

広島市地震情報ネットワークシステムについて

佐々木康¹・小西宏之²・古川智³・久保田博章³・渡辺修士³

¹正会員 工博 広島大学教授 工学部第4類(建設系)(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 広島市消防局 防災部 防災課(〒730-0051 広島市中区大手町5-20-12)

³正会員 中電技術コンサルタント株式会社 防災対策室(〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

広島市では、平成11年4月に地震情報ネットワークシステムの運用を一部開始した。市内8カ所に設置した計測震度計、3カ所の間隙水圧計および1カ所の鉛直アレー観測点における地中強震計(3深度)から送信されるデータをもとに、地震被害を予測し災害の初動体制の確立に利用する。本報告では、システムの概要について紹介するとともに、被害予測項目のうち液状化予測法の比較検討結果について紹介する。広島市においては、液状化発生が人的被害・施設被害の規模を左右する大きな影響を与えることから、その判定法が重要であった。そこで、判定法の比較を、i) 通常用いられる地表面最大加速度による方法、ii) 広島市の地盤モデルと想定地震動の加速度レベルに応じた地中せん断応力分布を事前に準備しておく方法について検討した。

Key Words: Disaster estimation, Disaster information management, Soil condition database, Strong motion instrumentation, Soil liquefaction

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、広島市では大地震に備えるため平成7年から平成9年にかけて被害想定調査を実施し¹⁾、災害に強いまちづくりプランを策定した。このプランにおいて、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、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されている。

さらに広域的・突発的で、同時多発するという大地震による災害の特徴を考えると、自助、公助、互助の3本柱を基本とする、市民と行政が一体となった対応の準備が必要であることも議論されている。これを受け、すでに地域の災害危険性と避難地を示した地図が各世帯へ配布されたほか、リアルタイムで被害状況を把握する地震情報ネットワークシステムの整備が進められ、平成12年4月から完全運用が開始される。

このシステムは、断片的に寄せられるであろう通報だけに頼らず被害の全貌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提供しようとするものである。このため技術検討委員会を設け、検討が進められた。

この報告は、地震発生20分後には、市内8カ所で観測した地震動と地盤や施設の現況から被害分布を予測し、表示するシステムの概要を紹介するものである。

2. システムの全体構成

このシステム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するものである。すなわち、災害対策本部の設置の必要性、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分後には提供し、さらに被害情報を収集する重点地区、被害の発生を監視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分後までには提供する(図2.1)。

この目的を満足するために必要なシステム全体構成を、兵庫県南部地震の経験、広島市域の災害ポテンシャル、広島周辺の地震活動度などを元に検討した。提供する情報は人的被害および消防活動の支障となる施設被害ならびにその根拠となる施設被害である(表2.1)。短時間内での実際の被害実態調査は困難であるので、提供する

被害状況は、地震動とこれを用いて推定した地盤破壊から予測することとした。

したがって、このシステムは図 2.1 に示すように、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。

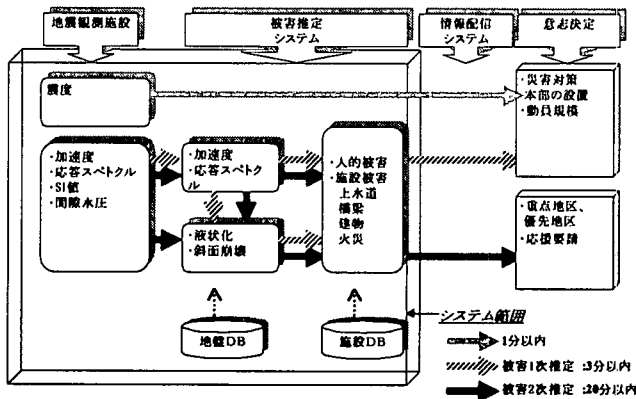


図 2.1 システム全体構成

表 2.1 被害推定項目

地震動	地盤被害	人的・施設被害
最大加速度	液状化	—
	斜面崩壊	—
SI 値	—	上水道、橋梁
速度応答スペクトル	—	建物、火災、人的

3. 地震動・間隙水圧の観測

地震動を観測する地点は市内各区に一つずつ計 8 地点に配置した (図 3.1)。8 観測地点のうち、牛田浄水場、広域公園、防災センターでは工学的基盤面までの深さは 5m 以下と浅く、その他の 5 地点では 17~45m 程度と深い (表 3.1)。また、消防航空隊基地ではデルタ沖積層での地震動増幅特性の把握を目的とする地中 3 深度での観測を含む鉛直アレーとした。(図 5.3)この地点および矢野新町公園、美の里公園の 3 観測地点では加速度観測のほかに沖積砂層での間隙水圧計測を目的とする間隙水圧計を埋設した。

用いた強震計は、東京測振製の 3 成分サーボ型加速度計で測定範囲 0-2000gal、サンプリング周期 1/100 秒、遅延装置 15 秒、トリガーレベルは 3 成分合成加速度 1.5gal のものである。観測した加速度はその場で計測震度、速度応答スペクトル、SI 値への変換機能を有しており、加速度記録の時刻歴、間隙水圧の時刻歴とともに公衆電話回線または無線回線を介して主コンピュータに伝送される。

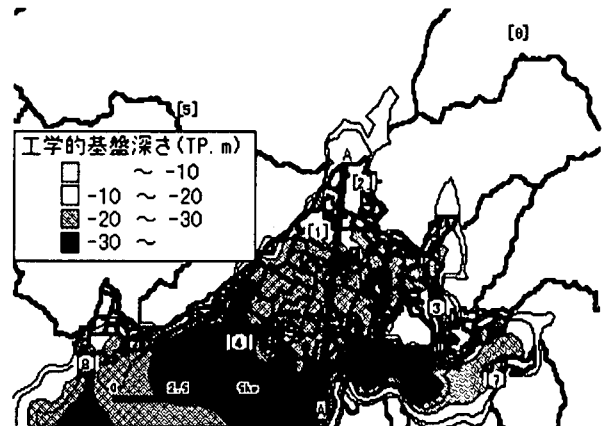


図 3.1 地震動の観測地点とデルタの工学的基盤深さ

表 3.1 各観測地点の地盤条件

No.	観測場所	強震計深度(m)	間隙水圧計	工学基盤深度(m)
①	広瀬北公園	GL±0	—	GL-27.0
②	牛田浄水場	GL±0	—	GL-4.0
③	環境局南工場	GL±0	—	GL-17.0
④	消防航空隊基地	GL±0,-8,-21,-36	GL-5.8	GL-34.3
⑤	広島広域公園	GL±0	—	GL-2.0
⑥	広島市防災センター	GL±0	—	GL-5.0
⑦	矢野新町公園	GL±0	GL-4.8	GL-33.0
⑧	美の里公園	GL±0	GL-3.3	GL-44.5

4. 地盤モデル

4.1 地盤構造を表現する地点

地震被害は、サイトの地震動と地盤変状 (液状化や斜面崩壊) が直接的な誘因となって生じるため、地表近くの地盤の性質に左右され、表層地盤構造の適切なモデル化が重要である。地盤の地震時応答の計算や液状化判定ではサイトの地盤構成をきめ細かく設定することが必要であるが、同時に広域的な地震被害の推定を行うために短時間で多くの地点を計算しなければならないことも考慮しておく必要がある。

そのためこの種の計算では、一般に計算対象地域をいくつかの小領域に細分してそれぞれの小領域ごとに地盤構造をモデル化し、その集合を地域全体の地盤構造モデルとして扱う。

このシステムでも、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 メッシュを基本単位として小領域に区分し、その中央座標を地盤モデル所在地点とした。同じ町丁目であっても、次に述べる検討の結果別の地形区分に属する領域は町丁目をさらに細分してそれぞれを表現地点とした。この結果、地盤構造を表現する地点は低地部で 588 地点、丘陵部で 1,151 地点となった。これらの地点は、後述する被害推定の計算地点でもある (図 5.1)。

4. 2 地盤モデル設定のための検討

広島市域の地盤モデルを設定するために、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。収集したボーリングデータの総数は、広島県地盤図からの引用、新交通システム地盤調査結果などが主体で低地部を中心に約6,500本にのぼる。

地盤モデルの設定手順は、まず広島市域を山地部、三角州など地形要素により細分することから始めた。細分に用いた地形区分は14種である。次に先述の図3.1に併記した工学的基盤面の深度により、各地点の深度を5m刻みで細分すると、これら地形要素による区分は低地部で42種類、山地部では8種類に分けられる。

さらに、各地点でのボーリングデータから層序を調べてみると、表土層、沖積砂層、沖積粘土層、下部砂礫層、基盤層から成り、ところによってこれらの一部が欠落していることが分かった。そこで、これらの層序構成の違いを加味して先の地形要素と基盤深度の階級区分による地盤種別を細分することとした。この結果、地盤種別は合計122タイプに区分されることとなった。

122種類の地盤タイプの、それぞれの層序区分の土層ごとにボーリングデータを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4.1に示す。

5. 1 地震動の指標

被害推定の計算には、震害と地震動の間の経験則を活用する。このため地震動を表現する指標は次のように、推定する施設別に、最大加速度、SI値、速度応答スペクトルの3種類のものを用いることとした。

- ・最大加速度(A_{max})：液状化判定、斜面崩壊、上水道被害推定に用いる。
- ・SI値：橋梁被害推定に用いる。
- ・速度応答スペクトル(S_v)：建物被害推定に用いる。

5. 2 観測地震動から市域全体の地震動分布を推定する方法

8カ所の観測地点で観測した地震動から、図5.1に示す広島市内の被害推定地点(1739カ所)の地震動を推定する方法を図5.2に概念的に示す。すなわち、観測地点の地表で計測された地震動を一次推定では応答倍率によって、二次推定では応答計算によって工学的基盤面深さにおける地震動を求める。次に、空間補間によって各推定地点の基盤面における地震動の値を求め、各地点の応答倍率を用いて推定地点の地表の地震動を設定する。

空間補間の方法として、濱田ら²⁾の提案する予測システムでも用いている塩野ら³⁾が提案する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観測点の実測値を含むなめらかな曲面を設定し、この

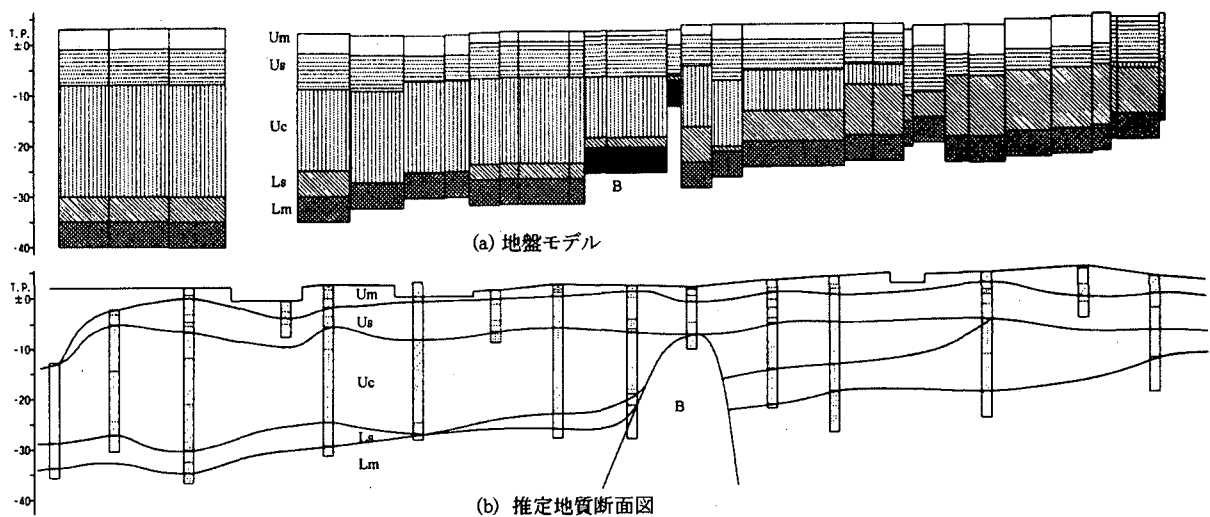


図4.1 A-A断面 地質縦断面図と地盤モデルの対比

5. 被害推定システム

このシステムでは、8カ所の観測地点で実測した地震動をもとに市域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こととしている。以下順を追って被害推定の方法を説明する。

曲面より格子点の値を補間するものである。ここでは、3.5km四方の格子を採用した。

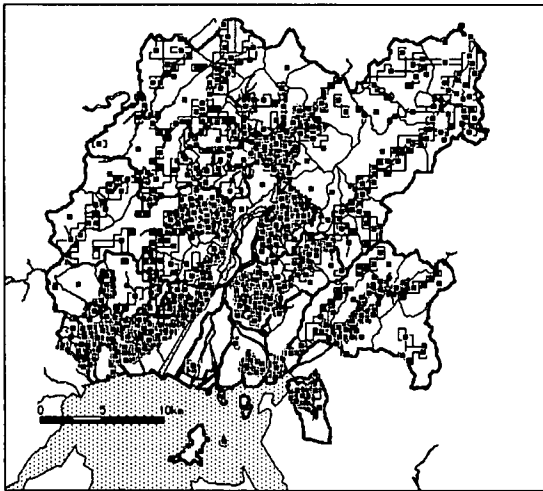


図 5.1(a) 山地・丘陵地の推定点(1,151点)

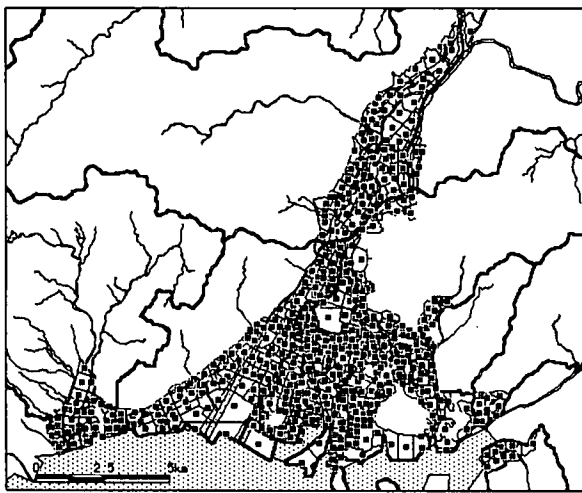


図 5.1(b) 低地部の予測点(588点)

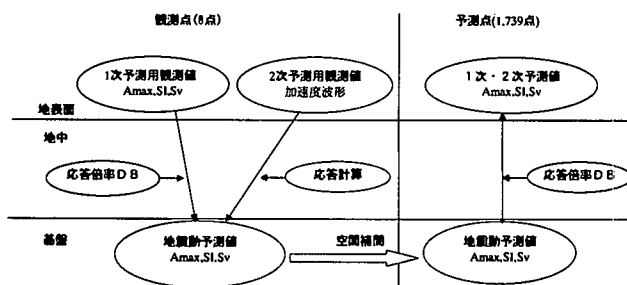


図 5.2 観測値から地震動分布を推定する方法

5.3 応答計算法

図 5.2 に示した観測地点および推定地点の応答計算には、SHAKE を改良した杉戸ら⁴⁾による等価ひずみの周波数依存性を考慮した計算法を採用した。これは、大規模地震までを対象とする場合に、SHAKE による計算では軟弱地盤において地盤の非線形性の影響が過度に入る傾向を改善することが出来る。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ものである。

5.4 液状化発生の推定

広島市においては、液状化発生が人的被害・施設被害の規模を左右する大きな影響を与えることから、液状化判定法の妥当性について検討を行う必要があった。そこで、以下に示す道路橋示方書・同解説⁵⁾に示される F_L 値による方法を基本にし、動的せん断応力比を算定する方法に改良を加えた。

$$F_L = R/L \quad (1)$$

ここで、 F_L ：液状化抵抗率、1.0 以下の土層は液状化する。 R ：動的せん断応力比 (N 値・粒度から示方書により求める。) L ：地震時せん断応力比、次式より求める。

$$L = (r_d \cdot \alpha_{max} \cdot \sigma_v) / (g \cdot \sigma_v') \quad (2)$$

ただし、 α_{max} は地表面最大加速度、 g は重力加速度、 r_d は深さ方向の低減係数、 σ_v は上載圧、 σ_v' は有効上載圧である。

道路橋示方書ではどのような地盤でも深さ方向の低減係数 r_d を $r_d = 1 - 0.015Z$ (Z は深さ m) から求めている。このため、地盤の層序構成や地震動レベルによっては計算される地震時せん断応力比は実際に生じているものとは異なり、地表面最大加速度が大きい場合にはその差がさらに大きくなる可能性がある。そこで佐藤ら⁶⁾の提案を参考にし、1905 年芸予地震級の想定地震波形を用い、広島市域の地盤モデルに対して入力加速度レベル 50~400gal に調整して入力した場合の地表面加速度と地中各深度の最大せん断応力比を応答計算によって求め、式 (3) により各被害推定地点の加速度レベルごとの低減係数 r_d のテーブルを準備した。

$$r_d = (\tau_{max} \cdot g) / (\alpha_{max} \cdot \sigma_v') \quad (3)$$

式 (3) による液状化判定の改良効果を確認するため、広島市内の低地部での液状化判定結果の手法による違いを以下のように比較検討した。

比較の対象とした想定地震は、低減係数 r_d のテーブルを作成するのに用いた 1905 年芸予地震級の想定地震 (CASE-1) と広島市において内陸直下型地震として想定している己斐断層地震 (CASE-2) とした。これらの地震に対する広島市内の工学的基盤面における地震動波形を非正常地震動予測モデル⁷⁾により求めた。また、己斐断層地震については、このモデルの旧バージョンにより求めた地震動 (CASE-3) についても入力地震動の周波数特性の違いによる影響をみるため比較の対象とした。ここでは、鉛直アレー観測地点であり図 5.3 に示す地盤構造である消防航空隊基地の GL-34m 位置における各ケースの想定地震動波形とそのフーリエスペクトルを図 5.4 に示す。CASE-1 の地震は $M = 7.1/4$ 、震源距離 76km であり、最大加速度 110Gal、卓越周波数は 2.0Hz 付近

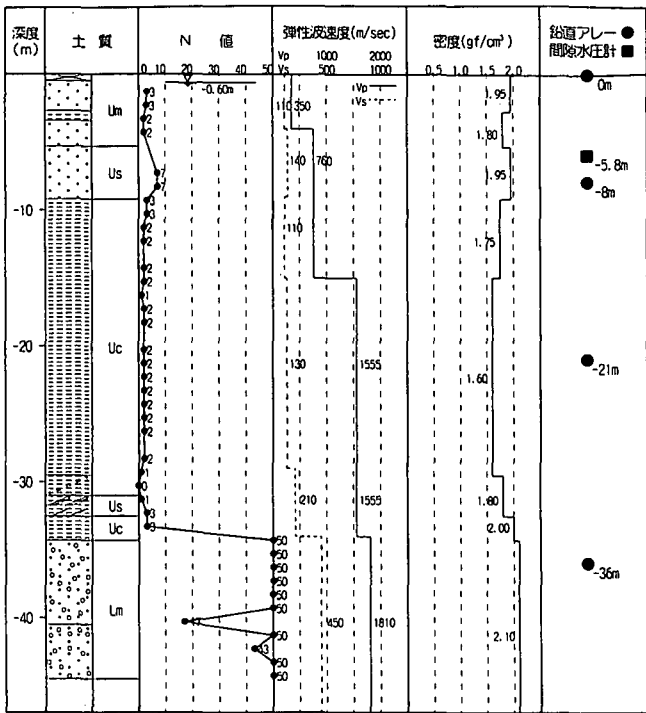


図 5.3 消防航空隊基地の地盤構成と計器設置位置

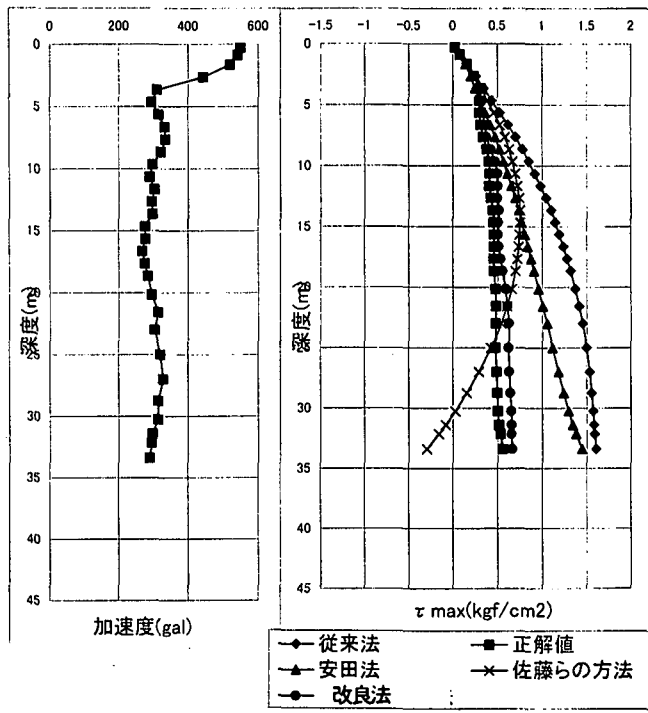
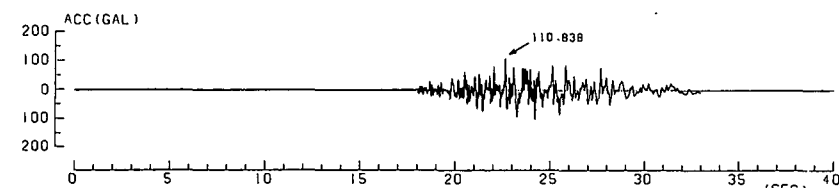


図 5.5 消防航空隊基地の α_{max} と τ_{max} の深度分布

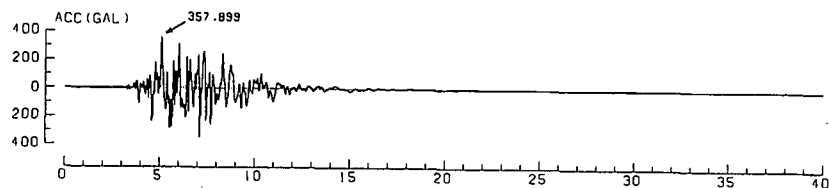
にある。一方、CASE-2,3の地震はM=6.5、震源距離12kmであり最大加速度350Galであるが、周波数特性はCASE-2では0.5~4Hzの成分が、CASE-3では2Hz以上の成分が卓越している。したがって、CASE-2と3の地震動は最大加速度は同程度であるが、CASE-3の方が高周波成分の多い特徴がある。

判定法の比較は、応答計算から地盤内の最大せん断応力比が求められるので、その値を用いて液状化判定を行った場合を正解（正解法）と考え、道路橋示方書の低減係数 r_d を用いた場合（従来法）、式（3）による低減係

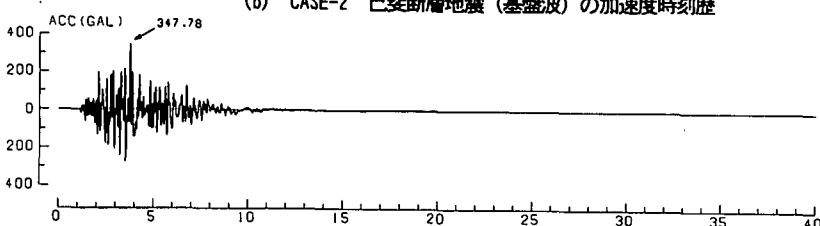
数を用いた場合（改良法）の両者をこれと比較する。図5.5には、消防航空隊基地におけるCASE-2の地震による最大加速度 α_{max} の深度分布と各判定法による地中の最大せん断応力 τ_{max} の深度分布を示す。なお、 τ_{max} に



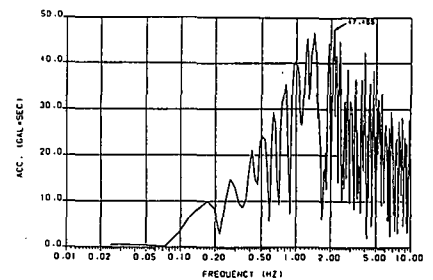
(a) CASE-1 芸予地震（基盤波）の加速度時刻歴



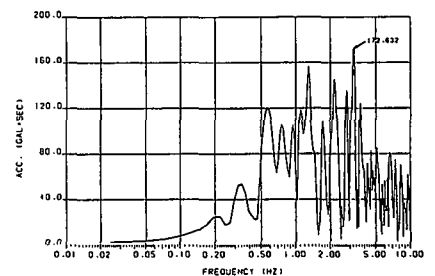
(b) CASE-2 己斐断層地震（基盤波）の加速度時刻歴



(c) CASE-3 己斐断層地震（基盤波）の加速度時刻歴(旧バージョン)



(a) CASE-1 芸予地震（基盤波）のフーリエスペクトル



(b) CASE-2 己斐断層地震（基盤波）のフーリエスペクトル

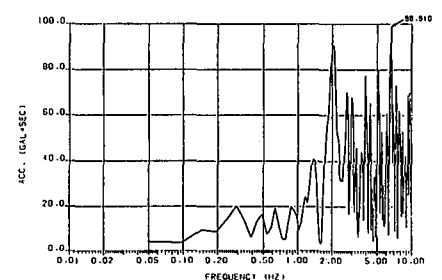


図 5.4 想定地震動波形とフーリエスペクトル (c) CASE-3 己斐断層地震（基盤波）のフーリエスペクトル

については、SI 値を用いた判定法⁸⁾ (安田法)、SI 値と最大加速度を用いた方法⁹⁾ (佐藤法) で求めた結果も合わせて示した。図 5.5 より τ_{max} の深度分布は応答解析結果に比べ従来法では差が大きく、改良法による改善が認められる。

図 5.6 には、他の観測点 2 点を加えて従来法と改良法に対し、応答解析により求めた τ_{max} との比較を 3 ケースの地震について示した。図 5.6 より従来法は τ_{max} が小さい範囲で解析結果との対応がよいが、 τ_{max} が大きくなると次第に解析結果との差が生じている。⁹⁾ また、CASE-2 の地震に比べ高周波成分の卓越する CASE-3 の方が解析結果との差が大きい。一方、改良法では、各ケースとも改良効果が認められる。

次に、各被害推定地点での深さごとの液状化抵抗率から深さ方向の重み係数を考慮した積分値によって求められる液状化指数 P_L 値の地域分布を比較することとした。 $P_L > 15$ となると液状化危険度が極めて高いと判断される。図 5.7 に CASE-2,3 の己斐断層地震を対象に計算した結果を示す。従来法による P_L 値分布は、正解法に比べ全域で大きな P_L 値を与えており、改良法が正解に近い結果を与えることが分かる。

さらに、CASE-2 と 3 の比較により入力地震動の周波数特性の違いによる P_L 値分布の差について考察する。正解法においては、高周波成分の卓越する CASE-3 が CASE-2 に比べ小さな P_L 値分布となっている。これは、同レベルの最大加速度入力でも低周波成分の卓越する CASE-2 の方が τ_{max} が大きくなるためである。したがって、従来法との比較では CASE-3 の方が正解法との差が大きくなっている。一方、改良法では、CASE-2 に比べ予測精度は少し落ちているが、従来法に比べ精度の向上が見込めるものとする。

6. まとめ

広島市地震情報ネットワークシステムの概要を紹介した。さらに、広島市においては液状化発生が人的被害・施設被害の規模を左右するため、液状化判定法の妥当性について検討した結果を紹介した。今後の課題としては、予測精度向上のために、実測データに基づく表層地盤の応答倍率および地中せん断応力の低減係数 r_d に対するテーブルの見直しが必要である。

謝辞：システム整備に当たり予算措置を補助いただいた科学技術庁、システム内容の技術検討に協力いただいた検討委員の方々、地盤モデル設定に当たりボーリングデータを提供いただいた関連機関、ならびに観測施設の設置に当たり協力いただいた地元関係者の方々に感謝の意を表します。

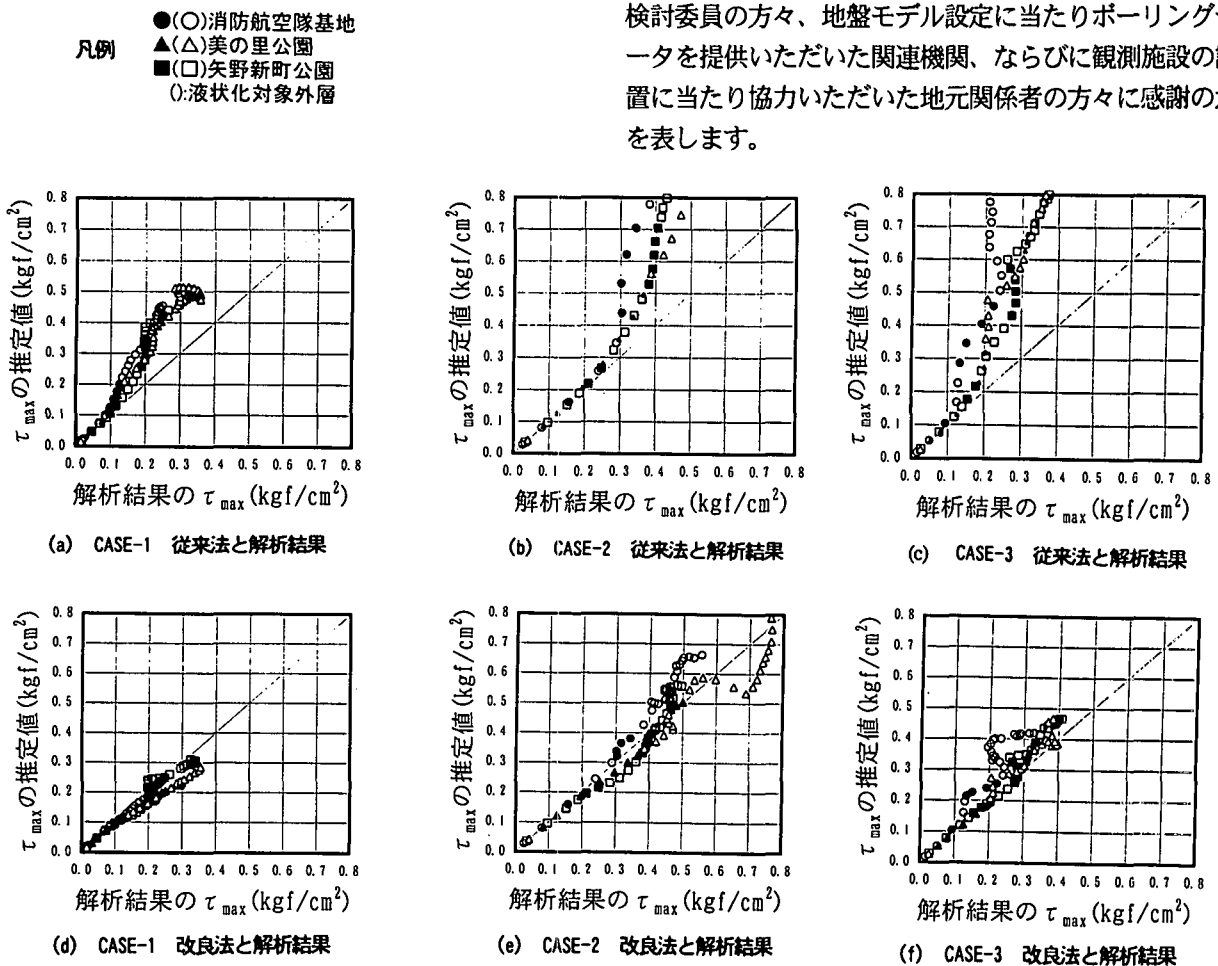
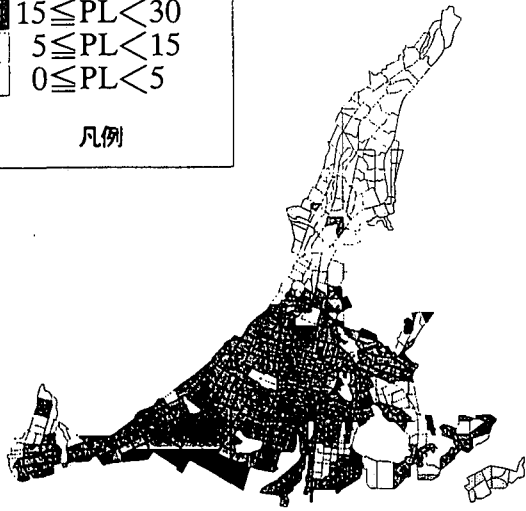
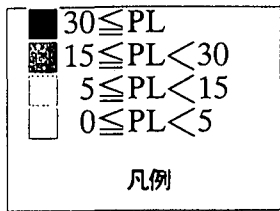
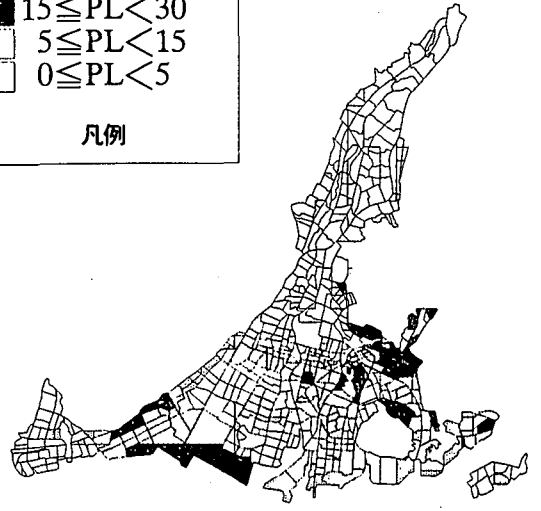
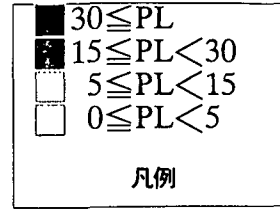


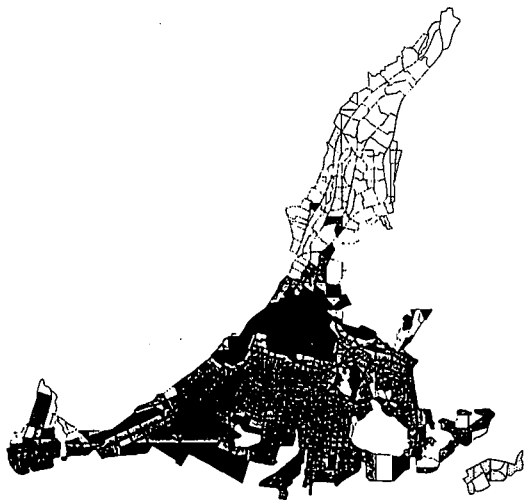
図 5.6 τ_{max} の推定値と解析結果の比較



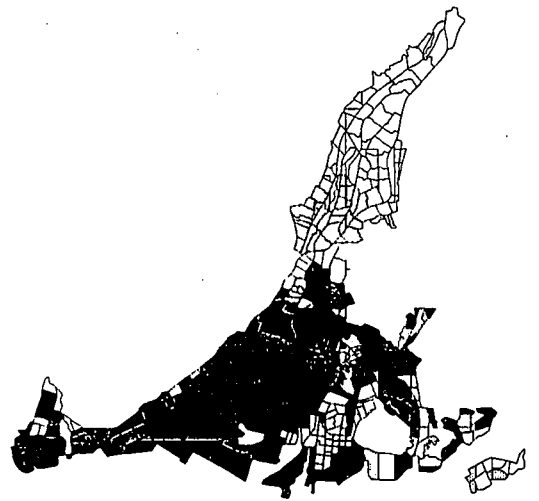
(a) CASE-2 正解法



(d) CASE-3 正解法



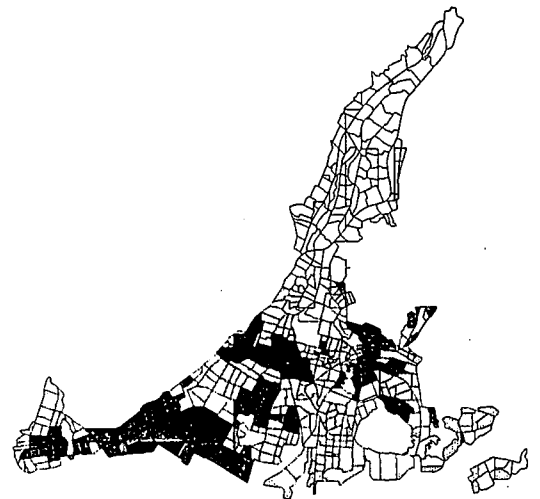
(b) CASE-2 従来法



(e) CASE-3 従来法



(c) CASE-2 改良法



(f) CASE-3 改良法

図 5.7 判定法の違いによる広島市域の液状化危険度分布の比較

参考文献

- 1) 広島市消防局：広島市大規模地震被害想定調査報告書、1997.
- 2) 濱田禎、杉田秀樹、金子正洋：公共土木施設における即時震害予測システム、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.3419-3424. 1998.
- 3) 塩野清治、升本眞二、弘原海清：BASICによるコンターマップⅡ、応用編、共立出版.1988.
- 4) 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.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編..1996.
- 6) 佐藤正行、安田進、吉田望、増田民夫：地盤の地震時せん断応力の簡易推定法、土木学会論文集、No.610/III-45、pp.83-96. 1998.
- 7) M.Sugito and H.Kameda :Prediction of Nonstationary Earthquake Motion on Rock Surface, Proc.of Japan Society of Civil Engineers, Structural Eng./Earthquake Eng..Vol.2,No.2,pp149~159,Oct.1985.
- 8) 安田進、吉川洋一、牛島和子、石川利明：S I 値を用いた液状化予測手法、第28回土質工学研究発表講演集、PP.1325~1328,1993.