0.6$ 秒、右図は $T=1.5$ 秒の時の関係である(地盤区分は道路橋示方書V耐震設計編による)。 PBA 、すなわち、工学基盤面における地震動が大きいほど、地盤増幅率 ξ が低下する傾向が読み取れる。手法fは、この特性を簡略式により陽な形で反映している。手法hは、 $T=1.5$ 秒の時(同図(a))、逆に地盤増幅率が増大する状態が見られ、表層地盤の非線形応答と地盤増幅率の関係を、より複雑に盛り込んだ結果といえる。

また、微小な PBA の時は、表層地盤の材料非線形性が影響せず、地盤増幅率 ξ は上限値を示すものと考えられるが、手法fには上限値の規定がなく大きな値を示してしまうため、適用には注意が必要である。

次に、表層地盤の材料非線形性が、地盤増幅率 ξ の周期特性のに与える影響を、地盤増幅率スペクト

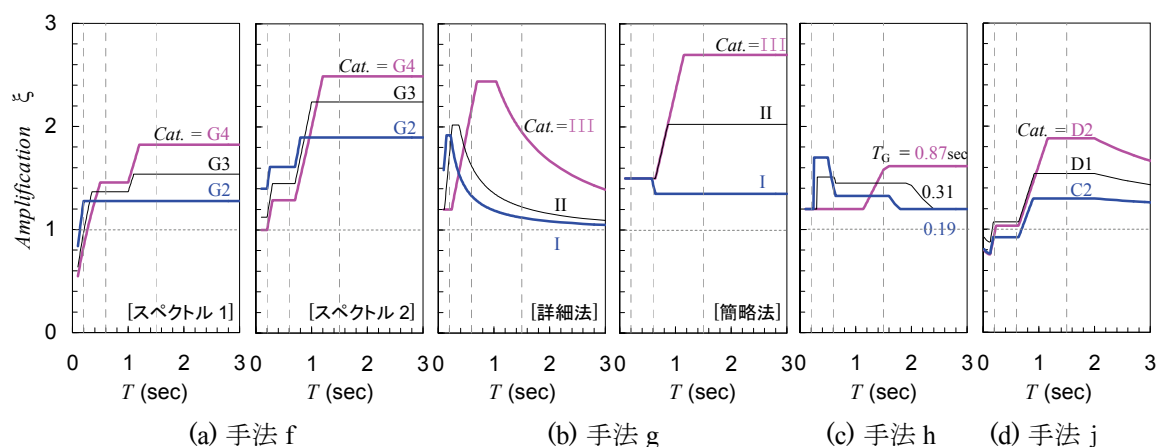


図-5 地盤増幅率スペクトル($PBA=3.2\text{m/sec}^2$)

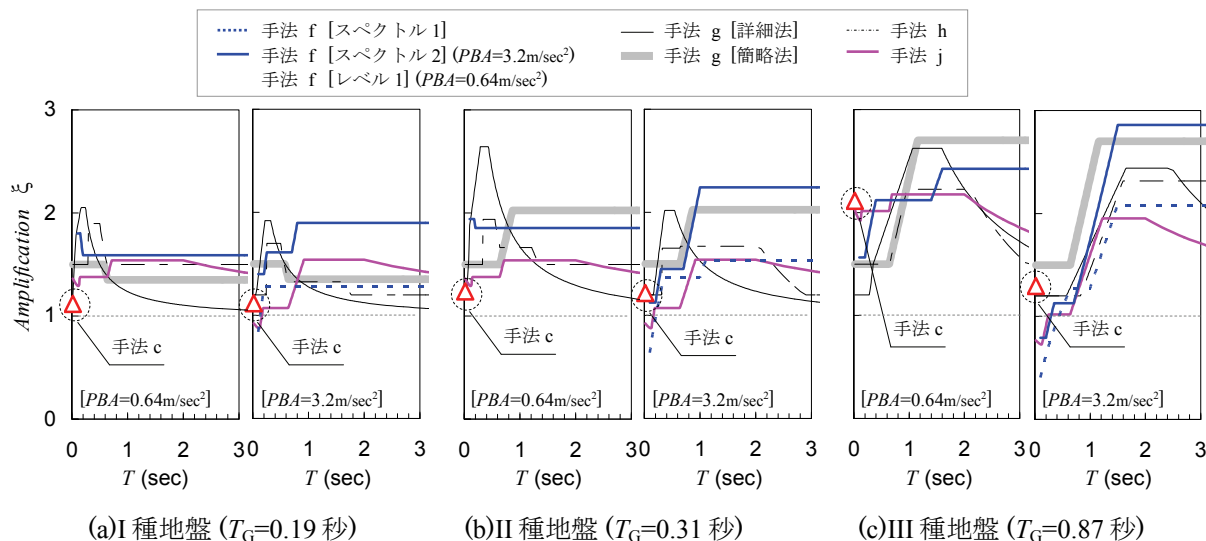


図-6 地盤増幅率スペクトルの比較

ル(=地盤増幅率 ξ と固有周期の関係)を用いて考察する。図-3は、II種の地盤区分について、PBAによる地盤増幅率スペクトルの形状変化を示したものである。手法fは、PBAに関わらず同一形状を保持していることから、地盤の材料非線形性が、地盤増幅率 ξ の周期特性には影響していないと考えることができる。一方、手法g, h, jは、PBAによって形状が複雑に変化していることから、地盤の材料非線形性が、地盤増幅率 ξ の周期特性に影響することがわかる。特に、手法hについて、短周期領域ではPBAの小さい方が地盤増幅率が大きいのにに対し、長周期領域ではその大小関係が逆転している。表層地盤の材料非線形性が顕著になると、地盤が長周期化する影響が、地盤増幅率の周期特性に反映されている。

(3) 地盤増幅率の周期特性

図-4は、 $PBA=3.2\text{m/sec}^2$ における工学基盤面の弾性加速度応答スペクトルである。手法f[スペクトル1]を除けば、ほぼ同一のスペクトルを示す。地盤増幅率の基準となる地盤面のスペクトル特性がほぼ同じである場合に、地盤増幅率がどのような特性となるか、次に比較・考察する。

図-5は、地盤増幅率 ξ と固有周期の関係を、地盤区分とともに表したものである。まず、手法g[精細法]と手法jは、特徴的な形状をもっている。地盤増幅率スペクトルは明確なピークを持ち、ピークより長周期側では1に収束していく。これは、“やや長周期補正係数”の効果に対応するもので、手法jは、意図的にこの効果を取り入れている(本論ではこの効果が表れる周期を一般的な2秒以降と仮定)。手法hでも、最も軟弱な地盤を除き、長周期側では地盤増幅率が下限値に収束していく特性を持つ。手法f, g[簡略法]では、このような収束性に配慮されていない。また、地盤の硬さ(=地盤区分)による影響を、スペクトル形状から再度考察してみる。手法f, g[詳細法], hでは、固有周期 T が短いときは、より固い地盤区分の方が地盤増幅率 ξ は大きい。そして、固有周期 T が長くなるのに伴い、関係は逆転し、今度はより柔らかい地盤区分の方が地盤増幅率 ξ は大きくなっている。地盤の硬さが地盤増幅率の周期特性に与える影響が、顕著に表れている。

図-6は、地盤区分ごとに、各手法の増幅率スペクトルを重ねたものである。各図の左図は $PBA=0.64\text{m/sec}^2$ 、右図は $PBA=3.2\text{m/sec}^2$ の時を表している。図-4で示したように、手法f[スペクトル1]を除き、地盤増幅率の基準となる地盤面の加速度応答スペクトルがほぼ同じであるにもかかわらず、いずれの地盤区分でも、 $T=0.6\sim 0.8$ 秒付近を除くと、各手法による地盤増幅率 ξ は大きく開き、1.5~2倍程度の違いが生じている。また、 $PBA=3.2\text{m/sec}^2$ の時、固有周期 $T=0$ 秒における地盤増幅率 ξ は、手法cによる地盤増幅率 ξ とほぼ同一値とっており、定量的に整合していることがわかる。しかし、 $PBA=0.64\text{m/sec}^2$ の時は、手法cは過小あるいは過大となる場合がみられる。

5. まとめ

- ・土木・建築分野での、主要な地盤増幅率の評価手法10種類について調査した。これらは、地震動振幅の最大値に関するもの、限定された構造物周期の弾性加速度応答に関するもの、そして、弾性加速度応答スペクトルに関するものに分類することができる。
- ・地震による構造物の被害分析に用いる地盤増幅率については、地盤の周期特性(1次周期、地盤区分等)、地震動の大きさに伴う表層地盤の材料非線形性の効果、構造物の周期特性が重要な要素となるが、すべてを考慮可能なものは5手法になる。それらの手法間で、地盤増幅率が大きくなる要因は、地盤の硬さ(本論では、1次周期で代表)に加え、構造物周期との相対関係が関与する。地盤の1次周期が構造物の周期よりも長い場合に、地盤増幅率が低下する特性を示している。
- ・先の5種類の手法の内、表層地盤の材料非線形性に起因する地盤増幅率の変化を、任意の工学基盤面における地震動強さに対して連続的に評価できるものは、2手法に限定される。どちらも、工学基盤面における地震動が大きいほど、地盤増幅率が小さくなる現象を表している。
- ・以上に加え、“やや長周期地震動”の効果を含んだ形で提案されているものは1手法であった。
- ・微小な地震動における地盤増幅率を利用する場合は、地盤増幅率の上限値についての配慮が必要である。
- ・提案手法間で、地盤増幅率に1.5~2倍近くの差が生じるので、地震被害分析に用いる際には、複数の手法による検証を行うなど、十分な配慮が必要である。

参考文献

- 1) 青戸弘起, 吉川弘道: 鉄筋コンクリート橋脚のフラジリティ曲線と地震ロス関数に関する研究, 日本コンクリート工学年論文集, Vol.30, 2008.7
- 2) 建設省建築研究所, 財団法人日本建築センター: 設計用入力地震動作成手法技術指針(案) 本文解説編 平成4年3月, 設計用入力地震動研究委員会平成3年度成果報告書, 1992.3
- 3) 福和伸夫, 荒川政知, 西阪理永: 国土数値情報を活用した地震時地盤増幅度の推定, 構造工学論文集, Vol.44B, pp.77-84, 1998.3
- 4) 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との関係, 土木学会論文集, No.626, 1-48, pp.79-91, 土木学会, 1999.7
- 5) 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, 日本地震工学論文集, 第6巻, 第1号, 2006
- 6) 荻尾堅治, 河村壮一, 高木正美: 表層地盤の設計用増幅スペクトルに関する研究, 日本建築学会大会学術講演概要集(北陸), pp.441-442, 1992.8
- 7) 佐藤一郎, 平川倫生, 神田順: 活断層を考慮した地震

- 危険度解析と最適信頼性への応用, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.145-150, 1998
- 8) 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, pp. 25-38, 64-81, 丸善株式会社, 1999.10
- 9) 国土交通省住宅局建築指導課, 他: 2001 年版 限界耐力計算法の計算例とその解説, 工学図書株式会社, 2001.3
- 10) 境有紀, 大月俊典: 被害と対応した地震動強さの面的分布を簡便に求める方法の検討, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, pp. 130-133, 2006.11
- 11) Building Seismic Safety Council : NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures(FEMA450) Part1:Provisions 2003 Edition, pp.17-49, 2003
- 12) 内山泰生, 翠川三郎: 地盤分類別の地盤増幅率を用いた基盤地震動スペクトルの簡便な評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第 582 号, pp.39-46, 2004.8
- 13) 神田順, 神田誠一: インターネットによる構造安全性評価手法の開発, 信学技法, pp.17-20, 電子情報通信学会, 2007.7
- 14) 建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 1993.6

A COMPARATIVE STUDY ON THE PRACTICAL ESTIMATION OF THE SITE AMPLIFICATION FACTOR

Hiroki AOTO and Hiromichi YOSHIKAWA

The site amplification factor is most important parameter on the seismic damage prediction of civil and building structures. We investigate the simple estimation techniques about site amplification factor in Japan. About major 5 methods, the fundamental characteristics related to the period, nonlinearity of the soil are compared by the numerical simulation. We confirmed that relative relation of periods of grounds and structures, and the soil nonlinearity, are considered in the major 5 method. It found that only a few methods can consider the earthquake intensity continuously from weak upto strong. In addition, we noted that it is necessary to consider the upper limit of the amplification factor in the weak intensity of earthquakes.