

リアルタイム地震防災における 地盤および地震動データについて

山本明夫¹・瀬川秀恭²・篠原秀明³

¹正会員 応用地質株式会社 技術本部 土質技術部 (〒330-8632 埼玉県大宮市土呂町 2-61-5)

²理修 応用地質株式会社 GIS事業部 (〒336-0015 埼玉県浦和市太田窪 2-2-19)

³ 応用地質株式会社 技術本部 土質技術部 (〒330-8632 埼玉県大宮市土呂町 2-61-5)

本論文では、リアルタイム地震防災システムで利用される地盤データおよび地震動データについて検討を行った。地盤データについては、グレードを区分してその状況を取りまとめた。現状、簡易予測方法の中で、国土数値情報が利用されてきたことが注目される。地震動データについては、オンライン処理で利用されていることから、加速度応答スペクトルを地震計処理部で短時間に自動演算し、即時に伝送するシステムを検討した。

Key Words: On-line ground property data and earthquake motion data in real-time earthquake engineering

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震において、地震被害情報の早期収集がなかなかうまくいかなかったことから、被害情報をリアルタイムに収集し、様々な救助・救援活動を円滑に進めようとする機運が生まれた。また、上記の兵庫県南部地震を含めて1993年釧路沖地震、1993年北海道南西沖地震、1994年北海道東方沖地震、1994年三陸はるか沖地震など、種々の震源断層タイプを持った地震が発生し、地震予知の困難性が認識させられてきた。これらの状況を背景にして、近年日本でもリアルタイム地震防災システムが発展してきた。

リアルタイム地震防災システムの基本的構成は、地震計(強震計)ネットワークとオンライン地震被害推定システムが結びついたものであり、地震動をモニタリングし、その情報に基づいて、地震被害防止もしくは軽減のための対応を迅速に開始するためのシステムと認識される。

リアルタイム地震防災システムが発展する以前から、国あるいは地方自治体などを中心として地震被害想定調査が行われてきた。これらの地震被害想定調査については、太田¹⁾および金子²⁾がその現状、将来展望等を詳しく述べている。ここで太田は、地震被害予測法を支える3種の神器が存在するとして、以下の3つのツールを挙

げている。

- ①想定地震 [強地震動入力]
- ②事実データ [地域(自然、社会)環境データ]
- ③知識データ [地震学的、耐震工学的知見]

これらの3者が程良くバランスしたところに信頼性のある被害予測が生ずるとしている¹⁾。地震被害想定調査では、特に①の想定地震の設定が難しく、被害想定結果が現実とならない可能性を常に孕んでいると考えられる。

このような想定地震の問題を回避できることもリアルタイム地震防災システムの大きな利点であると考えられる。

2. リアルタイム地震防災における地盤データおよび地震動データの位置付け

リアルタイム地震防災システムでリアルタイム被害推定を行うためには、地震計の設置地点には限りがあるため、観測を実施していない地点で地震動を推定する必要がある。この地震動推定にもいろいろな方法が考えられるが、強震動の性質や地盤条件を考慮して、観測された地震動を空間的に補間して行くことが一般的である。

図-1に本論文で議論しようとしている地盤データおよび地震動データのリアルタイム地震防災システムでの

位置付けを示した。リアルタイム地震防災システムではオンラインデータとして地震動データを処理し、被害軽減緊急対策にこの情報を活かして行こうとするが、そのオンライン処理を行うシステム(モデル)は、オフライン処理によって事前に準備されるのが通常である。

このような意味で、地盤データはこのオフライン処理の状況で利用されることが多い。図-1の(A)の部分がオフライン処理での地盤データにあたる。このデータ(データ・ベース)は、深い地盤構造DB、表層地盤構造DB、地盤物性DB、地盤強度DB、動的変形特性DBおよび既存強震波形DB等からなる。図-1(C)に示すようにこれらのデータ・ベースから、対象地域を細分化して事前に解析(数値化)された地盤情報つまり地震動の増幅率等を作成しておくことが一般的である。リアルタイム地震防災システムでは、オンライン情報の即時性が求められるため、観測地震動のデータを受け取ってから地震動・液状化の予測解析をオンライン処理で行うことは、現在の計算機の処理能力においても時間的に無理なことが多い。観測された地震動の最大値等をパラメーターとして、動的な非線形性まですべてとり込んで、表層地盤の増幅率をデータ・ベースとしておけばオンライン情報の即時性を保つことができると考えられる。

一方、地震動データは、リアルタイム地震動システムを構成する基本となるものであり、図-1(B)に示すような地震計ネットワークから、通信システムによって図-1(D)のオンライン処理に入ってくると考えられる。この場合において、地震計の数が多くなるにつれて、地震動の波形データまで通信システムを介してシステム側に送る時間的な余裕がないという問題が発生しつつあり、解析の精度と即時性の整合性が今後一層求められる状況になっている。

このように、リアルタイム地震防災システム全体の予測解析精度は、オフライン処理部分の解析精度とオンライン処理部分のデータの質に依存するようになっており、地盤データ・ベースも解析精度に併せて更新して行く必要があると考えられる。

オンライン処理である地震動データの場合は、何らかの障害によって、データがシステム側に送られない状況も十分予想され、それを考慮に入れたリアルタイム地震防災システムを構築する必要がある。

リアルタイム地震防災システムにおいては、対策による予測結果への修正のフィードバックが必ずあると考えられるが、これらのシステムが稼動し始めてから日が浅いため、このフィードバックの影響が実際にどのような形になるか現時点では予測し難い。オンライン処理で未経験の問題がフィードバックされた時、図-1(C)に示す解析(数値化)された地盤情報だけでは対応できないことも考えられ、より基本的な図-1(A)の地盤データ・

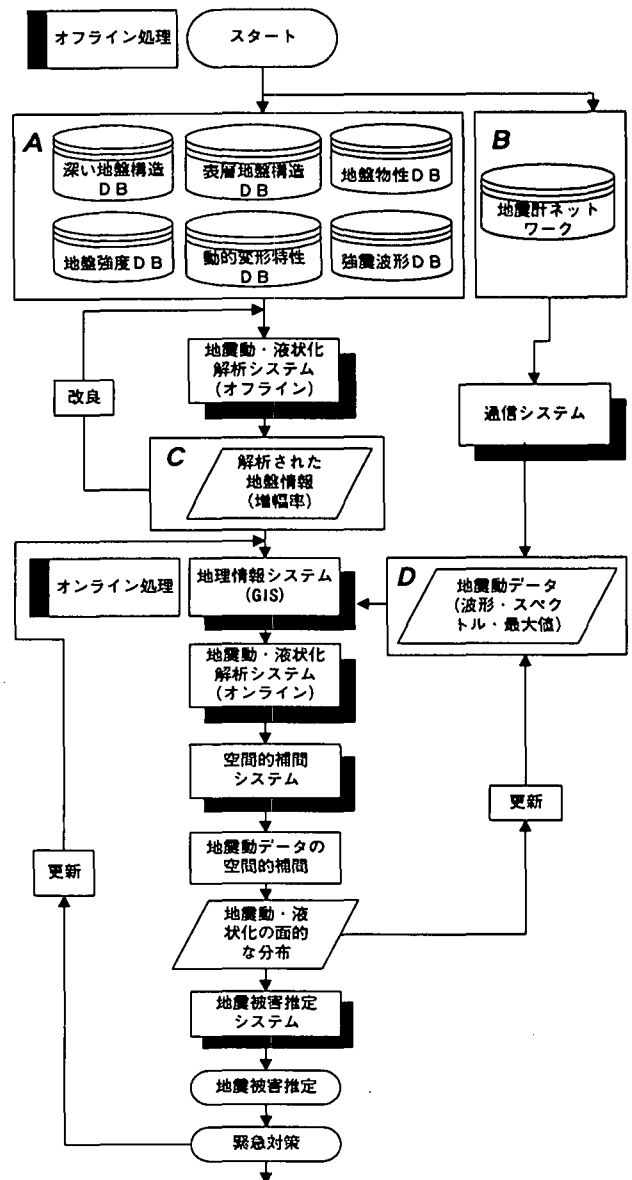


図-1 地盤データおよび地震動データの位置付け

ベースが重要な情報となってくる可能性もあると考えられる。

3. 地盤データ

3.1 地盤データの内容

実際にリアルタイム地震防災システムに利用されている地盤データの内容をここで紹介する。表-1にリアルタイム地震防災システムに利用される地盤データの状況を取りまとめた。この表で地盤データの種類・内容をグレード1~グレード3に分けたのは、国際土質基礎工学会の手法マニュアル³⁾に倣ったものであり、地盤データの状況をわかりやすく分類したものである。

1) グレード1

グレード1の概略予測においては、主に過去の被害履

表-1 リアルタイム地震防災システムに利用される地盤データの状況

項目 グレード	地盤データの種類・内容		データの利用に際しての	
	地震動予測	液状化予測	利点	欠点
グレード1 (概略予測)	情報	①過去の地震履歴の文献情報 ②小縮尺の地形分類図・表層地質図情報	①過去の液状化履歴文献情報 ②小縮尺の地形分類図・表層地質図情報	①結果の評価作業が少ない ①定性的でOn-line情報となっていない
	結果	→(a)地震動の大小の相対予測	→(a)液状化のしやすさの相対予測	
グレード2 (簡易予測)	情報	[I 国土数値情報] ①表層地質・地形分類情報(KS-156-1) ②標高情報(数値地図250mメッシュ標高) ③河川からの距離情報(流路位置KS-272) ④地質調査所1/100万地質図CD-ROM	[I 国土数値情報] ①表層地質・地形分類情報(KS-156-1) ②標高情報(数値地図250mメッシュ標高) ③河川からの距離情報(流路位置KS-272) ④海岸からの距離情報	①県域を越えた広域の一定グレードの情報 ②On-line情報として利用しやすい ①1kmメッシュ情報のためデータが粗い ②旧河道等の微地形情報は欠落する ③最新の地形変化に対応していない ④図幅ごとに地形分類の区分に差がある ⑤地盤の動的な非線形性の評価が不明確
	結果	→(a)平均S波速度の推定 →(b)距離減衰式による工学的地震基盤での最大速度の推定 →(c)表層地盤の増幅度の推定	→(a)微地形分類の推定 →(b)微地形分類から液状化危険度の推定	
グレード3 (詳細予測)	情報	①深度方向の地盤情報/柱状図/地質断面図/地下水水位情報 ②平面的な地盤情報/表層地盤情報/地下水分布情報 ③地盤の動的な物性情報/S波速度/変形定数/強度定数 ④地盤の物理試験情報/密度	①深度方向の地盤情報/柱状図/地下水水位情報 ②地盤の物理試験情報/密度/平均粒径/細粒含有率 ③地盤の強度定数/N値/液状化強度 ④地盤の変形定数/剛性率/減衰比/S波速度	①深度方向の地盤データが含まれる ②国土数値情報よりデータは細かい ③地盤の動的な非線形性がとり込める ①すべての情報は一般に公開されていない ②On-line情報とするのに費用がかかる ③情報の精度が平面的に一律でない ④県域より広域となると情報が整合しない
	結果	→(a)地震基盤での入力地震動の予測 →(b)表層地盤での増幅度の予測/等価線形法/非線形法	→(a)各種指針による液状化判定 →(b)有効応力法による液状化解析	

歴を用いて定性的な予測を行うための情報が主であり、結果の評価作業が楽であるが、その情報が定性的でオンライン情報になっていないというデータ利用上の欠点を持っていると考えられる。

2) グレード2

近年、グレード2の簡易予測のレベルで国土数値情報が使用されるようになってきた。国土数値情報は、客観的な地域計画策定のため基礎的な数値地理データとして国土庁と国土地理院によって整備されたものである。この中で、自然条件に関するものとしては、海岸域、地形、土地分類、湖沼、流域等および土地利用の6項目である⁴⁾。

基準地域メッシュの大きさは、緯度・経度等分割で緯度方向で30秒、経度方向で45秒(約1km×1km)であり、日本全国が約39万の基準地域メッシュに分割されている。

海岸線・標高・流域などは国土地理院発行縮尺2万5千分の1の地形図に基づいたもので、座標値で表現したベクトル型データで与えられる。また土地分類は国土庁の縮尺10万ないしは20万分の1の土地分類図に基づいたもので、基準地域メッシュごとにその属性が指定されたラスター型データで与えられる⁴⁾。

地震動予測の方法は、国土数値情報の地形分類情報と標高情報から、地盤表層の平均S波速度を推定し⁴⁾、平均S波速度と表層地盤の増幅度の関係と距離減衰式によ

る工学的地震基盤での最大速度の推定式より地表での最大速度を推定する⁵⁾。

液状化危険度の予測方法は、国土数値情報から対象地域の微地形分類を推定し、微地形分類と液状化を発生する最大速度の関係から液状化危険度を推定するものである⁶⁾。松岡・翠川は、さらに国土数値情報を用いて地震時斜面崩壊危険度予測も行い、地震ハザードの総合評価を最終的に行っている⁷⁾。

この方法の最大の利点は、県域を越えた広域での一定グレードの地盤データ情報が利用できる点であり、オンライン情報として非常に利用しやすい。逆に1kmメッシュの地形分類情報はかなり粗いものであり、旧河道等の微地形情報は欠落してしまう恐れがある。また地形分類をまとめられた図幅ごとに地形分類区分が異なっており、これらを修正するためには、かなり専門的な知識が必要と考えられる。さらにグレード2の簡易予測では過大な期待かもしれないが、地盤の動的な非線形性の評価が不明確であることが挙げられる。

3) グレード3

グレード3の地盤データとしては、従来地方自治体などを中心に行われてきた地震被害想定調査での地盤関係のとりまとめ結果となる。この地盤データの最大の欠点は、データが県域より広域となると情報が整合しないこ

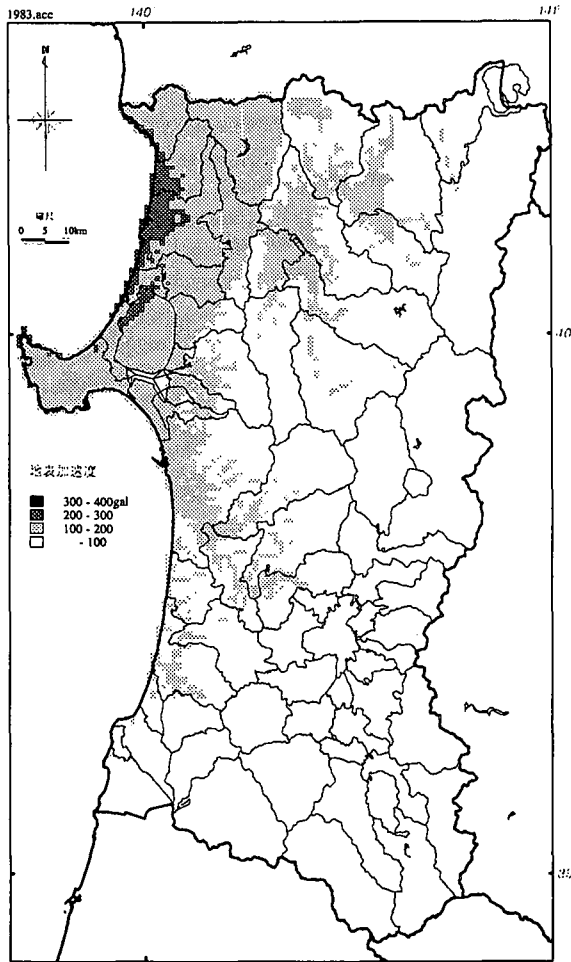


図-2 国土数値情報を利用した地震動予測結果

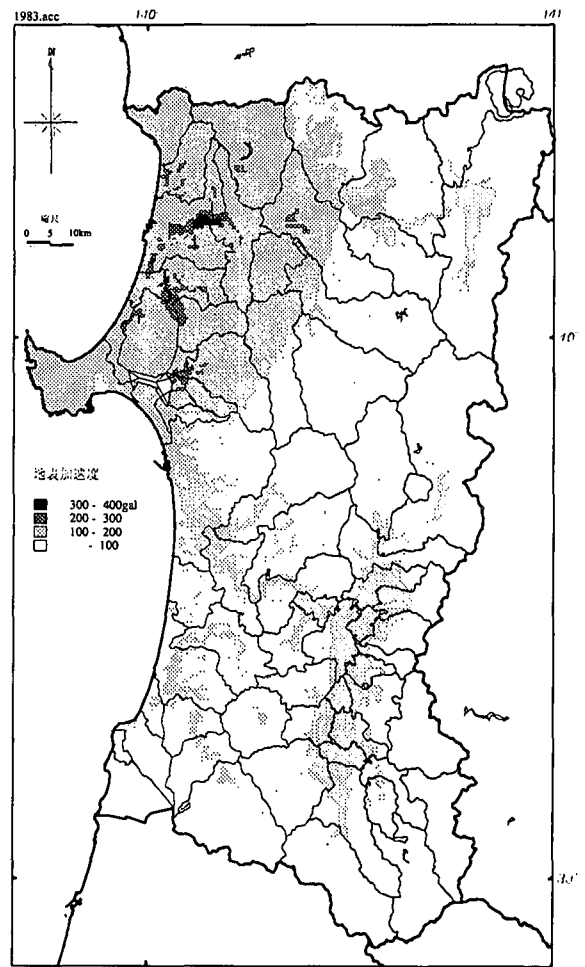


図-3 詳細な地盤データを用いた地震動予測結果

とであり、広域のリアルタイム地震防災システムを構築する際は、地盤データがより粗いデータに統一されることになり易いと考えられる。このグレード3の地盤データの利点は、深度方向の地盤情報が含まれること、また地盤の動的な非線形性が解析方法に応じて評価できることである。このグレード3の地盤データを用いた解析予測結果は、公表されているものが多いが、地盤データそのものをオンライン情報として公開しているところはまだ少ないと考えられる。

3.2 国土数値情報の利用について

ここでは、表層地盤の増幅度について国土数値情報からの地盤データを利用した方法と、表-1のグレード3の詳細な地盤データを用いた解析予測結果を比較して紹介する。

図-2は、1983年日本海中部地震を対象として国土数値情報を用いて解析したものであり、計算条件は以下に示すものである⁸⁾。

- ①地震基盤は、S波速度2.5km/sec層とした。
- ②基盤地震動は、翠川・小林⁹⁾、Kobayashi and Midorikawa¹⁰⁾の方法を用いて速度応答スペクトルおよび最大加速度を求めた。断層パラメータは、

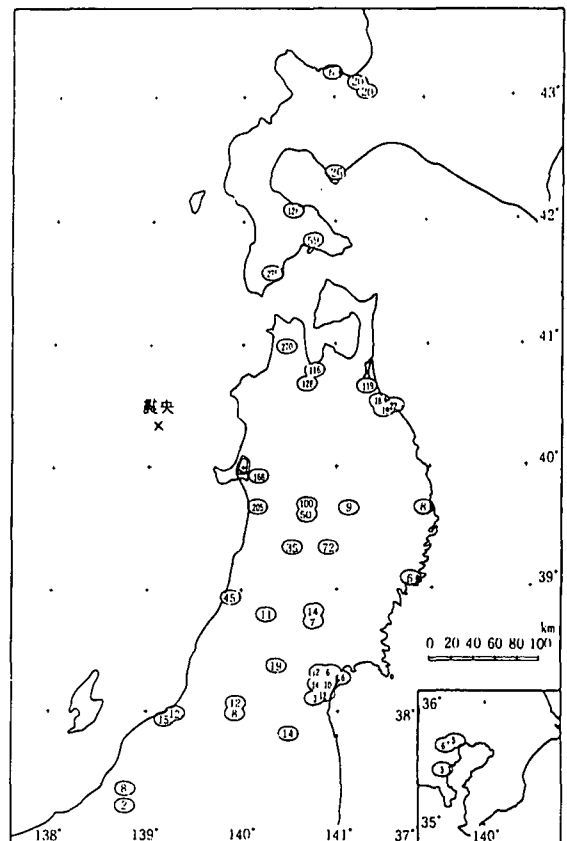


図-4 日本海中部地震における観測水平最大加速度分布

Fukuyama and Irikura¹¹⁾のものを中心に用いた。

③表層地盤は、国土数値情報を地盤データとして用いた。微地形分類と表層の平均S波速度の関係、平均S波速度と表層増幅度の関係を使って、増幅特性を評価した。

④表層の増幅度の算出は、基本的に松岡・翠川の方法⁵⁾を用いた。国土数値情報のデータの他に地質調査所による1/100万地質図のCD-ROMのデータも用いた。また国土数値情報の地形分類に関して、人工改変地および谷底平野の地盤情報を補足して加えた。このようにして作成した微地形分類図より平均S波速度を推定し、翠川・小林によるS波速度と増幅倍率の関係¹²⁾より、地表最大加速度を算出した。松岡・翠川の原論文⁵⁾では、最大速度を求めているが、今回は強震観測記録と比較するため、地表最大加速度を求めた。

一方、図-3は詳細な地盤データを用いた地表最大加速度予測結果である。基盤地震動の算出までは、国土数値情報を用いた解析①~②と同じ結果を用いている。地震基盤より上部の表層地盤の増幅度算出は、以下の方法による。

- a) S波速度 $V_s=700\text{m/sec}$ を境に表層地盤を深い構造と浅い構造に分けて評価した。
- b) 浅い構造は、主にボーリング資料に基づいて行われ、入力地震波を定めて等価線形法による地震応答解析を行い増幅度(伝達関数)と入力地震動の大きさの関係を地盤モデルごとに導いている。
- c) 深い構造については、重力探査結果、深井戸ボーリングなどのデータに基づいて、S波速度 1.5km/sec 相当層の深さ分布を求め、線形の伝達関数を算出した。
- d) 地震基盤における速度応答スペクトルと表層地盤の伝達関数を掛け合わせ、地表における500mメッシュごとの速度応答スペクトルを算出し、さらにこれから地表最大加速度を求めた。

図-4に日本海中部地震による観測水平最大加速度分布を示した¹³⁾。図-4と図-2および図-3を比較すると、やはり詳細な地盤データを用いた地震動予測結果の対応がよりよいものとなっている。国土数値情報を用いた地震動予測結果は、同じ微地形分類の地域が同増幅度となるため、強震地域が集中する傾向がある。また対象地域東南部の内陸盆地の地震動予測結果が図-3と異なる結果となっている。後者の結果は、国土数値情報の地形分類だけの解析の限界を示していると考えられ、地盤物性および地盤の深さ方向の情報の重要性を示唆している。しかしながら、国土数値情報による解析は、相対的に解析労力と解析結果のコストパフォーマンスが高い結果となっていると考えられる。

4. 地震動データについて

地震動データについては、前述したように地震計の数が多くなるにつれて、通信システムを介して波形のデジタルデータまでシステム側に送る時間的な余裕がないといった問題が生じつつあり、地震動の最大加速度、最大速度等のデータのみを送って、システムの即時性を保とうとする傾向もでてきている。

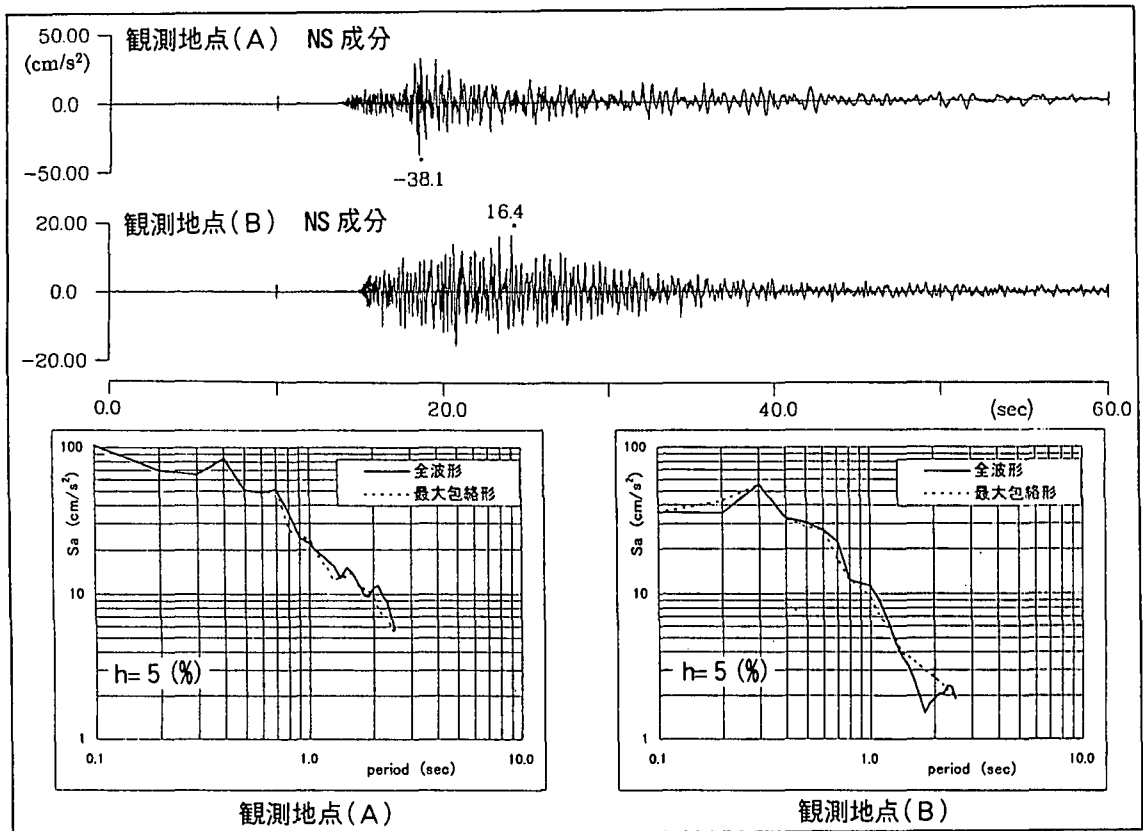
従来地震計で自動演算処理され伝送されている地震動の強さを表す指標は、計測震度、最大加速度、最大速度およびSI値などが多かった。最近では加速度応答スペクトルも地震計処理部で短時間に自動演算処理し、伝送する地震計が開発されている¹⁴⁾。この地震計では、地震検知後即時に加速度応答スペクトルも含めた5項目17成分の地震動データを伝送する。加速度応答スペクトルがリアルタイムで得られるようになったことから、リアルタイム地震防災システムでも周期特性が考慮できる地震動データが利用できるようになってくると考えられる。

この地震計の加速度応答スペクトルの演算は、気象庁計測震度計の演算に準じているため、10秒区間ごとに計算した結果の最大包絡形から全体の値を求めている。図-5は、1998年4月22日に三重・岐阜県境付近で発生したM=5.2の地震の観測記録である。同図では、2観測地点のNS成分の加速度波形および加速度応答スペクトルを示しており、加速度応答スペクトルは、10秒区間ごとの最大包絡形のものと同全波形から算出したものを比較している。2つの手法による加速度応答スペクトルは、ほぼ同じ結果となっており、即時性等を考慮すると十分リアルタイム地震防災システムのオンライン情報として利用できると思われる。

5. まとめ

本論文では、リアルタイム地震防災システムにおける地盤データおよび地震動データについて検討を行い以下の結論を得た。

- ①地盤データおよび地震動データを、リアルタイム地震防災システムの流れの中で位置付けた。地盤データは主にオフライン処理で、地震動データはオンライン処理で利用される。
- ②リアルタイム地震防災システムで利用される地盤データについて、グレードを区分してその状況をとりまとめた。現状、簡易予測の方法の中で国土数値情報が利用されてきたことが注目される。
- ③国土数値情報を用いた地震動予測と詳細な地盤データを用いた地震動予測の比較を、1983年日本海中部地震を対象として行った。この結果、国土数値情報を用いた場合、地形分類データからの解析の限界があり、地



図一五 応答スペクトル算出機能を有する地震計の記録例¹⁴⁾

盤物性の検討および深さ方向の地盤データが必要であると考えられる。しかしながら、広域のリアルタイム地震防災システムを考える場合、国土数値情報の優位性は明らかである。

④地震動データについては、オンライン処理であることから、加速度応答スペクトルを地震計処理部で短時間に自動演算処理し、即時に伝送する地震計を紹介し、その利用について検討した。

参考文献

- 1) 太田 裕：強震動の面的・即時的情報の地震防災における役割と期待，日本建築学会 第22回地盤震動シンポジウム講演集，pp.63-72，1994。
- 2) 金子史夫：サイスミックマイクロゾーニングにおける地震動評価の現状，日本建築学会 第22回地盤震動シンポジウム講演集，pp.3-12，1994。
- 3) Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, ISSMFE: Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards, pp.1-4, 1993.
- 4) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した地盤の平均S波速度の推定，日本建築学会構造系論文報告集，第443号，pp.65-71，1993。
- 5) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した広域震度分布予測，日本建築学会構造系論文報告集，第447号，pp.51-56，1993。
- 6) 松岡昌志，翠川三郎，若松加寿江：国土数値情報を利用した広域液状化危険度予測，日本建築学会構造系論文報告集，第452号，39-45，1993。
- 7) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した地震ハザードの総合評価，物理探査，第48巻，第6号，pp.519-529，1995。
- 8) 秋田県：秋田県地震被害想定調査報告書，平成9年3月，1997。
- 9) 翠川三郎，小林啓美：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定，日本建築学会論文報告集，第282号，71-81，1979。
- 10) Kobayashi, H., and S. Midorikawa: A Semi-Empirical Method for Estimating Response Spectra of Near-Field Ground Motions with Regard to Fault Rupture, Proc. 7th. European Conf. on Earthquake Eng., 2, 1982.
- 11) Fukuyama, E. and K. Irikura: Rupture process of the 1983 Japan Sea (Akita-Oki) earthquake using a waveform inversion method, BSSA, 76, pp.1623-1640, 1986.
- 12) 翠川三郎，小林啓美：震源域およびその周辺での地表面最大加速度分布の推定，日本建築学会論文報告集，第290号，pp.83-94，1980。
- 13) 株式会社 応用地質調査事務所：1983年5月26日日本海中部地震被害調査報告，pp.25-27，1984。
- 14) 小出栄治，池田善考，瀬川秀恭，原 徹夫，中出勝己：応答スペクトル算出機能を有する地震計と地震観測結果，社団法人 全国地質調査業協会連合会，全地連「技術フォーラム'98」講演集，pp.213-214，1998。