

地震動パラメータ推定手法の開発と 詳細地盤データの整備

蛭沢勝三¹、阿部一郎²、柴田勝之³

¹正会員 工博 日本原子力研究所 地震情報伝達研究特別チーム (〒319-1195 茨城県東海村白方白根 2-4)

²正会員 同上、³工博 同上

日本原子力研究所（原研）では、科学技術庁の「地震総合フロンティア研究」の一環として、地震観測ネットワークによる地震動観測データを利用して、震源及び地震動パラメータを迅速に推定する「地震情報緊急伝達システム」の研究開発に着手した。地震動パラメータ推定手法については、推定時間、推定パラメータの種類及び推定精度に対する要望がユーザーによって異なると考えられるので、これらの相互関係をトレードオフの関係として自由に選択できるような基本的考え方に基づき開発している。開発地震動推定手法を原研東海研究所周辺地域に適用し、想定大地震による地震動分布を把握するため、同地域の地盤データベースを整備中である。

Key Words: Real-time seismic disaster mitigation system, seismic monitoring network, earthquake ground motion, soil data

1. まえがき

1995 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震を契機に、初動対応や産業施設の地震防災の観点から、地震発生時に、正確且つ速やかに地震情報を通報できるリアルタイム地震情報システムの整備が急務になっている¹⁾。

日本原子力研究所（原研）では、科学技術庁の「地震総合フロンティア研究」の一環として、地震観測ネットワークによる地震動観測データを有効利用し、震源パラメータと都市及び産業施設の立地地域での地震動パラメータを迅速に提供する「地震情報緊急伝達システム」の研究開発に着手した^{2)、3)}。

この研究開発は、初動対応や被害推定のために必要な震源及び地震動パラメータの推定手法の開発を主な目的としている。上記システムは、これら推定手法やシステム内機能間の連携を検証するために開発する。これまでに、地震動パラメータ推定手法の開発に着手すると共に、同手法を原研東海研究所周辺地域へ適用するため、この地域の地盤データベースを整備中である。

手法開発については、防災科学技術研究所との共同研究として進めている。また、原研内に大学や産業界等の専門家からなる「地震情報緊急伝達法等研究専門部会（部会長：京都大学防災研究所亀田弘行教授）」を設置し、

専門家の意見を十分に反映しつつ進めている。

本報では、地震動パラメータ推定手法及び地盤データ整備内容について述べる。

2. 地震情報緊急伝達システムの概要

地震情報緊急伝達システムは、図 1 に示すように地震動伝送（本来地震動観測ネットワークに相当するが、ここでは研究開発用の複数の地震計程度のものを想定）、地震動収集、震源・地震動パラメータ推定、地震情報発信、地震情報受信及び地震情報表示/利用の各サブシステムからなる。これらのうち、機能的に関連するサブシステムを地震動伝播・収集フレーム、震源・地震動パラメータ推定フレーム及び地震情報発受信・表示/利用フレームに大別し、それぞれの概要について述べる。

・地震動伝送・収集フレーム

地震動伝送・収集フレームでは、地震観測ネットワークによる地震動観測データを地震動収集サブシステムへリアルタイムで伝送し、収集したデータのフォーマットの統一やノイズ・ドリフト等への対応を行う。

同フレームにおいては、ネットワーク間の異なるフォーマットの一元化機能や地震波形のノイズ・ドリフト等への対応機能を検討し、整備する。また、リアルタイム

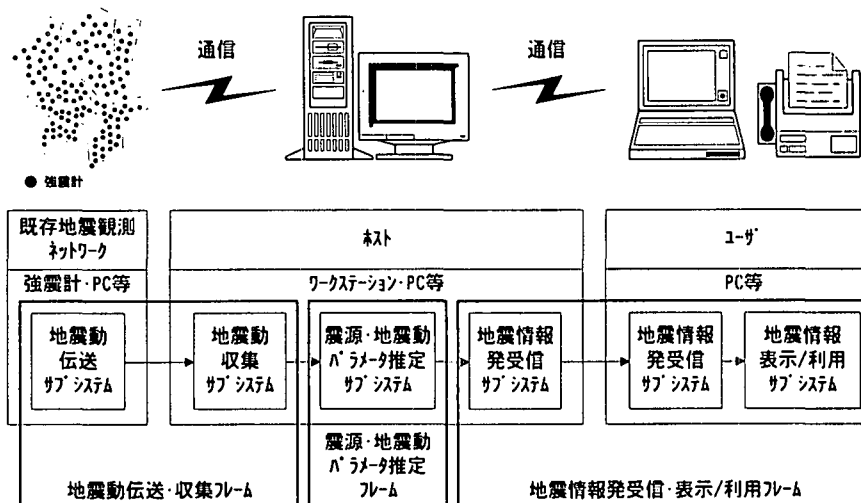


図1 地震情報緊急伝達システムの構成

伝送を目的としていない既存の地震動観測ネットワークの代表的なものを対象として、リアルタイム化技術や伝送ネットワーク上の代表的施設の地震動下での信頼性を検討する。

・震源・地震動パラメータ推定フレーム

震源・地震動パラメータ推定フレームでは、地震動観測データを用いて、震源・地震動パラメータを迅速に推定する。

同フレームにおいては、震源パラメータ（震源位置・規模）を1分以内で、断層パラメータ（地震モーメントやコーナ周波数等）を2分以内で推定する手法と地震動パラメータを迅速に推定する手法を開発する。地震動パラメータ推定手法の詳細については、3章で述べる。

・地震情報発受信・表示/利用フレーム

地震情報発受信・表示/利用フレームでは、震源・地震動パラメータ等の地震情報をユーザへ発信し、ユーザ側で表示装置へ表示し、利用する。

同フレームにおいては、発受信に関する地上回線、無線、衛星等複数の通信手段と、Fax、モニター等の表示装置との最適組み合わせについて、経済性、信頼性及び伝送速度等の観点から検討する。地震情報や地理情報システム（GIS）データが、時空間的に常に更新され、平常時、緊急時を通して常に活用されていることの重要性が指摘されている⁴⁾。そこで、このような概念に基づき開発されているGIS⁵⁾とのインターフェースを検討する。

3. 地震動パラメータ推定手法の開発

（1）開発上の基本的考え方

地震動パラメータ推定手法開発上の基本的考え方は、

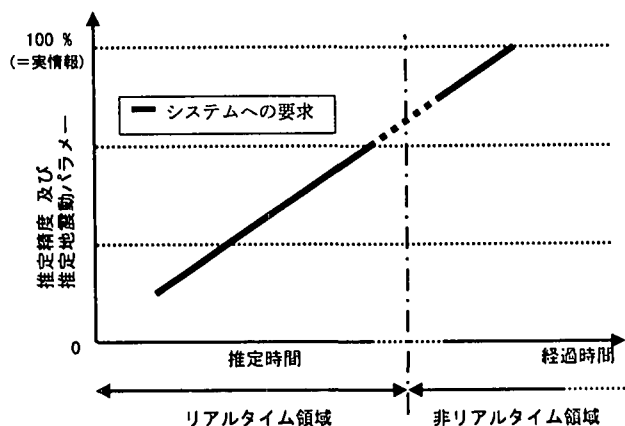


図2 推定時間と推定地震動パラメータの種類及び推定精度との相互関係

以下の通りである。

・推定時間と推定地震動パラメータ及び推定精度との相互関係をトレードオフ関係として提供：

地震動パラメータを必要とするユーザーは、行政分野から産業分野、及び一般市民までと広範である。そのために、ユーザーによって、推定時間、推定地震動パラメータの種類及び推定精度に対する要望が異なると考えられる。そこで、地震動到達から数十分以内を目途に、推定時間と推定地震動パラメータの種類及び推定精度との相互関係を図2に示すようなトレードオフの関係として自由に選択できるような機能を有するものとする。

・詳細な地盤情報の事前整備に基づく詳細地震動情報の提供：

兵庫県南部地震での“震災の帯”は、表層地盤の非線形性や基盤の不整形性による地震動増幅によってもたらされたと考えられているので⁶⁾、地震防災の観点から地盤情報を事前に如何に整備しておくかが重要となる。そのために、表層地盤の非線形性や基盤の不整

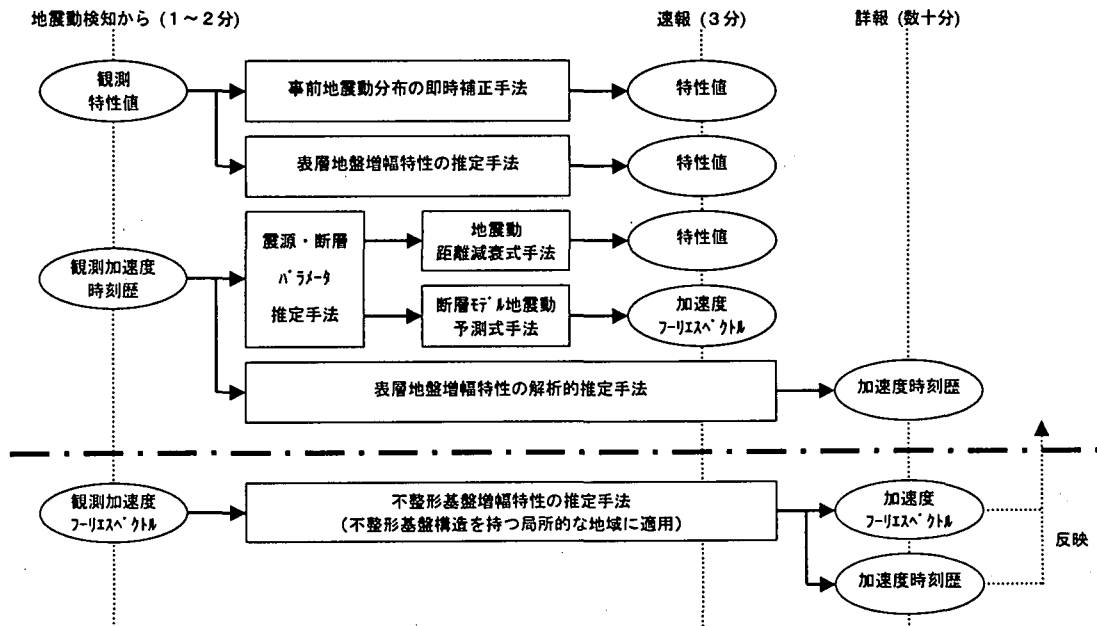


図3 地震情報緊急伝達システムの地震動パラメータ推定手法の構成

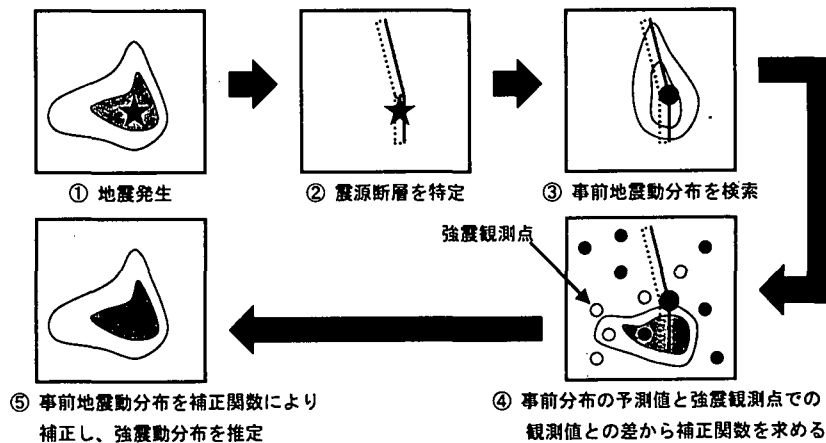


図4 事前地震動分布の即時補正手法の手順

形性に関する詳細な地盤データを事前に整備しておき、これらを地震動分布推定に十分反映し得るような機能を有するものとする。また、対象地域での想定地震による地震動分布を事前に整備しておき、これらを迅速に補正して地震動分布を推定し得るような機能を有するものとする。

(2) 推定手法の内容

上記考え方を反映した地震動パラメータ推定手法の手順と推定時間の目安及び推定地震動パラメータの種類を図3に示す。以下、各手法の内容について述べる。

a) 事前地震動分布の即時補正手法⁷⁾

事前地震動分布の即時補正手法の手順を図4に示す。まず、地震動観測データから震源位置、マグニチュード、方向等を推定する。これらを用いて、想定地震を対象として事前に求めておいた地震動予測分布（特性値：最大加速度、速度、変位、震度、液状化指数等）を検索する。

次いで、検索地震動予測分布（特性値）と地震動観測データ（特性値）との差異から補正関数を求める。この関数により事前地震動分布を補正して、任意地点の地震動分布（特性値）を推定する。事前地震動分布は、長周期（1秒以上）の強震動を3次元差分法で、短周期（1秒以下）の強震動を断層モデルによる地震動予測法でそれぞれ評価し、足し合わせて求める。

b) 表層地盤増幅特性の推定手法

表層地盤増幅特性の推定手法では、表層地盤による地震動増幅特性を増幅率関数として事前に整備しておき、これらに地震動観測データ（特性値）を乗除することによって任意地点の地震動分布（特性値）を推定する。増幅率関数は、中～大規模地震や近～中距離地震による地震動を統計的グリーン関数法によって作成した上で、種々の地盤を対象とした地震応答解析を行い、地盤特性毎に求める。

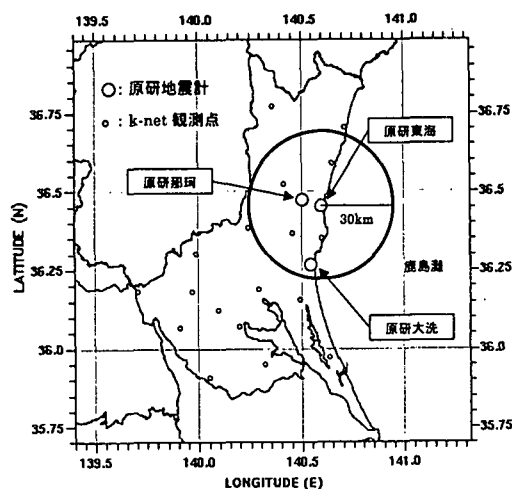


図5 地震動パラメータ推定手法の適用対象地域

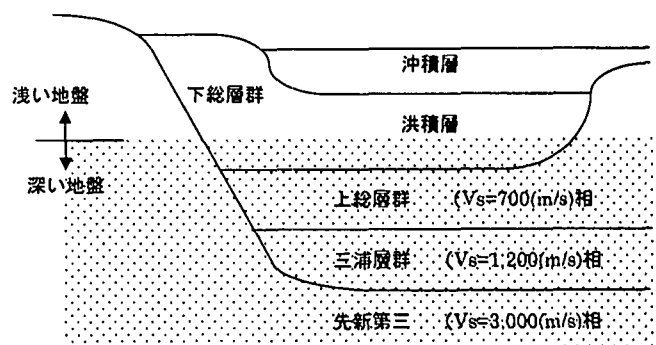


図6 適用対象地域及び周辺地域の地盤構造の模式図

c) 地震動距離減衰式手法

地震動距離減衰式手法は、地震動観測データから震源パラメータ（震源位置、マグニチュード）を推定し、これらを用いて距離減衰式から任意地点の地震動分布（特性値）を推定する。

d) 断層モデル地震動予測式手法

断層モデル地震動予測式手法は、地震動観測データから断層パラメータ（地震モーメント、及びコーナ周波数）を推定し、これらを用いて理論震源特性式から震源特性を求め、既知の伝播特性及びサイト増幅特性に乗じて、任意地点の地震動分布（加速度フーリエスペクトル）を推定する。

e) 表層地盤増幅特性の解析的推定手法

表層地盤増幅特性の解析的推定手法では、地震動観測データ（加速度時刻歴）を用いて、1次元等価線形解析によって工学基盤での地震動を求め、空間補間した後に、1次元等価線形解析によって任意地点での地震動分布（加速度時刻歴）を推定する。解析手法は、SHAKE 及び FDEL コードに組み込まれている手法の長所を反映して開発する。

f) 不整形基盤増幅特性の推定手法

不整形基盤増幅特性の推定手法は、局所的な不整形基盤構造による地震動の増幅分布を推定する。同手法では、地震動観測地点及び任意地点での表層地盤による地震動増幅特性を1次元伝達関数として、基盤の不整形性による地震動増幅特性を2次元伝達関数としてそれぞれ事前に整備しておく。これらと地震動観測データ（加速度フーリエスペクトル）を用いて、任意地点の地震動分布（加速度フーリエスペクトル）を推定する。

(3) 推定手法の検証

(2) の推定手法のうち、a)、b)、e)、f) の各手法の検証は、兵庫県南部地震で得られた地震動データや整備された地盤データを用いて行う。

4. 地震動パラメータ推定手法の地域への適用と詳細地盤データの整備

(1) 対象地域

地震動パラメータ推定手法の適用対象地域は、図5に示す原研東海研究所周辺 30 km 四方の地域である。選定理由は、地域内に原研東海、那珂、大洗各研究所の研究用原子炉施設があり、それらの耐震設計のために詳細な地盤データが整備されており、更に我が国有数の地震発生地域の鹿島灘に面しているためである。

(2) 実施項目

対象地域での主な実施項目は、以下の通りである。

- ・ 詳細地盤データの整備
 - ・ 地震動パラメータ推定手法の整備
 - ・ 想定地震による 500m メッシュの地震動分布の事前推定
 - ・ 500m メッシュの表層地盤増幅率関数の推定
 - ・ 断層モデル地震動予測式の作成
 - ・ 局所的な不整形基盤構造地域での地震動増幅特性の推定
 - ・ 地盤データの精度を変えた場合の地震動パラメータ推定精度への影響とパラメータ推定時間の確認
- 以下、これら実施項目の内容について述べる。

(3) 詳細地盤データの整備

a) 対象地域の地盤構造の概要

対象地域及び周辺地域の地盤構造の模式図を図6に示す。地盤構造は、浅い地盤と深い地盤に大別される。浅い地盤は、沖積層及び洪積層である。深い地盤は、先新第3系の花崗岩類、変成岩類（せん断波速度 V_s : 3000 m/sec 相当）上に三浦層群相当層 (V_s : 1200 m/sec 相当) が、更にその上に上総層群相当層 (V_s : 700 m/sec 相当) が分布した構造となっている。

表1 対象地盤の土質名または地質名

土質名または地質名				
沖積層	盛土	洪積層	区分不能な上部更新統	
	有機質土		上下総層群相当層	
	粘性土		上総層群相当層	
	砂質土	第三紀	新系岩第堆三積	強風化 風化 新鮮
	礫質土		新系岩第火三山	強風化 風化 新鮮
	崩積土・崖錐		花崗岩類	強風化 風化 新鮮
	関東ローム		変成岩類	強風化 風化 新鮮
	粘性土	基盤岩類	成類	新鮮
	砂質土			
	礫質土			

b) 対象地盤深さ、メッシュサイズ及び地盤パラメータ

対象範囲の地盤深さは、陸域及び海域共に、 V_s : 3000 m/sec の基盤まで、地盤データのメッシュサイズは、500 m メッシュとした。地盤パラメータは、地震動伝播解析に必要な次のものとした。

・陸域

- ・浅い地盤: N 値、密度、せん断波速度、等価せん断剛性率—せん断ひずみ曲線、減衰定数—せん断ひずみ曲線、液化強度を求めるための平均粒径(D_{50})等の定数

- ・深い地盤: 密度、せん断波速度、 V_s : 700、1200、3000 m/s 各層上面の深度

・海域

陸域と同様条件

c) 使用地盤データ

使用地盤データのうち陸域については、茨城県内のボーリングデータ等に基づく公表地盤図及び地質解析データ^{8)・9)}や原研でのボーリングデータ等に基づく地盤データを用いた。参考として、k-net のボーリングデータ¹⁰⁾を使用した。海域については、東海第2原子力発電所設置許可申請書内の地盤データ¹¹⁾を参考として用いた。

これら地盤データのうち、茨城県内のデータの多くは、 N 値 30~50 回 (V_s : 300~500 m/sec) 程度の工学基盤までのものである。一方、原研のデータは、深尺のボーリング調査、PS 検層、ボーリングコアによる室内土質・岩石試験、浅層反射法探査等に基づいたものであり、精度が高い。

工学基盤までの地層境界深度、地質分布、せん断波速度等については、県内データと原研データは調和しているが、深い地盤についてはかなり異なっている。

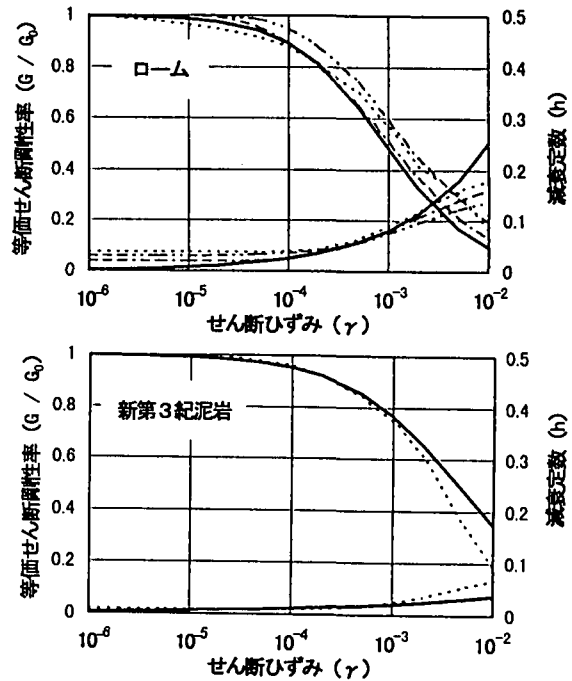


図7 等価せん断剛性率・減衰定数—せん断ひずみ曲線

d) 地盤のモデル化と基盤の不整形構造例

地盤のモデル化に当たっては、地盤を浅い地盤と深い地盤に大別した。

浅い地盤のモデル化では、地域内の類似地盤を集約し、地盤資料・表層地質・微地形区分・地質断面図等から対象地域に分布する地形や地質及び地層構成を明らかにした。次いで、地層構成の同じようなものや地震動の応答が同様になるものを集約して、136 種類の地盤モデルを作成した。表1に地盤分類の主な種類を示す。図7に等価せん断剛性率—せん断ひずみ曲線、減衰定数—せん断ひずみ曲線の例を示す。

深い地盤のモデル化では、地盤を上総層群相当層、新第3系堆積岩、新第3系火山岩、花崗岩類、変成岩類に分類し、各地盤毎に、密度及びせん断波速度を設定すると共に、各層上面の深度を設定した。3. (2)f) の不整形基盤増幅特性推定手法を地域内に適用するために、深い地盤データを用いて、基盤の不整形構造箇所を調べた。不整形構造とみなし得る箇所の例を図8に示す。

(4) 地震動パラメータ推定手法の整備

a) 主な手法の整備内容

・事前地震動分布の即時補正手法

原研東海研究所周辺地域の活断層、リニアメント及び歴史地震を対象として、各種断層パラメータを仮定した上で断層モデルによる強震動予測手法¹²⁾によって地震動を作成する。これらの地震動と上述(2)の地盤データから作成した3次元差分地盤モデルを用いて、原研東海研周辺 30 km 以内 500 m メッシュの地震基盤での地震動分布を推定する。

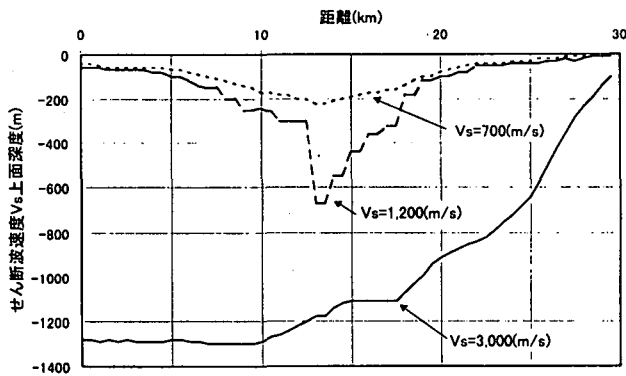


図8 適用対象地域内での基盤の不整形構造箇所例

・表層地盤増幅特性の推定手法

上述(2)の地盤データを用いて、表層地盤増幅率関数を推定する上での地盤分類を行い、500 m メッシュの増幅率関数を求める。これらの関数と上記地震基盤での地震動を用いて、500 m メッシュの地震動分布を推定する。

・断層モデル地震動予測式手法

原研大洗サイトを対象とした断層モデル地震動予測式を大洗研の鉛直アレー観測¹³⁾と周辺気象庁サイトでの地震動データを用いて、インバージョン解析によって求めた¹⁴⁾。これを任意地点に適用できるようにするために、大洗研周辺の k-net と上記鉛直アレーの地震動データを用いて、インバージョン解析によって各観測点での地盤増幅特性を求めた。これを上記表層地盤増幅率関数推定での地盤分類結果を参考として、任意地点に当てはめる。

・不整形基盤増幅特性の推定手法

図8の不整形性構造を対象として、表層地盤の1次元伝達関数と不整形性基盤の2次元伝達関数を求める。これら関数と上記地震基盤での地震動を用いて、500 m メッシュの地震動分布を推定し、地震動増幅特性を求める。

b) 推定手法の機能確認方法

上記推定手法の機能確認は、原研東海、那珂、大洗の各研究所内に設置している地震計や k-net 観測点での地震動観測データを、任意地点の地震動パラメータ推定用と推定結果確認用に分けて、推定結果と確認用データとを比較することによって行う。

(5) 地盤データの精度を変えた場合の地震動パラメータ推定精度への影響とパラメータ推定時間の確認

地盤データの精度を変えた場合の地震動パラメータ推定精度への影響評価は、上記(3)a)で述べた3次元差分地盤モデル、表層地盤増幅率関数及び不整形基盤の2次元伝達関数の評価精度を何段階かに粗く設定することによって行う。同様に、地震動パラメータ推定時間の確認も評価条件を変えることによって行う。

5. あとがき

本報では、地震動パラメータの推定手法及び詳細地盤データの整備内容について述べた。今後は、原研東海研究所周辺の想定地震を対象として、これらによる地震動分布の事前推定を行う。また、これらと地盤データを用いて、地盤データの精度を変えた場合の地震動パラメータ推定精度への影響と地震動パラメータ推定時間の確認を行う。

謝辞：地震動推定手法の開発では、(財)大阪土質試験所の香川敬生氏、佐藤工業(株)末富岩雄氏、(株)大林組の栗本修、竹内義高両氏、地盤データの整備では(株)応用地質の山本明夫氏の協力を得た。感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 山崎文雄：リアルタイム地震防災システムの現状と展望、土木学会論文集、No. 577/I-41、1997年。
- 2) 蛭沢勝三、柴田勝之、村松健、梅本通孝：耐震安全・防災フロンティア研究の概要、地球惑星科学関連学会 1998 年合同大会、Ad-008、1998年5月。
- 3) 日本原子力研究所：地震情報緊急伝達システムの研究開発—原研のリアルタイム地震防災研究—、SEISMO、1998 VOL. 2 NO. 8、1998年8月。
- 4) 亀田弘行、角本繁、大野茂樹他：阪神・淡路大震災下の長田区役所における行政対応の情報化作業とその効果分析—リスク対応型地域空間情報システムの提言—、京都大学防災研究所総合防災研究報告、第1号、平成9年3月。
- 5) 岡本茂明、滝野秀一、谷口時寛他：多次元時空間 GIS のソフトウェア部品の開発—DiMSIS-EX—、第8回機能図形情報システムシンポジウム、1997年4月。
- 6) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震災害調査速報、1995年3月。
- 7) 赤澤隆士、香川敬生：強震動予測に観測情報を導入した即時地震動分布推定、第2回都市直下型地震災害総合シンポジウム、1997年。
- 8) 建設省計画局、茨城県 編集：茨城県水戸・日立地区の地盤、都市地盤調査報告書、第20巻、1969。
- 9) 国土庁土地局国土調査課 監修：土地分類図(茨城県)、1973年復刻版、縮尺 1/200,000、1991。
- 10) 木下繁夫：地震観測に基づく観測点特性と経路減衰特性の評価、地震2、46、1993。
- 11) 日本原子力発電(株)：東海第2発電所原子炉設置変更許可申請書、平成9年9月。
- 12) 入倉孝次郎：地震防災を目的とした地震動情報の即時伝達システムに関する研究、平成7年度～平成9年度科学研究費補助金研究成果報告書、平成10年3月。
- 13) 蛭沢勝三他：硬質地盤における鉛直アレー観測で得られた地震動特性、第23回地震工学発表会、1995年7月。
- 14) 蛭沢勝三他：断層モデルによる地震動予測式の作成法—概要—、土木学会第51回年次学術講演会、I-B210、1996。