



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
長尾, 毅

(Citation)

土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 75(4):I_763-I_769

(Issue Date)

2019

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2019 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90008221>



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、最大速度および速度のPSI値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、深層地盤と表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、最大速度および速度のPSI値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。ここではラディエーションパターンの影響は考慮していない。



図-1 検討に用いた強震観測点(青色の四角)と地震の震央(赤色の丸)

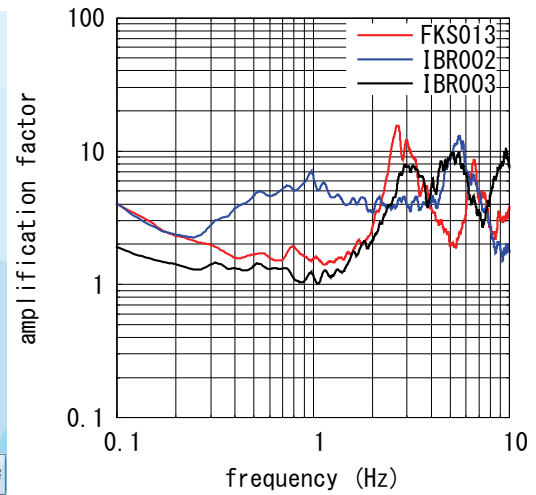


図-2 スペクトルインバージョンによる
検討対象地点のサイト増幅特性

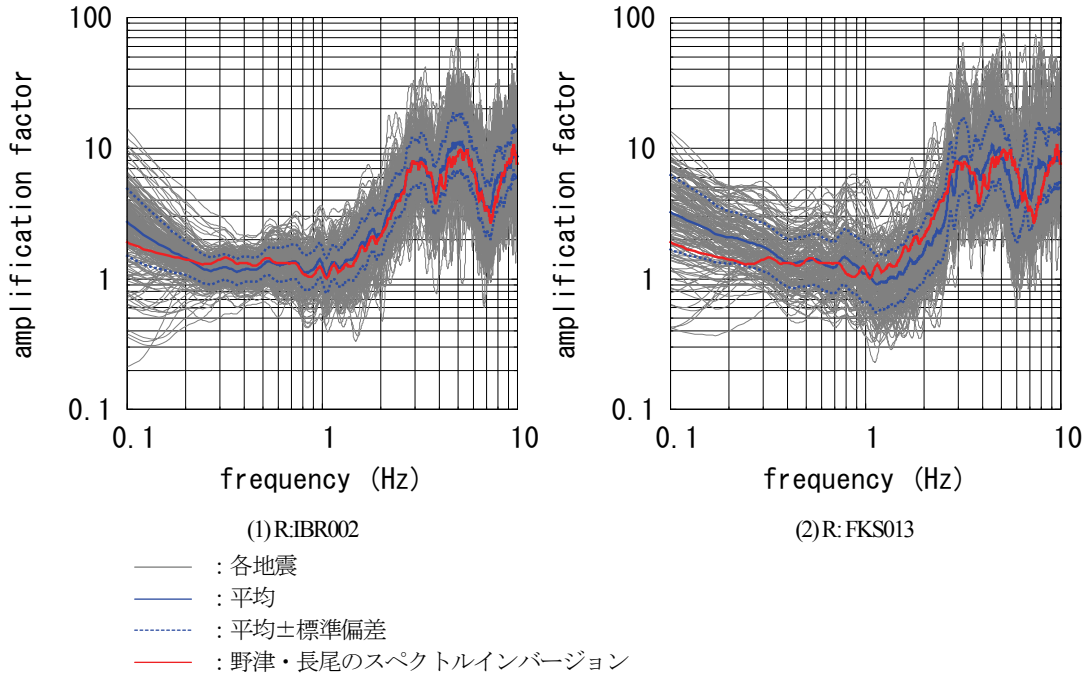


図-3 IBR003 でのサイト増幅特性の算定結果

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

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

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

ここで、伝播経路特性 $P_R(f)$, $P_T(f)$ は

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

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

とモデル化する。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

後述するように、基準点—対象地点間の距離の違いを把握するため、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

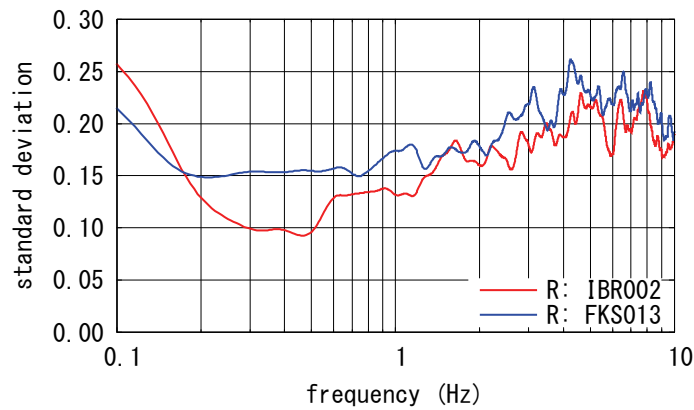


図4 IBR003 でのサイト増幅特性のばらつき

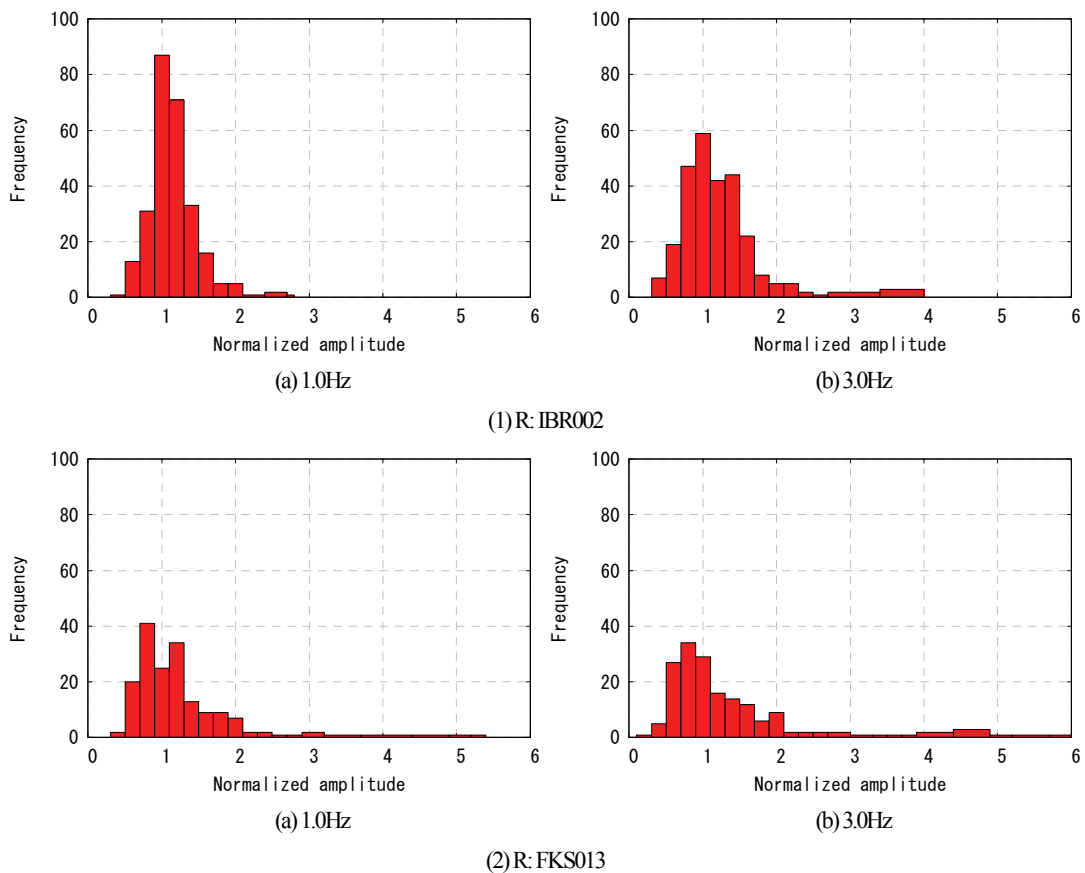


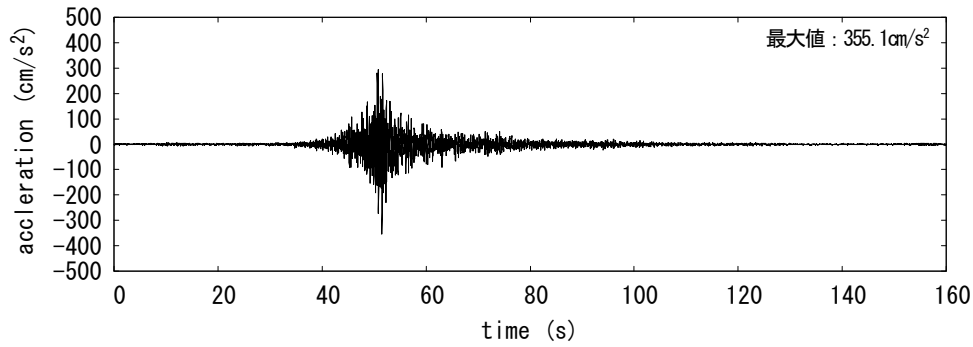
図5 IBR003 でのサイト増幅特性の頻度分布(平均値で正規化)

である。IBR002 は 2Hz 以下にピークが見られ、J-SHIS⁴⁾の深部地盤モデルによると、地震基盤相当(せん断波速度 3200m/s)の深さが 400m 以上と堆積層が比較的厚い地点となっている。これに対し、IBR003 では 3Hz 以上にピークが見られ、地震基盤相当の深さが 150m 程度と堆積層が比較的薄い地点となっている。

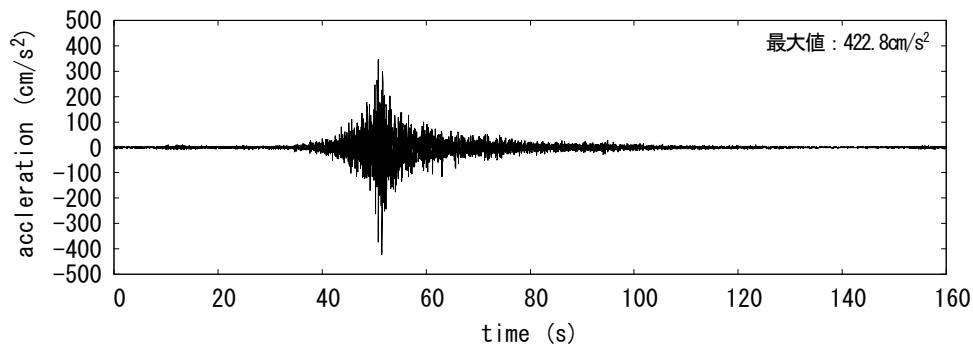
3 地点のうち、IBR003 を対象地点とし、FKS013 と IBR002 を基準点した場合のサイト増幅特性とそのばらつきを式(5)より算定する。ここで、伝播経路の Q 値については、佐藤・巽⁵⁾による東日本海溝型地震の次式を用いている。

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

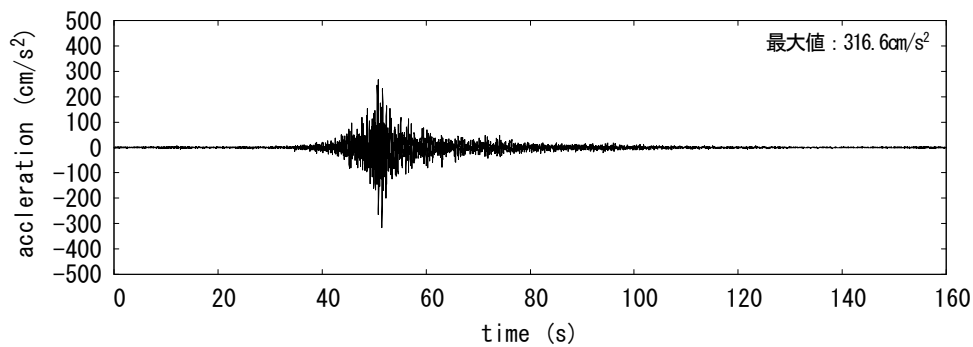
算定した IBR003 でのサイト増幅特性の算定結果を図-3 に示す。算定には、対象地点と基準点との同時観測記録のうち、0.2Hz まで S/N 比が良好な記録(FKS013 を基準点とする場合 173 記録、IBR002 を基準点とする場合 266 記録)を用いている。図中の灰色の線が各地震、青色の実線が平均値、青色の点線が平均±標準偏差、赤色の線が野津・長尾のスペクトルインバージョン²⁾によるサイト増幅特性である。平均のサイト増幅特性はスペクトルインバージョンによるサイト増幅特性と概ね似ているが、低周波数領域では平均のサイト増幅特性のほうがスペク



(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-6 IBR003のレベル1地震動の加速度時刻歴波形の例

トルインバージョンによるサイト増幅特性より大きい。また、1Hz以上の周波数帯では、IBR002を基準点とした場合は両者がほぼ一致しているが、FKS013を基準点とした場合は両者にずれが見られる。

図-4には、サイト増幅特性の常用対数の標準偏差を示す。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、IBR002を基準点とした場合0.186、FKS013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⁶⁾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⁷⁾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。

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。グラフの右側の裾が長い分布となっており、サイト増幅特性のばらつきは対数正規分布を仮定することができる。

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⁸⁾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-6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

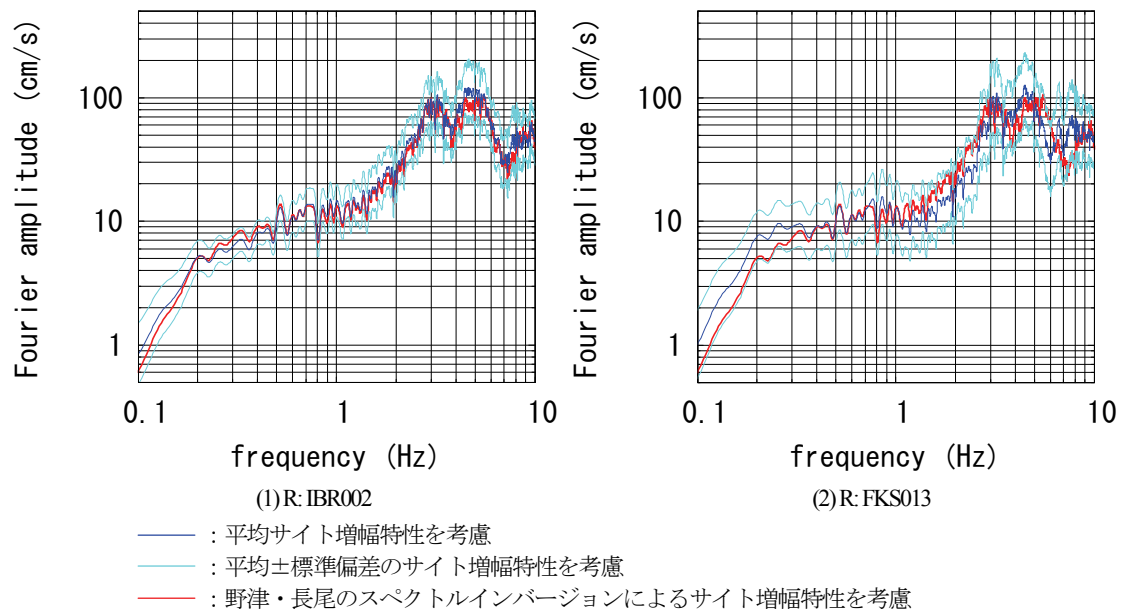


図-7 IBR003 のレベル1地震動のフーリエ振幅スペクトル

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。

図-6 に示した、平均サイト増幅特性を考慮した場合および野津・長尾の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の加速度時刻歴波形のフーリエ振幅スペクトルに加え、平均±標準偏差のサイト増幅特性を考慮した場合の加速度時刻歴波形のフーリエ振幅スペクトルを図-7 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、最大速度および速度の PSI (Power Spectrum Intensity) 値⁹⁾の頻度分布を図-8 に示す。いずれもグラフの右側の裾が長い分布となっており、対数正規分布を仮定することができる。

サイト増幅特性の平均(図-7 の青色の線)を考慮したレベル1地震動の最大加速度、最大速度、速度の PSI 値(図-8 の緑色の線)は、各地震ごとのサイト増幅特性を考慮して算定されたレベル1地震動の最大加速度、最大速度、速度の PSI 値の対数軸上での平均値(図-8 の黒色の線)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 、速度の PSI 値で 0.86 であった。これより、本検討での範囲では、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ない結果となった。

図-9 は、最大加速度、最大速度、速度の PSI 値の標準偏差とサイト増幅特性の標準偏差($0.5\sim 10\text{Hz}$ での平均値)

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 、速度の PSI 値で 0.61 であった。

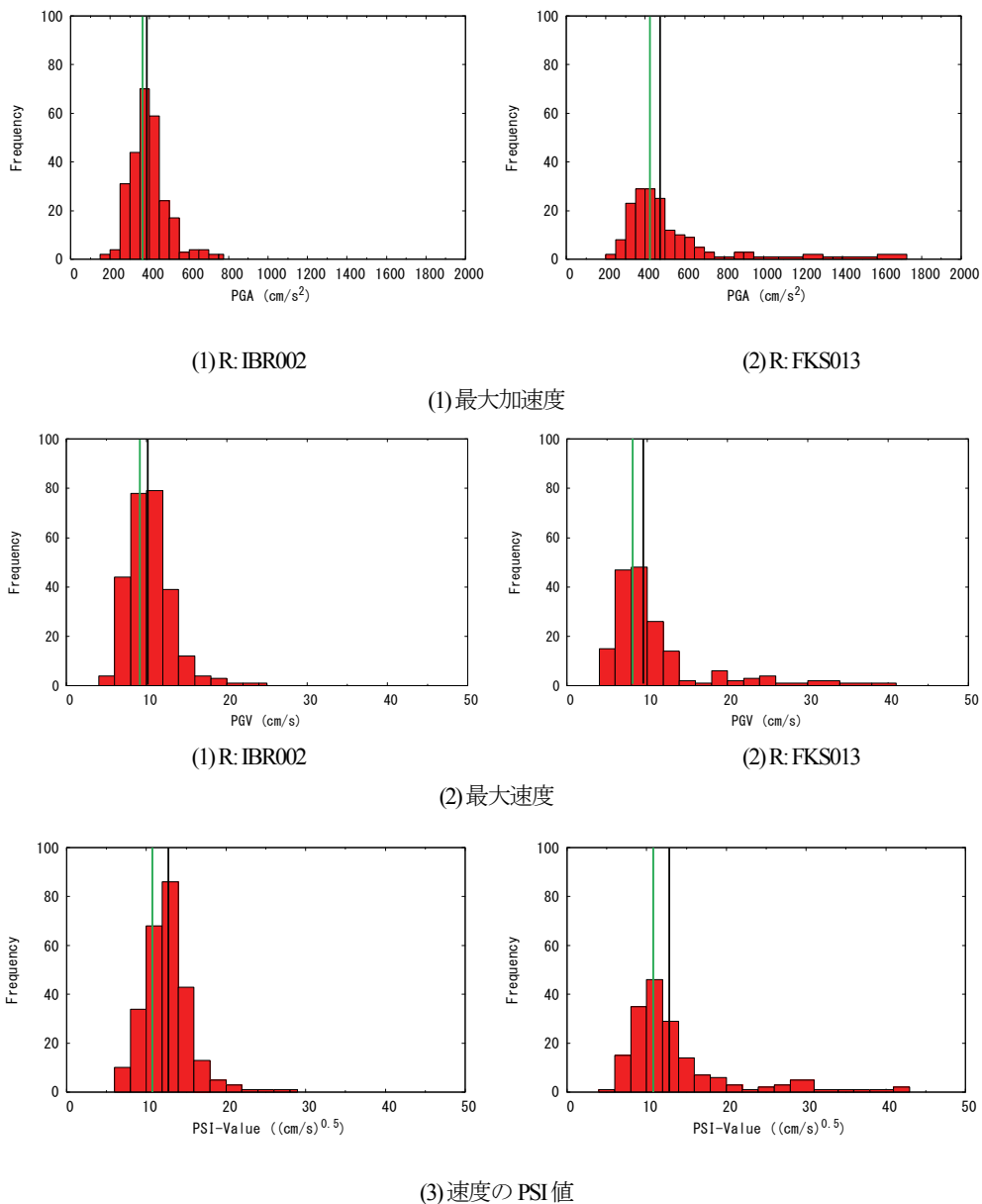
5. まとめ

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。

- 本検討での範囲では、基準点-対象地点間距離が大きいほうが、サイト増幅特性の標準偏差が大きい結果となった。
- 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、速度の PSI 値は、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結果となった。

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、サイト増幅特性の標準偏差の距離依存性などについては今後、地点数を増やし、あらためて検討する必要がある。

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。



— : 平均サイト増幅特性を考慮した場合の地震動の指標値
 — : 各サイト増幅特性を考慮した場合の地震動の指標値の対数軸上での平均

図-8 IBR003 のレベル1地震動の最大加速度, 最大速度, 速度のPSI値の頻度分布

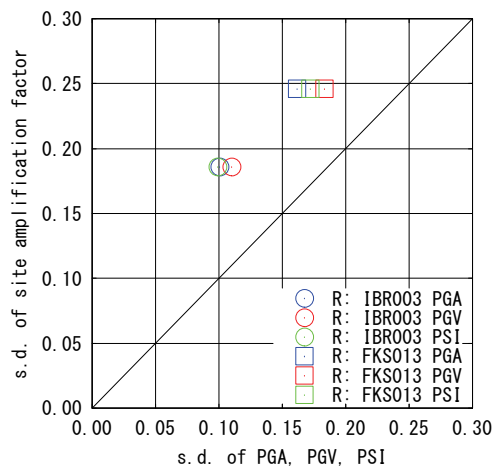


図-9 最大加速度, 最大速度, 速度のPSI値の標準偏差とサイト増幅特性の標準偏差(0.5~10Hz平均)の関係

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, KiKnet), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2017年9月閲覧)
- 4) (独)防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2017年9月閲覧)
- 5) 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.
- 6) 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), pp. L468-L473, 2012.

- 7) 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バ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.
- 8) 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)

- 9) 野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 平成 12 年度土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 18-19, 2001.

(2018.11.9 受付, 2019.2.20 修正, 2019.2.28 受理)

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

Yasuhiro FUKUSHIMA and Takashi NAGAO

In this study, by using simultaneous observation record at neighbouring earthquake ground motion observation stations, the variations of the site amplification factors was evaluated with IBR003 earthquake ground motion observation stations in Ibaraki prefecture. Furthermore, the earthquake ground motion considering the variation of the site amplification factors was calculated, and the relation between the variation of the site amplification factors and the variation of representative values of earthquake ground motion was discussed.

As a result, the peak ground accelerations, peak ground velocities, and power spectrum intensity values of the earthquake ground motions considering the average site amplification factor are smaller than the average values of those of the earthquake ground motions.