



## 兵庫県域の地震観測地点を対象とした短周期成分卓越観測地点の特定

伊佐, 政晃

鍬田, 泰子

---

**(Citation)**

土木学会論文集A1（構造・地震工学）, 71(4):I\_308-I\_316

**(Issue Date)**

2015

**(Resource Type)**

journal article

**(Version)**

Version of Record

**(Rights)**

©2015 公益社団法人 土木学会

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003289>



# 兵庫県域の地震観測地点を対象とした 短周期成分卓越観測地点の特定

伊佐 政晃<sup>1</sup>・鍬田 泰子<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 神戸大学大学院 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

E-mail: 147t103t@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 神戸大学大学院 工学研究科 准教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

1995年兵庫県南部地震以降, 行政や民間などの様々な機関で地震時の早期対応を目的に強震ネットワークが増強され, さらにこれらの地震計の記録を用いたリアルタイム被害予測システムが構築されている。被害予測には計測震度の指標を用いているものが多く, 短周期成分が卓越する地震動を観測する傾向を持つ観測地点が1地点でもあれば高震度が算出され, 被害を過大評価することが危惧される。本研究では, 兵庫県内の地震観測地点を対象に, 近年発生した中小地震の観測記録を用いて, 既往の距離減衰式の推定値と観測値の差分を比較することで, 短周期に特に大きな地震動を観測する傾向のある地震観測地点を特定した。さらに, 短周期の強震観測地点の記録の特徴について明らかにした。

**Key Words :** attenuation relations, acceleration response, damage estimation

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災を契機に全国各地で高密度の地震観測網の整備が行われている。自治体では, 大規模地震発生時において, 震度計からの震度情報と建物・人口等のデータをもとに, 震度分布, 建物倒壊数, 死者・負傷者数等を瞬時に割り出す被害予測システムの運用が進められている。この被害予測システムにより被災市町が必要とする救助要員・救援物資等の把握や, 効果的な初動体制の構築が可能になる<sup>例えば<sup>1)</sup></sup>。リアルタイムの震度情報は自治体以外にも民間の事業者でも広く利用されている。

しかし, 2013年4月13日に淡路島付近で発生した地震(M6.3)後に兵庫県が算出した被害予測値が実被害よりも多く評価された。県内の実被害は, 人的被害において死者0人, 重傷者7人, 軽傷者18人, 住家被害において全壊6棟, 半壊66棟, 一部破損7,999棟と報告されているが, 予測では死者10人, 負傷者76人, 全壊429棟, 半壊1,519棟, 避難者1万6,778人と過大に算出されていた<sup>2)</sup>。被害予測は地震計の計測震度をもとに算出されたものである。淡路島では計測震度6弱が観測されたが, 地震計の周辺ではそれほど顕著な建物被害はなかった<sup>3), 4)</sup>。

このような事例は兵庫県南部地震以降の国内の地震でも指摘されており<sup>5)</sup>, 短周期が卓越した地震動は計測震度算出時のフィルター特性が十分に効かず大きな計測震度が算出される。本地震の実被害との差異の要因の一つにも, 短周期成分が卓越した地震動が挙げられる。

地震の度に, サイト特性によって短周期が卓越した地震動を観測するような地震観測地点が1地点でもあれば, 地震被害予測に過大な評価を招くことが考えられる。岩盤だけでなく一般的な沖積地盤の上にも地震計が設置されていることを考慮すると, 地震観測地点の地盤増幅特性を予め把握した上で, 被害推定に反映することが望ましい。しかし, 兵庫県が管理する地震計は観測網が構築されて以降, 観測記録を用いた観測地点の地震動の特性や地盤増幅特性などの分析はほとんど行われていないのが現状である。

本研究は, 兵庫県域の(独)防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netの地震計, さらに県が管理する地震計から得られた地震観測記録を用いて, 中小地震から短周期において大きい振幅をもつ傾向にある観測地点を選定する方法を提案し, 兵庫県域の地震観測地点に適用して短周期が卓越する特異地点を選定することを目的とする。

観測点の地震動情報を用いて高精度に被害予測するには、観測点の特性を分析せずとも、建物被害に対応するように周期1~2秒の地震動を用いた新たな震度も提案されている<sup>6,7)</sup>ために、震度算出の過程で修正することも考えられる。しかし、実務上、自治体の被害予測システムでは現行の気象庁計測震度によるフラジリティ関数を用いて被害を評価していることが多い。そのため、本研究では、新たな震度を用いるのではなく、気象庁計測震度を過大に算出しやすい観測点を探し出すことに着目した。

## 2. 地震観測地点と分析対象の概要

本研究で対象とする兵庫県内の地震観測地点は、兵庫県震度情報ネットワークシステム<sup>1)</sup>に属する、県が管理する地震計と、(独)防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの地震計を対象とする。図-1にK-NET、KiK-netおよび県が管理する地震観測地点(以下、県管理)の位置を示す。地震観測地点はK-NETが27地点、KiK-netが15地点、県管理が69地点あり、県内には合計111地点がある。分析で用いる地震観測記録は県内で複数の観測を有する近年発生したマグニチュードの比較的大きい12地震であり、表-1にまとめて示す。12地震を選定した理由は、県管理の兵庫県震度情報ネットワークシステムの運用の開始が2010年以降であり、それに合わせてシステムの更新が行われ、それ以前の観測記録は入手できなかつたためである。本研究で扱う12地震では唯一、前述した2013年4月13日淡路島地震(地震No.10)において兵庫県内で被害が報告されている。本地震では最大計測震度が5.6であるが、その他の地震の最大震度は3.1以下である。そのため、111地点の観測地点のうち、半数以上の地震計が観測した地震は4地震と少ない。

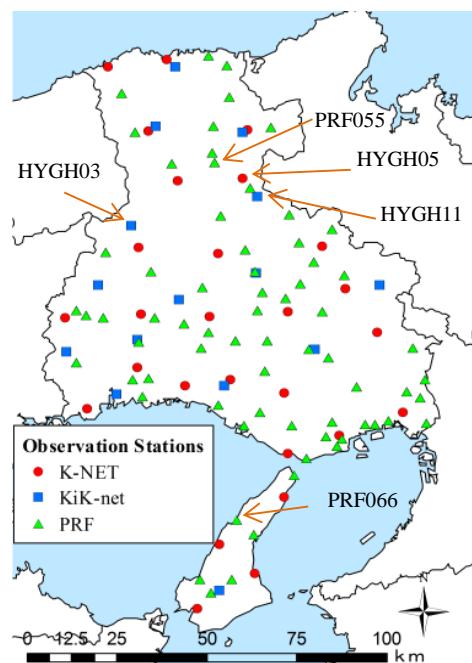


図-1 地震観測地点

## 3. 強震特異地点の選定法の提案と適用

### (1) 強震特異地点の選定法

周辺の地震観測記録の中で、短周期成分が他の地点よりも卓越し、かつ、周期1.0s, 2.0sで小さい加速度を記録する地点を強震特異地点として定義をして、その特異地点を選定する方法を以下に示す。選定にあたっては、様々な要因による地震動のばらつきを考慮しながら、既往の距離減衰式から得られる推定値と実際の観測値との差異を比較する。強震特異地点の特定手法の概要を図-2のフローとともに以下に示す。

地震動の指標には、地表で観測された地震記録からPGA、周期0.1, 0.5, 1.0, 2.0sの加速度応答(5%減衰)を用い、以降これらを加速度指標値 $a_{ki}^{obs}$ (観測地点を $k$ 、PGAまたは各周期の加速度応答の指標を $i$ とする)と呼ぶ。

#### a) 観測地点の設定

既往の距離減衰式が適用できるようにマグニチュード

表-1 過去3年間の兵庫県域で観測された12地震の概要

No	地震発生日時	震源の位置	Mj (Mw)	震源深さ (km)	最大計測震度	観測数(箇所)		
						K-NET	KiK-net	県管理
1	2010年7月21日6時19分	奈良県	5.1	58	2.0	20	6	17
2	2011年1月28日22時48分	兵庫県南東部	3.6	6	3.1	5	5	4
3	2011年2月21日15時46分	和歌山県北部	4.8	53	2.0	10	7	7
4	2011年3月11日14時46分	三陸沖	9.0	24	3.0	10	8	16
5	2011年6月4日1時57分	島根県東部	5.2	11	1.6	15	9	4
6	2011年7月5日19時18分	和歌山県北部	5.5	7	3.0	23	9	40
7	2011年10月9日16時18分	大阪府南部	3.9	12	1.8	11	4	8
8	2011年11月18日3時57分	福井県嶺北	4.8	7	2.1	16	9	12
9	2011年11月21日19時16分	広島県北部	5.4	12	2.4	24	10	25
10	2013年4月13日5時33分	淡路島付近	6.3(5.8)	15	5.6	27	11	67
11	2013年4月13日5時41分	淡路島付近	3.9	14	2.8	12	7	12
12	2013年7月17日12時07分	淡路島付近	4.0	17	2.8	19	10	39
								68

5.0以上の地震の内、3地震以上で観測記録が得られている観測地点に限定して検討する。2地震以下の観測記録しかない観測地点については、1つの地震で偶発的に大きな加速度指標値  $a_{ki}^{obs}$  を記録している場合も考えられるため、統計処理上の信頼性の確保のため分析から除外する。

### b) サイト特性の補正

地震観測で得られた地表での加速度指標値  $a_{ki}^{obs}$  に対して、表層地盤の增幅の影響を除くため基準地盤 (AVS30 = 300m/s) の相当の地盤震動に対応するように増幅度で除することによりサイト特性の補正を行う。基準地盤での加速度指標値  $a_{ki}^{obs'}$  に変換して距離減衰式と比較する。ただし、地震動レベルに応じた地盤応答の非線形性の影響は考慮していない。

### c) 距離減衰式の推定値との比較

基準地盤に補正後の加速度指標値  $a_{ki}^{obs'}$  と距離減衰式による推定加速度指標値  $a_{ki}^{pre}$  の常用対数の差分をとり、対数差分  $\varepsilon_{ki}$  とする。

$$\varepsilon_{ki} = \log(a_{ki}^{obs'}) - \log(a_{ki}^{pre}) \quad (1)$$

距離減衰式には、データベースの記録数が豊富であることから、安中式<sup>8)</sup>またはKanno et al式<sup>9)</sup>を用いる。安中

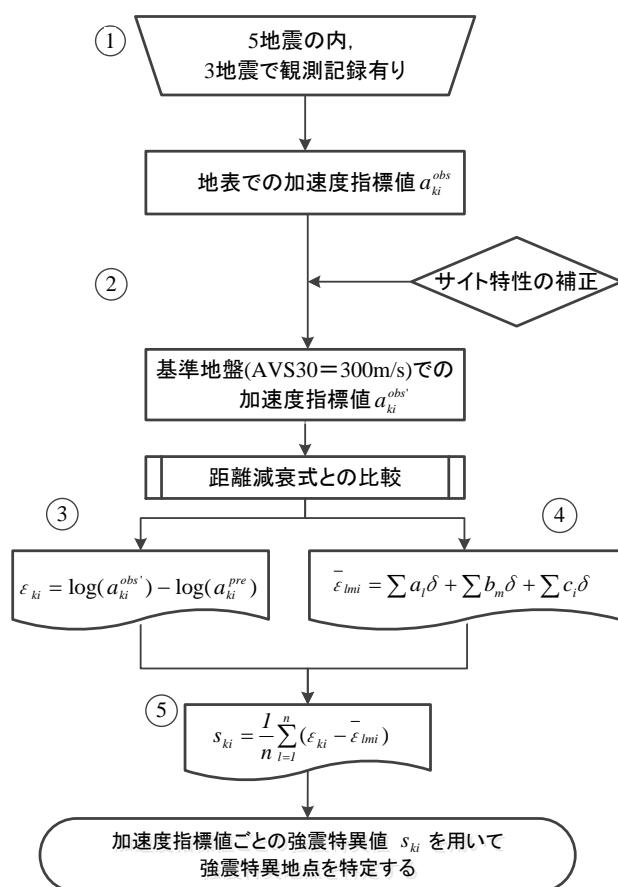


図-2 特定手法の概要

式のデータベースに適さない地震については、Kanno et al式を適用する。

### d) 地震・加速度指標間の誤差の補正

距離減衰式との比較とともに、地震特性、観測地点の地盤特性、加速度指標による対数差分  $\varepsilon_{ki}$  のばらつきを考慮するため、対数差分  $\varepsilon_{ki}$  を目的変数に、地震、地盤分類、加速度指標値を説明係数にして式(2)の回帰式に対して、回帰分析によりそれらの変数のばらつきを考慮した対数差分平均  $\bar{\varepsilon}_{lmi}$  を求める。

$$\bar{\varepsilon}_{lmi} = \sum a_l \delta + \sum b_m \delta + \sum c_i \delta \quad (2)$$

ここで、 $a_l$  : 地震 No.l を示すパラメータ、 $b_m$  : 地盤特性(AVS30)区分  $m$  のパラメータ、 $c_i$  : PGA、周期 0.1, 0.5, 1.0, 2.0s の加速度指標値  $i$  のパラメータ、 $\delta$  : Kronecker のデルタ

### e) 強震特異地点の選定

前述の手順 c) で求めた対数差分  $\varepsilon_{ki}$  から、d) の回帰により得られたばらつきの補正のための対数差分平均  $\bar{\varepsilon}_{lmi}$  を減算する。最後に、観測された地震数  $n$  で  $\varepsilon_{ki} - \bar{\varepsilon}_{lmi}$  を平均して、観測地点  $k$  における PGA または各周期の加速度応答の指標  $i$  の強震特異値  $s_{ki}$  (site differential value) を求める。

$$s_{ki} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n (\varepsilon_{ki} - \bar{\varepsilon}_{lmi}) \quad (3)$$

本研究では強震特異値  $s_{ki}$  を、特異地点の選定に用いる新たな指標として提案する。強震特異値  $s_{ki}$  が大きい観測地点は、マグニチュードや震源距離などの地震特性によらず、一般的な表層地盤の增幅特性を考慮しても、より加速度指標値が大きく観測されやすい観測地点であると解釈できる。

本研究では短周期が卓越する地震動に着目することから、強震特異値  $s_{ki}$  が周期 0.1, 0.5s において大きな値を示し、さらに周期 1.0, 2.0s において小さな値を示す観測地点は、長周期においては小さな加速度を示す一方で、構造物被害への影響が少ない短周期において大きな加速度を示す観測地点、つまり強震特異地点であると考えられる。ここで、強震特異地点を、強震特異値  $s_{ki}$  が周期 0.1, 0.5s において上位 5 位内にあり、さらに周期 1.0, 2.0s において 0 以下を示すという条件を満たす観測地点と定義する。

## (2) 兵庫県域の地震計への適用

### a) 観測地点の設定

兵庫県域の地震計の強震特異地点を選定するため、表-1 に示した 12 地震の記録を用いる。距離減衰式の適用地

震のマグニチュードの制約の違いから,  $M_j$  が 5.0 以上の地震として, No.1, 5, 6, 9, 10 の 5 地震を選択した.

次に, 上述の 5 地震の内, 3 地震以上で観測記録が得られている観測地点に限定する. これにより対象観測地点は 111 地点のうち 61 地点に絞られた. その内訳は K-NET が 25 地点, KiK-net が 10 地点, 県管理が 26 地点である.

### b) サイト特性の補正

Kanno et al<sup>9</sup>は, 地表から AVS30=300m/s 地盤までの増幅度を回帰分析により推定し, サイト特性の補正として用いている. また, PGA, PGV に限らず各周期における加速度応答スペクトルの増幅度  $G$  と AVS30 との関係式を式(4)のように示している.

$$G = \log(\text{obs}/\text{pre}) = p \log \text{AVS30} + q \quad (4)$$

ここで, 回帰係数  $p, q$  は PGA, 周期 0.1s, 0.5s, 1.0s, 2.0s に着目した加速度応答スペクトルのそれぞれに対して得られており, これを表-2 に示す.

式(4)により得られた増幅度  $G$  で, 各値を除することで, サイト特性の補正を行う. AVS30 は, S 波の走時で重みをつけた深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度とする.

$$\text{AVS30} = 30 \sqrt[n]{\sum_{j=1}^n (H_j/V_{sj})} \quad (5)$$

ここで,  $H_j$  : 各層の厚さ(m),  $V_{sj}$  : 各層の S 波速度(m/s)

KiK-net, K-NET の観測地点では PS 検層が行われている. KiK-net, K-NET の観測地点の AVS30 を算出するにあたり, 調査深度が 30m 未満の場合(K-NET の地盤データのすべて)は, 最も深い層の S 波速度が 30m まで続くと仮定して計算した.

県管理の観測地点については PS 検層, ボーリング調査が行われていないため, 関西圏地盤情報ネットワーク<sup>10</sup>を利用して, 地震観測地点の位置と同町目のごく近傍と考えられるボーリングデータを当該地点の位置でのボーリングデータとみなして抽出した. ここで, 観測地点から最大 400m までの範囲にあるボーリングデータを観測地点近傍として使用した. ボーリングデータは 30m 未満の場合が大部分であり, データが存在する層までは道路橋示方書<sup>11</sup>に基づいて, N 値から S 波速度を推定した. 最下層以深については, (独)防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS の深部地盤データ<sup>12</sup> の最上層の S 波速度が深さ 30m まで続くとした. さらに, 県管理の観測地点については, ボーリングデータが観測地点近傍にない場合, AVS30 は, J-SHIS による, 微地形区分から推定した AVS30<sup>13</sup>を用いた.

表-2 地盤増幅度 式(4)の  $p, q$  値 (文献9) から作成)

Period	$p$	$q$
PGA	-0.55	1.35
0.1s	-0.32	0.78
$S_A(T =)$		
0.5s	-0.91	2.25
1.0s	-0.93	2.32
2.0s	-0.78	1.92

PS 検層から求めた KiK-net と K-NET の AVS30 と J-SHIS の AVS30 とを比較したものを図-3(a)に示す. また, 県管理の観測地点におけるボーリングデータから求めた AVS30 と J-SHIS の AVS30 とを比較したものを図-3(b)に示す. いずれの場合も, PS 検層, ボーリングデータから求めた AVS30 と J-SHIS の AVS30 にある程度良い相関があり, J-SHIS の AVS30 の方が比較的速いことがわかる. また, 式(4)より, AVS30 が速い領域では増幅度の変化量が小さくなるため, ボーリングデータのない観測地点で J-SHIS の AVS30 を用いたとしても増幅度に与える誤差は小さいと判断できる.

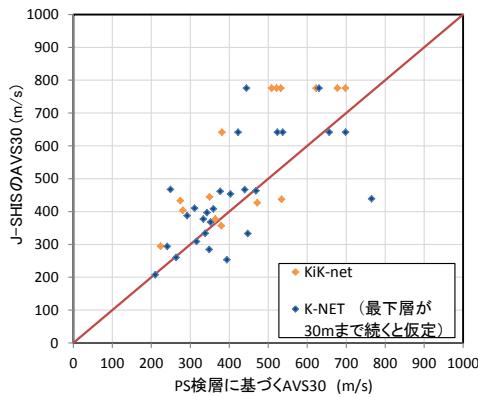
### c) 距離減衰式の推定値との比較

距離減衰式による推定では, 地震 No.1, 5, 6, 9 には安中式を適用して算出した. 安中式のデータベースでは, マグニチュードが大きく震央距離が小さい領域のデータがなく, 最大加速度が 100gal を超えるデータはわずか 1 個である. 一方, 数地点で最大加速度 100gal 以上を記録する地震 No.10 は安中式を適用できない. 地震 No.10 には, Mw5.5 以上で震源から近いデータも含む Kanno et al 式を適用した. このとき, 安中式, Kanno et al 式のいずれにおいても, 比較対象とする 5 地震が距離減衰式のデータベースにした地震記録と比較してマグニチュードが小さいため, 点震源として, 震源距離が断層最短距離に等しいとした. なお, 安中による距離減衰式においても Kanno et al によるサイト補正を適用した. いずれの距離減衰式も S 波速度 300m/s 相当の基盤を基準とする記録によるものである.

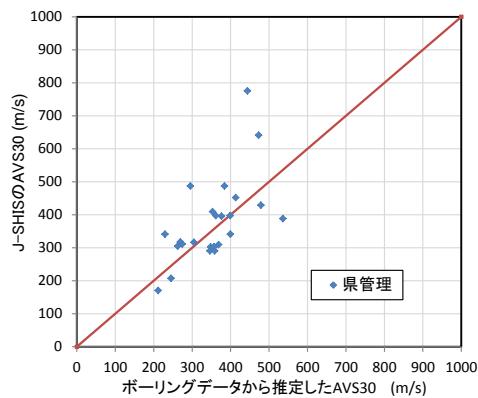
### d) 地震間・加速度指標間のばらつきの補正

次に, 地震, 表層地盤, 加速度指標値を説明変数にし, それらの変数要素のばらつきを補正する対数差分平均  $\varepsilon_{lmi}$  を求める. 具体的には, 地震の特性を示すパラメータ  $a_l$  として, 地震 No.1, 5, 6, 9, 10 の 5 つの地震事象を, 地盤の特性を示すパラメータ  $b_m$  として, 100m/s ごとに区分した AVS30 (AVS30=200~300, 300~400, 400~500, 500~600, 600~700m/s の 5 区分) を, 加速度指標値のパラメータ  $c_i$  として, PGA, 周期 0.1, 0.5, 1.0, 2.0s の加速度応答をそれぞれ説明変数として式(2)でモデル化して回帰分析を行った.

回帰分析に用いた観測数は 1,165 個である. 得られた回帰係数を表-3, 図-4 に示す. 重相関係数は 0.696 であった.



(a) PS 検層に基づく KiK-net, K-NET の AVS30



(b) ボーリングデータから推定した県管理の AVS30

図-3 J-SHIS による AVS30 と各観測地点の AVS30 との比較

図-4より、AVS30 のカテゴリの係数はいずれも負の値であるがカテゴリ間のばらつきは小さい。表層地盤の增幅分の補正を既に行っているので AVS30 間のばらつきが  $\varepsilon_{lmi}$  に与える影響はほとんどないことがわかる。一方で、地震間のばらつきが  $\varepsilon_{lmi}$  に与える影響は大きい。しかし、震源メカニズム等を検討したが、地震による係数のばらつきにおいて一定の傾向を得るのは難しかった。また、加速度応答 0.1, 0.5, 1.0, 2.0s をみると、短周期では  $\varepsilon_{lmi}$  が大きく、長周期になるにつれて  $\varepsilon_{lmi}$  を小さくする方向に作用する傾向がある。この理由としては次のことと考えられる。距離減衰式の推定の際に用いるデータベースにはマグニチュードが比較的大きい地震を多く含んでおり、これらの地震は建物被害に影響するといわれている比較的長周期の 1.0s や 2.0s において大きく卓越する。一方で、本研究で対象とした地震はマグニチュードが小さく、短周期側に卓越するため、長周期になるにつれて、距離減衰式の推定値からの誤差が小さくなる。以上の回帰式から、地震のマグニチュードなど震源特性の違いが  $\varepsilon_{lmi}$  に大きく寄与していることがわかる。

#### e) 強震特異地点の選定

回帰式から得られた  $\varepsilon_{lmi}$  で対数差分  $\varepsilon_{ki}$  を減算し、さらに観測地点ごとに地震間で平均をとった強震特異値  $s_{ki}$  (site differential value)は、地震間のばらつきの補正がなされた

表-3 本分析で得られた回帰係数

EQ.NO	$a_i$	AVS30(m/s)	$b_m$	加速度指標	$c_i$
1	0.023	200~300	-0.159	PGA	0.125
5	0.328	300~400	-0.151	0.1s	0.258
6	0.056	400~500	-0.113	$s_A(T=)$ 0.5s	0.097
9	0.422	500~600	-0.148	1.0s	-0.030
10	0.295	600~700	-0.119	2.0s	-0.148

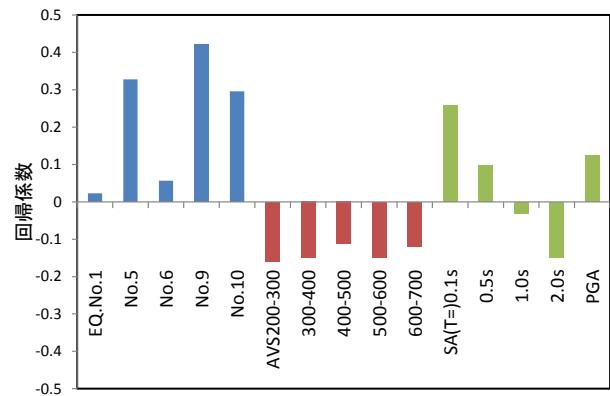


図-4 影響要因

指標であると考えられる。地震 No.1, 5, 6, 9, 10 の 5 地震の内、3 地震以上で観測記録が得られている観測地点に限定した結果、計 61 地点となった。これらの観測地点について、PGA と周期 0.1, 0.5, 1.0, 2.0s の加速度応答別に強震特異値  $s_{ki}$  とその上位 5 観測地点を図-5 に示す。ここで、簡略化のために、各指標値における強震特異値  $s_{ki}$  を  $s(\text{PGA})$ ,  $s(T=0.1\text{s})$  と示す。強震特異値が大きい観測地点は、マグニチュードや震源距離などの地震特性によらず、一般的な表層地盤の增幅特性を考慮しても、より加速度指標値が大きく観測されやすい地点であるといえる。

この結果、K-NET で 1 地点 (HYG005), KiK-net で 2 地点 (HYGH03, HYGH11) および県が管理する地震観測地点 PRF055 (番号は著者らによるものであり、位置は図-1 に示す) は、 $s(T=0.1\text{s})$  と  $s(T=0.5\text{s})$  では強震特異値  $s_{ki}$  の上位 5 位内を記録しているが、 $s(T=1.0\text{s})$  と  $s(T=2.0\text{s})$  では強震特異値  $s_{ki}$  が小さい(強震特異値 0 以下の)観測地点である。つまり、0.1~0.5s の短周期には大きく卓越するが、構造物被害に影響があるとされる 1.0~2.0s の長周期においてはむしろ小さい加速度を示す強震特異地点であることがわかる。このような観測地点では、計測震度を算出する際のハイカットフィルタによる補正が上手く効かず、構造物にあまり影響しない短周期成分の加速度が用いられ、実被害よりも過大に被害予測されることが危惧される。

淡路島内にある観測地点 PRF066 は、周期 0.5s で高い強震特異値を示しており、強震特異地点の定義からは外れるが、短周期成分が卓越していることが分かる。本研究

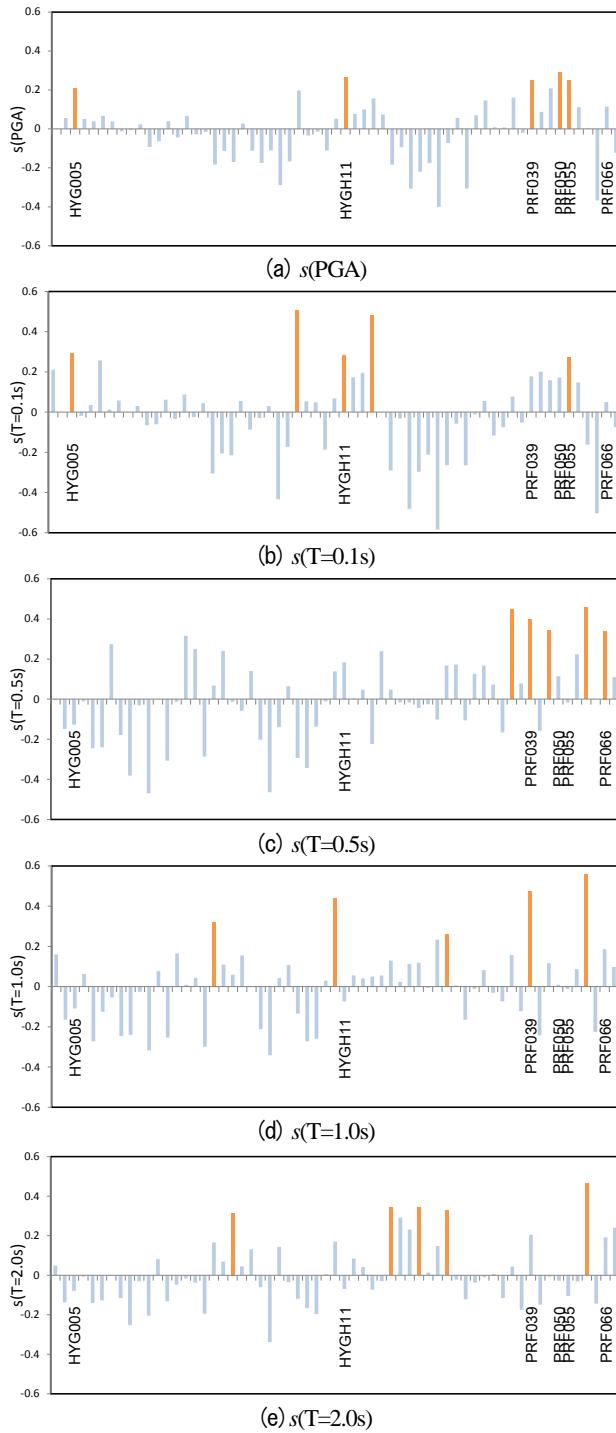


図-5 各観測地点での強震特異値

で提案した手法を用いると、この観測地点は、冒頭で述べた淡路島地震による被害の過大評価の一要因として考えられる。

#### 4. 強震特異地点の考察

3.において、短周期に卓越する傾向のある観測地点を特定するための指標として強震特異値を定義した。各観測地点での強震特異値は地震(No.1, 5, 6, 9, 10)のマグニ

チュードや震源距離を適用した距離減衰式の推定値と、各地震による観測値との対数差分( $\varepsilon_{ki} - \varepsilon_{lmi}$ )を取り、観測された地震数で平均した値である。ここで、観測された地震数で平均することで地震間のばらつきを考慮している。しかし、ある1つの地震による対数差分が異常に大きい場合、それが平均値を引き上げて強震特異値を大きくしていることも考えられる。そこで、強震特異地点と特定されたHYG005, HYGH03, HYGH11, PRF055を対象に、強震特異値を詳細に検討してみる。

図-6は強震特異地点 HYG005, HYGH03, HYGH11, PRF055において観測された地震ごとの各周期(0.1, 0.5, 1.0, 2.0s)における対数差分  $\varepsilon_{ki} - \varepsilon_{lmi}$  を示す。HYG005では、観測地震 No.5, 9, 10 で周期 0.1s の対数差分が大きく、0.5, 1.0, 2.0s の周期では比較的小さいことから、0.1s のごく短周期で大きな加速度を示す観測地点であることがいえる。しかし、地震 No.6 では周期 0.1s での対数差分が負の値であった。HYGH03についても同様なことがいえる。HYGH11では、地震 No.10 を除き、0.1, 0.5s の周期における対数差分が、1.0, 2.0s のそれよりも大きく、短周期に卓越する地点であった。PRF055に関しては、地震 No.5, 10においては 0.5s までの短周期に卓越しているが、地震 No.9 では周期 2.0s にも比較的大きい加速度を示すことが分かる。つまり、全地震で短周期に卓越するわけではなかった。このように、観測された地震数で平均を取った強震特異値からは強震特異地点として抽出されるが、これはこれらの観測地点が短周期に卓越する可能性が高いことを示すだけで、必ずしも短周期に卓越するとは限らないことがわかる。

以上のことから、本研究で新たに提案した強震特異値を用いて、概ね短周期に卓越しやすい観測地点を特定することはできるが、地震の度に必ずそのような特徴を持つとはいえない。より短周期に卓越する傾向にある観測地点を抽出する精度を向上させるためには、距離減衰式の推定値と比較する地震の数を増やす必要があると考えられる。

また、短周期の強震特異地点における地震動 H/V スペクトル比から表層地盤の增幅特性を把握する。地震動の水平動および上下動のフーリエスペクトルは、地盤の非線形性や地震の規模、震源距離などの震源特性により、形状や振幅値が異なるが、H/V スペクトル比は形状、振幅値とともに地震によらず概ね安定しており、震源の影響が少なく、地盤構造を強く反映していると考えられる<sup>14)</sup>。ここでは、地震 No.1~12 の地震記録を利用して、地盤の震動特性を地震動 H/V スペクトル比から分析する。まず、観測波形からフーリエスペクトルを計算し、平滑化のために 0.4Hz の Parzen Window を施す。次に、水平動と上下動のフーリエスペクトルの比を計算し、地震動 H/V スペクトル比を導出する。ここで水平動フーリエスペクトル

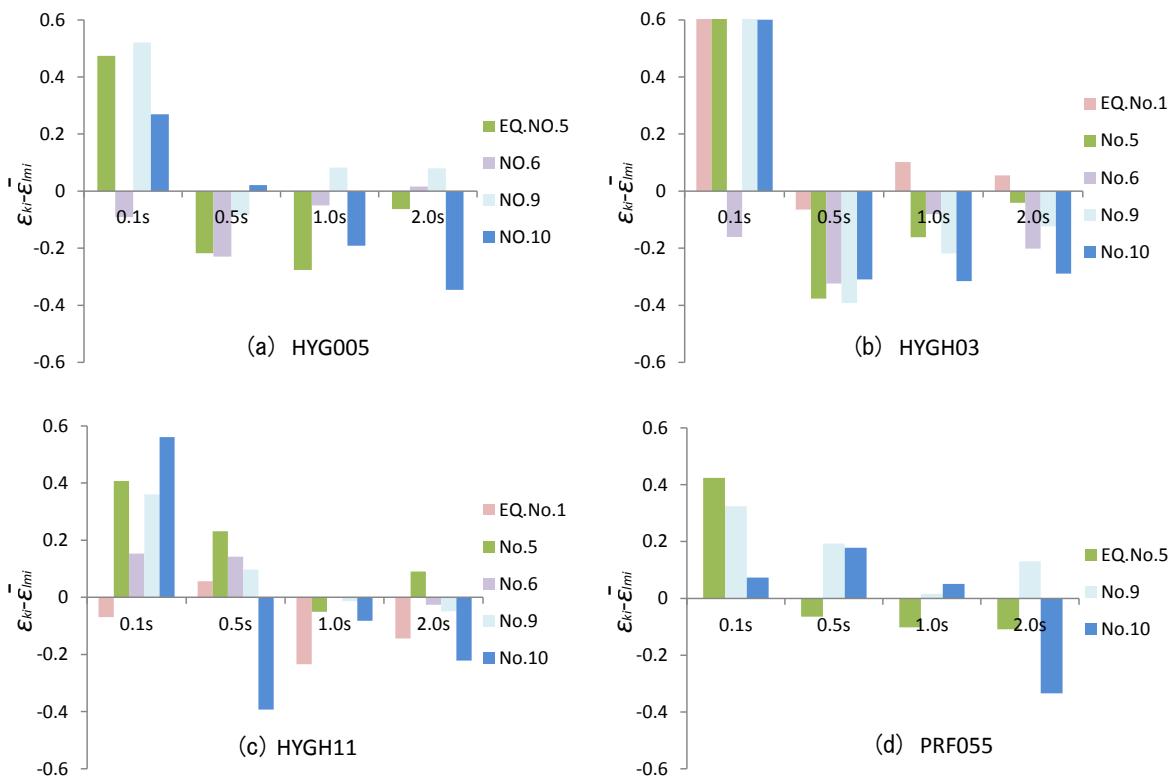
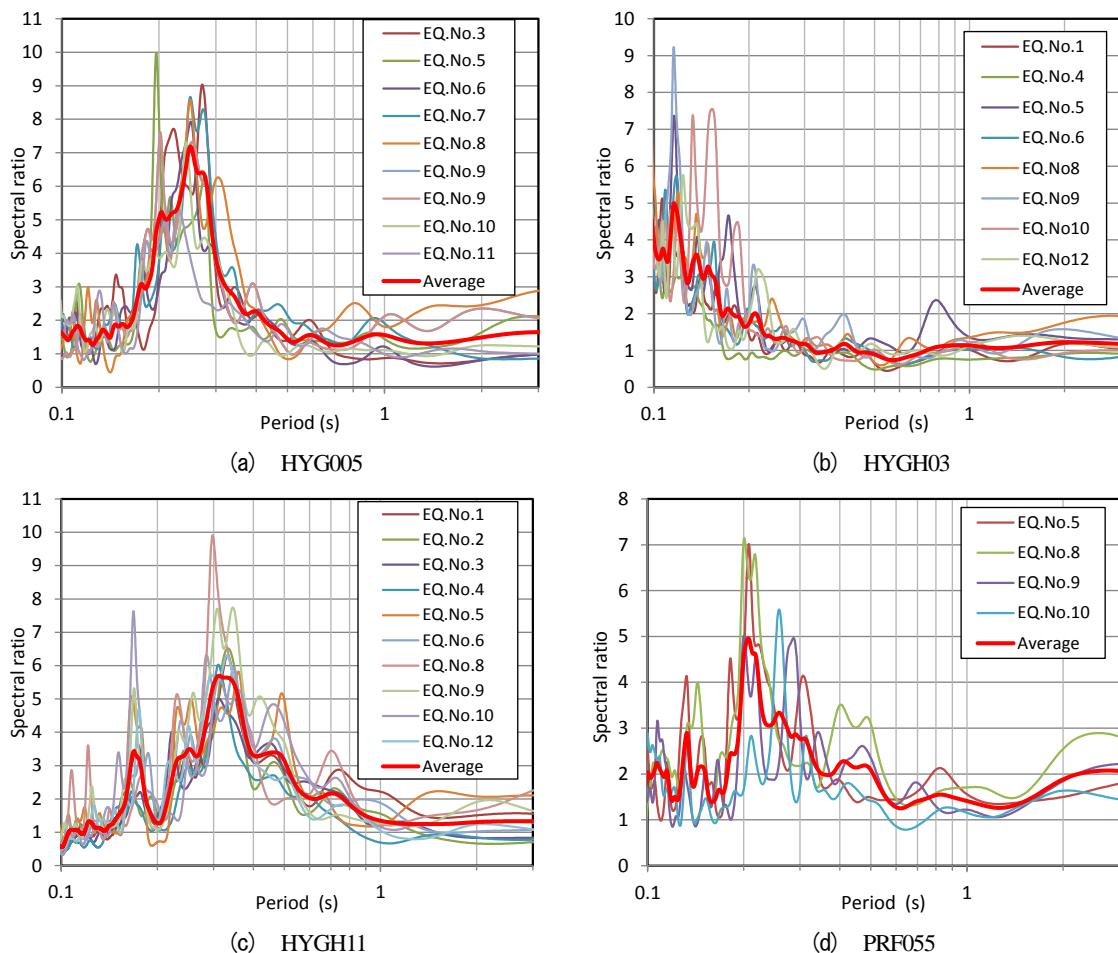
図-6 HYG005, HYGH03, HYGH11, PRF055 の観測地震ごとの各周期における対数差分  $\varepsilon_{kn} - \varepsilon_{klm}$ 

図-7 HYG005, HYGH03, HYGH11, PRF055 の観測地震ごとの地震動 H/V スペクトル比

は NS 成分と EW 成分の幾何平均とした。短周期強震特異地点である HYG005, HYGH03, HYGH11, PRF055 観測地点における地震動 H/V スペクトルとそれらの平均のスペクトル比を図-7 にそれぞれ示す。地盤が非線形挙動をするような地震動レベルではないため、同じ観測地点ではいずれの H/V スペクトル比でも類似した形状を示している。さらに、H/V スペクトル比から、これら 4 地点では 0.5s 以下に卓越していることがわかる。表層の地盤増幅特性からも短周期に地震動が増幅しやすいことがわかる。

さらに、観測地点にボーリングデータがある HYG005, HYGH03, HYGH11 では、表層の堆積層が非常に薄く、その下層地盤が岩盤になっているところが多かった。つまり、インピーダンス比が小さく増幅度が元々高くなりやすい傾向にあった。ただし、全ての観測地点がインピーダンス比の要因だけで高くなつたとは考えられず、他にはその観測地点の地形的な問題なども考えられる。本研究で強震特異地点として特定した観測地点については微動観測等のより詳細な調査が今後必要である。

しかし、PS 検層が行われていない観測地点が多くある場合には、地震動 H/V スペクトル比で短周期が卓越しているものを絞る他、本研究で提案したような強震特異値によって把握するとともに、恒常に短周期成分が卓越する場合には、被害予測時に観測記録に補正をかけて推定するなどの工夫が必要になるといえる。

## 5. おわりに

本研究では、周期 0.1s~0.5s の短周期で大きく卓越するような地震観測地点では、高震度が算出されて被害予測を過大に評価する恐れがあることから、兵庫県内の地震観測地点を対象にして、短周期に卓越する傾向のある短周期強震特異地点を示した。また、強震特異地点における地震動 H/V スペクトル比から表層地盤の増幅特性を考察した。本研究は以下のようにまとめられる。

1) 加速度指標 (PGA, 周期 0.1, 0.5, 1.0, 2.0s の加速度応答スペクトル) ごとに大きな加速度を示す傾向のある観測地点を評価するため、サイト補正と、地震間のばらつき補正をした強震特異値  $S_{ki}$  (site differential value) を評価指標として提案した。

2) 強震特異値  $S_{ki}$  を用いて HYG005, HYGH03, HYGH11, PRF055 が、0.1~0.5s の短周期には大きく卓越するが、1.0~2.0s の周期においてはむしろ小さい加速度を示す地点であることがわかった。このことから、実際の被害予測システムに属する PRF055 は、被害予測の際に過大評価を招く要因となり得ることを示した。

3) 短周期の強震特異地点の中には、既往の地震記録か

ら恒常に強震特異値が大きくならない地点があった。また、H/V スペクトル比から表層地盤の増幅は 0.5s 以下の短周期に卓越しやすいことは確認できたが、H/V スペクトル比の振幅比をインピーダンス比だけで説明するには本研究に用いた地震記録からだけでは不十分であった。

4) 提案した強震特異値は兵庫県内の地震観測地点を対象に相対的に評価したものであり、データ数の制約上、強震特異値から計測震度への影響を定量評価するに至っていない。今後は各観測地点について微動観測などの観測記録を用いてさらに表層地盤の増幅特性をより詳細に検討する必要がある。

**謝辞**：兵庫県域の地震観測地点の調査にあたり、(独)防災科学技術研究所の観測記録を利用させていただいた。また兵庫県企画県民部災害対策局に地震計の加速度記録の資料を提供していただいた。ここに記して謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 兵庫県：兵庫県地域防災計画（地震災害対策計画）平成24年修正
- 2) 消防庁災害対策本部：淡路島付近を震源とする地震(確定報), 平成25年10月29日  
[www.fdma.go.jp/bn/2013/detail/802.html](http://www.fdma.go.jp/bn/2013/detail/802.html)  
(2014年1月11日閲覧)
- 3) 鍛田泰子, 上仲亮：2013年4月13日に淡路島付近で発生した地震の現地の状況報告  
<http://www2.kobe-u.ac.jp/~kuwata/earthquake/report20130413e.pdf> (2014年1月11日閲覧)
- 4) 森伸一郎：2013年淡路島地震における州浜橋(斜張橋)の地震被害と被害メカニズム想定, 第 16 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 51-58, 2013.
- 5) 境有紀, 神野達夫, 繁瀬一起：震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 585 号, pp.71-76, 2004.
- 6) 境有紀：2007年能登半島地震、新潟県中越沖地震の強震記録と被害データを加えた建物被害と対応した地震動の周期帯の検討, 日本地震工学会大会-2007梗概集, pp.480-481, 2007.11
- 7) 齋藤栄, 鍛田泰子：建物の等価周期帯に着目した震度算定法の提案, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, pp.781-782, 2011.
- 8) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹：気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会, pp.161-164, 1997.
- 9) Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y.: A New Attenuation Relation for Strong Ground

- Motion in Japan Based on Record Data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, pp.879-897, 2006.
- 10) 関西圏地盤情報協議会：関西圏地盤情報ネットワーク  
<http://www.kg-net2005.jp/db01.html> (2014年1月15日閲覧)
- 11) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012
- 12) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 森川信之, 先名重樹, 工藤暢章, 大井昌弘, はお憲生, 早川謙, 遠山信彦, 松山尚典, 岩本鋼司, 鈴木晴彦, 劉瑛：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料 第337号, 2009.
- 13) 藤本一雄, 翠川三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.3, No.3, pp.13-27, 2003.
- 14) 中村豊, 上野真：地表面震動の上下動と水平動を利用した表層地盤特性推定の試み, 第7回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.265-270, 1986.

(2014.11.10受付, 2015.1.28修正, 2015.2.21受理)

## SEISMIC OBSERVATION STATIONS PREDOMINANT IN SHORT-PERIOD IN HYOGO PREFECTURE

Masaaki ISA and Yasuko KUWATA

Local government and other private companies have installed motion networks consisting of a large number of seismometers since the 1995 Kobe earthquake, for the purpose of obtaining information on seismic motion in real time and predicting damage immediately after the earthquake. By the way, some of the damage estimation system adapts instrumental seismic intensity calculated from the observed motion. The observation station at which the motion predominant in short-period is frequently observed causes high seismic intensity in the calculation and overestimation of damage. This study focuses on the observation stations in Hyogo Prefecture and attempts selecting the observation station which frequently records high acceleration in the short-period using earthquake records of recent small or moderate earthquakes and comparing differences between the observed value and the value estimated from attenuation relation.