



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の評価

福島, 康宏
長尾, 毅

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 22:26-44

(Issue Date)

2018-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011566>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011566>



サイト増幅特性のばらつきを考慮した 強震動のばらつきの評価

Stochastic characteristic of site amplification factor and its effect
on earthquake ground motion

福島康宏 ¹⁾

Yasuhiro Fukushima

長尾 毅 ²⁾

Takashi Nagao

概要：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、最大速度、速度の PSI 値など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。

キーワード：地震動, 経験的サイト増幅特性, ばらつき

1. 序論

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、最大速度や速度の PSI 値など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．

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

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

ここで，伝播経路特性 $P_R(f)$, $P_T(f)$ は

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

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

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．

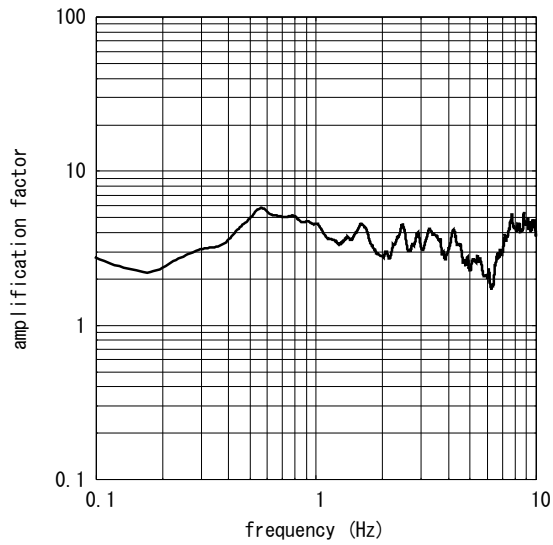
$$G_T(f) = G_R(f) \cdot \frac{O_T(f)}{O_R(f)} \cdot \frac{r_T}{r_R} \cdot \frac{\exp \left\{ -(\pi f r_R) / (Q(f) V_s) \right\}}{\exp \left\{ -(\pi f r_T) / (Q(f) V_s) \right\}} \quad (5)$$

3. 対象地点と用いたデータ

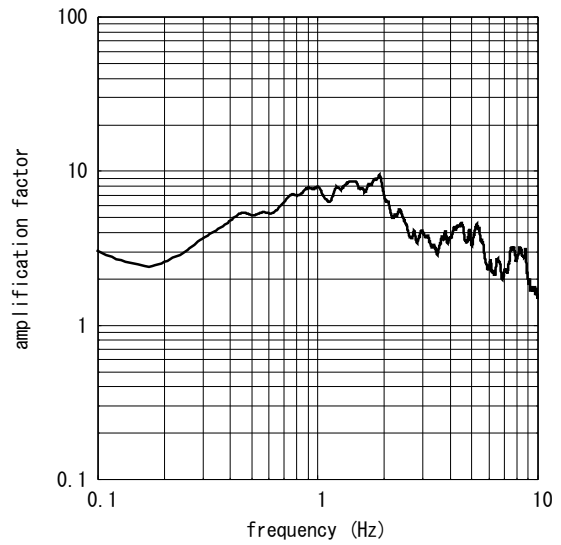
図-1 に示す福島県内・茨城県内の K-NET, KiK-net³⁾ 強震観測点 10 地点を対象とする．10 地点のうちある 1 地点を基準点とする場合は残りの 9 地点を対象地点とする，といった具合で総当たりの検討を行う．対象とした 10 地点について，スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性²⁾を図-2 に示す．なお，各観測点について，スペクトルインバージョンに用いられている地震記録数は表-1 に示す通りである．FKS011, FKS012, FKS013, FKSH14, IBR002 は 2Hz 以下にピークが見られ，堆積層が比較的厚い地点となっている．それ以外の地点は堆積層が比較的薄く，IBRH14 や IBRH16 はほぼ岩盤の観測点となっている．



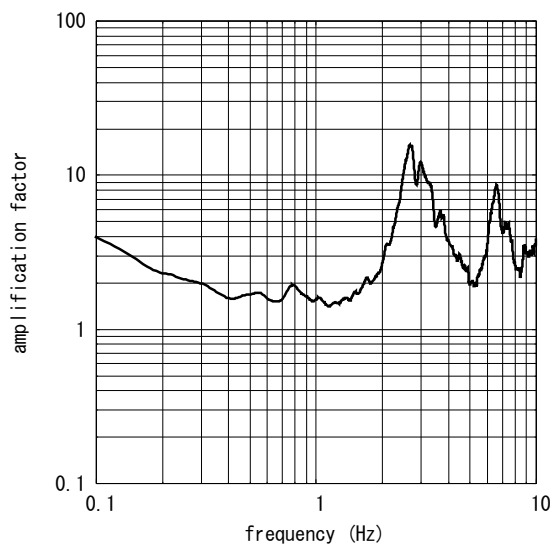
図-1 検討に用いた強震観測点



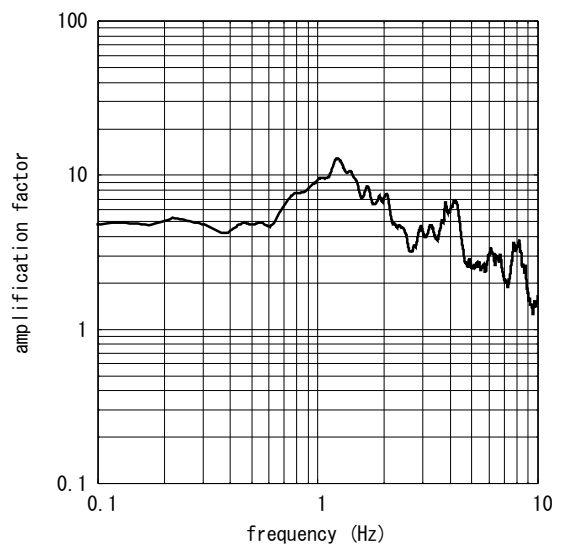
(1) FKS011



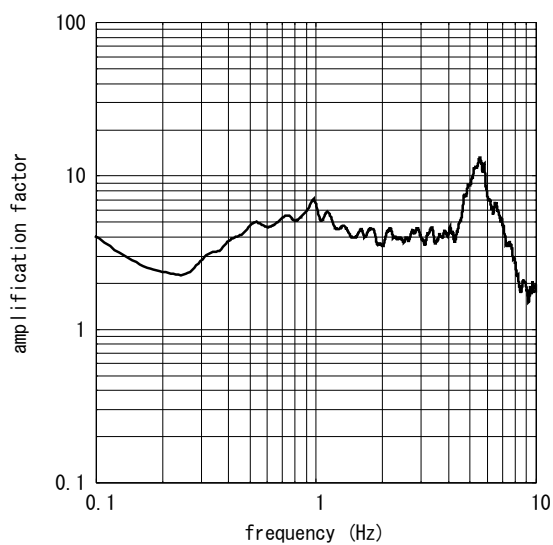
(2) FKS012



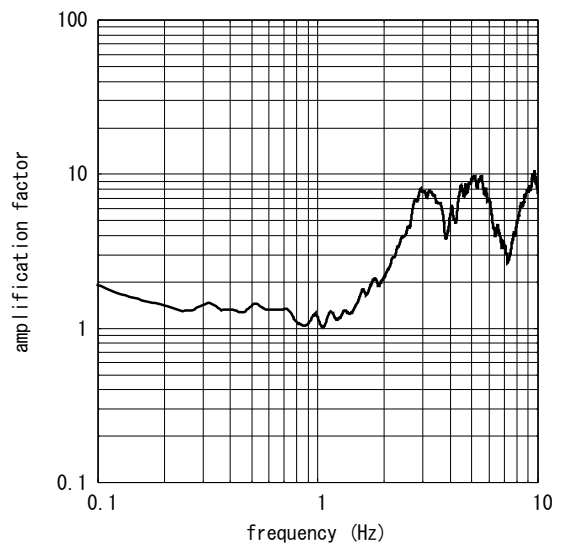
(3) FKS013



(4) FKSH14

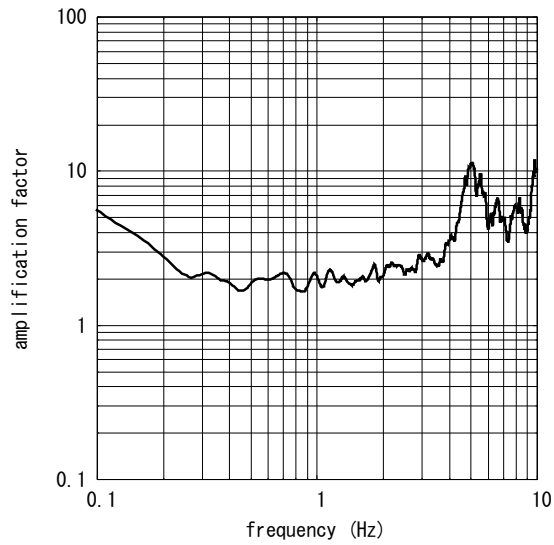


(5) IBR002

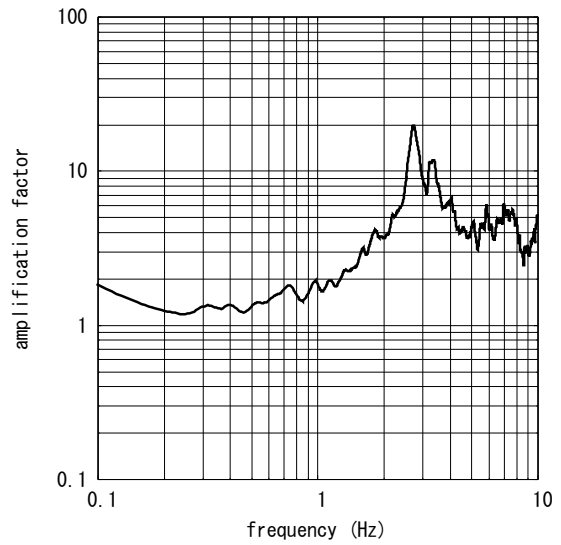


(6) IBR003

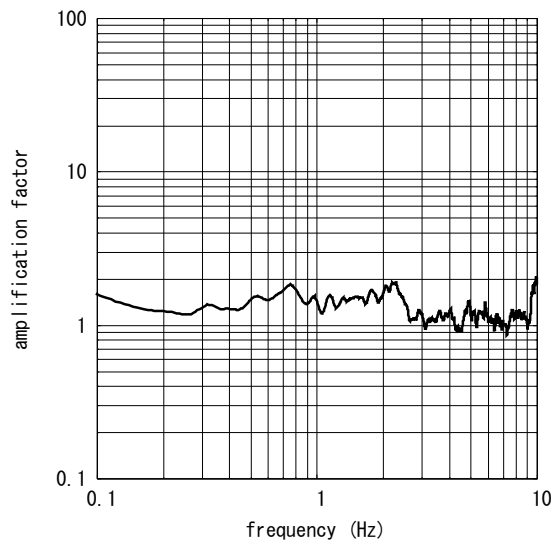
図-2 スペクトルインバージョン²⁾による検討対象 10 地点のサイト増幅特性(1/2)



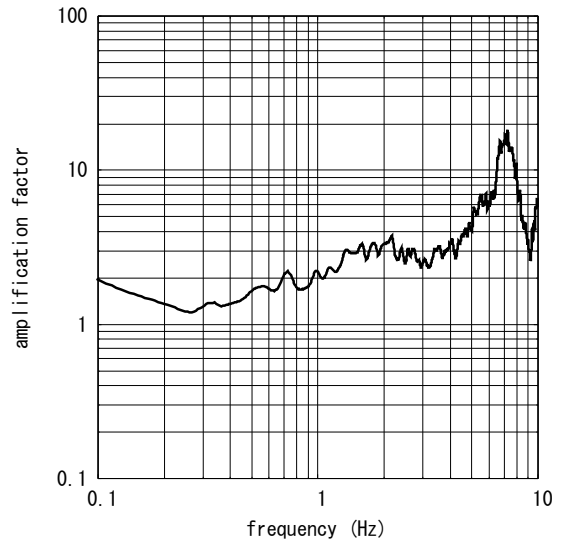
(7) IBR019



(8) IBRH13



(9) IBRH14



(10) IBRH14

図-2 スペクトルインバージョン²⁾による検討対象 10 地点のサイト増幅特性 (2/2)

表-1 スペクトルインバージョン²⁾で用いられた地震記録数

観測点	地震記録数
FKS011	51
FKS012	65
FKS013	66
FKSH14	54
IBR002	83
IBR003	74
IBR019	15
IBRH13	17
IBRH14	15
IBRH16	11

4. サイト増幅特性のばらつき

図-1で示した10地点について、自分自身以外の9地点から式(5)により地震ごとのサイト増幅特性を算定した。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

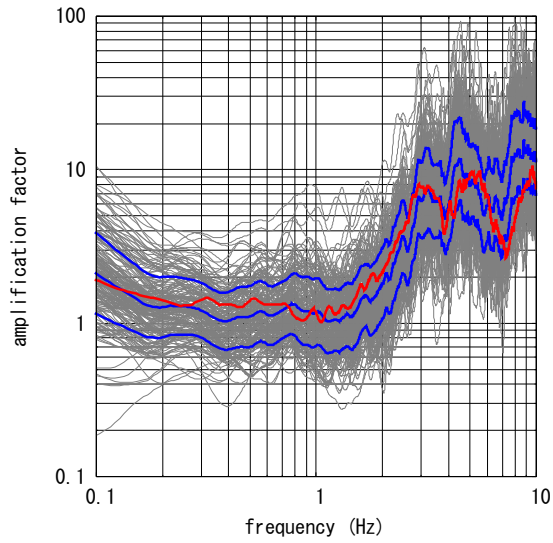
$$Q(f)=114f^{0.92} \quad (6)$$

を用いている。

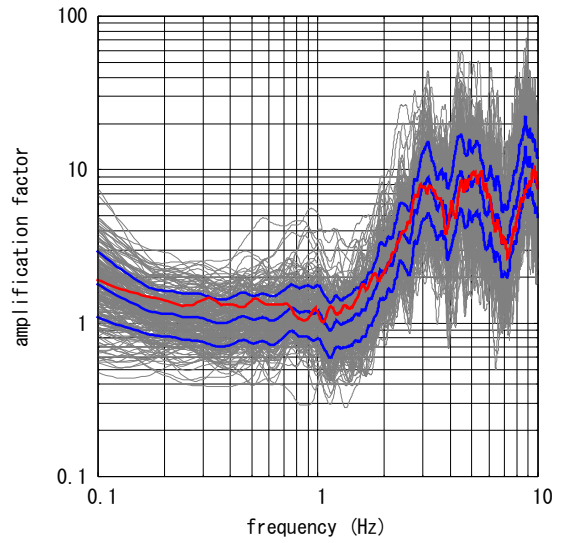
算定したサイト増幅特性の例として、IBR003観測点を対象地点とした算定結果を図-3に示す。算定には、対象地点と基準点との同時観測記録記録を用いているが、0.2HzまでS/N比が良好な記録(基準点により異なるが56～266記録)を用いている。図中の灰色の線が各地震、青色の実線が平均値、青色の点線が平均±標準偏差、赤色の線が野津・長尾のスペクトルインバージョン²⁾によるサイト増幅特性である。平均のサイト増幅特性はスペクトルインバージョンによるサイト増幅特性と概ね似ているが、基準点の違いや周波数帯により異なっている場合もある。

算定したサイト増幅特性のばらつきは、基準点と対象地点の組み合わせにもよるが、0.5～10Hzでのサイト増幅特性の常用対数の標準偏差の平均で0.186～0.256となっている。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⁵⁾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⁶⁾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。また、関西地震観測研究協議会の強震観測点を対象とし、基盤スペクトルに対する観測スペクトルとしてサイト増幅特性を評価している鶴来ほか⁷⁾による検討の標準偏差は0.10～0.24(使用記録数2～11)であり、本検討の標準偏差は概ねこの範囲に入っている。

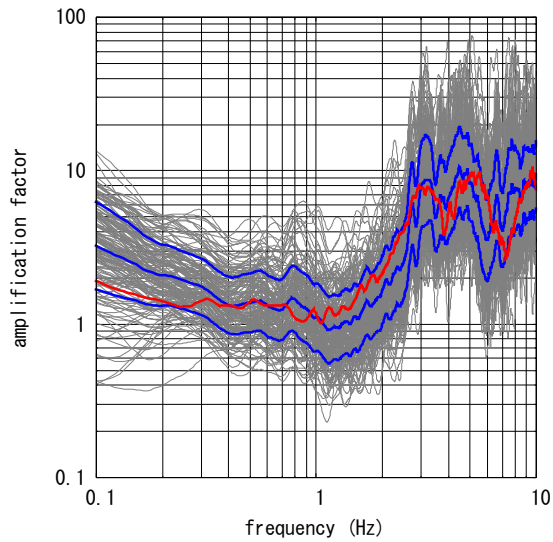
基準点－対象地点間距離と0.5～10Hzでのサイト増幅特性のばらつきの平均の関係を図-4に示す。基準点－観測点間距離が遠くなるほどサイト増幅特性のばらつきが大きくなる傾向が見られる。ここで、各地点でばらつきが大きいプロットが見られるが、これはIBR019を基準点とした場合である。IBR019での強震記録のフーリエスペクトルでは、1～2Hzの成分が卓越しているものや卓越しないものがまちまちで、複雑なサイト増幅特性を示しているものと考えられる。



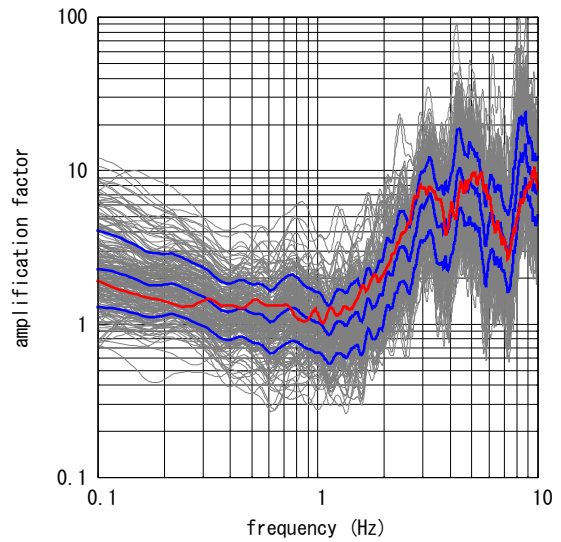
(1) FKS011を基準点(194地震データ使用)



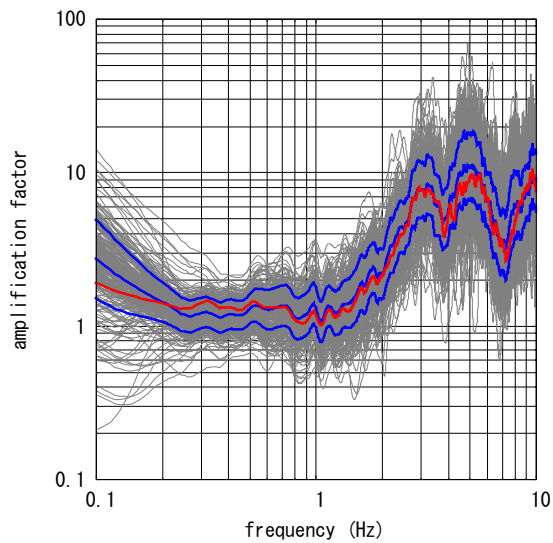
(2) FKS012を基準点(235地震データ使用)



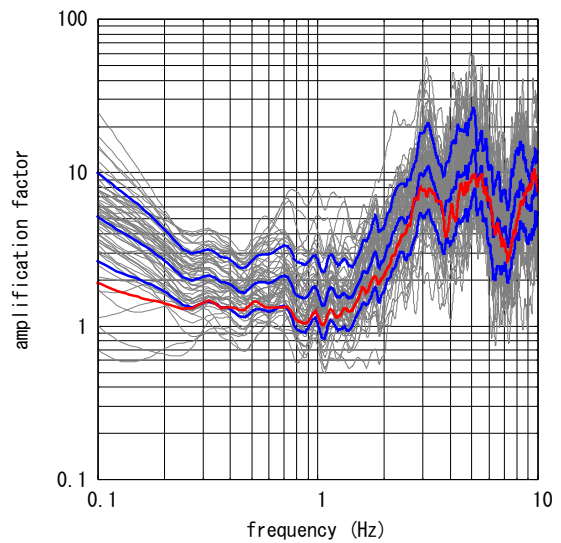
(3) FKS013を基準点(173地震データ使用)



(4) FKSH14を基準点(203地震データ使用)

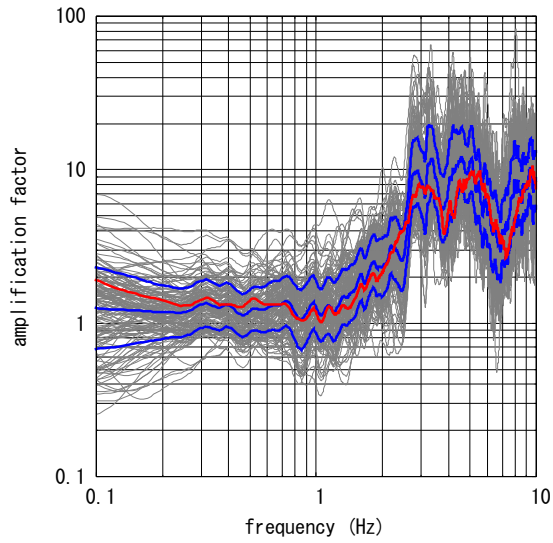


(5) IBR002を基準点(266地震データ使用)

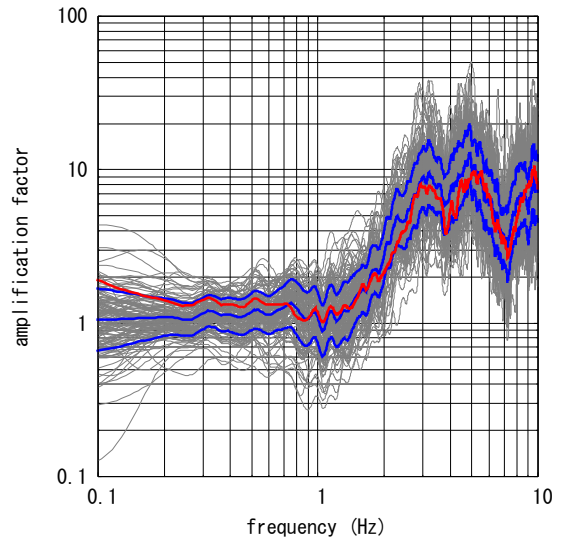


(6) IBR019を基準点(56地震データ使用)

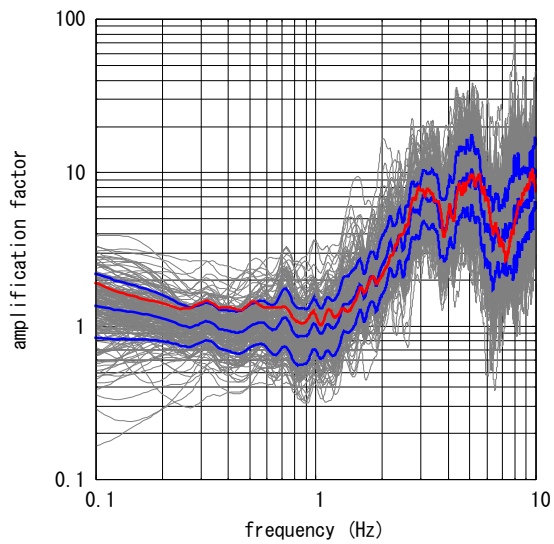
図-3 算定したIBR003のサイト増幅特性 (1/2)



(7) IBRH13を基準点(142地震データ使用)



(8) IBRH14を基準点(134地震データ使用)



(9) IBRH16を基準点(197地震データ使用)

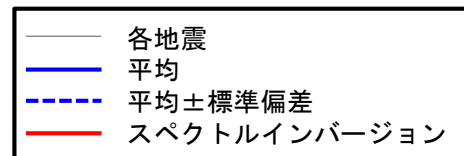


図-3 算定したIBR003のサイト増幅特性 (2/2)

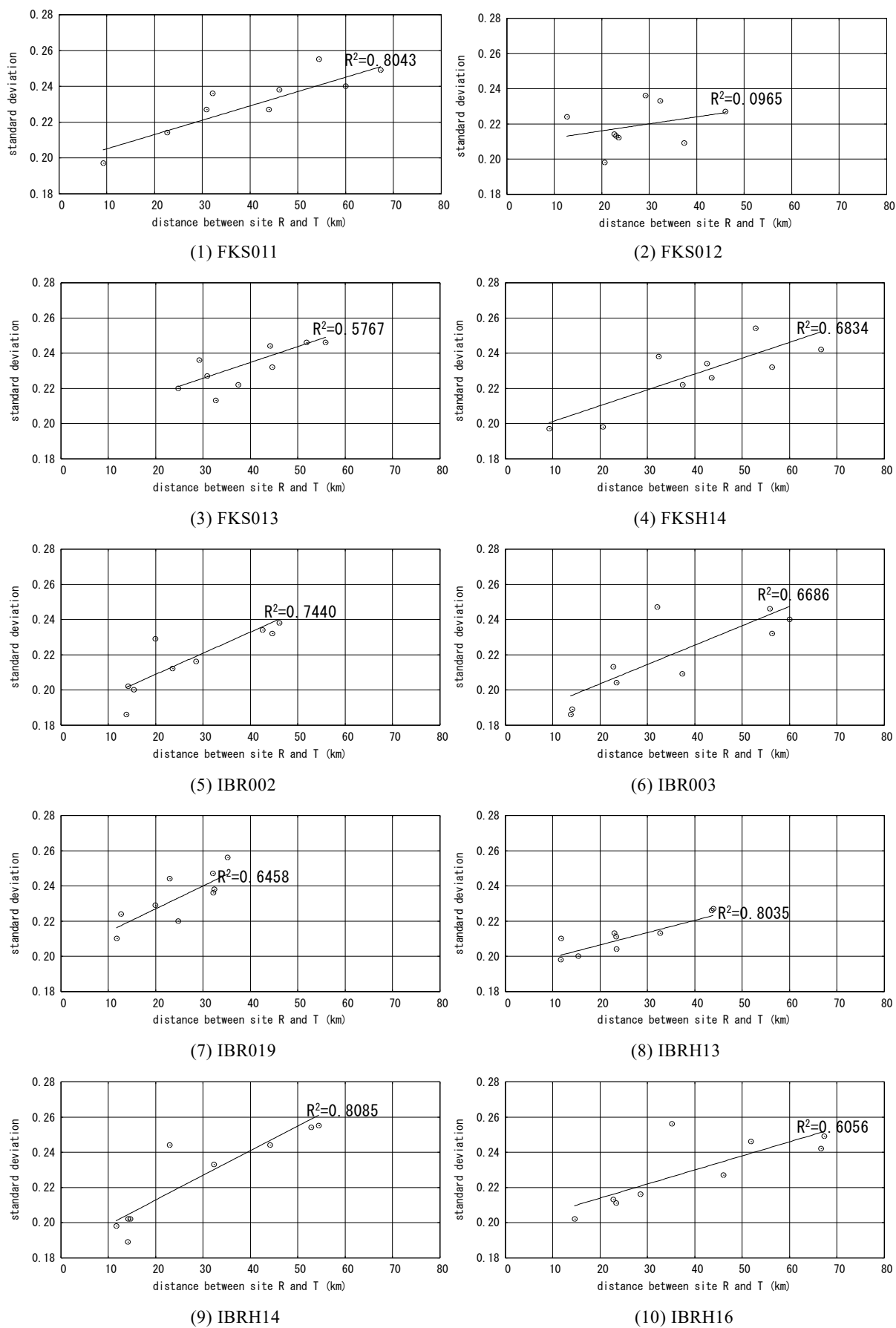


図-4 基準点ー対象地点間距離とサイト増幅特性の標準偏差(常用対数0.5～10Hz平均)の関係

5. 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

図-1で示した10地点のうち、IBR003観測点について、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観測点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⁾(図-5)のサイト増幅特性を、図-3で算定したIBR003観測点のサイト増幅特性で置換している。

図-6～8には、平均的なサイト増幅特性で正規化した各地震のサイト増幅特性(0.5～10Hzの総和)に対する、算定したレベル1地震動の最大加速度、最大速度、速度のPSI値⁹⁾(いずれの指標値も平均的なサイト増幅特性を考慮したケースで正規化したもの)を示す。各図とも、灰色のプロットが各地震のサイト増幅特性を考慮した場合、青色のプロットが平均、平均±標準偏差の増幅特性を考慮した場合、赤色のプロットが野津・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を考慮した場合である。個別の地震によるサイト増幅特性の0.5～10Hzの総和が、平均のサイト増幅特性の0.5～10Hzの総和と同様の値でも、周波数によって平均との大小関係が入れ替わっている。平均より大きい部分が地震動指標に影響しており、平均的なサイト増幅特性を用いた場合より多くの地震で大きな地震動となっている。

図-9には、算定した地震動の最大速度と速度のPSI値の関係を示す。灰色のプロットが各地震のサイト増幅特性を考慮した場合、黒色のプロットは各地震のサイト増幅特性を考慮した場合の指標値の平均、平均±標準偏差、青色のプロットが平均、平均±標準偏差の増幅特性を考慮した場合、赤色のプロットが野津・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である。平均的なサイト増幅特性を考慮したレベル1地震動の指標値は、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くなっている。

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。

6. まとめ

本研究では、福島県内、茨城県内の強震観測点10地点を対象として、近隣強震観測点での同時観測記録を用いたサイト増幅特性を算定し、そのばらつきを評価した。さらに、対象10地点のうちIBR003観測点について、サイト増幅特性のばらつきを考慮した強震動を算定し、サイト増幅特性のばらつきと強震動の指標値のばらつきとの関係を評価した。これにより以下のことがわかった。

- ・基準点ー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地震動の指標値は、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くなっており、平均的なサイト増幅特性を考慮するだけでは十分ではなく、過小評価する可能性がある。

今後、レベル2地震動についても、断層モデルを用いたシミュレーションと観測記録の比較を行い、合理的な地震動設定のために考慮すべきサイト増幅特性のばらつきの評価を行う予定である。

謝辞：防災科学技術研究所K-NET、KiK-netの強震記録を使用しました。また、関西地震観測研究協議会の観測点のサイト増幅特性のデータは、「関西の地震記録 ～関震協観測10周年記念CD-ROM」を使用しました。記して謝意を表します。

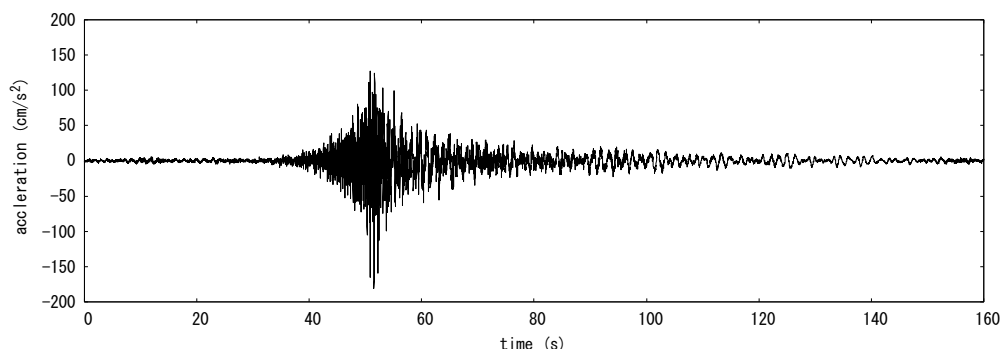
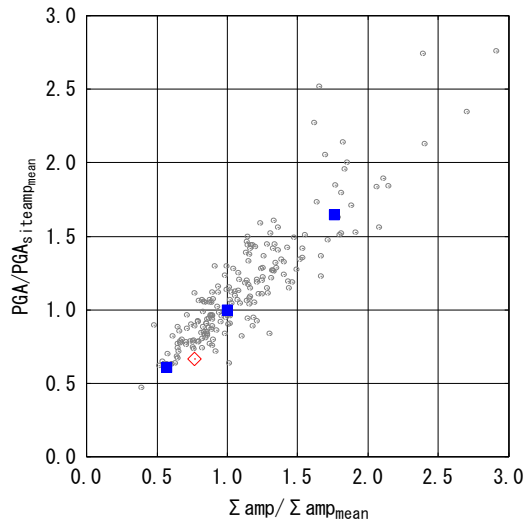
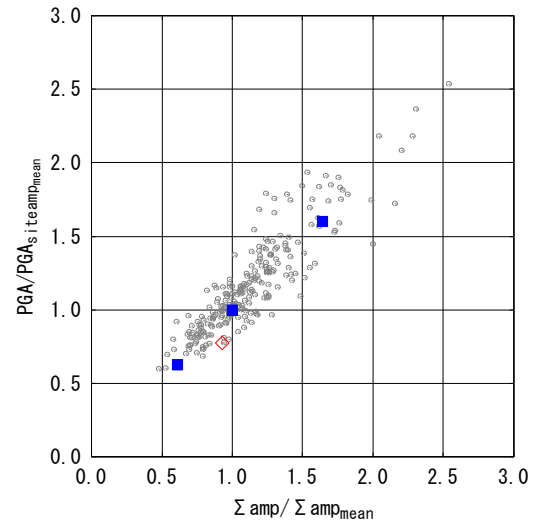


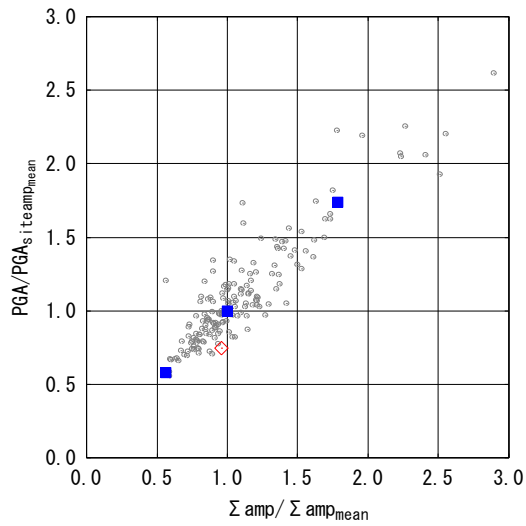
図-5 日立港で設定されているレベル1地震動⁸⁾の加速度時刻歴波形



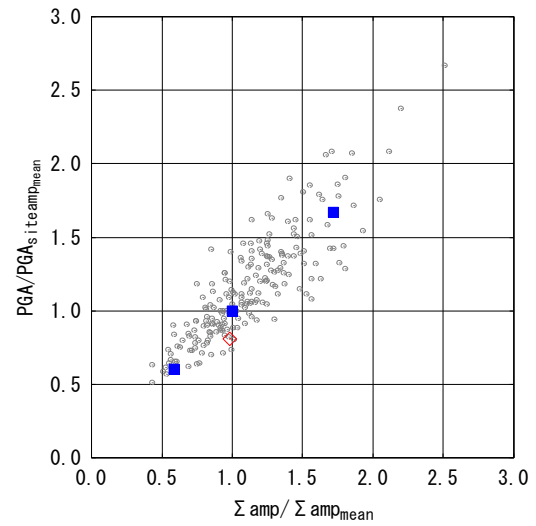
(1) FKS011を基準点



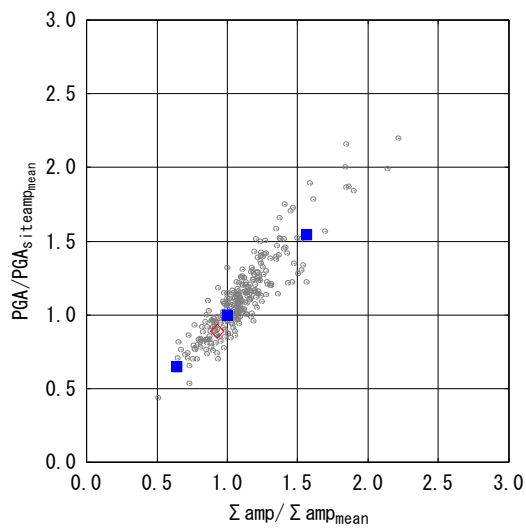
(2) FKS012を基準点



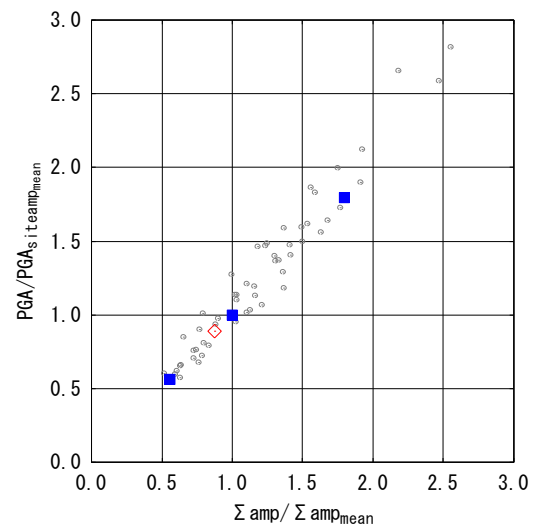
(3) FKS013を基準点



(4) FKSH14を基準点

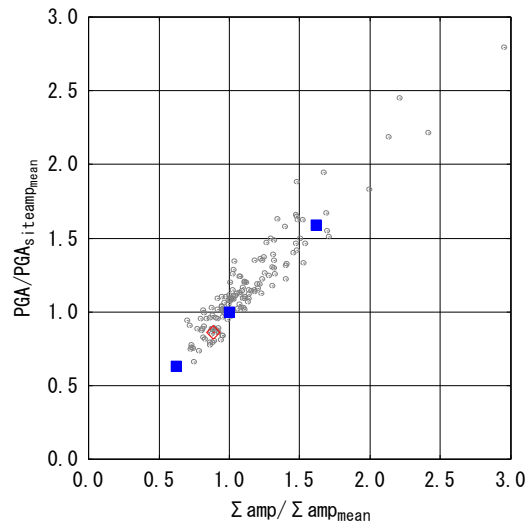


(5) IBR002を基準点

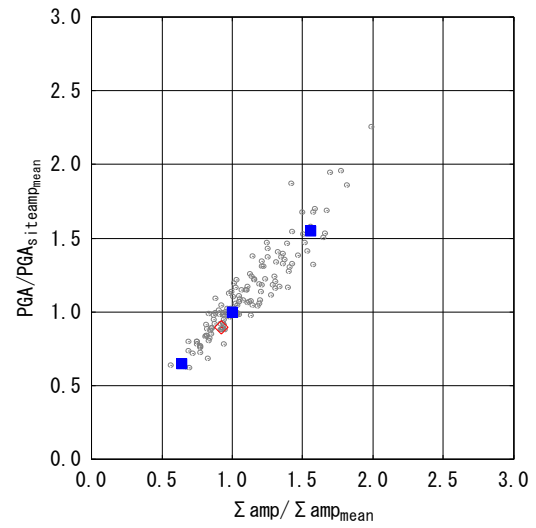


(6) IBR019を基準点

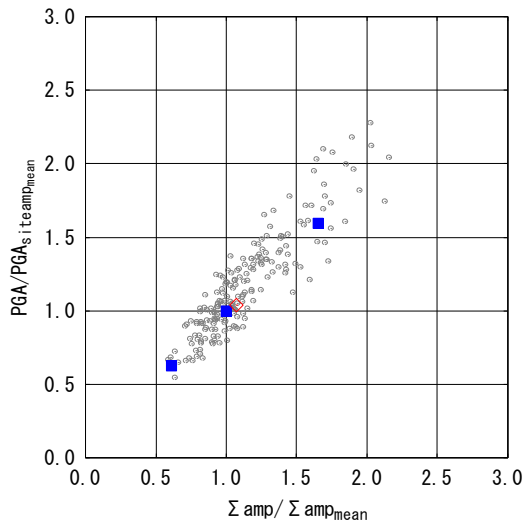
図-6 IBR003の正規化サイト増幅特性に対するレベル1地震動の正規化最大加速度(1/2)



(7) IBRH13を基準点



(8) IBRH14を基準点



(9) IBRH16を基準点

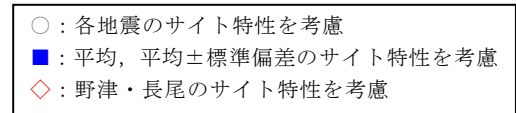
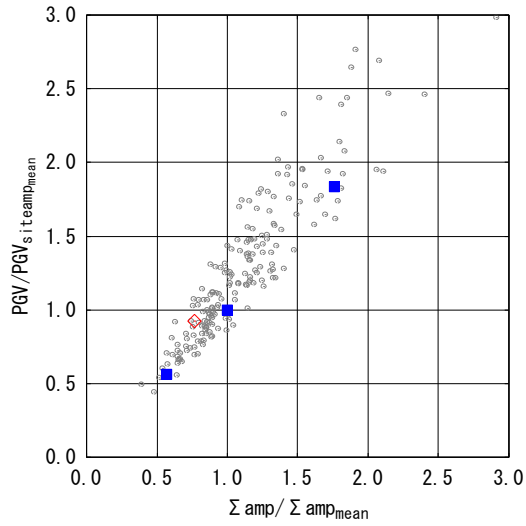
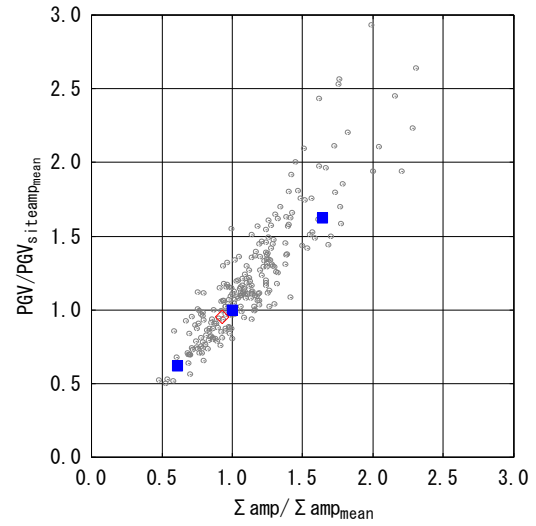


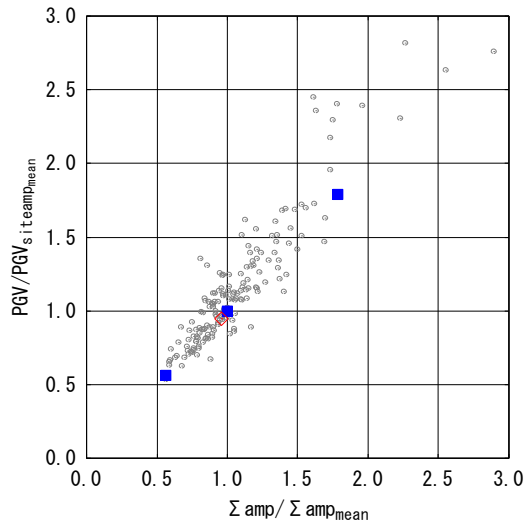
図-6 IBR003の正規化サイト増幅特性に対するレベル1地震動の正規化最大加速度 (2/2)



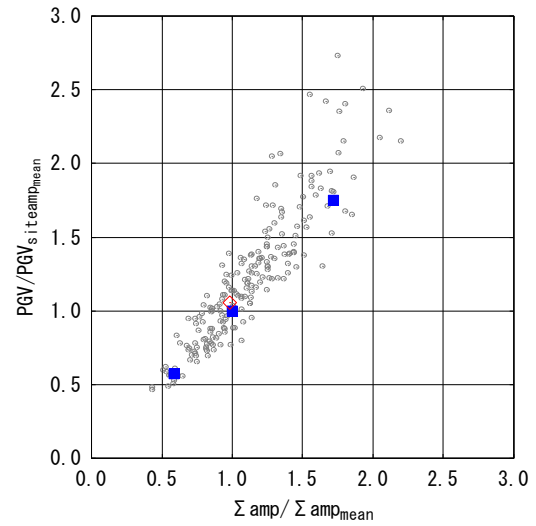
(1) FKS011を基準点



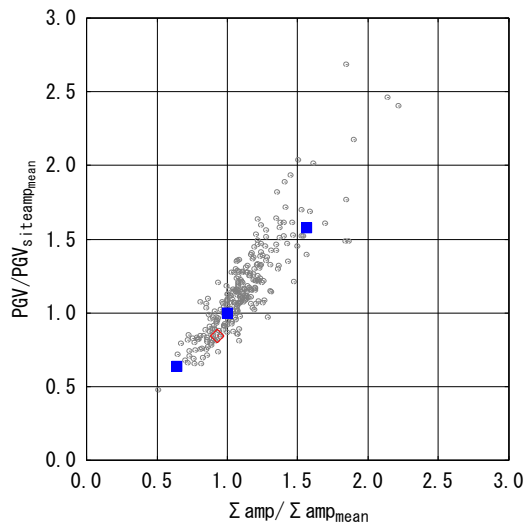
(2) FKS012を基準点



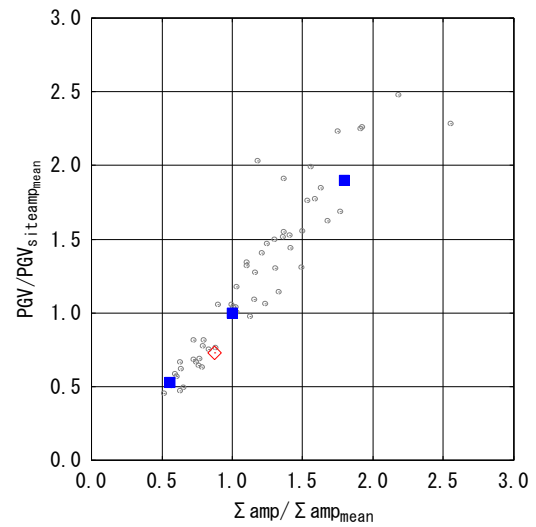
(3) FKS013を基準点



(4) FKSH14を基準点

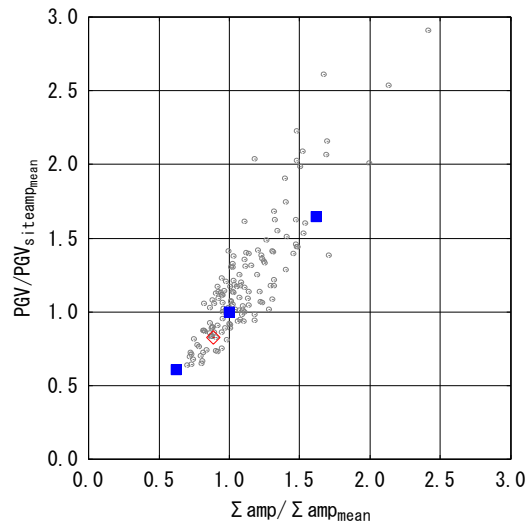


(5) IBR002を基準点

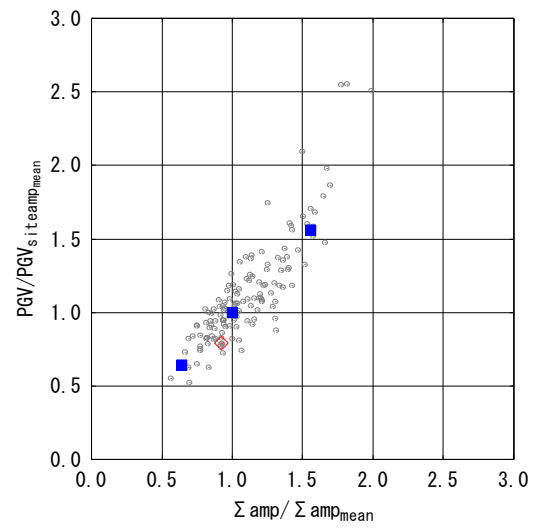


(6) IBR019を基準点

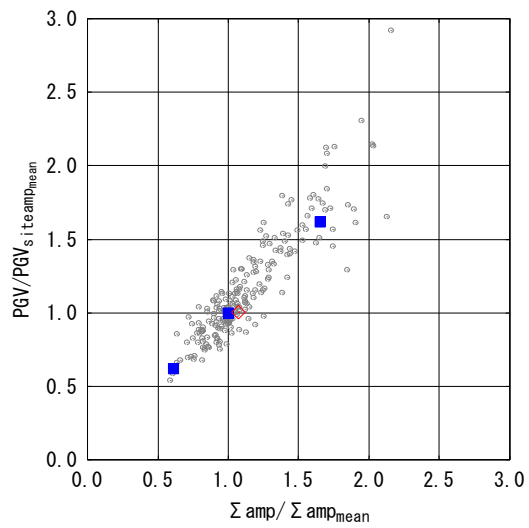
図-7 IBR003の正規化サイト増幅特性に対するレベル1地震動の正規化最大速度(1/2)



(7) IBRH13を基準点



(8) IBRH14を基準点



(9) IBRH16を基準点

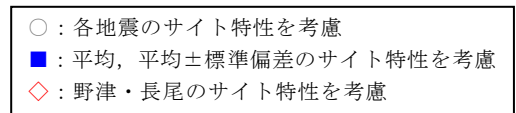
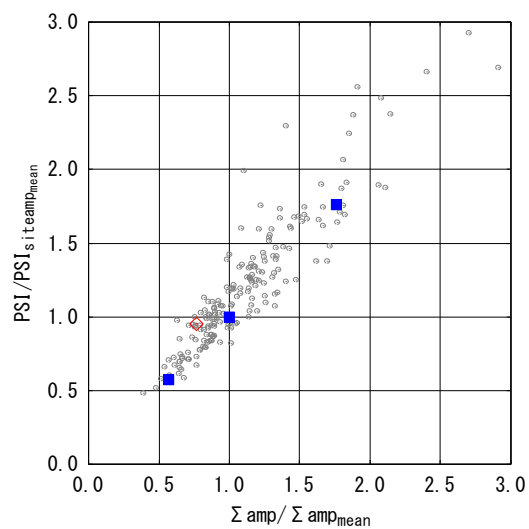
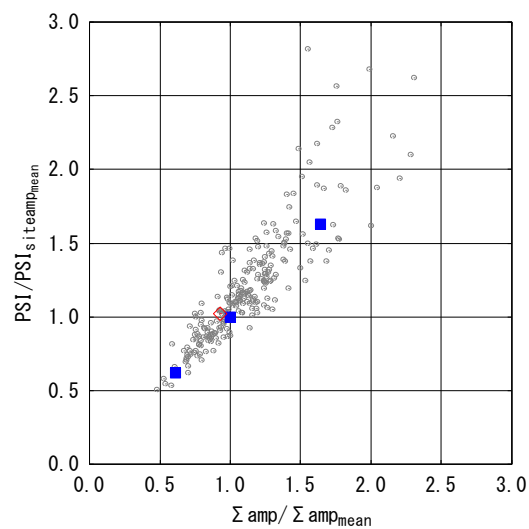


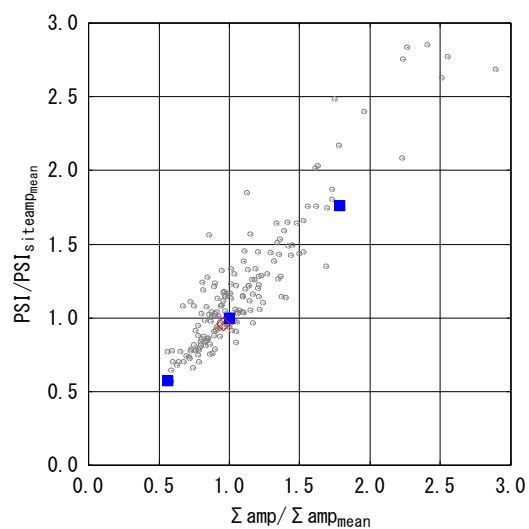
図-7 IBR003の正規化サイト増幅特性に対するレベル1地震動の正規化最大速度 (2/2)



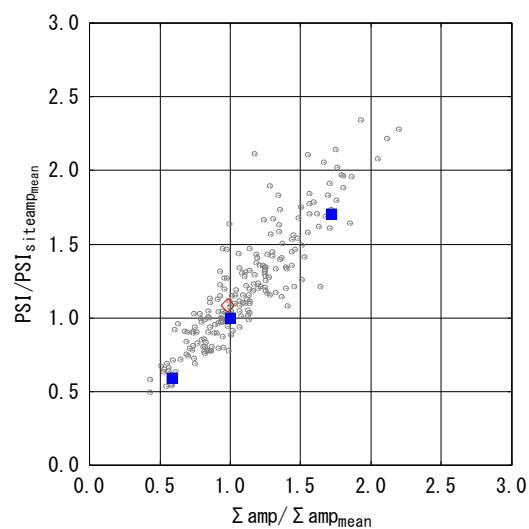
(1) FKS011を基準点



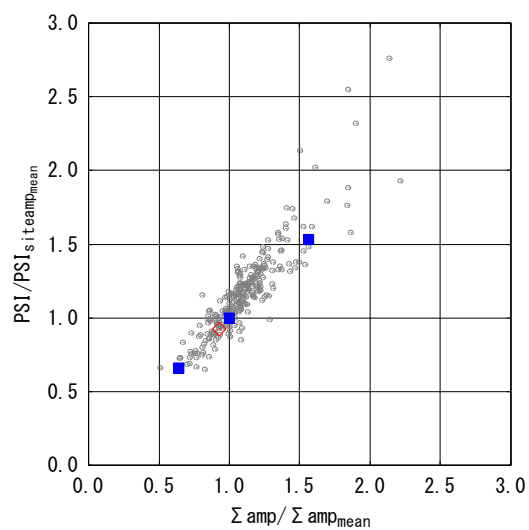
(2) FKS012を基準点



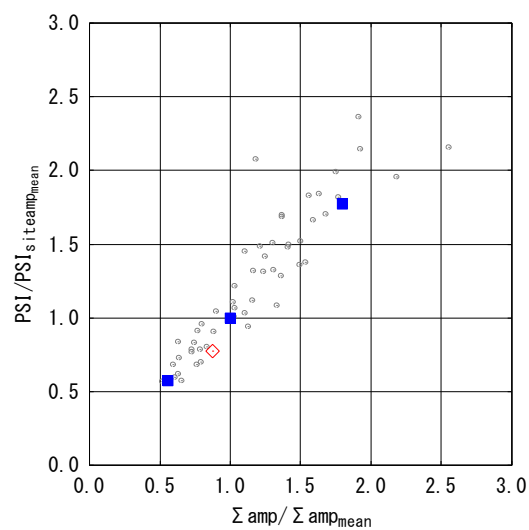
(3) FKS013を基準点



(4) FKSH14を基準点

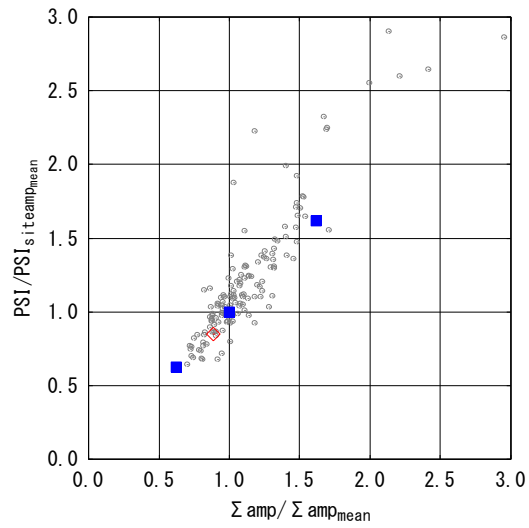


(5) IBR002を基準点

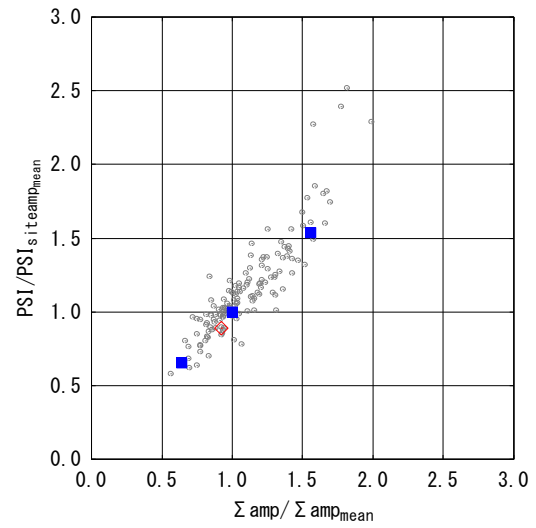


(6) IBR019を基準点

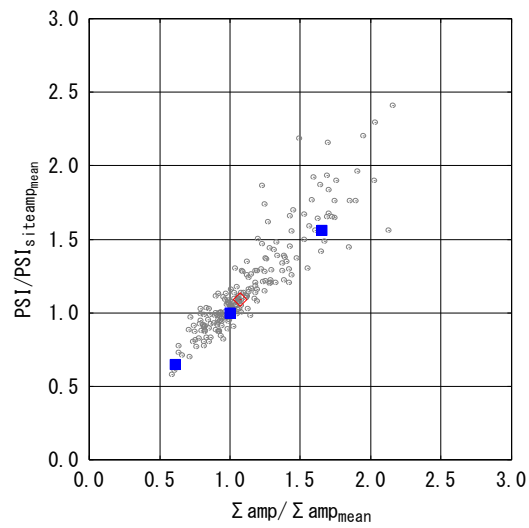
図-8 IBR003の正規化サイト増幅特性に対するレベル1地震動の正規化速度のPSI値(1/2)



(7) IBRH13を基準点



(8) IBRH14を基準点



(9) IBRH16を基準点

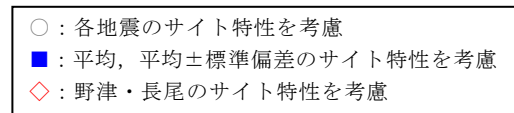
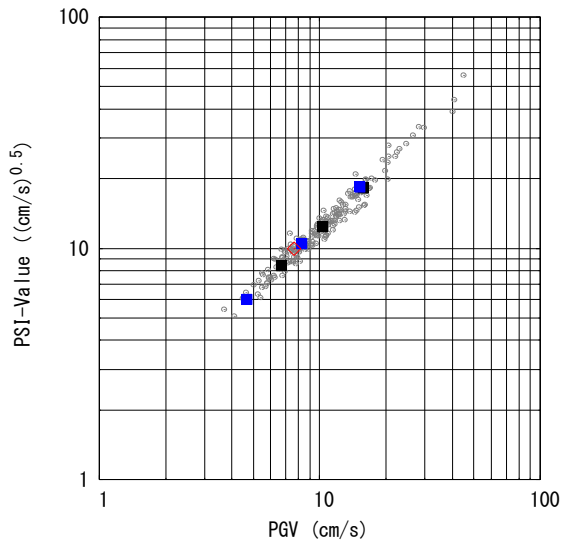
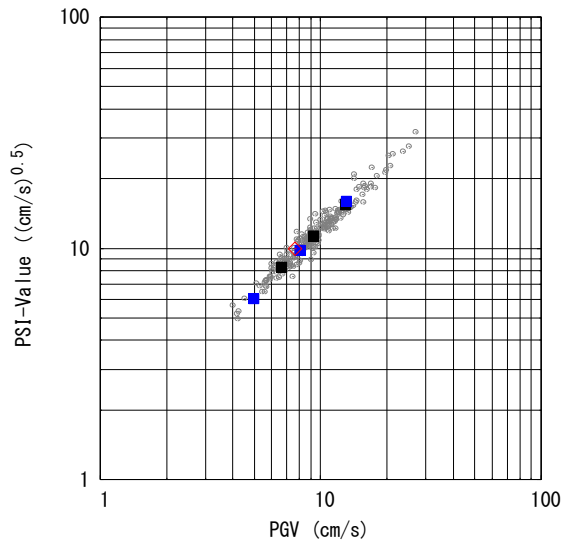


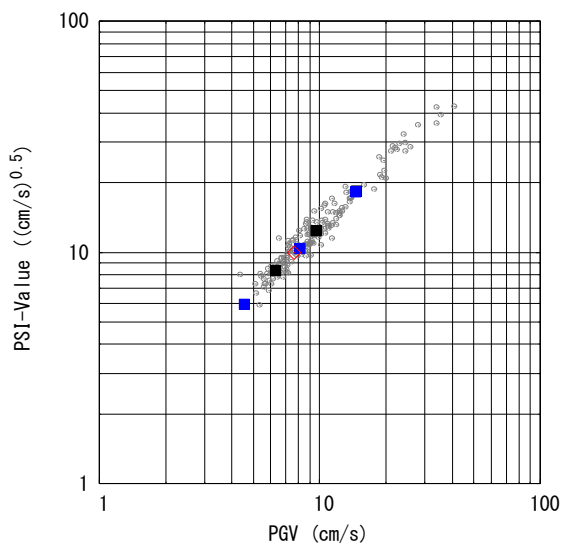
図-8 IBR003の正規化サイト増幅特性に対するレベル1地震動の正規化速度のPSI値(2/2)



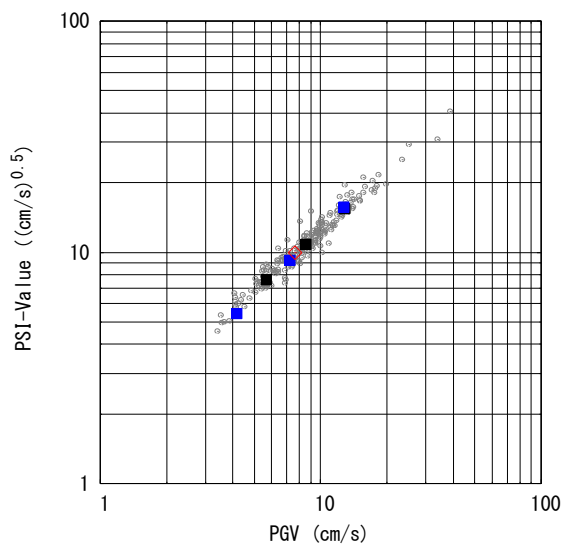
(1) FKS011を基準点



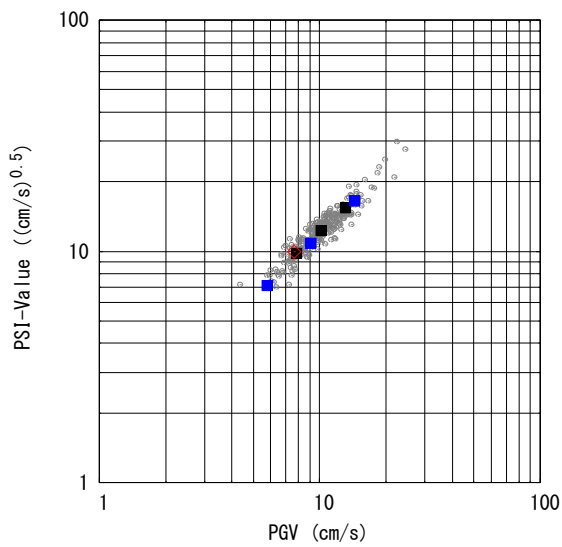
(2) FKS012を基準点



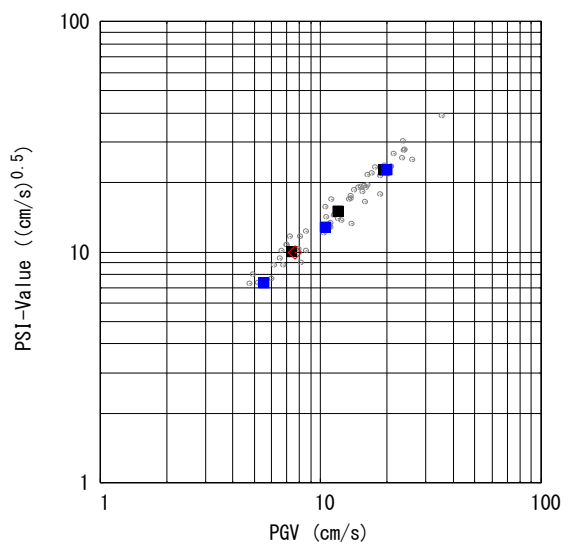
(3) FKS013を基準点



(4) FKSH14を基準点

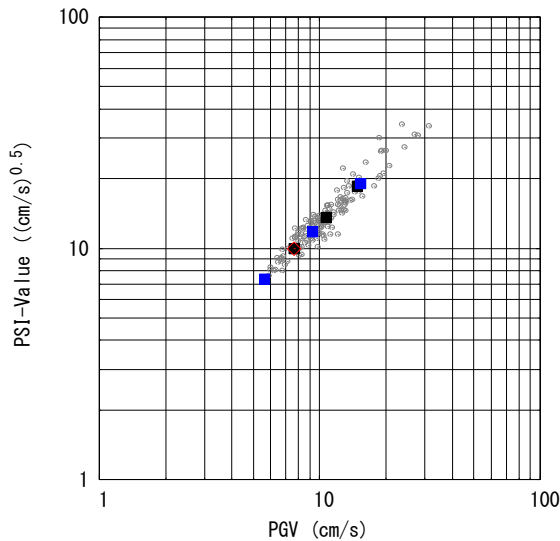


(5) IBR002を基準点

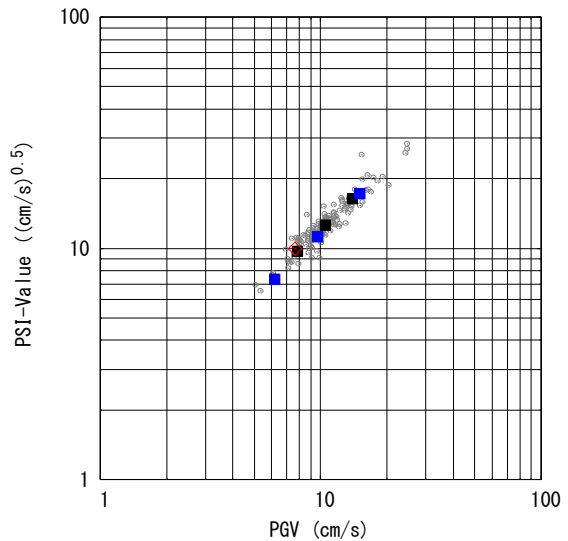


(6) IBR019を基準点

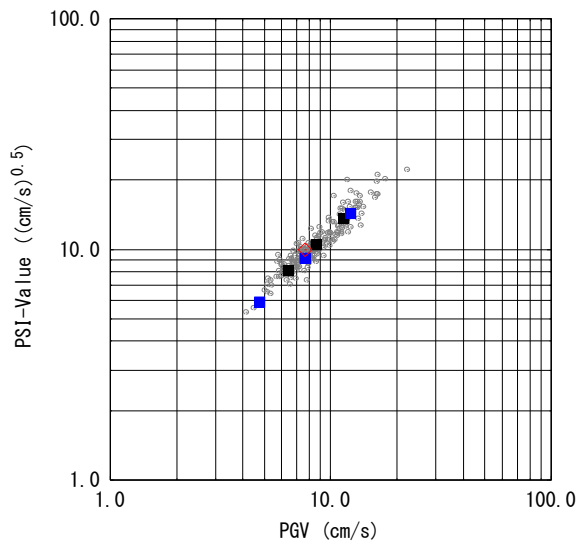
図-9 IBR003のレベル1地震動の最大速度と速度のPSI値の関係(1/2)



(7) IBRH13を基準点



(8) IBRH14を基準点



(9) IBRH16を基準点

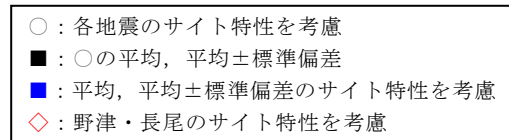


図-9 IBR003のレベル1地震動の最大速度と速度のPSI値の関係(2/2)

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.
- 7) 鶴来雅人，澤田純男，宮島昌克，北浦勝：関西地域におけるサイト増幅特性の再評価，構造工学論文集，Vol.48A，pp.577-586，2002.
- 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11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.

著者：1) 福島康宏，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻，学生(株式会社エイト日本技術開発)；2) 長尾毅，都市安全研究センター，教授

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

Yasuhiro Fukushima
Takashi Nagao

Abstract

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.

©2018 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.