

# リアルタイム地震被害推定システムによる 地震動推定精度の検討

古川 智<sup>1</sup>・三浦 房紀<sup>2</sup>・佐々木 康<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 中電技術コンサルタント(株) 解析技術部(〒734-8510 広島市南区出汐 2-3-30)

<sup>2</sup>正会員 工博 山口大学教授 大学院理工学研究科 環境共生工学専攻(〒755-8611 宇部市常盤台-16-1)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 広島大学教授 大学院工学研究科 社会環境システム専攻(〒739-0046 東広島市鏡山 1-4-1)

兵庫県南部地震以後、国や自治体は災害発生直後の初動期に被害の全容を把握するために、リアルタイム地震被害推定システムを導入してきた。しかし、これまで実際にシステムが地震時に活用された事例は少なく、システムの推定精度を検証した例は少ない。広島市は、平成 13 年芸予地震において、広島市地震情報ネットワークシステムを自治体レベルではじめて活用する機会を得た。本研究では、このシステムの稼動状況から、被害推定にとって最も重要となる地震動の推定精度を検証した。その結果、1) 表層地盤の増幅度を算定するために用いる工学的基盤における入力地震動、2) システム観測地点の配置、3) 表層地盤構造のモデル化のばらつき、が地震動推定精度に影響を与えたことを明らかにした。

**Key Words:** the 2001 Geiyo earthquake, real-time earthquake disaster information system, strong ground motions, modeling of surface ground, disaster information management

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以後、国や自治体の一部は災害発生直後の初動期に断片的に寄せられる通報だけに頼らず、被害の全容を客観的資料により把握・整理し、円滑な震後対応の判断材料を得るため、リアルタイム地震被害推定システムを導入してきた。広島市も災害に強いまちにするためには各種施設の構造を補強するとともに、地震後の救援、被害の拡大防止を円滑に行うための準備が必要であるとの考えから、リアルタイムに被害状況を把握する地震情報ネットワークシステムを整備した<sup>1,2)</sup>。

災害発生直後の初動期に被害の全容に関する情報提供を目的としたシステムは、内閣府の地震被害早期評価システム(EES)<sup>3)</sup>や横浜市高密度強震計ネットワークシステム<sup>4)</sup>に代表される自治体の地震被害推定システムが稼動している。しかし、これらのシステムは推定精度の点で問題が指摘されており、EES は鳥取県西部地震において実際より過大な被害推定値を算出したとされる<sup>5)</sup>。しかしながら地震の発生そのものが頻繁に生じる現象ではないことから、これまでにリアルタイム地震被害推定システムが地震時に活用された事例は少なく、初動期の災害対応にとって果たして有効な情報を提供できる推定精度を有しているか否かを検証した例は少ない<sup>6)</sup>。

平成 13 年 3 月 24 日 15 時 28 分に安芸灘を震源とする気象庁マグニチュード  $M_j=6.7$  の地震が発生し、広島県河

内町、大崎町、熊野町において 6 弱の大きな震度が観測された。広島市においても震度 5 強が記録され、被害状況は負傷者 28 名、家屋の部分焼 2 件、住家半壊 108 件・一部損壊 6,564 件、道路被害 294 件等であった<sup>7)</sup>。この地震において、広島市消防局は地震情報ネットワークシステムを実際に活用した。その活用例を以下に紹介する。このような規模の地震における自治体レベルでの活用は全国ではじめての事例である。

広島市消防局は、システムによって地震発生後 1 分以内に市内で最大震度 5 弱を観測したことを知り、予め決めていた災害対策本部第 4 次体制(職員全員の動員体制)を設置した。さらに 3 分以内に提供された一次被害推定結果をもとに、消防局と市内の各消防署において地震動、地盤被害(液状化)、物的被害(建物、火災)、人的被害のそれぞれの推定分布を確認し、被害状況レベルによる動員規模の把握に活用した。続いて 20 分以内に提供された二次被害推定結果から、一次推定項目の精度を上げた情報と追加情報として地盤被害(急傾斜地、造成宅地)、物的被害(上水道、橋梁)のそれぞれの推定分布を確認し、実被害情報を収集する重点地区、被害の発生を監視する優先地区を決定するための判断材料とした。

ただし、今回の地震は昼間に発生し、ライフライン障害もなく早期に通信指令室に 119 番通報等が入り、緊急性を要する被害発生地区、優先地区はこれらの通報情報等によって把握され、システムの利用は地震発生直後の

短時間に限定された。しかし、兵庫県南部地震のように夜間に発生した地震や、ライフライン障害により実被害情報が入らない情報空白期が長引く場合には、本システムが唯一の情報源となって重要な役割を果たす。

本研究では、このような地震被害推定システムの推定精度の改善を目的として、平成13年芸予地震における広島市地震情報ネットワークシステムの稼動状況から、被害推定にとって最も重要かつ基本となる地震動の推定精度に的を絞って検証し、その問題点を抽出した。

広島市のシステムは4.(3)で詳しく説明するように、市内8ヶ所の地表地震観測値を用いて一旦工学的基盤における入射地震動を推定した後、空間補間によって工学的基盤における市内全域の地震動を推定するという手法を用いている。したがって、このシステムにおいて地震動の推定精度に影響を与える要因としては、1) 観測地点の地盤増幅度を事前に評価するための想定入射波、2) 工学的基盤における地震動の空間補間処理、3) 市内全域の推定地点における地盤増幅度、の3点が考えられ、これらに対して観測値と推定値の比較検討を行った。

## 2. 平成13年芸予地震の概要

### (1) 想定地震と発生地震の比較

平成13年芸予地震のような安芸灘・伊予灘周辺で発生する地震は、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う引張力によってプレート内部で発生するスラブ内地震であり、 $M_j=6.0$ 以上の地震は歴史的に50~100年間隔で繰り返し発生している<sup>9)</sup>。

広島市では大地震に備えるため平成7年度から8年度にかけて実施した被害想定調査<sup>9)</sup>において、想定芸予地震を対象地震の一つとしていた。この想定地震と今回発生した地震の断層位置を図-1に示す。想定していた断層位置は過去の $M_j=7.0$ 以上の地震の震央位置を参考に設定したが、今回発生した位置は、想定位置より東へ約18km寄っていた。また、地震の規模は、想定していた $M_j=7.4$ に対し $M_j=6.7$ と、地震によって放出されるエネルギーに換算すると約1/7の小さな規模であったが、震源深さなどの断層諸元は想定とほぼ一致していた。

### (2) スラブ内地震の特徴

これまでに発生したスラブ内地震の代表例は、1983年釧路沖地震( $M_j=7.8$ )、1994年北海道東方沖地震( $M_j=8.2$ )である。これらのスラブ内地震は、同規模のプレート境界地震等に比べ震源の応力降下量が高い傾向にあり、地震動の加速度振幅が大きいことを芝ら<sup>10)</sup>が報告している。また、池田ら<sup>11)</sup>は今回の地震の本震と余震の震源スペクトルの短周期レベルと応力降下量を評価し、今回の地震の震源特性には短周期成分が卓越していたことを示して

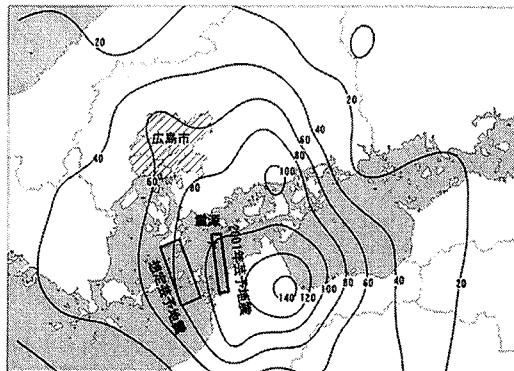


図-1 地震断層位置と地中最大加速度分布(EW成分)

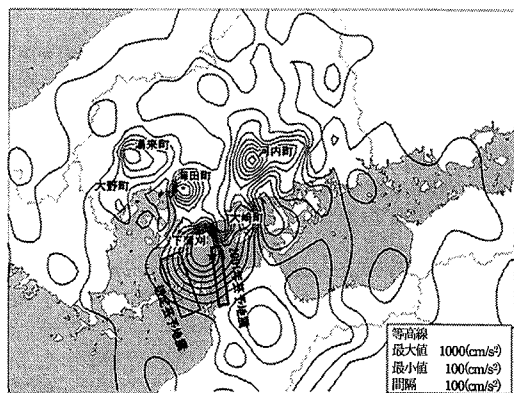


図-2 地表最大加速度分布(EW成分)

いる。

### (3) 加速度の広域分布の特徴

広島県内には広島県の設置した83点<sup>12)</sup>、広島市の設置した8点<sup>13)</sup>、さらに、防災科学技術研究所のK-net、Kik-net<sup>14)</sup>などの地震観測地点がある。

防災科学技術研究所による強震観測網のうちKik-netによる岩盤内の地中最大加速度EW成分を用いてコンター図を描いたものを図-1に示す。これは震源断層の南東側に中心を持つほぼ同心円状の分布を示す。一方、K-net、Kik-netと広島県設置の地震計が観測した地表最大加速度EW成分から求めた分布を図-2に示す。地表最大加速度の分布は各観測地点のサイト特性の影響を強く受け、図-1に示した地中最大加速度分布のように単純な同心円状の分布とはなっていない。加速度コンターの中心は下蒲刈町、大崎町、海田町、湯来町および河内町の5箇所であり、これらの地点では $800\sim 1000\text{ cm/s}^2$ の大きな加速度となっている。

以上の地表加速度の複雑な分布は、震源特性に短周期成分が卓越していたことと観測地点のサイト特性の影響が強く現れたことが原因と考えられる。この原因について、広島市内を対象に、地震情報ネットワークシステムによる地震動推定結果をもとに以下に検討する。

### 3. 広島市内の地震観測記録の概要

#### (1) 広島市地震情報ネットワークシステムの概要

このシステム（以下、本システムと呼ぶ）は地震発生直後に広島市消防局の初動体制の確立支援を主な目的として設置されたものである。すなわち、災害対策本部設置の必要性、動員規模などを迅速に判断するための被害状況（一次推定）を地震発生3分後に提供し、さらに被害情報を収集する重点地区、被害の発生を調査する優先地区の決定、他自治体や自衛隊への応援要請などの判断を速やかに行うための情報（二次推定）を地震発生20分後までに提供する。本システムは地震観測施設、地盤データベース、施設データベース、被害推定システムならびに結果の表示配信システムから構成されている<sup>15)</sup>。観測された加速度はその場で計測震度、速度応答スペクトル、SI値へ変換され、加速度記録の時刻歴、間隙水圧の時刻歴とともに主コンピュータに伝送される。

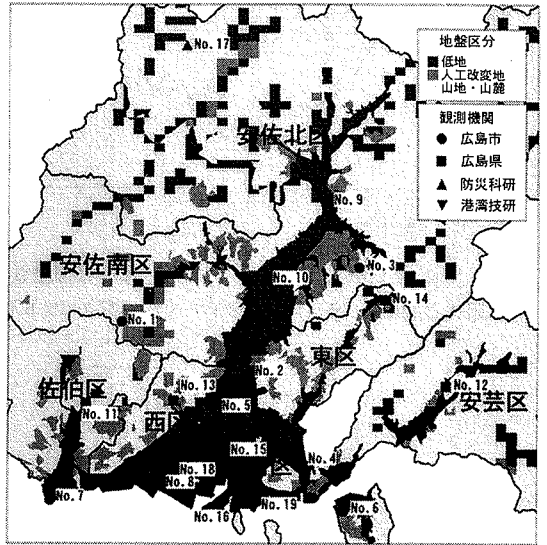


図-3 広島市内の主な地震観測地点

#### (2) 地震動の観測

広島市内の観測地点のうち、図-3に示すように、本システムの8観測地点(No. 1~8)、広島県が市内各区に一つずつ設置している計8地点(No. 9~16)<sup>12)</sup>、さらに防災科学技術研究所の2地点(No. 17, 18)<sup>14)</sup>と港湾空港技術研究所1地点(No. 19)<sup>16)</sup>の計19地点の記録を本研究では検討に用いた。

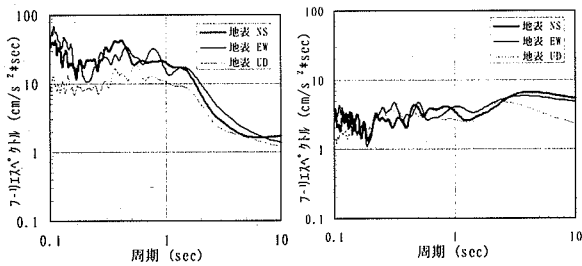
図-3には低地、人工改変地、山地・山麓の3種類の地形分布をあわせて示す。本システムの8観測地点のうち、人工改変地に位置するNo. 1, No. 2, No. 3は工学的基盤までの深さは5m以下と浅く、低地部に設置されたNo. 4~No. 8は17~45m程度と深い。また、No. 8はデルタ沖積層の地震動増幅特性を把握する目的で地中3深度の観測を含む鉛直アレーとしている。この地点およびNo. 6, No. 7の3観測地点には加速度のほかに沖積砂層の液状化の把握を目的に間隙水圧計が埋設してある。なお、県や国の設置した地震計は、No. 13, No. 17を除くと低地部にある。

表-1に各観測地点で得られた波形記録から求めた地震動指標をまとめて示す。なお、最大加速度とSI値は、水平2成分合成値である。本システムの地表8観測地点のうち震度とSI値が最小値を示すNo. 1は、4.(2)に後述する基盤B層に地震計を設置しており、他の観測地点に比べサイト特性の影響が少ない。そこで、この観測地点における記録から求めた加速度フーリエ振幅スペクトルを、鳥取県西部地震の記録から求めたものと比較して図-4に示す。鳥取県西部地震に比べ今回の地震によるスペクトルには短周期成分が多く含まれていることが分かる。

表-1 広島市内の観測記録

観測点		最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	計測震度	震度階	SI値	
No.	設置機関 設置位置					
1	広島市	228	4.4	4	9	
2		548	5	5強	16	
3		288	4.7	5弱	10	
4		258	4.8	5弱	12	
5		253	5.3	5強	37	
6		154	4.8	5弱	18	
7		261	5.3	5強	32	
8		地表	243	5.2	5強	28
	GL-8m	156	—	—	—	
	GL-21m	207	—	—	—	
	GL-36m	124	—	—	—	
9	広島県	407	5	5強	21	
10		438	5.3	5強	25	
11		420	5.1	5強	24	
12) <sup>1)</sup>		—	4.8	5弱	—	
13		584	5.2	5強	31	
14		240	4.1	4	8	
15		173	4.8	5弱	21	
16		164	4.7	5弱	19	
17	防災科研 Kik-net	地表	143	3.8	4	5
		GL-150m	69	—	—	—
18	防災科研 K-net	地表	308	5.1	5強	24
19	港湾空港 技研	地表	253	5	5強	25

\*1) 加速度波形記録なし



(a) 芸予地震 (b) 鳥取県西部地震

図-4 観測記録 (No.1) の加速度フーリエ振幅スペクトル

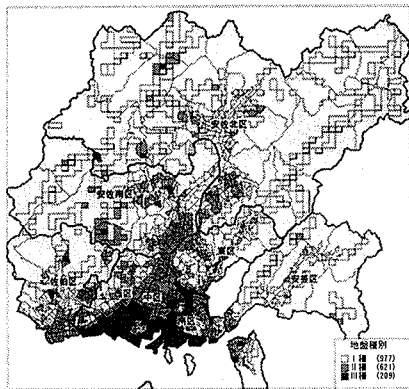


図-5 推定地点と地盤種別区分

#### 4. 地震動推定手法

##### (1) 推定地区の設定

本システムは、太田川デルタをはじめとする低地部では町丁目を基本単位とし、丘陵部では町丁目が大きすぎるので市街化の進んだ領域を 500m メッシュの基本単位として小領域に区分して、その中央座標を地盤モデル所在地点としている。この結果、地盤構造を表現する推定地区は、図-5 に示す 1,807 地区となった。

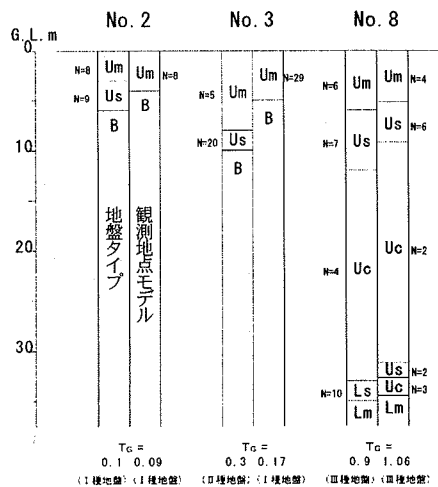
##### (2) 地盤モデルの設定

推定地区の地盤モデルを設定するため、既存ボーリングデータ、地盤標高を記載した下水道マンホールのデータ等を収集し、データベース化した<sup>17)</sup>。収集したボーリングデータの総数は、低地部を中心に約 6,500 本である。

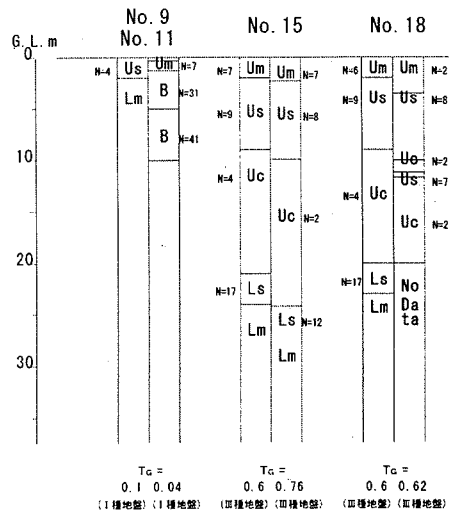
低地部の代表層序は、表土 Um 層、沖積砂 Us 層、沖積粘土 Uc 層、下部沖積砂礫 Lm 層、基盤 B 層 (風化花崗岩) からなり、工学的基盤として設定できる地層は Lm 層と B 層である。

地盤モデルは、地形、工学的基盤面の深度、層序構成の違いを加味して合計 126 の地盤タイプに区分した。なお、本システムの 8 観測地点は別途各地点のボーリングデータをもとにモデルを作成した。

地盤タイプそれぞれの土層ごとにボーリングデータを



(a) 本システムの観測地点



(b) その他の機関の観測地点

図-6 観測地点の地盤モデルの例

もとに単位体積重量、せん断波速度、N値などの物性値を設定した。こうして設定した地盤モデルの例を図-6 に示す。同図には推定地区ごとに左側に地盤タイプを、右側にボーリングデータによる観測地点モデルを示す。また、図-5、図-6 にはそれぞれの推定地区における地盤タイプのせん断波速度構造から求めた道路橋示方書・同解説<sup>18)</sup>によるⅠ～Ⅲ種の地盤種別区分を示した。図-3と図-5の地形区分を比較すると、基本固有周期  $T_c \geq 0.6$  秒のⅢ種地盤は西区、中区、南区の低地臨海部に分布し、その他の主な低地部、人工改変地はⅡ種地盤に相当する。また、山地、山麓および内陸の低地部はⅠ種地盤である。

図-6の本システム観測地点であるNo.3のように、推定地区の平均的な地盤タイプと観測地点モデルで地盤種別が異なるケースがあり、このような地盤モデルのばらつきの評価については今後の課題である。

### (3) 地震動の推定手法

本システムでは、前述の8観測地点の地表面地震動記録をもとに市内全域の地震動を推定し、これを用いて被害状況を推定する。その際、地震動を表現する指標として、最大加速度(Amax)、SI値(SI)、速度応答スペクトル(Sv)の3種類を用いている。

観測された地震動から、広島市内の地震動を推定する方法を図-7に示す。図-3に示すNo.1~No.8の本システム観測地点における地表地震動から、観測地点地盤モデルを用いて、一次推定では事前に求めておいた応答倍率(DB1)によって、工学的基盤における入射波成分2EのAmax, SI, Svを求める。次に、この8カ所のAmax, SI, Svから後述する空間補間によって各推定地区基盤のAmax, SI, Svを求め、これに当該地区の地盤モデルに対して事前に求めておいた応答倍率(DB2)を乗じて地表地震動のAmax, SI, Svとする。一方、二次推定では後述する応答計算によって、工学的基盤におけるAmax, SI, Svを求め、その後の処理は一次推定と同じとする。なお、この場合には工学的基盤での地震動の推定に用いた応答倍率と、地上の地震動分布の推定に用いる応答倍率(DB2)が違うため、8観測地点の観測値は厳密には再現されない。本システムでは推定値は観測地点を含めた推定地区の代表地盤モデルに対する推定値と考えて与えている点に留意する必要がある。

応答倍率は、図-8に示すように、8観測地点用(DB1)と126タイプの推定地区用(DB2)の地盤モデルに対して予め応答計算によって求めた。この計算に用いた入力地震動は、芸予地震の想定断層から杉戸ら<sup>19)</sup>の統計的グリーン関数法(EMPR)を用いて求めた入射波の最大加速度レベルを振幅調整したものを用いた。

応答計算法は、SHAKEを改良した杉戸ら<sup>20)</sup>による等価ひずみの周波数依存性を考慮した方法(FDEL)を用いた。SHAKEによる計算では軟弱地盤において大規模地震時に地盤の非線形性の影響が過度に入る傾向にあるが、採用した方法はこの点を改善したものである。すなわち、液状化判定、斜面崩壊の被害推定に用いる最大加速度値を過小評価し、危険側の結果を与えないよう考慮した。

応答倍率は、8観測地点では50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400cm/s<sup>2</sup>の9レベル、126タイプの推定地区用の地盤モデルに対しては、50, 100, 200, 300, 400cm/s<sup>2</sup>の5レベルについて求めた。そして、各レベル間は線形補間によった。こうして求めた8観測地点の応答倍率を図-9に示す。なお、速度応答スペクトルの倍率カーブも同様に応答周期毎に求めて用いている。

工学的基盤における空間補間の方法は、塩野ら<sup>21)</sup>のコンターマップ作成法を用いた。この方法は対象地域を格子に分割した後、観測値を含むなめらかな曲面を設定し、この曲面から格子点の値を補間するものである。本シス

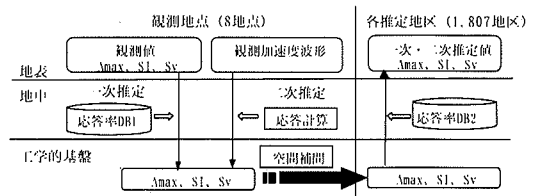


図-7 観測値から地震動分布を推定する方法

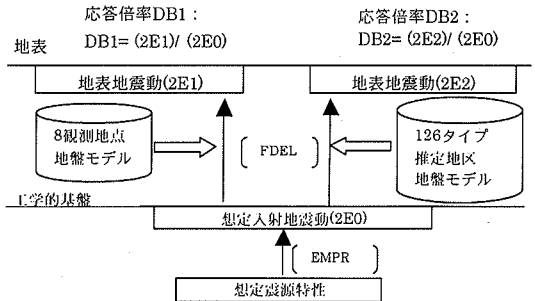
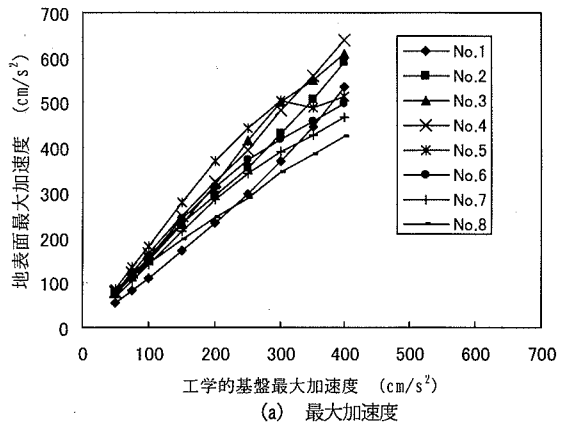
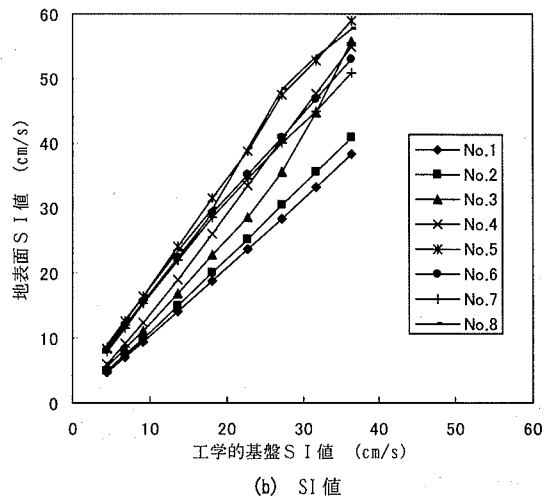


図-8 応答倍率の算定方法



(a) 最大加速度



(b) SI値

図-9 観測地点の応答倍率曲線

テムでは、8 観測地点の工学的基盤における地震動指標の変化を確実に捉え、過度な平滑化を防ぐために 350m 四方の格子を用いた。

## 5. 地震動の推定精度の検証

### (1) 応答計算法の妥当性の検証

先に示したように本システムの地震動推定において、前もって求めておく表層地盤の応答倍率の算定や二次推定時に行う地震発生後の応答計算に用いる方法は重要である。そこで、今回の地震において観測された No. 8 の鉛直アレー記録を用いて、本システムの応答計算法の妥当性を検証した<sup>22), 23)</sup>。すなわち、工学的基盤と考えた GL-36m 位置の観測波形水平 2 成分を入力地震動 (E+F) とした場合の応答計算を実施し、観測値と比較した。ここに、計算に用いた地盤モデルは、図-6 の No. 8 の観測地点モデルである。本システムでは図-10 に示す Hardin-Drnevich モデル<sup>24)</sup>の  $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$  関係を使用しているが、この地点では不攪乱試料を採取し室内動的変形試験を行っている。その結果も同図に併せて示す。この試験結果を用いた応答計算を別途実施しているが、その結果と H-D モデルを用いた結果とは大差ないことを確認している。

図-11 は最大加速度の深さ方向の分布を観測値と計算値について示したもので、比較的良く一致していることがわかる。さらに、システムで重要な情報となる表層地盤の応答倍率を GL-36m と地表とのフーリエ振幅スペクトル比として観測値と計算値について比較した結果を図-12 に示す。フーリエスペクトルはバンド幅 0.4Hz の Parzen ウィンドウで平滑化した。図には NS, EW の 2 成分について示している。計算値は 2 次以上のピーク周期が観測値に比べ短周期側にあるが、1 次のピークはよく一致しており、主な周期帯域で応答倍率はよく再現しているといえよう。

ところで、今回の地震によって地盤の非線形性がどの程度現われ、その影響が応答計算によってどの程度再現されているかを確認するため、これまでに当地点で観測された弱震時の記録からフーリエ振幅スペクトル比を求めた。観測された小地震と各地震における地表面最大加速度の観測値を表-2 に示す。これらの記録から鳥取県西部地震と芸予地震を除く 6 つの地震の記録から求めたスペクトル比と一次元重複反射理論によって求めた計算値を図-13 に示す。1 次～5 次までのピーク周期と応答倍率は地震によらずほぼ一定値を示す。当地点の PS 検層および密度検層結果からモデル化した地盤モデルによって求めた計算スペクトル比と観測スペクトル比の 1 次と 2 次のピーク周期の対応はよい。しかし、高次モードは計算

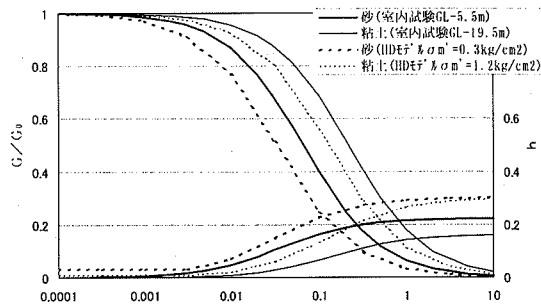


図-10  $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$  関係

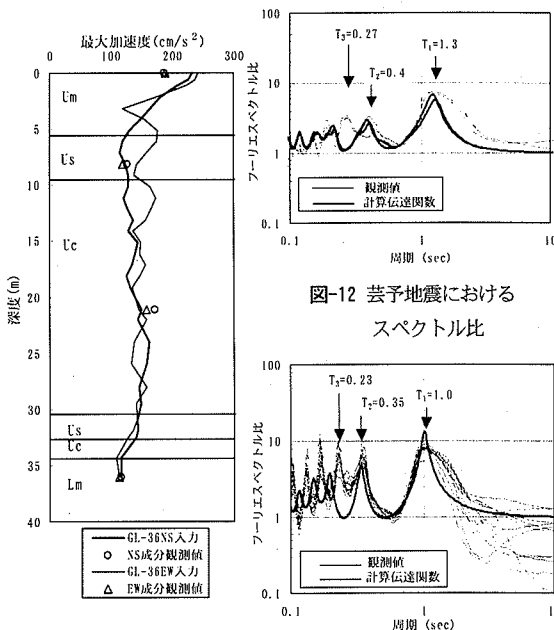


図-11 最大加速度の深さ方向の分布

図-13 弱震時のスペクトル比

表-2 分析に用いた地震の諸元

No	地震名・震央地名	発生日月日	$M_j$	震源深さ (km)	観測最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )
1	鳥取県西部地震	2000.10.06	7.3	11	40
2	伊予灘	2000.12.01	4.1	53	4
3	芸予地震	2001.03.24	6.7	51	189
4	周防灘	2001.04.03	4.4	67	12
5	日向灘	2001.04.25	5.6	42	5
6	安芸灘	2001.05.27	4	55	5
7	安芸灘	2001.08.24	4.3	48	9
8	伊予灘	2002.03.25	5	50	15

値が観測値から少し短周期側へずれる。図-12 と図-13 を比較すると弱震時の観測スペクトル比に比べ強震時にはピーク周期が長周期側へ移行するとともに高次モード

の応答倍率が低下しており、表層地盤の非線形性の影響が確認できる。また、計算値にも同様な傾向が再現されており、本システムで採用している応答計算法の妥当性が確認できたと考える。

## (2) 最大加速度の推定

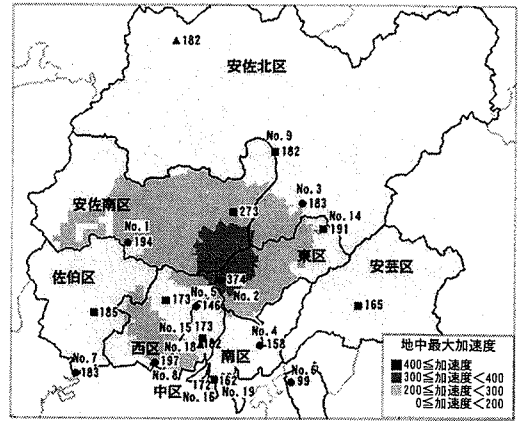
### a) 工学的基盤における推定値

前述のとおり地震発生後本システムでは8観測地点の地表記録から、一次推定は応答倍率で除することによって、二次推定は応答計算によって工学的基盤の $A_{max}$ ,  $S_I$ ,  $S_v$ を推定している。そしてこの8観測地点の $A_{max}$ ,  $S_I$ ,  $S_v$ をもとに、工学的基盤における空間補間によって推定地区の $A_{max}$ ,  $S_I$ ,  $S_v$ を求める。したがって、一次推定と二次推定の差は、8観測地点の一次、二次の応答倍率の差によって発生する。そこで、まず図-14に示す一次と二次の推定値分布を比較し、その後図-15に示す本システムの8地点と他機関による10地点の地震計が設置されている推定地区の推定値について検討する。なお、図-14に示す工学的基盤の加速度分布は、図-1に示したKik-netによる岩盤内の加速度分布と値も分布形状も異なる。これは、本システムで前提としている工学的基盤層のせん断波速度が $V_s=450\sim 600\text{m/s}$ であるのに対し、Kik-netでは $V_s=1000\sim 3000\text{m/s}$ の硬質層であり、図-14の加速度分布には硬質層から工学的基盤層までのサイト特性が含まれているためである。

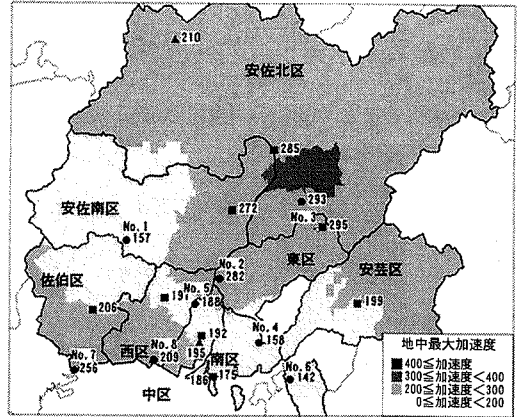
図-14(a)の一次推定加速度分布は、市内中央部で $300\sim 400\text{cm/s}^2$ と大きく、ここを中心としてほぼ同心円状に分布している。これは、No.2の推定値が $374\text{cm/s}^2$ と、他の観測地点の $100\sim 200\text{cm/s}^2$ に比べ大きいためである。一方、図-14(b)に示す二次推定では、市内北東部に $300\sim 400\text{cm/s}^2$ の領域が出現し、 $200\sim 300\text{cm/s}^2$ の領域が市内北部に広く分布している。この原因は、No.2とNo.3の推定値が他の観測地点に比べ大きいためである。このような一次推定と二次推定の差は、8観測地点の推定差によって生じる。なお、図-14(b)の $300\sim 400\text{cm/s}^2$ の島状の領域は、外挿補間となる領域で現われている。空間補間の方法は、観測値を含む最も滑らかな曲面を与えることが重要と考え、ここでは隣り合う格子点での値の変化が最小となる条件付きの最適化問題として求めたものである。この場合、外挿補間であるため内挿により求めた領域に比べ精度が低下することは否めない。

次に、地震計の設置されている推定地区ごとの一次と二次の推定値を地盤種別ごとに図-15に示す。まず、推定差の大きい地区をみると、8地点(No.1~No.8)のうちI種とII種地盤上のNo.2, No.3で差が大きい。また、他機関設置地点では、No.3に近いI種地盤上のNo.9とII種地盤上No.14の推定差が大きい。

一方、本システムの8地点のうち、No.4, No.5, No.6,

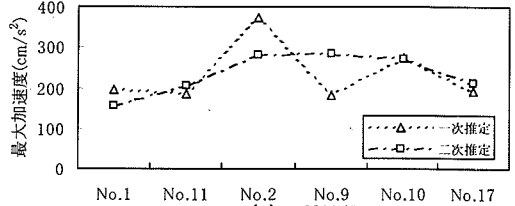


(a) 一次推定値分布

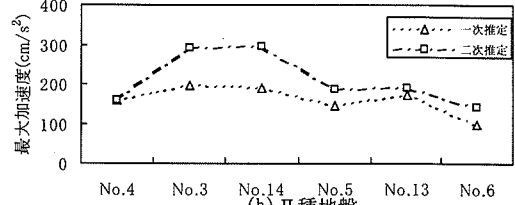


(b) 二次推定値分布

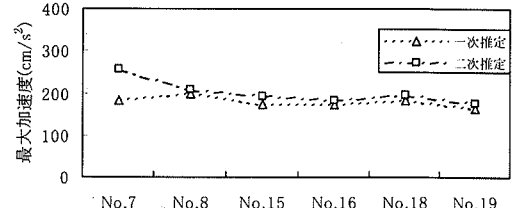
図-14 工学的基盤における最大加速度分布



(a) I種地盤

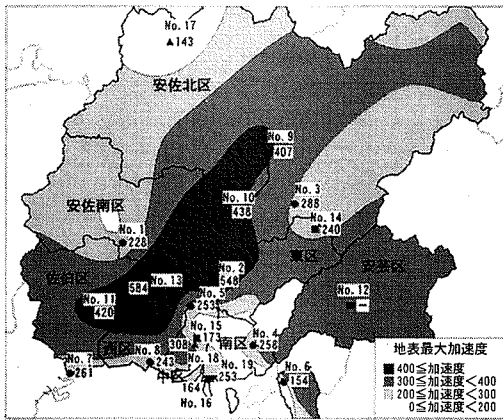


(b) II種地盤

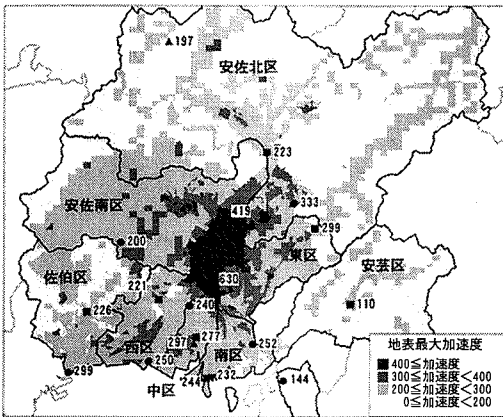


(c) III種地盤

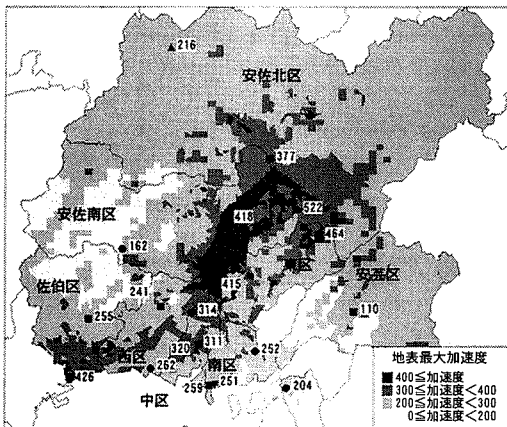
図-15 推定地区の工学的基盤における最大加速度推定値



(a) 地表観測値から直接推定した分布



(b) 一次推定値分布



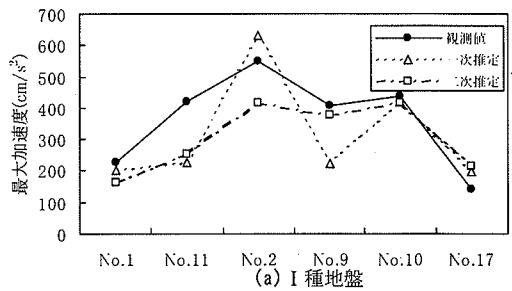
(c) 二次推定値分布

図-16 地表の推定最大加速度分布

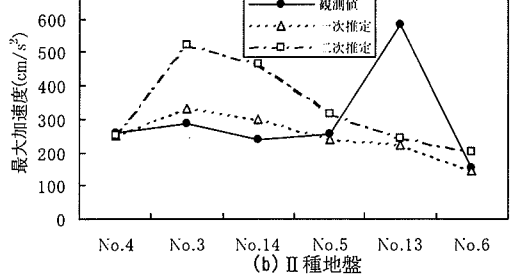
No. 8の応答倍率の差は小さく、これらの観測地点に囲まれたⅢ種地盤上のNo. 15, No. 16, No. 18, No. 19における推定差も小さく求まっている。

b) 地表における推定値

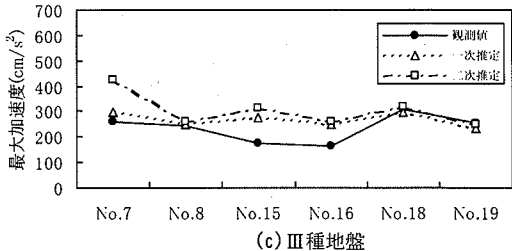
地表における推定値分布は、18観測値を用いて地表で直接空間補間して求めた図-16(a)に対して、(b)の一次推



(a) I種地盤



(b) II種地盤



(c) III種地盤

図-17 推定地区の地表最大加速度推定値

定値分布、(c)の二次推定値分布を比較検討する。

図-16(a)には市内中央部から南西部付近で $400\text{cm/s}^2$ 以上の加速度の大きい領域が存在する。これは、主にI種地盤上のNo. 2, No. 9, No. 10, No. 11の観測値に依存している。一方、図-16(b)の一次推定値分布は図-14(a)に示した工学的基盤における空間補間の影響が地表における推定値にも現われ、No. 2からNo. 10付近の市内中央部で $400\text{cm/s}^2$ 以上の加速度の大きい領域が存在し、それより西側と南側に $200\sim 300\text{cm/s}^2$ の領域が広がっている。さらに、図-16(c)の二次推定分布は、No. 2からNo. 9まで $400\text{cm/s}^2$ 以上の領域が分布し、他の領域も一次推定値より大きな推定値となっている。

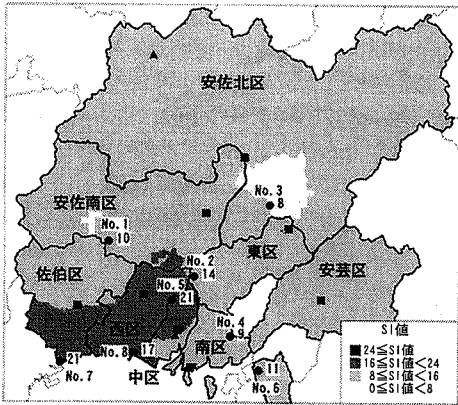
次に、地震計の設置されている推定地区ごとの一次と二次の推定値を地盤種別ごとに図-17に示した。推定誤差の大きい地区をみると、I種とII種地盤上において差が大きく、III種地盤上では比較的差が小さい。一次、二次ともに観測値との差が大きいのは、No. 11, No. 13, No. 15である。

(3) S1値の推定

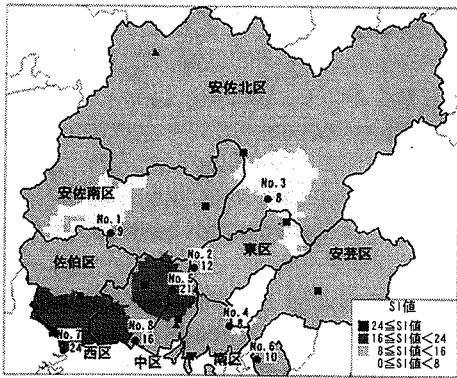
a) 工学的基盤における推定値

図-18に一次と二次の推定結果分布を示す。図-18(a)



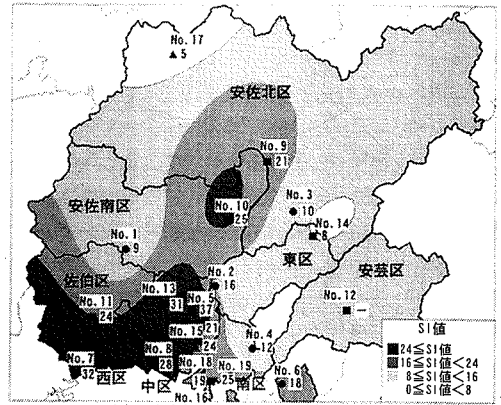


(a) 一次推定値分布

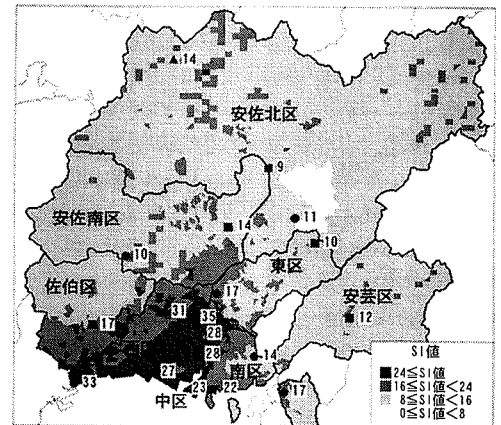


(b) 二次推定値分布

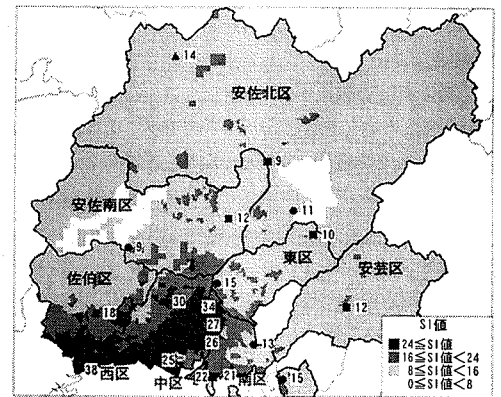
図-18 工学的基盤における推定S1値分布



(a) 地表観測値から直接推定した分布

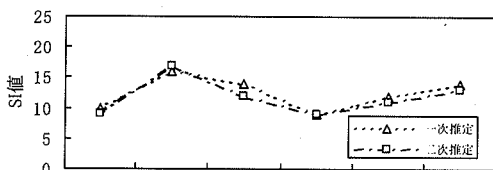


(b) 一次推定値分布

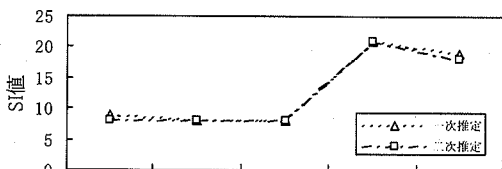


(c) 二次推定値分布

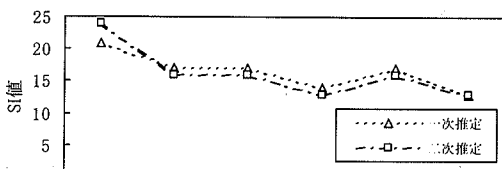
図-20 地表における推定S1値分布



(a) I種地盤



(b) II種地盤



(c) III種地盤

図-19 推定地区の工学的基盤における推定S1値

の一次推定値分布は、中区と西区のほぼ全域、佐伯区の南部を中心とする地区でS1値が16~24cm/sと大きく推定され、その他の地区は8~16cm/sである。この傾向は、市内中央部で大きく市内南部の沿岸部で小さい傾向を示す最大加速度の推定値分布形状とは異なる。また、図-18(b)の二次推定値分布は16~24cm/sの地区が西区中央部を中心に少し狭くなるが一次推定との差は小さい。次に、地震計の設置されている推定地区ごとの一次と

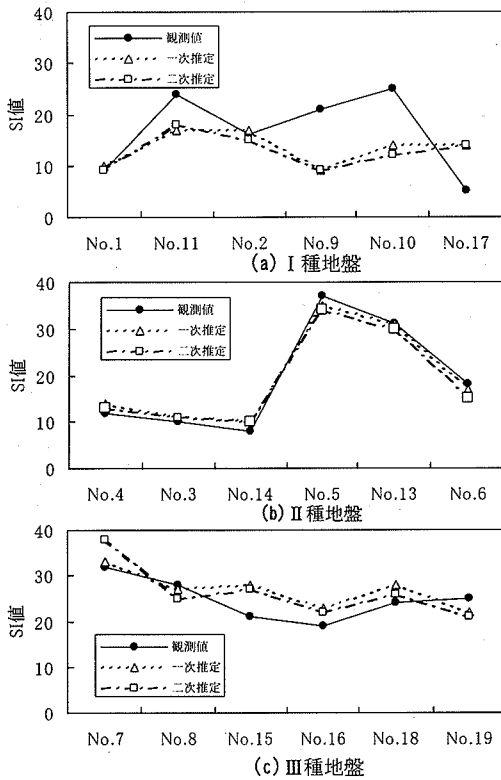


図-21 推定地区の地表推定 SI 値

二次の推定値を地盤種別ごとに図-19 に示した。先に示した工学的基盤の最大加速度に比べ SI 値の一次と二次の推定差は小さい。

b) 地表における推定値

観測値をもとに地表で直接空間補間した図-20(a)と(b)の一次推定値分布, (c)の二次推定値分布を比較した。

図-20(a)では、先に示した工学的基盤の SI 値が 16~24cm/s の領域において地表 SI 値は 24cm/s 以上と大きく推定され、16~24cm/s の領域は No. 9, No. 10 の影響で安佐北区と安佐南区にも分布している。図-20(b), (c)の推定値分布においても 24cm/s 以上の領域が市南西部の沿岸部に現われ、図-20(a)と調和的である。しかし、16~24cm/s の領域は No. 9, No. 10 の観測地点まで分布しておらず、違いがみられる。

次に、地震計の設置されている推定地区ごとの一次と二次の推定値を地盤種別ごとに比較して図-21 に示す。推定誤差の大きい地区は、I 種地盤上の No. 9, No. 10, No. 11, No. 17 と III 種地盤上の No. 15 である。

(4) 推定値の誤差原因の検討

a) 工学的基盤における推定値

地震計の設置されている推定地区のうち、先に示した結果から地表の最大加速度と SI 値の推定誤差が大きい

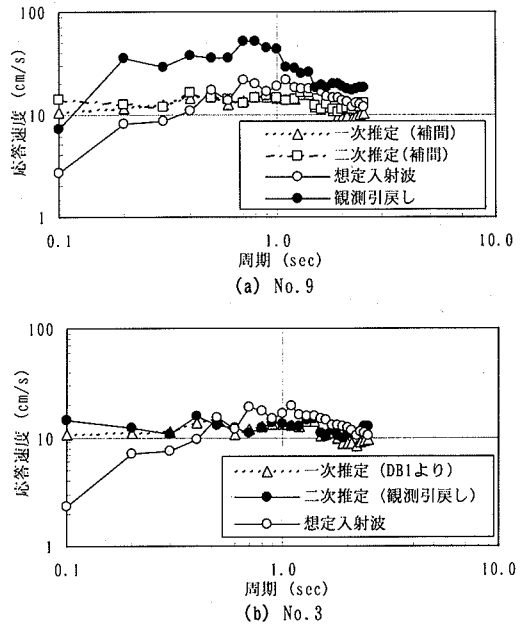


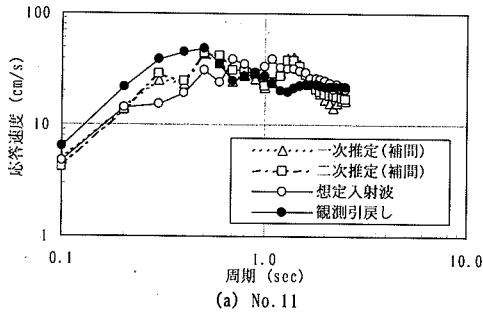
図-22 No. 9, No. 3 の工学的基盤における速度応答スペクトル

I 種地盤上の No. 9 と No. 11, II 種地盤上の No. 13, III 種地盤上の No. 15 に着目し、工学的基盤上の速度応答スペクトルをもとに誤差の原因を調べる。

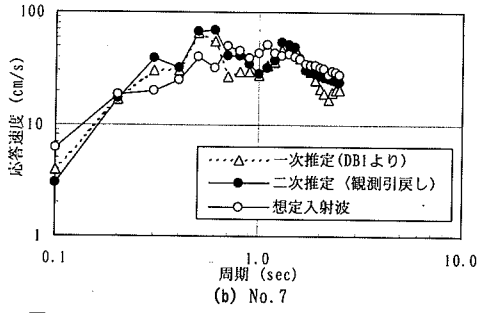
図-22(a)に No. 9 の工学的基盤における速度応答スペクトルを示す。同図には一次と二次の推定値との比較のために、事前の応答倍率の算定に用いた想定入射波の応答スペクトル、さらに当該観測点の設置機関により観測された地表記録波形から応答計算により引戻した応答スペクトルを併せて示している。なお、ここでの想定入射波の応答スペクトルは、それから求まる SI 値の大きさが今回の地震における各地区基盤での一次推定 SI 値と同じになるように補正している。

図-22(a)の一次と二次の推定値は、想定入射波の応答スペクトルに比べ 0.5 秒以下の短周期側で大きい。ここで、図-22(b)には、No. 9 に最も近い位置にある本システム観測地点 No. 3 の工学的基盤における速度応答スペクトルを示す。補間によって求まった No. 9 と No. 3 の推定値と想定入射波はほぼ一致し、No. 3 の推定値が No. 9 の推定値に強く影響していることが分かる。すなわち、No. 9 の推定値と想定入射波の応答スペクトルの差は、No. 3 にみられる差によって生じている。この原因は、工学的基盤における実際の入射波には想定入射波に比べて短周期成分が多く含まれていたためである。

さらに、図-22(a)の一次と二次の推定値と地表観測値から引戻した応答スペクトルを比較すると、0.1 秒を除くほぼ全周期帯で引戻した応答スペクトルが大きい。これは、主に No. 3 の推定値から空間補間により求まる No. 9



(a) No. 11



(b) No. 7

図-23 No. 11 の工学的基盤における速度応答スペクトル

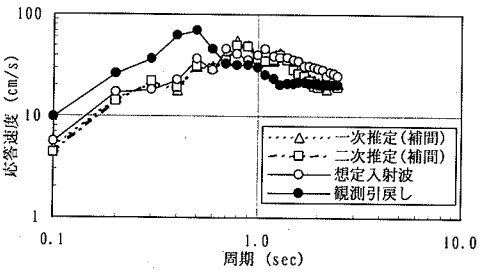


図-24 No. 13 の工学的基盤における速度応答スペクトル

の推定値が、地表観測値から求めたものと大きく異なっていたことを示している。すなわち、工学的基盤における速度応答スペクトルの空間補間による誤差が大きく現れたことを意味している。

図-23(a)は、No. 11 について同様に求めた工学的基盤における速度応答スペクトルである。No. 11 に近い位置にある本システム観測地点は No. 7 であり、その No. 7 の速度応答スペクトルを図-23(b)に示す。No. 11 の推定値と想定入射波の差は図-22 に比べそれほど大きくないが、地表観測値から引戻した応答スペクトルに比べると 0.5 秒以下の短周期側で小さい。

次に、Ⅱ種地盤上の No. 13 について、同様に比較した結果を図-24 に示す。No. 11 と同じように推定値と想定入射波の差は大きくないが、地表観測値から引戻した応答スペクトルに比べると推定結果は 0.7 秒以下の短周期側で小さい。

同様に、Ⅲ種地盤上の No. 15 も、図-25 に示す。No. 15 の推定値と想定入射波の差は小さく、地表観測値から引戻した応答スペクトルとの比較においても周期 0.1 秒に

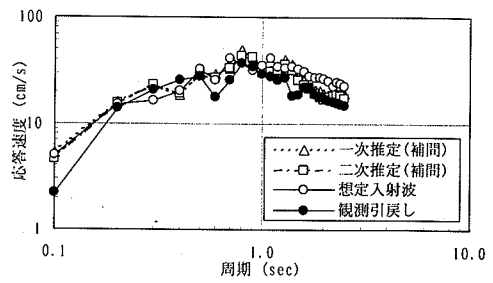
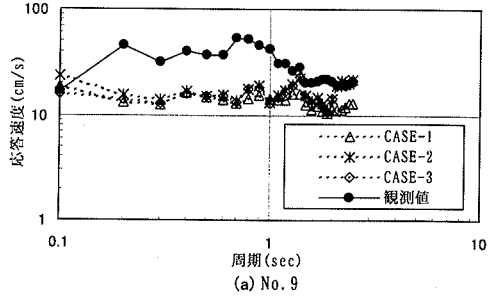
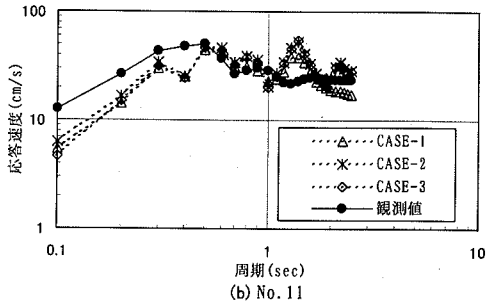


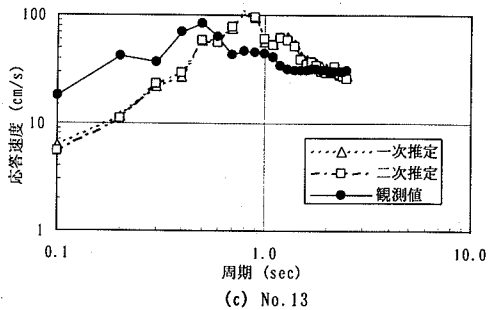
図-25 No. 15 の工学的基盤速度応答スペクトル



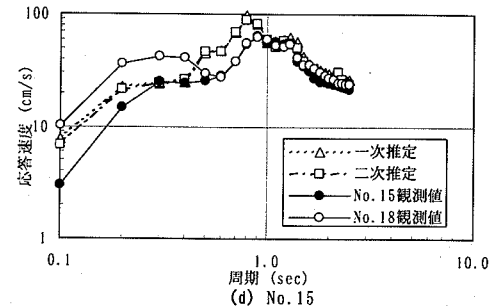
(a) No. 9



(b) No. 11



(c) No. 13



(d) No. 15

図-26 地表速度応答スペクトル

おける推定値以外はその差が小さい。

#### b) 地表における推定値

推定地区の地表における観測値と推定値の誤差の原因は、空間補間による工学的基盤での推定値の違いと推定地区の応答倍率の違いが考えられる。前者の工学的基盤における空間補間に伴う誤差についてはNo. 9, No. 11について先に示した。後者の応答倍率については、推定地区の地盤モデルのばらつきによる影響と想定入射波の影響が考えられる。そこで、ここではNo. 9, No. 11, No. 13, No. 15の応答倍率の違いを調べ、誤差の原因について考察する。

まず、No. 9, No. 11の地表での推定値および観測値を図-26(a), (b)に示す。地表の二次推定値をCASE-1とし、これと比較して想定入射波の影響を確認するため、No. 8の鉛直アレー記録から求めた工学的基盤入射波に応答倍率を乗じて求めた地表推定値をCASE-2とした。さらに、表層地盤モデルの影響を確認するためのケースを設定した。すなわち、No. 9とNo. 11の地盤モデルは図-6に示すように地表面付近がN値=4である。そこで、これをN値=10に変更した地盤モデルに対して求めて応答倍率を乗じた地表推定値をCASE-3とした。ここでN値=10としたのは、No. 9の地表面のN値が7, No. 11のN値が12であり、ほぼこの平均的な値を用いたものである。これら3ケースを比較すると、CASE-2が工学的基盤入射波の影響で短周期側にやや増幅がみられるものの、あまり差はない。そしていずれのケースも地表観測値から求めた応答スペクトルに比べて小さい。これらの結果から、表層地盤における応答倍率の誤差の影響よりも先に示した工学的基盤における空間補間の誤差の影響が大きいことが分かる。

次に、No. 13の推定誤差の原因について示す。図-26(c)に地表観測値と推定値を示すが、0.5秒以下の周期で推定値は観測値に比べ小さい。したがって、No. 9とNo. 11と同様に、応答倍率の誤差の影響よりも工学的基盤における空間補間の誤差の影響が大きいことが考えられるが、No. 13は本システム観測地点No. 5と比較的に近い位置にある。このため、工学的基盤における空間補間の推定値にNo. 9とNo. 11ほど大きな違いがあるとは考えにくい。そこで、現地の調査を行ってみたところ、当該観測地点は盛土法肩に位置していた。このことより地表記録に局所的な地形効果が強く影響したことが誤差の原因ではないかと考えている。

さらに、Ⅲ種地盤上の観測地点のうち、No. 15の推定差の原因について示す。No. 15と近接するNo. 18との設置間隔は約500m程度の距離しか離れていない。これら2地点のボーリング柱状図を図-6に示しているが、同じ地層構成で各層厚と平均N値に若干の違いがみられる程度である。距離が近く地盤条件も大きく変わらないNo. 15

とNo. 18の最大加速度は、No. 15の173 cm/s<sup>2</sup>に対してNo. 18では308 cm/s<sup>2</sup>と1.8倍大きい。図-26(d)にはこれらの観測地点の地表観測値と推定値の速度応答スペクトルを示す。なお、No. 18の推定値は近距離のためNo. 15のそれらとほぼ同じ値となっており、ここでは表示を省略した。地表観測値は、0.6秒以上の周期帯においては両地点でほぼ一致しているが、これより短周期側においてはNo. 18の方がNo. 15より明らかに大きい。すなわち、表層地盤のわずかな差によって地表地震動の短周期成分に大きく差が現われ、最大加速度と速度応答スペクトルに差が生じている。この原因はNo. 18がNo. 15に比べて、表層1m層のN値が小さく緩い傾向にあり、この層での増幅が大きくなったためであると考えられる。

一方、図-21に示したようにこれらの地点で観測されたSI値には最大加速度ほどの差は生じていない。

#### (5) 推定精度改善のための今後の課題

本システムによる地震動の推定は、1) 数少ない地表観測値を一旦工学的基盤に引戻し、2) そこで空間補間した後に、3) 推定地区の応答倍率を乗じることによって求める、という手順によっている。

1) における誤差は、観測地点の引戻し用の応答倍率、すなわちその算定に用いる地盤モデルと想定入射波の妥当性に依存している。本システム構築にあたっては、8観測地点の地盤モデルは地質調査によって比較的精度よく設定されていた。しかし、想定入射波についてはスラブ内地震の特徴である地震動の短周期成分が卓越する特性を想定していなかった。このため、応答倍率に差が生じ、観測値との違いが大きかった。したがって、今後、工学的基盤における入射地震動の推定法を改善することが重要である。ただし、スラブ内地震、活断層型地震、海溝型地震と震源タイプに応じて応答倍率を変える必要があり、システムに震源推定機能を導入する必要がある。

2) の工学的基盤における空間補間に関しては、外挿補間となる領域の推定精度が大きく低下していた。地盤モデルや想定入射波の精度に比べ、特にこの空間補間による推定精度が地表地震動の推定誤差に与える影響の大きいことが確認できた。このため、推定範囲に外挿領域が生じないようにシステム観測地点の配置を改善することが、推定精度の向上のために最も重要である。

3) の推定地区の応答倍率の精度は、地盤モデルと想定入射波の妥当性の両方に依存する。想定入射波の違いとともに、現状では推定地区における地盤モデルのばらつきの影響も大きい。特に、短周期成分が卓越する平成13年芸予地震のようなスラブ内地震では、表層の地盤構造のわずかな違いによって地表最大加速度に大きな違いが認められた。このため、今後、精度の良い地盤調査、常時微動観測、地震動観測等によって地盤データの蓄積が

重要である。

## 6. 結論

本研究では、リアルタイム地震被害推定システムの地震動推定精度を改善することを目的に、平成13年芸予地震時における広島市地震情報ネットワークシステムの稼動状況を検証し、その問題点を抽出した。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

1. 平成13年芸予地震はスラブ内地震の特徴である短周期成分が卓越したため、地表加速度の空間分布にサイト特性の影響が強く現われた。
2. システムで採用している地盤の応答計算法の妥当性を鉛直アレー記録を用いたシミュレーションによって確認した。その結果、最大加速度、スペクトル特性および地盤的非線形性の再現性を確認できた。
3. システムによる最大加速度の推定値は、観測地点において工学的基盤に引戻した段階で、Ⅰ種とⅡ種地盤上で一次と二次の推定値に差が生じた。これは一次推定の応答倍率の算定に用いていた想定入射波と観測波の短周期成分の違いによって生じたものである。したがって、短周期成分の影響の少ないⅢ種地盤においてはその差が小さかった。
4. システムによって推定されたSI値は、工学的基盤における一次と二次の推定差は少なく、地表における推定値も比較的差が小さかった。しかし、空間補間が外挿となる領域では誤差が大きくなった。
5. 誤差の大きかった推定地区の速度応答スペクトルを調べた。その結果、工学的基盤における応答スペクトルの推定誤差の主な原因は、Ⅰ種とⅡ種地盤上で想定入射波の短周期成分を過少評価していたこと、空間補間の外挿によって誤差が増大したことが確認できた。
6. 平成13年芸予地震が短周期成分の卓越するスラブ内地震であったため、表層地盤のわずかな違いによって地表地震動の短周期成分に大きな差が現れ、これが最大加速度と速度応答スペクトルの推定誤差の原因となったことが確認できた。
7. 地震動の推定精度を改善するためには、工学的基盤における想定入射地震動の推定法の改善、システム観測地点の増設、地盤データの蓄積が今後の課題である。

なお、現在引続き、同システムによる地震被害推定精度の検討を行っており、今後とりまとめて紹介する予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ご討議頂いた広島市地

震情報ネットワークシステム検討委員会の各委員、広島市消防局、ならびに作業に協力頂いた中電技術コンサルタント（株）の片山吉史氏、岸田健太郎氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Sasaki,Y, Fujiwara,K., Miura,F, Konishi,H. and Furukawa ,S. : Development of the seismic disaster information system for HIROSHIMA CITY, 12WCEE, 2000.
- 2) 広島市消防局：平成13年芸予地震と広島市地震情報ネットワークシステム—地震の概要と被害の分析ならびにシステムの検証—, 2001.
- 3) 桐山孝晴：国におけるリアルタイム地震防災システムのあり方, 第2回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp.143-148, 2000.
- 4) 阿部進, 鈴木誠：横浜市リアルタイム地震防災システムについて, 第2回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp.11-18, 2000.
- 5) 菊地正幸：リアルタイム地震学の進展と課題, 国土セイフティネットシンポジウム, pp.7-15, 2002.
- 6) 桐山孝晴：地震防災情報システム(DIS)の開発, 第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp.59-62, 1999.
- 7) 広島市：平成13年(2001年)芸予地震に関する情報, 2001.5.31, <http://www.city.hiroshima.jp/shobou>
- 8) 古川智, 藤原健蔵, 佐々木康, 三浦房紀：2001年芸予地震の特徴と今後の課題, 「近年の国内外で発生した大地震の記録と課題」シンポジウム論文集, pp.17-24, 2002.
- 9) 広島市消防局：広島市大規模地震被害想定調査報告書, 1997.
- 10) 電力中央研究所：平成13年芸予地震調査速報, 電力中央研究所報告, U01003, pp.6-7, 2001.
- 11) 池田孝, 加藤研一, 武村雅之：2001年芸予地震の高振動数成分の励起特性, 第11回日本地震工学シンポジウム, 2002.
- 12) 広島県：広島県震度情報ネットワークシステム, 1997.
- 13) 広島市：広島市地震情報ネットワークシステム, 1999, <http://www.shobou.city.hiroshima.jp/>
- 14) 独立行政法人防災科学技術研究所：基盤強震観測網, 強震観測網, 2001, <http://www.kik.bosai.go.jp/http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 15) 佐々木康, 小西宏之, 古川智, 久保田博章, 渡辺修士：広島市地震情報ネットワークシステムについて, 第2回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp.59-66, 2000.
- 16) 独立行政法人港湾空港技術研究所：港湾地域強震観測, 2001, <http://www.eq.ysk.nilim.go.jp/>
- 17) 渡辺修士, 佐々木康, 小西宏之：広島市域における地震時被害予測のための地盤モデル, 第51回土木学会中国支部研究発表会講演概要集, pp.297-298, 1999.
- 18) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編, pp.25-27, 2002.

- 19) Sugito, M., Furumoto, Y. and Sugiyama, T. : Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, 12WCEE, 2000.
- 20) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/II-27, pp.49-58, 1994.
- 21) 塩野清治, 升本眞二, 弘原海晴: BASIC によるコンターマップⅡ, 応用編, 共立出版, 1988.
- 22) 古川智, 佐々木豊, 西岡大介, 片山吉史: 鳥取県西部地震と芸予地震における広島市内の鉛直アレー記録の分析, 第37 回地盤工学研究発表会, pp.2115-2116, 2002.
- 23) 佐々木豊, 中下明文, 西岡大介: 鳥取県西部地震と芸予地震における広島市内の鉛直アレー記録の分析, 電力土木, pp.90-93, 2002.
- 24) Hardin, B.O. and Drnevich, V.P.: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.98, SM7, pp.667-692, 1972.

(2003. 8. 4 受付)

## STUDY ON THE ESTIMATION ACCURACY OF STRONG EARTHQUAKE MOTIONS BY THE HIROSHIMA CITY REAL-TIME EARTHQUAKE DAMAGE ESTIMATION SYSTEM

Satoshi FURUKAWA, Fusanori MIURA and Yasushi SASAKI

After the 1995 Hyogoken-nambu earthquake, real-time earthquake damage estimation systems have been introduced into the national government and local governments. Hiroshima city also introduced such a system and got an opportunity to utilize the system for the first time as a local government at the 2001 Geiyo earthquake.

In this study, we investigated the estimation accuracy of strong earthquake motions which are the base of the damage estimation of the system. There were large differences between observed earthquake motions and estimated ones at some recording sites. The three main reasons of the differences are as follows; first, the difference of spectral characteristics in the high frequency range of the estimated motions from the observed ones, second, extrapolation technique which is used to estimate the distribution of ground motions from observed ones, third, the variation of modeling the surface ground to estimate the ground motions.