

サイト増幅特性のばらつきを考慮した 強震動のばらつき

福島 康宏¹・長尾 毅²

¹正会員 株式会社エイト日本技術開発 中国支社 防災保全部 耐震・保全グループ
(〒700-8617 岡山市北区津島京町3-1-21)

E-mail: fukushima-ya@ej-hds.co.jp

²正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

地震動を決定する要素の一つであるサイト増幅特性のばらつきに着目した地震動のばらつきの評価を行った。対象地点での地震観測記録のフーリエスペクトルを、対象地点と同時記録が得られている近隣強震観測点(基準点)での地震観測記録のフーリエスペクトルで除した比を基準点における経験的サイト増幅特性に乗じることにより、対象地点のサイト増幅特性を多数の地震について評価し、そのばらつきを算定した。さらに、サイト増幅特性のばらつきを考慮した地震動を評価し、最大加速度や最大速度のばらつきを検討し、これらとサイト増幅特性のばらつきの相関を議論した。

Key Words : earthquake ground motion, site amplification factor, stochastic characteristic

1. はじめに

地震動の影響を無視できない地域において、社会基盤施設のリスクを評価するためには、作用する地震動のばらつきを評価する必要がある。しかしながら、一般にリスク解析で用いられる地震ハザードは年超過確率ごとの地震動の代表値(例えば最大加速度や最大速度)の平均値などにより示されるだけで、地震動のばらつきを陽な形で考慮したリスク解析が行われることは少ない。しかしながら、港湾施設などの土木構造物の性能設計において性能照査手法として用いられている信頼性設計などでは、構造物の破壊確率の評価のために作用のばらつきの評価が必要である。

地震動を精度良く設定するためには、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮する必要がある¹⁾。このうち、深層地盤による増幅特性(サイト増幅特性という)は地点により大きく異なることが知られている。ここで、サイト増幅特性とは、周波数ごとの地震基盤に対する増幅倍率のことである。強震記録に基づいたサイト増幅特性の評価には、スペクトルインバージョンによる方法(例えば野津・長尾²⁾)と、対象地点とその周辺での同時記録から評価する方法とがあるが、いずれも複数の記録による平均的な増幅特性が議論の対象となり、そのばら

つきについてはほとんど考慮されていないのが現状である。

そこで、地震動を決定する要素の一つであるサイト増幅特性のばらつきに着目した地震動のばらつきの評価を行った。本研究では、対象地点での地震観測記録のフーリエスペクトルを基準点での地震観測記録のフーリエスペクトルで除した比を基準点における経験的サイト増幅特性に乗じることにより、対象地点のサイト増幅特性を多数の地震について評価した。

さらに、サイト増幅特性のばらつきを考慮した地震動を評価した上で、最大加速度や最大速度のばらつきを検討し、これらとサイト増幅特性のばらつきの相関を議論する。

2. サイト増幅特性の評価方法

サイト増幅特性が既知の地点 R を基準点、同じ地震が観測されている地点 T を対象地点とする。両地点での地震動の観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_R(f)$ 、 $O_T(f)$ は、震源特性 $S(f)$ 、伝播経路特性 $P_R(f)$ 、 $P_T(f)$ 、サイト増幅特性 $G_R(f)$ 、 $G_T(f)$ の積として次式で表現できる。



図-1 検討に用いた強震観測点

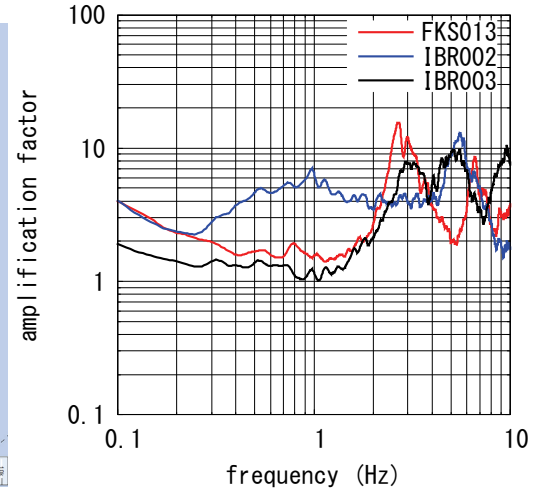


図-2 スペクトルインバージョンによる
検討対象地点のサイト増幅特性

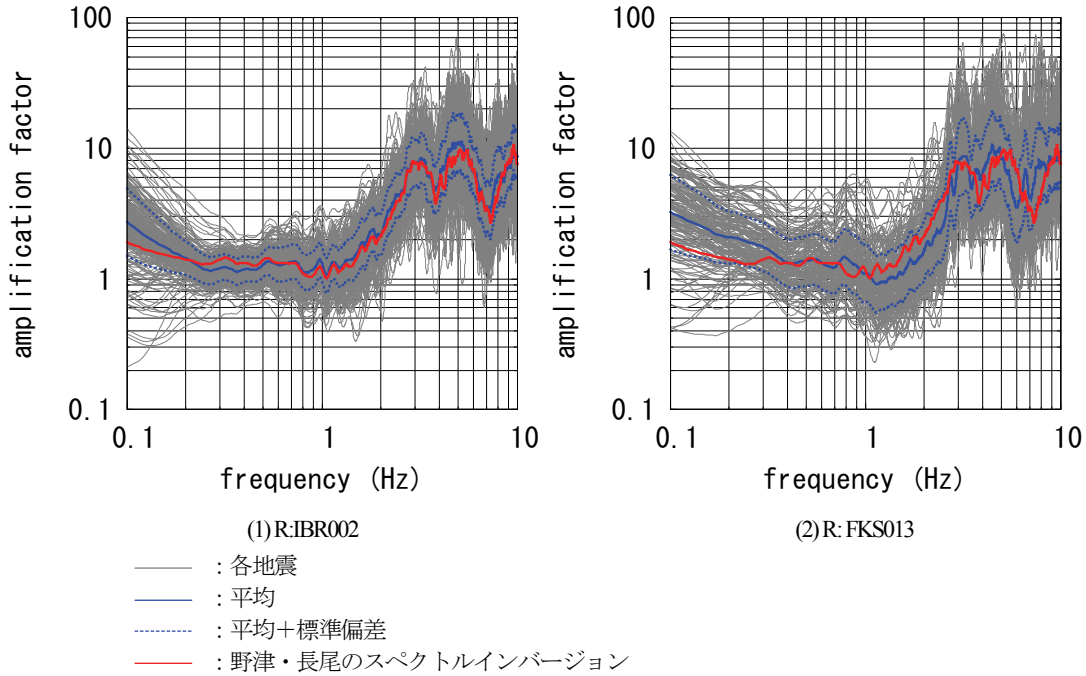


図-3 IBR003 でのサイト増幅特性の算定結果

$$O_R(f) = S(f) \cdot P_R(f) \cdot G_R(f) \quad (1)$$

$$O_T(f) = S(f) \cdot P_T(f) \cdot G_T(f) \quad (2)$$

$$G_T(f) = G_R(f) \cdot \frac{O_T(f)}{O_R(f)} \cdot \frac{r_T}{r_R} \cdot \frac{\exp\{-(\pi f r_R)/(Q(f)V_s)\}}{\exp\{-(\pi f r_T)/(Q(f)V_s)\}} \quad (5)$$

ここで、伝播経路特性 $P_R(f)$, $P_T(f)$ は

$$P_R(f) = \exp\{-(\pi f r_R)/(Q(f)V_s)\}/r_R \quad (3)$$

$$P_T(f) = \exp\{-(\pi f r_T)/(Q(f)V_s)\}/r_T \quad (4)$$

で表される。ここで、 r_R , r_T はそれぞれ地点 R , T までの震源距離、 $Q(f)$ は伝播経路の減衰を表す Q 値、 V_s は S 波速度である。これより、地点 T のサイト増幅特性 $G_T(f)$ は次式で表される。

3. サイト増幅特性のばらつき

図-1 に示す福島県内・茨城県内の K-NET³ 強震観測点 3 地点を対象とする。対象とした 3 地点について、スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性²⁾を図-2 に示す。なお、各観測点について、スペクトルインバージョンに用いられている地震記録数は、FKS013 が 66 記録、IBR002 が 83 記録、IBR003 が 74 記録である。IBR002 は 2Hz 以下にピークが見られ、堆積層が比較的厚い地点と

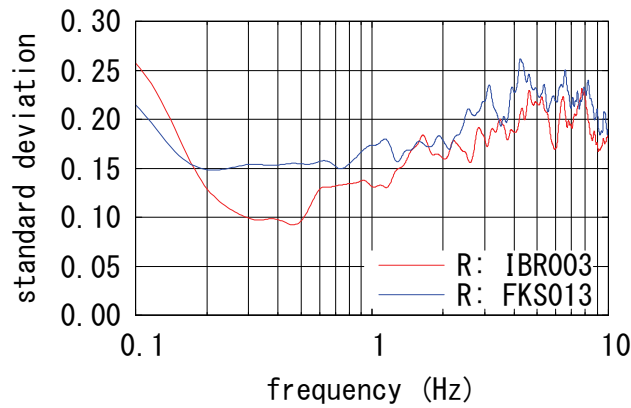


図4 IBR003 でのサイト増幅特性のばらつき

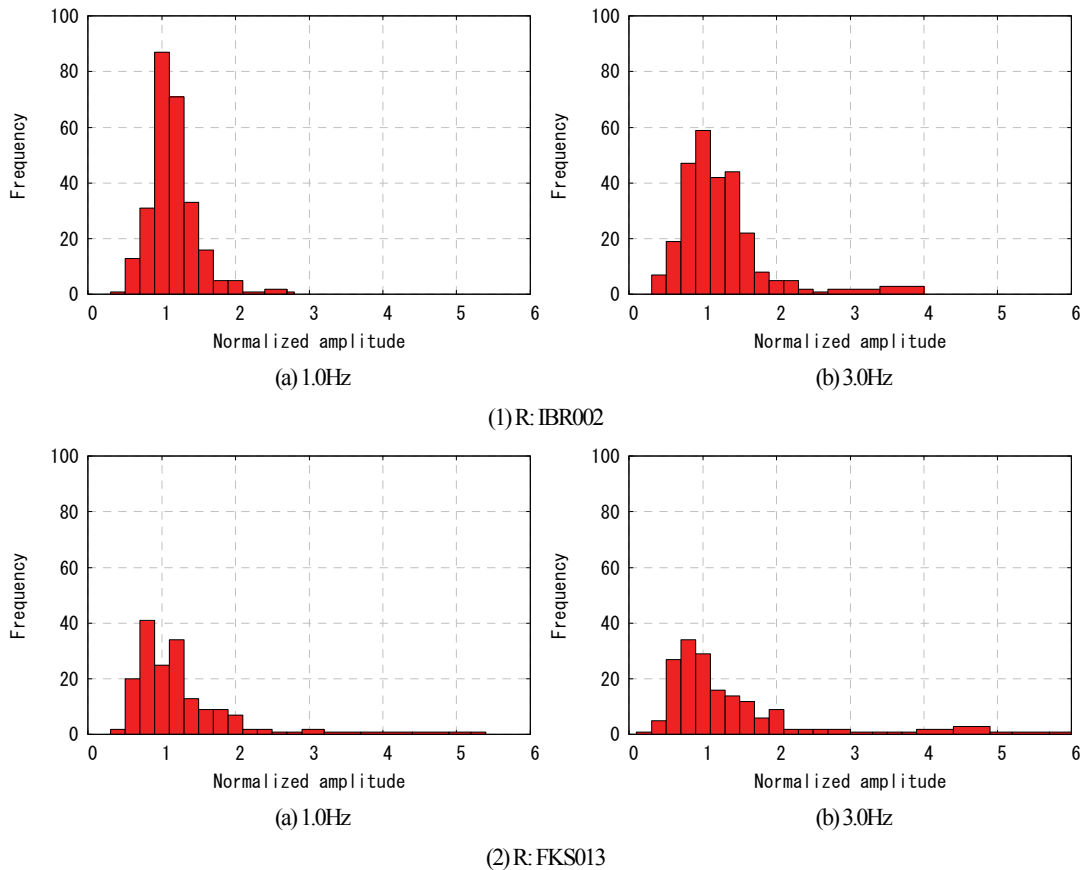


図5 IBR003 でのサイト増幅特性の頻度分布(平均値で正規化)

なっている。これに対し、IBR003 では 3Hz 以上にピークが見られ、堆積層が比較的薄い地点となっている。

3 地点のうち、IBR003 を対象地点とし、FKS013 と IBR002 を基準点した場合のサイト増幅特性とそのばらつきを式(5)より算定する。ここで、伝播経路の Q 値については、佐藤・巽⁴⁾による東日本海溝型地震の次式

$$Q(f)=114f^{0.92} \quad (6)$$

を用いている。

算定した IBR003 でのサイト増幅特性の算定結果を図-3 に示す。算定には、対象地点と基準点との同時観測記録を用いているが、0.2Hz まで S/N 比が良好な記録

(FKS013 を基準点とする場合 173 記録、IBR002 を基準点とする場合 266 記録)を用いている。図中の灰色の線が各地震、青色の実線が平均値、青色の点線が平均±標準偏差、赤色の線が野津・長尾のスペクトルインバージョン²⁾によるサイト増幅特性である。平均のサイト増幅特性はスペクトルインバージョンによるサイト増幅特性と概ね似ているが、基準点の違いや周波数帯による違いも見られる。

図-4 には、サイト増幅特性の標準偏差(常用対数)を示す。対象地点 IBR003 から遠い FKS013 を基準点とした場合は、対象地点に近い IBR002 を基準点とした場合と比

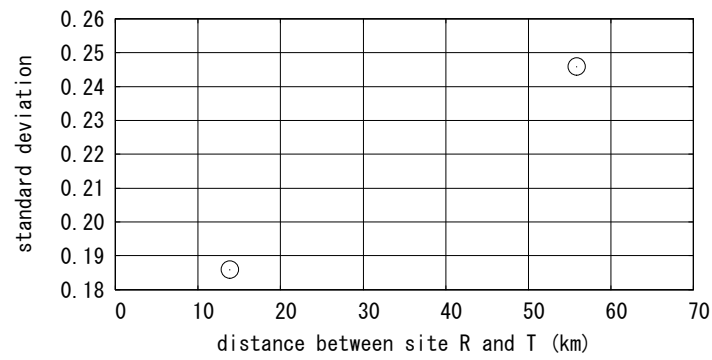
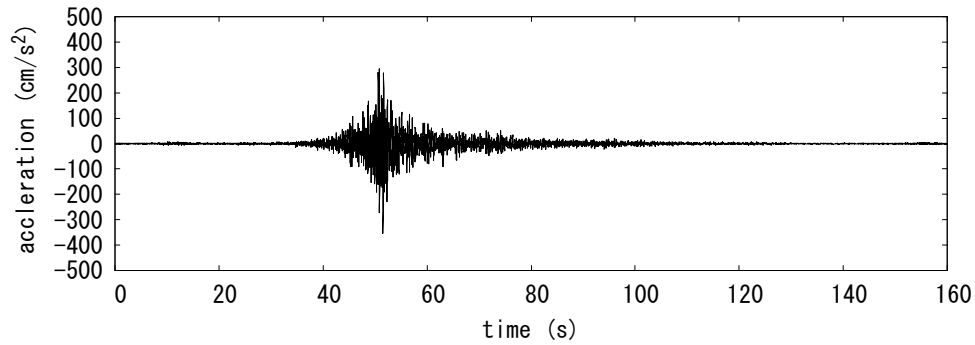
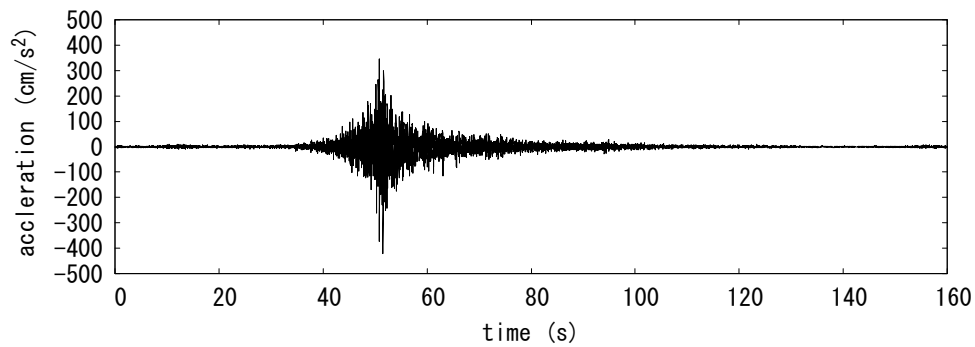


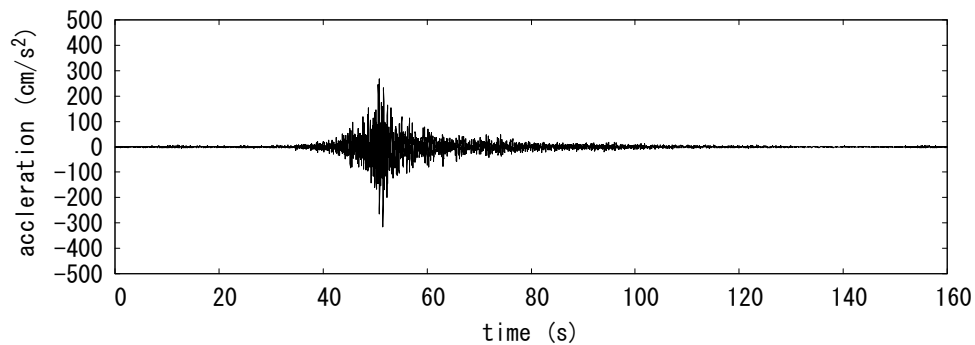
図-6 基準点－対象地点間距離とサイト増幅特性のばらつきの関係



(1)IBR002を基準点とした場合の平均サイト増幅特性を考慮した場合



(2)FKS013を基準点とした場合の平均サイト増幅特性を考慮した場合



(3)スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性を考慮した場合

図-7 IBR003 のレベル1 地震動の加速度時刻歴波形の例

べ、ほとんどの周波数で標準偏差が大きくなっている。
0.5～10Hzでの標準偏差の平均値は、FKS013を基準点とした場合0.186、IBR002を基準点とした場合0.246である。
同様の手法による宮城県の仙台～塩竈を対象とした平

井・長尾⁹⁾による検討の標準偏差0.25(使用記録数68)、
鳥取県米子と周辺観測点を対象とした福島・長尾⁹⁾による検討の標準偏差0.25～0.29(使用記録数16～17)と比べると同程度かやや小さい。

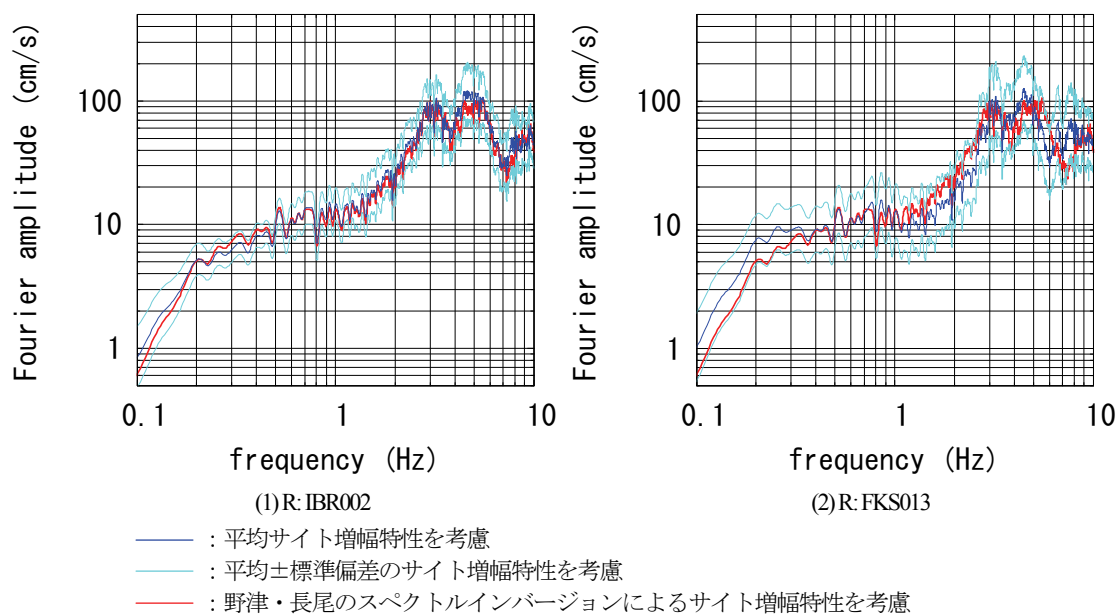


図-8 IBR003 のレベル 1 地震動のフーリエ振幅スペクトル

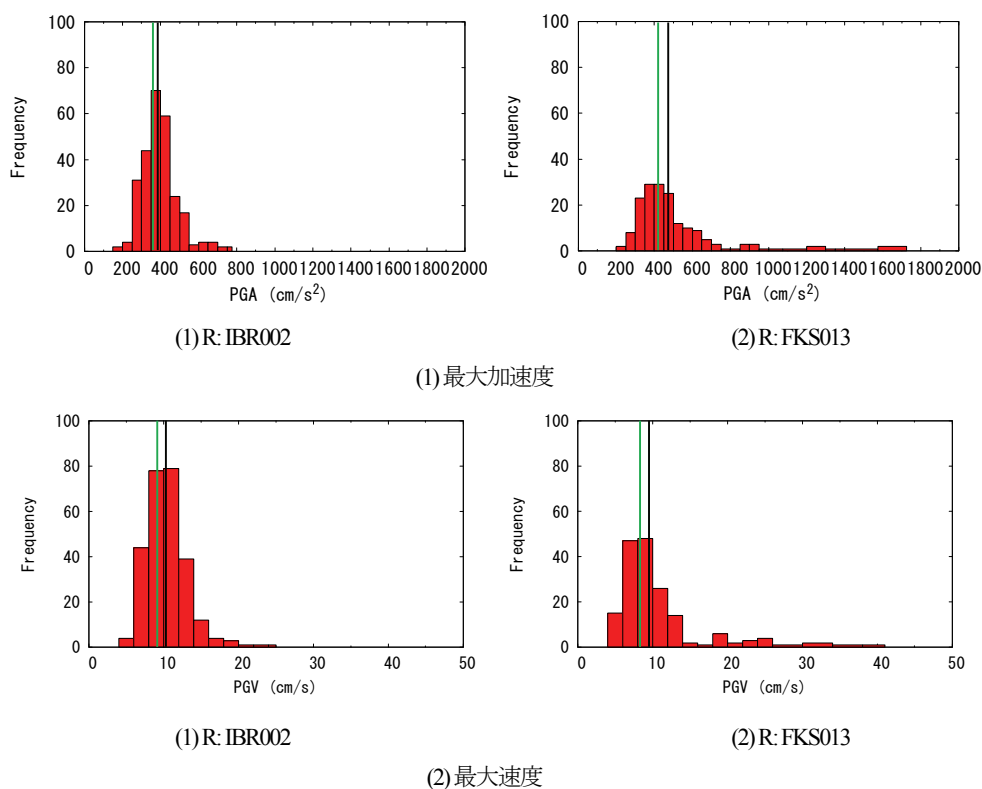


図-9 IBR003 のレベル 1 地震動の最大加速度と最大速度の頻度分布

サイト増幅特性の頻度分布の例として、1Hz および 3Hz のものを図-5 に示す。ここでは、サイト増幅特性を平均値で正規化している。サイト増幅特性のばらつきは対数標準偏差に従うとみなすことができる。

基準点一対象地点間の距離と 0.5~10Hz でのサイト増

幅特性のばらつきの平均の関係を図-6 に示す。基準点一対象地点間距離が大きくなるほどサイト増幅特性のばらつきが大きくなる傾向が見られる。これは、式(5)での伝播経路特性のばらつきに起因すると考えられる。

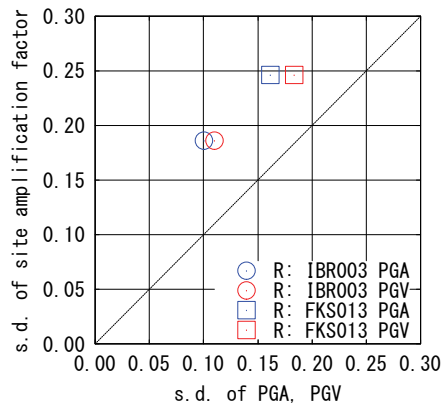


図-10 最大加速度，最大速度のばらつきとサイト増幅特性のばらつきの関係

4. サイト増幅特性のばらつきを考慮した強震動のばらつき

IBR003 について，サイト増幅特性のばらつきを考慮した強震動を算定する．ここでは，IBR003 に近い日立港で確率論的地震ハザード解析によって設定されているレベル 1 地震動⁷⁾のサイト増幅特性を，図-3 で算定した IBR003 のサイト増幅特性で置換している．算定した IBR003 での加速度時刻歴波形を図-7 に示す．最大加速度は，IBR002 を基準点とした場合の平均サイト増幅特性を考慮する場合 355.1cm/s^2 ，FKS013 を基準点とした場合の平均サイト増幅特性を考慮する場合 422.8cm/s^2 ，スペクトルインバージョンによる IBR003 のサイト増幅特性を考慮する場合 316.6cm/s^2 である．これは無視できない程度の相違である．

これらのフーリエ振幅スペクトルを図-8 に示す．ここでは，バンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウにより平滑化している．上述の最大加速度の相違は，サイト増幅特性の相違によるフーリエ振幅スペクトルの相違によるものである．

最大加速度および最大速度の頻度分布を図-9 に示す．両者とも，対数標準偏差とみなすことができる．サイト増幅特性の平均を考慮したレベル 1 地震動の最大加速度，最大速度は，算定されたレベル 1 地震動の最大加速度，最大速度の平均値よりも小さい．前者と後者の比の平均は，最大加速度で 0.90 ，最大速度で 0.87 であった．これより，以上より，地震動の設定にあたっては，平均的なサイト増幅特性を考慮しても，平均的な地震動とはならず，過小評価する可能性があることが示唆される．

図-10 は，最大加速度の標準偏差と最大速度の関係と，サイト増幅特性の標準偏差との関係を示している．前者と後者の比の平均は，最大加速度で 0.60 ，最大速度で

0.67 であった．

5. まとめ

本研究では，隣接する強震観測点での同時観測記録を用いて，IBR003 強震観測点でのサイト増幅特性のばらつきを評価した．さらに，サイト増幅特性のばらつきを考慮したレベル 1 地震動を算定し，地震動の指標値のばらつきとサイト増幅特性のばらつきとの関係について検討した．これにより以下のことがわかった．

- ・基準点一対象地点間距離が大きくなるほどサイト増幅特性のばらつきが大きくなる傾向が見られる．
- ・平均的なサイト増幅特性を考慮したレベル 1 地震動の最大加速度，最大速度は，各地震のサイト増幅特性を考慮したレベル 1 地震動の指標値の平均より小さい．
- ・平均的なサイト増幅特性を考慮して地震動を評価すると危険側の設定となるため，十分な注意が必要である．

ただし，これらは，福島県，茨城県における 3 つの強震観測点で得られた強震記録から得られたものに過ぎないことから，これらの知見が他の強震記録に適用可能かどうかさらなる検討が必要である．

謝辞：防災科学技術研究所 K-NET の強震記録を使用しました．記して謝意を表します．

参考文献

- 1) 土木学会：2016 年制定 土木構造物共通示方書 性能・作用編，2016.
- 2) 野津厚，長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112，2005.
- 3) (独)防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET，KiK-net)，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2017 年 9 月閲覧).
- 4) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，第 556 号，pp.15-24，2002.
- 5) 平井俊之，長尾毅：岸壁の残留変形量に関する地震動のばらつきの影響の簡易評価，土木学会論文集 B3，Vol.68，No.2 (海洋開発論文集 Vol.28)，I_468-I_473，2012.
- 6) 福島康宏，長尾毅：地震動のサイト増幅特性の経験的評価におけるパラツキに関する基礎的検討，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，I-389，2017.
- 7) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室：レベル 1 地震動(重要港湾以上)，<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/level1.html> (2017 年 12 月閲覧).

STOCHASTIC CHARACTERISTIC OF SITE AMPLIFICATION FACTOR AND ITS EFFECT ON EARTHQUAKE GROUND MOTION

Yasuhiro FUKUSHIMA and Takashi NAGAO

Seismic risk analysis on social infrastructure is important in earthquake prone areas. Seismic risk analysis is usually conducted by the convolution of seismic hazard function and structural fragility function. Seismic hazard curve, in general, is expressed as the representative value of earthquake ground motion such as peak ground acceleration corresponding to the annual probability of exceedance. The representative value, however, lacks information on the frequency characteristic of the earthquake ground motion.

Earthquake ground motion is expressed by the multiplication of source characteristic, path characteristic and site amplification characteristic in the frequency domain. Although the source and path characteristics can be evaluated analytically, site amplification characteristic can only be evaluated precisely in an empirical manner by using the strong motion record because site amplification characteristic is strongly affected by the sedimentary environment of soil layers at the site of interest. Little study on the stochastic characteristic of site amplification factor has been done so far.

In this study, authors evaluated the stochastic characteristic of site amplification factor by the spectral analysis on the strong motion records observed at two sites: reference site and target site. Variation of the representative value of earthquake ground motion such as peak ground acceleration and peak ground velocity considering the variation of site amplification factor is discussed.