

SSS023-01

会場:国際会議室

時間:5月23日 08:30-08:45

直下型巨大地震による原発災害とその回避案

The nuclear power plant disaster accompanying a great earthquake and the plan to avoid the disaster

高橋 耕三^{1*}

Kozo Takahashi^{1*}

¹なし

¹None

[はじめに] 地震国である我国では原発は設置すべきではないと内外から言われているので、直下型巨大地震による原発災害の定量的検討を試みると共に、その回避方法を提案する。{cr/}

[原発災害] 幸か不幸か、地震による原発災害を予測できる事故例がこれまでに知られている。{cr/}

1979/03/28にThree Mile Island 2号炉で、点検後のBackup Pompの出力弁の開け忘れが原因となって、事故後、数分で炉心溶融が始まったため、圧力容器格納容器に穴があくか、これらが蒸気爆発で破壊され、Chernobyl 4号炉の1000倍程度の放射性物質が噴出すると推定され(1000倍の根拠: Chernobylの原子炉は1661個のセルからなり、そのうちの一個が爆発し、現在も99.9%以上の放射性物質は石棺の中に残っている)大規模な避難が行われた。幸い、炉心溶融は上半分で済んだため、放射性物質の漏洩は小規模に留まった。なお、我国でも、1991/02/09に関西電力美浜2号炉で、点検後に給水Pompの出力弁を開け忘れていたため、危うく大事故になるところであった。{cr/}

1986/04/26にChernobyl 4号炉が暴走し、核爆発に至った。惰性による発電量測定のため、原子炉は極低出力で運転され、測定は無事終了し、原子炉を完全に停止するため制御棒の一斉挿入ボタンを押した途端、暴走が始まり爆発に至った。地震時の緊急停止と同じ操作が核爆発の引き金となったが、我国の原発では、制御棒の一斉挿入による暴走にたいする対応策は取られているとのことである。事故の遠因は、運転規則に無い状態が生じたため、若しくは手順書の不備とするのが妥当であろう。原発事故ではないが、類似の事故として、1999/09/30の東海村でのウラン加工施設の臨界事故があり、遠因は実情にそぐわない安全基準にあったと言われている。{cr/}

上記の事故は、いずれも些細な過失が遠因であり、大地震に遭遇して初めて気付く過失が多々あることを示唆している。{cr/}

中部電浜岡原発は0.15 g以上の加速度を検出すると、1.5秒で自動的に全制御棒の挿入を終え、その後の最大加速度が2 g以下ならば正常に停止することになっている。しかし、岩手県内陸南部地震(2008/06/14、M 7.2、深さ: 8 km、I: 6強)の際、震源距離8.5 kmの一関西では、最大加速度4.1 gを観測しているため、原発が2 g以上の衝撃を受ける可能性もある。2 g以上の地震動で、原発の給水管蒸気管の破断、炉心冷却系の破損、停電(補助電源破損)がほぼ同じ確率で起き、炉心が蒸気中に露出すると、風向きによっては、我国の人口の半分近くが移住しなければならないことになる。{cr/}

浜岡の直下15 kmがM 8.2の震源の場合は、震源が近いので、初動が強い衝撃波となり、衝撃で原子炉に大量の水漏れが発生すると同時に制御棒挿入機構が壊れ、全出力運転状態で空焚きになると、炉心全体が直ちに溶融する。炉心全体が溶融すると、ウラン(U)・プルトニウム(Pu)の比重は大きいので、高温高密度の大量のUPuが下部に集まり、Chernobyl 4号炉のように原子炉は暴走し、ウラン爆弾並みの核爆発が誘発されることになる。{cr/}

[対策案] 上記の災害が100年以内に発生する確率は十万分の一以下でも、被害額の期待値は10億円以上となるため、数億円以下のシステムでの予知が可能ならば、予知は有意義となる。大地震の前には異常電界が観測されているから、落雷地点同定システムと共用の電界観測による直前予知システムの構築が原発災害回避に最も有効であろう。電界観測による予知では、正確な発生日時の予知は期待できないが、誤差約10 kmでの震源域の同定は可能となる。震源域が原発から100 km以上離れていれば、Mが8.2程度であっても、地震動の最大加速度は2 g以下となるため、原発災害が発生する可能性は無くなり、地震前に何日も原発を徒に休止する必要も無くなる。

キーワード: 原発災害, 巨大地震, 直下型地震

Keywords: nuclear power plant disaster, great earthquake, earthquake directly under the plant

地震に起因する人間被害の学際的研究(7) 瑞浪市における救急活動対応力の改善 Transdisciplinary Study on Earthquake-related Diseases (7) For Improving Emergency Ambulance Activities

太田 裕^{1*}
Yutaka Ohta^{1*}

¹ 東濃地震科学研究所

¹Tono Research Inst of Earthq Science

1. はじめに

この大きな課題の下で近年は地震時の救急車の活動対応力について考察を続けており、今回はその続報である。事例研究の対象となる瑞浪市 - 研究所が立地 - は全国基準を上回る、救急車3台を運用しており、平常時の119番 call に対する出勤対応率は優に80%を超える良好な状況を保持している。しかし、やがて来る地震時にはこれが10%程度にまで急減することがシミュレーションを通じて明らかになる等、問題を内蔵している。今回は、この問題の解決に向けて119番 call を半減させ、また出勤から帰還までの時間を半減させる等の戦略を考えることで事態改善の可能性を Simulation 的に探った。しかし、このような戦略の実現可能性について深く議論するまでには至らなかった。今回は救急活動のさらに詳しい資料を入手し、分析することでこの問題改善への実際の方途にまで立ち入って考究した。

2. 資料の入手と分析の実施

瑞浪市においては119番 Call にもとづく年間出勤数は1400回を越えている(住民30人当たり1回相当)。出勤毎の所要時間を「出発から現場到着までの時間」、「現場滞在時間」、「現場から病院までの時間」、「病院滞在時間」および「病院から帰還に至るまでの時間」に詳細区分した資料を瑞浪市消防本部の好意によって入手した。その上で、これらのうち特に重要となる「現場滞在時間」、「病院滞在時間」の両者に注目し、搬送患者の重症度等との関係に留意して検討を行った(他の諸量は移動距離に比例的に変化し、操作の余地はほとんどない)。

特に、前回までの結果を考慮に入れながら、需要(=119番 Call)と供給(=出勤)のそれぞれについて回数の低減そして時間短縮の可能性に注意しながら、集計と分析を実施した。まず、需要側については119番 Call にもとづく重症度別の出勤回数をカウントし、これを低減させる可能性について検討した。一方、供給(出勤)側については現地滞在時間および病院滞在時間の両者について基本統計量を計量し、それらを搬送患者の重症度との関係で整理した。

3. 結果

重症度別にみると、特に軽症者については想定される発症数をかなり下回った形で119番 Call が行われており、地域住民が既に相応の自己規制を行っていることがハッキリした。一方、現場滞在時間・病院滞在時間のいずれもが重症度とはほとんど関係がないこと、具体的には軽症者の場合でも中等症・重症患者と同じ程度の時間を要していることが判った。これは、救急車が文字通り救命救急に直結する「生命保全支援資源」であることを思い起こせば、以下のような判断を導入すべきことを強く思わせる結果でもある。端的にいえば、平常時はともかく地震等の異常時にあって、需給関係全体の改善に資するためには「軽症者を運ばないこと」が重視されるべきことを強く想起させる結果であり、これはまた前回提案した戦略の具体手順ともなっている。

この視点に則った Simulation を実施することで、この効果の程をあらためて確認した。また、このような結果が瑞浪市の特異事例でないことを確かめ、蓋然性を確認すべく、地震襲来切迫性の一段と大きい静岡地域について補足調査と分析を実施した。

文献

太田 裕 (2010), 地震に起因する人間被害の学際的研究(6) - 岐阜県瑞浪市における救急活動対応力のシミュレーション的評価 -, 2010年秋季地震学会(広島)。

キーワード: 地震時人間被害, 重症度, 救急活動, 対応力改善, シミュレーション

Keywords: Earthquake-related Health Consequences, Seriousness Level, Ambulance Activity, Call-response Rate, Simulation

強震動予測手法に関するベンチマークテスト (その6: 理論的手法、ステップ3・4) Benchmark Tests for Strong Ground Motion Simulations (Part 6: Theoretical Methods, Step 3 & 4)

久田 嘉章^{1*}, 永野正行², 野津 厚³, 宮腰 研⁴, 中川太郎⁵, 浅野公之⁶

Yoshiaki Hisada^{1*}, Masayuki NAGANO², Atsushi, NOZU³, Ken MIYAKOSHI⁴, Taro NAKAGAWA⁵, Kimiyuki ASANO⁶

¹ 工学院大学, ² 東京理科大学, ³ 港湾空港技術研究所, ⁴ 地域地盤環境研究所, ⁵ フジタ, ⁶ 京都大学防災研究所

¹Kogakuin University, ²Tokyo University of Science, ³The Port and Airport Research Institute, ⁴Geo-Research Institute, ⁵Fujita Corporation, ⁶Disaster Prevention Research Institute

1 はじめに

前報(久田・加藤・吉村ほか、2010; 久田ほか、2011)に引き続き、2010年度に実施した3手法(理論的手法・数値解析手法・統計的グリーン関数法)のうち、本報(その6)では理論的手法による強震動予測手法に関するベンチマークテストの結果の報告を行う。さらに、(その7)では数値解析手法、(その8)では統計的手法に関する報告を行う。本ベンチマークテストは、強震動計算の分野の第一線で活躍する研究者・実務者の参加により、同じ条件で様々な手法・計算コードの結果の相互比較を行い、その適用範囲やバラツキを検討を行い、使用したデータ・結果、マニュアルを公開すること目的とした3年間のプロジェクトとして実施している。

2 理論的手法による強震動予測手法に関するベンチマークテスト(ステップ3、ステップ4)

表1と表2に2010年度に実施した理論的手法によるベンチマークテスト(ステップ3・4)の概要と地盤モデルを示す。2009年度に実施したステップ1・2の2層の平行成層地盤モデルに加え、工学的基盤までの4層地盤モデルを対象としている。ステップ3では、単純なガウス型関数のすべり速度を持つ点震源とし、深さ2 kmと地表の場合、減衰の有無の3種のモデルを課題とした(T31-T33)。一方、ステップ4では、中村-宮武型のすべり関数を持つ横ずれ断層モデルとし、地中断層(T41-T43)と地表断層(T44)を対象とした。破壊伝播に関しては、1kmメッシュサイズの小断層ごとに離散的なケース(T41, T42)と連続なケース(T43)を設定し、さらに離散的な場合は、一定の破壊伝播速度を与える場合(T41)と、3種のランダムな破壊開始時間を与える場合(T42)を設定した。

3 参加チームと実施結果

各ステップの参加チームと用いた手法は以下の通りである。ステップ3では、久田(工学院大、波数積分法)、永野(理科大、薄層法)、野津(港湾空港技術研究所、離散化波数法)、宮腰(地域地盤環境研究所、離散化波数法)、中川(フジタ、波数積分法)の5チームが、一方、ステップ4では久田・永野・中川の3チームが、それぞれ参加した。

ステップ3・4ともに、実用上、参加者間の結果はほぼ同等の結果を得た。特にT31、T41、T43における減衰のある地盤モデルでの地中震源・地中断層による結果はほぼ完全に一致した。一方、T32の無減衰地盤の場合は大きなQ値などで近似する必要があり、震央距離10 km以内では互いに一致したが、100 kmなどの遠方では表面波の振幅の差が現れた。またT33やT44の地表震源・地表断層では、条件通りに地表に震源を設定した場合と50 m程度の深さで近似した場合で、遠方では表面波に振幅の差異が見られた。

4 おわりに

より詳細な内容や結果は下記ページを参照されたい。

<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/test/home.htm>

2011年度には現実に近い地盤モデルと震源モデルによるブラインドプレディクション実施する予定である。

謝辞: 本プロジェクトは文部科学省・科学研費・基盤研究(B)「設計用入力地震動作成のための強震動予測手法の適用と検証」(平成21-23年度)の研究助成で行われ、日本建築学会地盤震動小委員会、および工学院大学・総合研究所・都市減災研究センターとの連携のもとに行われています。

参考文献:

久田ほか(2011)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 理論的手法の場合(その1)、日本建築学会技術報告集、第17巻、第35号、67-72

久田・加藤・吉村ほか(2010)、強震動予測手法に関するベンチマークテスト(その3:理論的手法)(その4:統計的グリーン関数法)(その5:数値解析手法) 日本地震学会・秋季大会

表1 理論的手法による2010年度ベンチマークテスト(ステップ3・4)の概要

ステップ3 (締切:2010/9/1)			ステップ4 (締切:2010/11/1)		
モデル名	T31	T32	T41	T42	T44
地盤	4層地盤		2層地盤		
減衰	あり	なし	あり		なし
震源	点震源(深さ2km:ガウス型関数) 点震源(深さ0km:ガウス型関数)		横ずれ断層(上端深さ2km:中村-宮武関数)		横ずれ断層(上端深さ0km:中村-宮武関数)
有効振動数	0~5 Hz		連続		
出力点	+002, +006, +010, +030, +060, +100 km (計6点)		連続		
			1km ² 間隔一定	1km ² 間隔ゆらぎ	連続
			0~5 Hz		
			±002, ±006, ±010, ±030, ±060, ±100 km (計12点)		
			1波形	3波形	1波形

表2 4層地盤モデルの物性値

Layer	Thickness (m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Density(kg/m ³)	Qp	Qs
1	200	1,600	400	2,000	20f	20f
2	400	2,600	1,000	2,400	30f	30f
3	1,000	4,000	2,000	2,600	40f	40f
4 (Half Space)	∞	6,000	3,464	2,700	70f	70f

注1: Q 値の f は振動数(Hz) 注2: 2層地盤モデルの場合、第3層を厚さ 1 km とする

キーワード: 強震動予測手法, ベンチマークテスト, 理論的手法, 波数積分法, 離散化波数法, 薄層法

Keywords: Strong Ground Motion Simulations, Benchmark Test, Theoretical Methods, Wavenumber Integration Method, Discrete Wavenumber Method, Thin Layer Method

強震動予測手法に関するベンチマークテスト (その7:数値解析手法、ステップ3・4) Benchmark Tests for Strong Ground Motion Simulations (Part 7: Numerical Methods, Step 3 & 4)

吉村 智昭^{1*}, 永野正行², 青井真³, 川辺秀憲⁴, 上林宏敏⁴, 早川崇⁵, Seckin Ozgur CITAK⁶, 久田嘉章⁷
Chiaki Yoshimura^{1*}, M. Nagano², S. Aoi³, H. Kawabe⁴, H. Uebayashi⁴, T. Hayakawa⁵, S. O. Citak⁶, Y. Hisada⁷

¹大成建設, ²東京理科大, ³防災科学技術研究所, ⁴京都大学, ⁵清水建設, ⁶海洋研究開発機構, ⁷工学院大学
¹Taisei Co., ²Tokyo Univ. of Science, ³NIED, ⁴Kyoto University, ⁵Shimizu Co., ⁶JAMSTEC, ⁷Kogakuin Univ.

1. はじめに

数値解析手法(3次元差分法、3次元有限要素法)は、関東、濃尾、大阪平野といった盆地構造を対象とした長周期地震動の計算によく用いられている。ただし、これらの手法では地盤モデルや震源モデルの違いにより計算結果がかなり異なり、それらを同一にしても、手法の特性や各プログラムの計算条件による違いもある。そこで本ベンチマークテストでは、参加者を募り、各々が保有する計算コードを用いて、同一の震源と地盤モデルで強震動計算を行う。それらと比較し、計算結果の違いの理由や、安定して計算するための留意点を整理することを目的としている。

2. 2009年度のベンチマークテスト結果の概要

本プロジェクトは2009年度から開始しており、非常に単純なモデルから徐々に複雑なモデルへとステップを踏んで進めている。2009年度は計6チームの参加者を得て、半無限および2層の平行成層地盤を対象として、点震源を対象としたステップ1、面震源を対象としたステップ2の2段階のベンチマークテストを実施した¹⁾²⁾³⁾。相互比較したところ、実用上ほぼ同等の結果が得られていることを確認した。なお、詳細にみると、差分法で地層境界上に格子点が位置する場合、この格子点に上の層、下の層、あるいは平均のうちどの物性値を与えるかで、波形がわずかに異なった。また、断層がモデル境界に近いケースでは、境界からの反射波がみられ、吸収ゾーンの設置により反射波をできるだけ低減することが重要であることがわかった。

3. 2010年度のベンチマークテスト実施内容

2010年度は、3次元差分法5チーム(永野、青井、川辺、早川、Citak・ほか)、3次元有限要素法1チーム(吉村)の計6チームの参加を得て、さらに地盤構造を複雑にしたケースで実施した。表1に解析条件をまとめた。ステップ3のN31、N32モデルでは4層地盤($V_s=400, 1000, 2000, 3464$ m/s)を対象に行った。実務的な観点から、構造物の基礎が設置される工学的基盤($V_s=400$ m/s)まで考慮して、どの程度結果が一致するか着目した。層境界が増えたので、物性値や格子サイズが変化する箇所も増え、計算条件もやや複雑となる。いずれも点震源を用い、N31はモデル中央とし、N32は境界寄りに設置して、吸収ゾーンの影響を調べることにした。N31では、理論値(久田)とも比較したところ、各チームともほぼ同じ結果が得られており、工学的基盤($V_s=400$ m/s)に至る低速度層を考慮しても精度ある結果が得られることがわかった。

N33モデルから地盤の不整形性を考慮した。N33モデルは台形状の対称な堆積盆地を対象とした(図1)。Aki-Larner法による理論解(上林)とも比較した。ステップ4のN41、N42モデルでは、傾斜基盤を有する非対称な堆積盆地を考慮した(図2)。N41の震源は盆地が深くなっている側(手前左端部直下3km)、N42は浅くなっている側(手前右端部直下3km)に配置している。これらの不整形モデルの場合も、実務上、各チームともほぼ同じ結果が得られた。ただし、不整形地盤を離散化した場合、曲面や傾斜面付近で物性値の配置がチームにより僅かに異なっており、これに起因すると考えられる僅かな位相の違いなどが観察された。

なお、詳細な解析条件と計算結果は <http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/test/home.htm> で公開されている。

謝辞

本プロジェクトは文部科学省・科学研費・基盤研究(B)「設計用入力地震動作成のための強震動予測手法の適用と検証」(代表:久田嘉章、平成21-23年度)の研究助成で行われ、日本建築学会・地盤震動小委員会(主査:加藤研一(小堀鐸二研究所))および工学院大学・総合研究所・都市減災研究センターとの連携のもとに行われています。Citak氏のチームには、松島信一氏、Robert W. Graves氏にも参加していただきました。

参考文献

- 1) 久田ほか (2010)、強震動予測に用いる手法のベンチマークテスト - その1:概要、第13回日本地震工学シンポジウム、352-356 (CD-ROM、論文番号 GO4-Thu-PM-1)
- 2) 吉村ほか (2010)、強震動予測に用いる手法のベンチマークテスト - その3:数値解析手法、第13回日本地震工学シンポジウム、352-356 (CD-ROM、論文番号 GO4-Thu-PM-3)
- 3) 吉村ほか (2011)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 数値解析手法の場合 (その1)、日本建築学会技術報告集、第17巻、第35号、67-72

表1 2010年度の数値解析手法の解析条件一覧

モデル名	ステップ3 (締切:2010/9/1)			ステップ4 (締切:2010/11/1)	
	N31	N32	N33	N41	N42
地盤	4層地盤		対称盆地	傾斜基盤盆地	
減衰	あり			あり	
震源	点震源A	点震源B	点震源C	点震源C	点震源D
有効動数	0~2.5Hz			0~2.5Hz	
出力点	21点	19点	21点	21点	21点

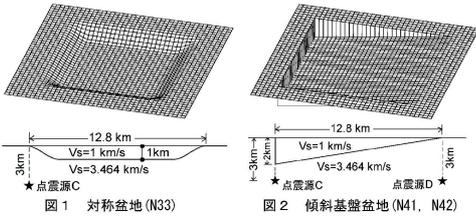


図1 対称盆地 (N33)

図2 傾斜基盤盆地 (N41, N42)

キーワード: 強震動予測手法, ベンチマークテスト, 数値解析手法, 三次元差分法, 三次元有限要素法

Keywords: Strong Ground Motion Simulation, Benchmark Test, Numerical Methods, Finite Difference Method, Finite Element Method

強震動予測手法に関するベンチマークテスト (その8: 統計的グリーン関数法、ステップ3・4) Benchmark Tests for Strong Ground Motion Simulations (Part 8: Stochastic Green's Function Method, Step 3 & 4)

加藤 研一^{1*}, 久田嘉章², 大野 晋³, 野畑有秀⁴, 森川 淳¹, 山本 優⁵

Kenichi Kato^{1*}, Yoshiaki Hisada², Susumu Ohno³, Arihide Nobata⁴, Atsushi Morikawa¹, Yu Yamamoto⁵

¹ 小堀鐸二研究所, ² 工学院大学, ³ 東北大学, ⁴ 大林組, ⁵ 大成建設

¹ Kobori Research Complex, ² Kogakuin Univ., ³ Tohoku Univ., ⁴ Obayashi Co., ⁵ Taisei Co.

1. はじめに

統計的グリーン関数法は高振動数帯域までの強震動波形を簡易に計算できるため、現在、国や自治体による強震動の面的評価や建設地点のサイト波の評価などに広く用いられている。しかしながら、乱数位相を用いた小地震動の作成法や、重ね合わせ法などに関して多様な手法が提案されており、手法間の相違が計算結果に及ぼす影響を把握する必要がある。本ベンチマークテストでは、参加者が各々保有する計算コードを用い、同一条件の震源・伝播・地盤モデルに基づいて強震動計算を行う。それらの結果を相互比較し、統計的グリーン関数法を適用する際の留意点を、乱数位相の使用に起因する計算結果の差の観点から整理した。

2. ステップ1、2のベンチマークテスト結果の概要

ベンチマークテストは3年計画で実施予定であり(久田ほか、吉村ほか、加藤ほか、2011)、初年度にあたる2009年度は半無限および2層の平行成層地盤を対象として計6名の参加者のもと、点震源を対象としたステップ1、面震源を対象としたステップ2の2段階のベンチマークテストを実施した。震源の放射係数は振動数に対して一定とし、SH波のみを対象とした。2層地盤についてはS波の鉛直平面波入射を仮定して地盤増幅特性を評価した。シンプルな解析条件を用いていることもあり、参加者間の計算結果は概ね一致した(加藤ほか、2010)。

3. ステップ3、4のベンチマークテスト結果

2010年度はより複雑な条件のもと計5名が参加し、表1に示す点震源を対象としたステップ3と、面震源を対象としたステップ4を実施した。ステップ1、2との相違は4層地盤も検討対象に加えたこと、SH波に加えてSV波を考慮し、振動数依存のラディエーションと基盤からの斜め入射の影響を考慮した点である。その結果、上下動も励起されることになり、3成分の地震動波形の提出を条件とした。

ステップ3の結果を相互比較すると、複雑な条件設定にもかかわらず、参加者間の結果は上下動も含めてステップ1と同程度に整合した。SHおよびSV波の斜め入射による地盤増幅率や、振動数依存のラディエーションも代表地点で比較し、参加者間で概ね一致することを確認している。

ステップ4では、面震源を断層長さ及び幅方向に離散化したことによる人工的な卓越周期が破壊伝播と逆方向で顕著になるが(モデルS41)、小断層の破壊開始時間にランダム性を与えることにより回避できること(モデルS42)、ライズタイムの逆数に相当する振動数でスペクトル振幅が落ち込むなどの傾向が、参加者間で共通に認められた。なお、1名(久田)は平行成層地盤の厳密なグリーン関数を用いて参加している。この結果は周期約1秒以上の長周期側において他の参加者に比べて異なる傾向を示し、遠方10kmで顕著となっている。設定した震源が点震源では2km、面震源では2~6kmと浅いこともあり、表面波の影響と考えられる。もともと統計的グリーン関数法は実体波を対象としており、手法としての制約も理解した上での適用が重要である。

より詳細な解析条件と計算結果は<<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/test/home.htm>>で公開されている。

謝辞: 本プロジェクトは文部科学省・科学研究費・基盤研究(B)「設計入力地震動作成のための強震動予測手法の適用と検証」(平成21-23年度)の研究助成で行われ、日本建築学会・地盤震動小委員会(主査:加藤研一(小堀鐸二研究所))および工学院大学・総合研究所・都市減災研究センターとの連携のもとに行われています。

参考文献:

久田ほか(2011)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 理論的手法の場合(その1)、日本建築学会技術報告集、第17巻、第35号、43-48。

加藤ほか(2011)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 統計的グリーン関数法の場合(その1)、日本建築学会技術

報告集、第 17 巻、第 35 号、49-54.

吉村ほか (2011)、強震動予測に関するベンチマークテスト - 数値解析手法の場合 (その 1)、日本建築学会技術報告集、第 17 巻、第 35 号、67-72.

表 1 2010 年度ベンチマークテストの統計的グリーン関数法の解析条件一覧

モデル名	ステップ3 (点震源)				ステップ4 (面震源)			
	S31	S32	S33	S34	S41	S42	S43	S44*
地盤	一様地盤	2層地盤		4層地盤	2層地盤			
入射角	鉛直	斜め入射			斜め入射			
Q値	なし	あり			あり			
震源	点震源				横ずれ断層	逆断層	横ずれ断層	
ディレイション (SH & SV)	振動数 (f) 一定		振動数 (f) 依存		振動数 (f) 依存			任意
破壊開始時間					一定	ランダム	一定	
有効振動数	0~20 Hz				0~20 Hz			
出力点	000, +002, +006, +010 (計4点)				000, ±002, ±006, ±010 (計7点)			
出力成分	水平2成分	水平・上下3成分			水平・上下3成分			
乱数の設定	各自の乱数3パターン				各自の乱数3パターン			

注*) S44はオプションケースで自由参加。近地項や中間項の考慮など各自のオリジナル手法を考慮

キーワード: 強震動予測手法, ベンチマークテスト, 統計的グリーン関数法, 乱数, 点震源, 断層モデル

Keywords: Strong motion prediction methods, Benchmark tests, Stochastic Green's function method, Random numbers, Point source, Fault model

地震動継続時間とマグニチュード Ground motion duration and earthquake magnitude

増田 徹^{1*}

Tetsu Masuda^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹ERI, University of Tokyo

地震動を予測する方法の一つである統計的グリーン関数法において、アスペリティの効果や破壊伝播の効果を取り入れるためには、点震源としてではなく、代表的長さ L の震源断層を代表的長さ R の要素断層に分割して、それぞれの要素断層からの地震動を合成することが必要となる。このとき、要素断層の大きさ R は任意に設定できるが、予想される地震動は要素断層 R の大きさに依存しないことが条件となる。統計的グリーン関数は正規乱数時系列と包絡線形状関数 $e(t)$ との積を基本としている。通常、包絡線形状関数の継続時間 T_r は要素地震のコーナー周波数 f_c に反比例、あるいは要素断層の長さ R に正比例するように設定されている。

$$T_r = d/f_c = (d/C_c)(R/V_s) \dots (1)$$

点震源の場合は、地震動の継続時間 T は、包絡線形状関数の継続時間 T_r と一致し、

$$T = T_r = d/f_c = (d/C_c)(L/V_s) \dots (2)$$

と表される。合成地震波の継続時間 T は、断層全体の長さ L を破壊が伝播する時間 T_p と、要素地震の継続時間 T_r との和となる。

$$T_p = C_p(L/V_s) \dots (3)$$

$$T = T_p + T_r \dots (4)$$

一般的に、点震源の場合の式 (2) と有限断層の場合の式 (4) では、継続時間の計算値は異なる。要素断層が小さくなると式 (4) の和は小さくなり、予測地震波は要素断層の大きさに依存することになってしまう。地震動の継続時間は、震源に起因する要素地震の継続時間 T_r と破壊の伝播時間 T_p のみで決まるものではなく、波の散乱や反射等の媒質に起因する項 T_m も影響している。したがって、継続時間は、

$$T = T_m + T_p + T_r \dots (5)$$

という形に表されるはずである。断層の長さ L はマグニチュードの増加関数としてよいから、継続時間 T はマグニチュードが大きくなると長くなる。式 (4) と (5) では継続時間のマグニチュードへの依存性が異なる。

以上を踏まえて、近年日本周辺で起きたいくつかの大地震とその余震について、地震動の継続時間とマグニチュードとの関係を調べた。解析に用いた地震は、内陸地殻内の地震、プレート境界型の地震、スラブ内地震である。マグニチュードの範囲は 3.6 から 8.0 であった。地震記録は防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net の観測記録、気象庁の強震観測記録を用いた。地震動の継続時間の定義は様々であるが、統計的グリーン関数との関連から、Boore により提案され広く用いられている包絡線形状関数 $e(t)$ の中で定義される T_w を採用した。

$$e(t) = a t^b \exp(-ct), t > T_s \dots (6)$$

$$T_w = b/c/0.2 \dots (7)$$

ここで、 t は時間、 a 、 b 、 c は包絡線形状を決定するパラメータ、 T_s は S 波到達時刻である。

それぞれの地震のそれぞれの観測点の地震記録の包絡線に対して、式 (6) のパラメータ a 、 b 、 c 、及び T_s を未知数として最小二乗法により解を求めた。継続時間 T_w は式 (7) により計算した。

解析の結果、以下のことが確かめられた。

1. 地震動継続時間は震央距離が大きいほど長くなる。
2. 地震動継続時間はマグニチュードが大きい地震ほど長くなる。
3. 地震動継続時間は観測点近傍の地下構造に影響され、地盤の固有周期が長いほど長くなる。
4. マグニチュードの小さい地震に対して、地震動継続時間は式 (4) で期待されるほど短くならない。
5. 地震動継続時間は式 (5) でよりよく説明される。

キーワード: 地震動継続時間, マグニチュード, 破壊伝播, ライズタイム, 強震動予測, 統計的グリーン関数

Keywords: ground motion duration, earthquake magnitude, rupture propagation, rise time, strong ground motion prediction, stochastic Green's function

SSS023-07

会場:国際会議室

時間:5月23日 10:00-10:15

陸海地形モデルを用いた地震波伝播シミュレーションの並列 GPU による高速化 Multi-GPU-accelerated simulation of seismic wave propagation for models with land-ocean topography

岡元 太郎^{1*}, 竹中 博士², 中村 武史³, 青木 尊之¹

Taro Okamoto^{1*}, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³, Takayuki Aoki¹

¹ 東工大, ² 九州大学, ³ 海洋研究開発機構

¹Tokyo Institute of Technology, ²Kyushu University, ³JAMSTEC

Accurate simulations of seismic wave propagation using the heterogeneous Earth model is essential in evaluating the strong ground motions due to earthquakes. Recent study with realistic models of land topography and oceanic layer have been revealing their effects on the seismic ground motions (e.g., Nakamura et al., AGU Fall Meeting, 2009). Thus the effects of the land-ocean topography need be incorporated in the simulations and be studied further for better understanding of the ground motions. In order to include those effects, we have recently proposed a unified approach (Takenaka, SEGJ 2009) to model structures with both the irregular free-surface (i.e., land topography) and the irregular water-solid interface (e.g., ocean bottom) in 3D seismic modeling with the finite-difference method (FDM). The approach allows to incorporate the effect of land-ocean topography with sufficient accuracy.

Thus, we implement the unified approach into multi-GPU finite-difference method (FDM) program. The GPUs are adopted to accelerate the simulations because, not only the accuracy, but also the efficiency (performance) of the numerical method is important for the simulation of the seismic wave propagation. GPU (Graphics Processing Unit) is a remarkable device for its many core architecture and for its high memory bandwidth. Recent GPU delivers extremely high computing performance (more than one TFlops in single-precision arithmetic) at a reduced power and cost compared to conventional CPUs.

In this talk we present examples of the simulations by using the new TSUBAME-2.0 grid cluster in the Global Scientific Information and Computing Center, Tokyo Institute of Technology. TSUBAME-2.0 is equipped with 4,224 NVIDIA M2050 GPUs and is ranked as world fourth fastest supercomputer in the recent TOP-500 list. Our MPI-parallel FDM program with the three-dimensional domain decomposition have achieved a performance of about 42.7 TFlops by using 1,200 GPUs so far. The weak scaling was nearly proportional to the number of the GPUs. We will also present some examples of visualization of the wave propagation for realistic land-ocean model.

キーワード: GPU, 地震波伝播, 差分法, 地形, 海底地形

Keywords: GPU, seismic wave propagation, finite-difference method, topography, ocean bottom topography

SSS023-08

会場:国際会議室

時間:5月23日 10:15-10:30

1次元地下構造モデルの調整と地震動シミュレーション Low-frequency seismic wave simulation with tuned 1-D structure

齊藤 竜彦^{1*}, 浅野 陽一¹, 伊藤 喜宏², 汐見 勝彦¹
Tatsuhiko Saito^{1*}, Youichi Asano¹, Yoshihiro Ito², Katsuhiko Shiomi¹

¹ 防災科研, ² 東北大学

¹NIED, ²Tohoku University

本研究では、高感度地震観測網で記録された低周波数 (0.02 - 0.05 Hz) の地震記録の波動場シミュレーションによる再現性という観点から、日本列島における標準的な1次元地震波速度構造を評価する。特に、現在防災科学技術研究所のCMT解推定で利用されている1次元構造、および本研究で提案する新たな1次元構造に関して、観測される地震波動場の再現性を比較する。

まず、表面波の分散曲線を基に、1次元構造の調整を行った。Hi-net併設の高感度加速度計で記録した巨大遠地地震の波形記録を周波数領域においてアレイ解析することで、レイリー波とラブ波の位相速度を測定した。既存1次元構造から予測される分散関係は、観測値よりも高速度の表面波伝播を予想する。既存モデルに対し、地殻のS波速度を4%、マンツルのS波速度を2%低下させた新しい1次元構造モデルを用いることにより、観測された0.01Hzから0.1Hzの範囲の表面波位相速度を概ね再現することができる。これを調整済1次元構造と呼ぶ。

次に、日本で発生した顕著な地震 ($6.0 < M < 6.8$) のHi-netにおける地震波形記録、特に、低周波数成分 (0.02 Hz - 0.05 Hz) の波の再現性という観点から、既存1次元構造と調整済1次元構造による波動場シミュレーションの性能を評価した。多くの地震において、調整済1次元構造は、既存1次元構造に比べて、観測波形の再現性が向上する。特に、400km以上伝播する表面波の再現性の向上は明瞭である。また、調整済1次元構造を使って推定したCMT解は、既存構造の場合に比べて、セントロイド時間が2秒程度系統的に早くなる。

本研究で新たに提案した日本列島下の1次元構造を用いることにより、多くの地震の場合において、低周波数 (0.02 - 0.05 Hz) 地震動の再現性が既存の1次元構造に比べて向上した。しかしながら、表面波が飛騨山脈を通過する場合のように、再現性が低下する地震もある。このような地震波の再現性を向上させるために、飛騨山脈下のモホ面形状が空間変化する3次元構造モデルが必要であろう。今後、調整済1次元構造を基にモホ面形状が変化する3次元構造モデルを作成し、波形再現性という観点から地下構造モデルの優位性を評価することが重要である。

キーワード: 地震波, シミュレーション

Keywords: Seismic wave, Simulation

SSS023-09

会場:国際会議室

時間:5月23日 10:45-11:00

2010年4月4日 El Mayor-Cucapah 地震 (Mw7.2) の際の Los Angeles 盆地における 長周期地震動増幅特性 Spectral Amplification Factors for Long-Period (3 to 10 s) Ground Motions in and around the Los Angeles Basin during the

畑山 健^{1*}, Erol Kalkan²
Ken Hatayama^{1*}, Erol Kalkan²

¹ 総務省消防庁消防研究センター, ²U.S. Geological Survey
¹Nat'l Res. Inst. of Fire and Disaster, ²U.S. Geological Survey

Mw7.2 El Mayor-Cucapah earthquake that occurred near the U.S.-Mexico border on April 4, 2010 is the first event providing a number of high-quality recordings to study long-period (3 to 10 s) ground motion amplification in and around the Los Angeles (LA) basin. In the LA basin, about 300 km away from the source, higher PGV values (~ 0.1 m/s) of long-period ground motions were observed relative to its surrounding area. By using more than 200 records from this event, spectral amplification factors of long-period ground motions were evaluated in and around the LA basin with respect to reference hard-rock sites. The main observations of this evaluation are the following: (1) Relative to the hard-rock reference sites, the maximum amplification is about a factor of 5 at 8 and 10 s periods in the central part of the LA basin, where depths of V_s 3.2 km/s and V_s 2.8 km/s isosurface according to the latest Southern California Earthquake Center Community Velocity Model (SCEC CVM-H 6.2) are correlated strongly with the observed high amplification; (2) in the San Gabriel valley, located northeast of the LA basin, the maximum amplification is about a factor of 3 at 8 s, and it is correlated well with the depth of V_s 1.5 km/s isosurface; (3) the largest amplification reached to a factor of 10 at the 6 s in the western part of the LA basin (Manhattan Beach), where the SCEC CVM-H 6.2 failed to provide the feature of the underground structures corresponding to the observed high amplification. The observations (1) and (2) mean that there is no single V_s isosurface that represents spatial variations of the long-period ground motion amplification observed in and around the LA basin. Finally, we compared the spectral amplification factors from the observations with those from the simulations using a simple point-source model and the SCEC CVM-H 6.2. Although the simulation results generally agree with the observations for spatial variation of amplification factors at long periods over 8 s, they tend to overestimate the intensity of amplification factors. Including Q-values and/or using detailed source model might improve the agreement between simulations and observations.

キーワード: 長周期地震動, Los Angeles 盆地, El Mayor-Cucapah 地震, 増幅特性

Keywords: long-period ground motions, Los Angeles basin, El Mayor-Cucapah earthquake, spectral amplification factors

愛知県三河地域における3次元地下構造モデルの構築と地震動シミュレーション 3-D underground structure model and simulation of seismic motions in the Mikawa area, Aichi prefecture

佐口 浩一郎^{1*}, 正木 和明²

Koichiro Saguchi^{1*}, Kazuaki Masaki²

¹ 株式会社日本アムスコ, ² 愛知工業大学

¹Nihon Emsco Ltd., Co., ²Aichi Institute of Technology

1. はじめに

愛知県三河地域は我が国でも有数の産業が集積しており、近い将来、東海・東南海地震が発生した場合、多大な死者と経済損失の発生が危惧される。構造物の被害や人的被害の軽減等、今後の地震対策強化のためにも構造物の耐震安全性の検討・被害予測などに強震動予測は必要不可欠である。しかしながら、この地域における強震動予測を行う際に必要な3次元地下構造モデルは未だ十分とは言えない。本研究は三河地域において地震観測(Ai-net)を実施し、得られた観測記録からレーシーバー関数法を用いて観測地点直下の地下構造の推定を行い、多地点同時インバージョンによって三河地域における3次元地下構造モデルの構築を行った。さらに、構築したモデルを用いて3次元有限要素法による地震動シミュレーションを行った。

2. レシーバー関数法と焼きなまし法による地下構造の推定

本研究では三河地域に30地点からなる地震観測網(Ai-net)を構築しており、各観測点の地震記録からレーシーバー関数(1)を算出した。レーシーバー関数の算出には7地震を使用し、解析区間はP波初動より約5秒間とした。なお、観測波形には1Hz~10Hzのバンドパスフィルターを施している。各観測点直下の地下構造の同定には観測記録から算出したレーシーバー関数を用いて焼きなまし法(2)を用いた。同定に用いるレーシーバー関数の理論値はHASKELL法(3)によるインパルス応答によって算出した。焼きなまし法による地下構造の同定では、探索パラメータを V_p (P波速度)、 V_s (S波速度)および H (層厚)とし、探索範囲は V_p および V_s では初期値 $\pm 50\%$ 、 H では初期値 $\pm 90\%$ とした。なお、 Q 値はそれぞれ $Q_{p0} = V_p / 15$ および $Q_{s0} = V_s / 15$ とし、 $Q = Q_0 * f$ (周波数依存)とした。さらに、すべての観測点を用いた多点同時インバージョンにより三河地域における地下構造を5層の堆積層と地震基盤からなる速度構造モデルが得られた。

3. 三河地域における3次元地下構造モデルの構築

三河地域においては、反射法による地下構造探査が実施されている(4)。本研究では、得られた速度構造モデルを基本として、50km x 50km x 10km程度の領域を3次元地下構造モデルとして新たに構築した。モデル化に際しては、地震観測点が存在する部分については、得られた速度構造モデルをそのまま用い、地震観測点のない部分については既往の探査結果にて補完することによりモデル化を行った。

4. 3次元有限要素法による地震動シミュレーション

得られた3次元地下構造を用いて3次元有限要素法により2005年12月24日の愛知県西部の地震($M_j=4.8$)のシミュレーションを実施した。3次元有限要素法による強震動シミュレーションでは、局所的な対象領域のみをモデル化し、遠方の震源による地震力と等価な地震力を入射境界面から入力する手法(5)(6)を用いる。解析には三河平野外縁の岩盤露頭観測点における観測記録の3成分を入射地震動としてモデル下部境界および震源側の側方境界において平面波として入射させた。対象とする周期帯域は0.5秒以上とし、入射角は震源からモデル底部に対しての入射角とした。モデルの外側領域においては吸収領域を設けた。解析の結果、各観測点における観測記録との整合性は概ね調和的であった。

参考文献

- 1) Langston, C.A.: Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic bodywaves., J. Geophys. Res. 84, 4749-4762, 1979
- 2) Ingber, L.: Very fast simulated annealing, Math. Comput. Modeling, Vol.12, No.8, pp.967-973, 1989
- 3) Haskell, N. A.: Crustal reflection of plane P and SV waves., J. Geophys. Res. 67, 4751-4767, 1962
- 4) 愛知県: 16年度三河地域堆積平野地下構造調査報告書, 2005
- 5) Jacobo Bielak, Kostas Loukakis, Yoshiaki Hisada, Chiaki Yoshimura: Domain Reduction Method for Three-Dimensional

Earthquake Modeling in Localized Regions , Part I : Theory , Bulletin of the Seismological Society of America , 93 , pp.817-824 , 2003

6) Chiaki Yoshimura , Jacobo Bielak , Yoshiaki Hisada , Antonio Fernandez: Domain Reduction Method for Three-Dimensional Earthquake Modeling in Localized Regions , Part II : Verification and Applications , Bulletin of the Seismological Society of America , 93 , pp.825-841 , 2003

キーワード: 3次元地下構造モデル, 地震動シミュレーション, 有限要素法, 地震観測

Keywords: 3-D underground structural model, simulation of the seismic ground motion, finite element method, seismic observation

地震波干渉法による1891年濃尾地震断層系におけるレイリー波群速度の推定 Estimation of Rayleigh wave group velocity in the 1891 Nobi earthquake fault system using seismic interferometry

佐藤 浩章^{1*}, 栗山 雅之¹, 青柳 恭平¹, 芝 良昭¹, 東 貞成¹

Hiroaki Sato^{1*}, Masayuki Kuriyama¹, Yasuhira Aoyagi¹, Yoshiaki Shiba¹, Sadanori Higashi¹

¹ 電力中央研究所

¹ CRIEPI

はじめに

1891年濃尾地震(M8.0)では、震源域において北西-南東方向に80kmにわたり複数の断層が連動破壊したことが地震後の調査により明らかとなっている。活断層群の連動性に関連する指標を抽出する上で、この地震の震源域における速度構造を明らかにすることは重要と考えられることから、我々はこれまで北部での稠密微小地震観測によるトモグラフィ解析などを実施してきた[例えば、青柳・阿部(2010)]。しかしながら、地震波トモグラフィは、微小地震活動が活発な地域では有効であるが、静穏な地域では適用が難しく、連動性指標の抽出法を一般化する際の課題でもある。近年、サイスミシティに左右されない常時微動の相互相関関数を長期間スタックすることによりグリーン関数を抽出する地震波干渉法が注目され、活断層帯を含む地域での群速度トモグラフィが実施されている[例えば、Shapiro et al.(2005)]。本研究では、本手法に着目し、濃尾地震断層系全体を囲むように常時微動の連続観測を約3か月にわたり実施し、地震波干渉法を適用してグリーン関数の抽出とレイリー波群速度の推定を試みた。

常時微動観測

常時微動観測は、2010年8月から11月上旬までの約3ヵ月間実施した。観測点は濃尾地震断層系全体(温見~根尾谷~岐阜-一宮)を取り囲むように、10kmから20kmの観測点間隔を目安として19台の地震計を設置した。観測システムは、地震計は動コイル型の加速度計(ミットヨ製 JEP-6A3)、データロガーはDATAMARK-LS7000XT(白山工業製)を用い、太陽電池パネルにより電源供給バッテリーを充電する独立型観測システムである。記録は200Hzサンプリングで収録し、地震計間の記録の同期はデータロガー付属のGPSによる絶対時刻を用いて行った。

地震波干渉法によるグリーン関数の抽出

本稿では、地震波トモグラフィを実施した北部の温見断層と根尾谷断層のステップ部周辺の観測点を対象に解析を試みた。具体的には、北東側の温見断層に沿った区間、南西側の根尾谷~揖斐川断層に沿った区間および温見断層から根尾谷~揖斐川断層をまたぐ区間の3区間を対象とした。

解析は、上下成分を対象に、0.1Hzから10Hzのバンドパスフィルター処理を施し、地震や突発的なノイズによる大振幅の影響を少なくするために、1ビット化して位相情報のみのデータに変換した[例えば、Sabra et al.(2005)]。これらの処理データに対して、1時間ずつのデータを重複せずに用い、最大ラグタイムを150秒として相互相関関数を求めた。最終的な相互相関関数は、これら1時間データごとの相互相関関数を約3ヵ月分スタックして求めた。なお、今回のデータでは30日以上スタックで信号成分が明確になり、グリーン関数を抽出できることが分かった。この傾向は3区間とも同様であった。

レイリー波群速度の推定

得られた観測グリーン関数に対し、山中・内山(2008)と同様に、マルチプルフィルター解析[Dziewonski et al.(1969)]により周期0.5秒から8秒までのcomplex envelopeを計算した。解析結果は、3区間のグリーン関数ともに最大値の到着時刻が分散性を示しており、レイリー波の特徴を示していた。そこで、この群遅延時間から、対象とする3区間のレイリー波群速度を推定した。その結果、北東側の温見断層に沿った区間と南西側の根尾谷~揖斐川断層に沿った区間では、周期1秒から3秒で温見断層に沿った北東側の方が大きく、それより長周期側でほぼ同じとなっていた。これは、浅い部分($z=0$ km)は温見断層を挟んで北東部が南東部よりも高速度であり、それ以深($z=3$ km)では差異が明瞭ではなくなる地震波トモグラフィによる結果と調和的である。一方、温見断層から根尾谷~揖斐川断層をまたぐ区間については、上述の2区間で群速度がほぼ同じだった周期3秒から6秒の区間で、両区間よりも小さい。地震波トモグラフィでは、 $z=3$ km以深で温見断層から根尾谷~揖斐川断層をまたぐ区間で低速度となっており、調和的と考えられる。

まとめ

濃尾地震断層系全体を囲むように常時微動の連続観測を約3か月にわたり実施し、地震波干渉法を適用してグリーン関数の抽出とレイリー波群速度の推定を試みた。その結果、観測点間毎に異なる特徴を示す分散性を示すレイリー波群速度が得られ、その特徴は地震波トモグラフィーで得られる地震波速度の空間分布とも調和的であり、本手法が震源域における地震波速度構造を明らかにする手法として有効である可能性を示した。今後は、全観測点ペアについて同様の解析を行い、濃尾地震断層系全体の群速度分布および速度構造の推定を試みるとともに、連動性指標の抽出を目指す。

謝辞 東工大山中浩明准教授には地震波干渉法についてご議論いただきました。

キーワード: 1891年濃尾地震, 地震波干渉法, 常時微動, 群速度, 活断層

Keywords: the 1891 Nobi earthquake, Seismic interferometry, Microtremor, Group velocity, Active fault

メキシコ盆地における微動のH/Vスペクトル比と地下構造モデル H/V spectral ratio of microtremors and velocity structure in the Mexico basin

松島 信一^{1*}, 廣川 貴則², 新田 祐平², 長嶋 史明², フランシスコ J サンチェス-セスマ³, 川瀬 博¹

Shinichi Matsushima^{1*}, Takanori Hirokawa², Yuhei Nitta², Fumiaki Nagashima², Francisco J. Sanchez-Sesma³, Hiroshi Kawase¹

¹ 京都大学防災研究所, ² 京都大学大学院工学研究科, ³ メキシコ国立自治大学工学研究所

¹DPRI, Kyoto University, ²Grad. School Eng., Kyoto University, ³Instituto de Ingenieria, UNAM

地震による揺れに対して都市空間の安全性を確保するためには、地下構造に関する情報を把握し地盤増幅特性を的確に評価した上で強震動予測をすることが必要不可欠である。地盤増幅特性を大きく左右する地盤の速度構造を推定する手法として、微動の水平動と上下動のフーリエスペクトル比 (H/V スペクトル比) を拡散波動場を仮定した場合に理論的に計算する方法を著者らは新たに提案している (Sanchez-Sesma et al. (2010) など)。本研究では、メキシコ盆地を対象にこの新しい考え方に基いて H/V スペクトル比から地盤構造を推定し、既往の研究との関係から適用性の確認をする。

メキシコ盆地では 1985 年メキシコ地震の際に震源から数百キロ離れているにもかかわらず、大きな揺れにより中層建物が多く破壊された。そのため、地震後に強震観測網が整備され、現在も地震観測が行われている。また、強震観測網の整備の際に、地下構造の調査が行われている。これらの地点において微動観測を行い、微動観測記録および強震観測記録の H/V スペクトル比と、著者らが提案する新しい手法により計算される理論 H/V スペクトル比との比較を行う。

平成 22 年 12 月初旬にメキシコ盆地内の 5 つの強震観測点において微動観測を行った。メキシコ市内において強震観測が行われている地点のうち、1985 年メキシコ地震で被害が甚大だったメキシコ市中心部の地域の東西約 1km の間に 3 点 (Plaza Ciberes, Plaza Rio de Janeiro, Jardin Pushkin)、メキシコ市南部に位置し溶岩が露頭するメキシコ自治大学構内の CENAPRED 本部に 1 点およびその中間地点の Coyoacan にて行った。

メキシコ市中心部で微動を観測した 3 点のうち西寄りの Plaza Ciberes での微動記録から得られた H/V スペクトル比は約 0.6Hz に 1 つピークを持ち、NS、EW 成分とも同じ性状を示す。中央の Plaza Rio de Janeiro では約 0.5Hz で NS、EW 成分ともピークを示す。東寄りの Jardin Pushkin では NS 成分では約 0.5 と約 0.7Hz、EW 成分では約 0.6Hz にそれぞれピークがあり、NS と EW 成分で少し異なる性状を示す。Plaza Ciberes における強震記録による H/V スペクトル比の卓越振動数はおおよそ 0.5Hz (Salinas, 2010) で、微動から得られるものに近いが若干異なる。一方、メキシコ市のやや南部に位置する Coyoacan では、NS、EW 成分ともピークは約 1.4Hz で、市中心部より明らかに卓越振動数が高い。溶岩が露頭する CENAPRED 本部では、明瞭なピークは見られない。今後は観測記録の詳細な分析と既往の地下構造から理論的に計算される H/V スペクトル比との比較を行う。

キーワード: メキシコ盆地, 微動, H/V スペクトル比, 拡散波動場, 地下構造

Keywords: Mexico Basin, Microtremor, H/V Spectral Ratio, Diffuse Field, Velocity Structure

コーダ規格化法によるサイト増幅特性の推定 (4) 全国強震観測網における増幅特性の統一的推定と地表と地中の比較

Site amplification factors derived from coda normalization method (4) amplification factors at borehole and surface

竹本 帝人^{1*}, 古村 孝志², 前田 拓人², 野口 科子²
Teito Takemoto^{1*}, Takashi Furumura², Takuto Maeda², Shinako Noguchi²

¹ 東京大学地震研究所, ² 東京大学総合防災情報研究センター
¹ERI, the Univ. of Tokyo, ²CIDIR, the Univ. of Tokyo

はじめに

我々は、これまでコーダ規格化法 (e.g. Phillips and Aki, 1986) を日本の高密度強震観測網の強震データに適用して、各地点の S 波の増幅特性を周波数帯域毎に詳しく評価し、サイト増幅と表層地質との関連を議論するとともに、求められたサイト増幅特性を用いた基盤上相当の震度の推定等への適用や、地震動の距離減衰式に基づく大地震の震度推定の高精度化に向けた検討を進めてきた (竹本・他, 2009)。また、東北日本の基盤強震観測網 KiK-net の地表地震計と地中地震計におけるサイト増幅係数の比較 (竹本・他, 2010) から、ある観測点の地表点と地中観測点における増幅特性が 2 Hz 以上では系統的に異なることを明らかにした。

本研究では、岩盤地点に対する地中および地表の S 波増幅特性について定量的に議論をするために、従来の解析をさらに進めて全国に展開されている KiK-net の地表地震計、地中地震計および広帯域強震計 F-net 観測点すべてを用いた同時インバージョンを行い統一的なサイト増幅特性の推定を行った。

使用データと解析方法

コーダ規格化法によりサイト増幅特性を求める手順 (竹本・他, 2009) に基づき解析を行った。本解析では、コーダ波の振幅がサイト増幅係数と地震波放射エネルギー項の積に比例するという性質を利用して、多数の地震の同じ経過時間におけるコーダ波振幅から観測点間の相対サイト増幅特性を推定する。2000 年-2010 年に日本周辺で発生した 48 個の地震に対し、震源距離が 100 km 以内の KiK-net (地中・地表) および F-net 強震計の記録を用いて解析を進めた。まず観測波形にバンドパスフィルター (0.5-1 Hz, 1-2 Hz, 2-4 Hz, 4-8 Hz) を掛け、それぞれ地震発生時から 60 秒から 65 秒の間の平均 RMS 振幅値を求める。周波数帯域ごとにすべての地震・観測点のデータを同時に用いたインバージョンにより、サイト増幅係数と地震波放射エネルギー項を最小二乗法により求める。ただし、本手法で推定される増幅特性はすべて相対値であるため、岩盤サイトである F-net 観測点の一点での増幅係数が 1 (0 dB) となるような拘束条件を与えた。

地表と地中の増幅係数

求められた増幅係数の空間分布を地表観測点、地中観測点それぞれについて比較検討した。高周波数帯域 (4-8 Hz) でのサイト増幅特性は、地表に比べて地中の増幅係数が相対的に小さく、地表平均増幅率は 8.6 dB であるのに対し、地中平均率は 4.5 dB となった。また地中の増幅係数は 0 dB 周辺の狭い範囲に集中しており、5-10 dB を中心に分布する地表の増幅係数との間での相関は悪い (相関係数 $r = 0.52$)。高周波数帯域では、地震動の増幅が主に KiK-net 地中観測点設置深度 (100 m-200 m) 以浅の比較的浅い場所の構造の影響を受けているためであると考えられる。

ところが、低周波数帯域 (0.5-1 Hz) においては地表と地中で推定されたサイト増幅特性に大きな分布の差は見られず、地表地震計からの推定値と地中地震計からの推定値の間の相関が良い ($r = 0.88$) ことが明らかになった。また、地表・地中どちらにおいても北海道の一部で 20 dB を超える極めて大きな推定値が得られた。一方、岩盤サイトと同程度の増幅 (0 dB 前後) を持つ観測点も多数あり、低周波数帯域では増幅係数の値の分布の幅が広いことが大きな特徴である。それに比べ、高周波数帯域では地表・地中両方で増幅の空間的バラツキが小さく、場所に大きく依らない増幅特性を示すことが明らかになった。

謝辞

防災科学技術研究所の KiK-net および F-net の観測データを使用した。

キーワード: コーダ規格化法, サイト増幅

Keywords: coda normalization, site amplification

長周期帯域の応答スペクトルの経験的地盤増幅率の面的補間とメディアムレスポンスに基づく考察 Spatial interpolation of empirical amplification factors for response spectra of long-period ground motions

佐藤 智美^{1*}, 大川出¹, 西川孝夫³, 佐藤俊明⁴
Toshimi Satoh^{1*}, Izuru OKAWA¹, Takao NISHIKAWA³, Toshiaki SATO⁴

¹ 大崎総合研究所, ² 建築研究所, ³ 首都大学東京, ⁴ 清水建設

¹Ohsaki Research Institute, ²Building Research Institute), ³Tokyo Metropolitan University, ⁴Shimizu Corporation

筆者ら(佐藤・他,2010)は、長周期建造物の設計用長周期地震動の策定を目的として、約1870の強震観測点で観測された多数の強震観測記録に基づき、長周期を含む周期0.1~10秒の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の距離減衰式を作成している。この距離減衰式では、各強震観測点での地盤増幅率が求められているため、強震観測点では、地点固有の地盤増幅率を考慮した長周期地震動予測が可能となっている。本研究では、長周期建造物が多い関東平野、濃尾平野、大阪平野の強震観測点以外での長周期地震動予測を目指し、地盤増幅率の面的補間を行うための回帰式を作成するとともに、この回帰式について理論的考察を行った。

既往の長周期帯域の距離減衰式では、地震基盤相当面までの深さ、または、より浅い岩盤相当面までの深さ、あるいは、これらにVs30を含めたパラメータで地盤増幅率がモデル化されている。このように深さがパラメータとして用いられてきたのは、これまでは、世界的にも多くの観測点において、基盤あるいは岩盤相当の深さの情報を得ることができても、S波速度構造までの情報を得ることが困難であったことが原因と考えられる。一方、2009年に文部科学省地震調査研究推進本部から長周期地震動予測地図とその計算に用いられた工学的基盤相当までの三次元地下構造モデルが公開された。そこで、本研究では、この三次元地下構造モデルの観測点直下のS波速度構造から、工学的基盤から地震基盤(S波速度Vs=3.2km/s)までの伝播時間Tz3.2を算出し、これをパラメータとした地盤増幅率のモデル化を試みた。

その結果、これら3平野では対象とした周期0.5~10秒で、各周期ポイントの地盤増幅率Cの対数がTz3.2をパラメータとして、 $Tz3.2 = 1$ 秒を境界としたバイリニア型の2本の直線によく表現できることがわかった。そこで、 $Tz3.2=1$ 秒以上で(1)式により回帰分析を行ない、次に、 $Tz3.2=1$ 秒での値を固定して、 $Tz3.2=1$ 秒以下で(2)式により回帰分析を行なった。

$$\log_{10}C=a_1+b_1Tz3.2 \quad (Tz3.2 \geq 1.0) \quad (1)$$

$$\log_{10}C=a_2+b_2Tz3.2 \quad (Tz3.2 < 1.0) \quad (2)$$

ここで、 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 は回帰係数である。なお、従来から用いられている地震基盤までの深さをパラメータとした場合より、 $Tz3.2$ をパラメータとした場合の方が、地盤増幅率Cをよく表現できることも確認した。また、得られた回帰式を用いて、3つの平野の代表的な8つの観測点での地盤増幅率を計算し、元の地盤増幅率と比較した結果、ばらつきを考慮すると両者はよく合っていることが確かめられた。

この回帰式の物理的意味について、メディアムレスポンスを用いて検討を行った。はじめに、観測点直下の速度構造モデルに基づき、ラブ波とレイリー波の基本モードのメディアムレスポンスを計算した。そして、レイリー波のメディアムレスポンスにレイリー波のH/Vを掛け、これとラブ波のメディアムレスポンスの和を、水平成分の近似メディアムレスポンスMRと定義した。そして、各周期ポイント毎にMRとの関係を分析した。その結果、 $Tz3.2$ とMRの対数との関係は、 $Tz3.2$ と地盤増幅率Cの対数の関係と定性的に同様であることがわかった。これは、(1)、(2)式に基づく回帰式は経験式ではあるが、定性的には理論的に説明できることを意味している。

謝辞：本研究は、国土交通省による平成22年度建築基準整備促進事業の技術開発の成果である。長周期地震動に関する検討委員会および地震動・応答WGの委員の方々には貴重なご意見を頂きました。記して感謝致します。

参考文献：佐藤智美・他(2010). 日本建築学会構造系論文集, 第649号, pp.521-530.

キーワード: 長周期地震動, 経験式, 地盤増幅率, 地下構造モデル, メディアムレスポンス

Keywords: long-period ground motions, empirical attenuation relations, amplification factors, velocity structure model, medium response

Evaluation of Site Effects for Acceleration Response Spectra based on Recorded Data

H. Serdar Kuyuk^{1*}, Hongjun Si¹, Kazuki Koketsu¹, Hiroe Miyake¹
H. Serdar Kuyuk^{1*}, Hongjun Si¹, Kazuki Koketsu¹, Hiroe Miyake¹

¹Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

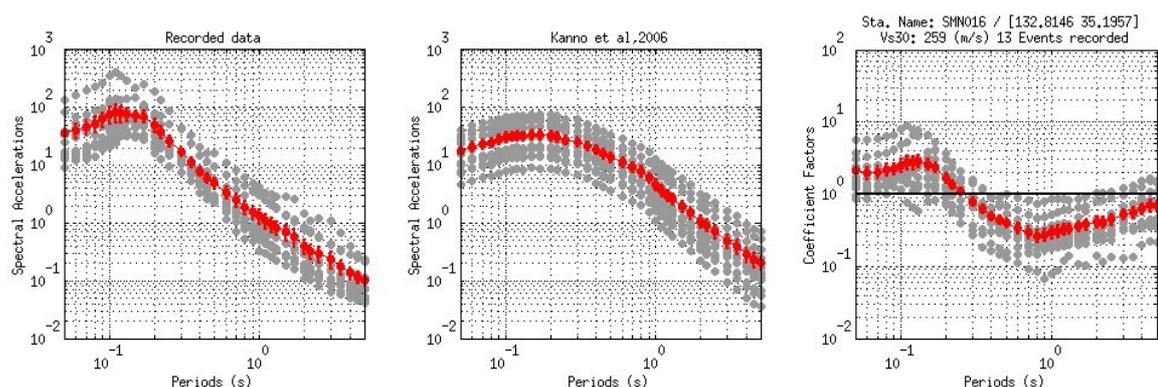
¹Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

Figure 1. a) Attenuation model for acceleration response spectra proposed by Kanno et al. b) acceleration response spectra using observed records c) site effect correction factors

Seismic networks, such as KIK-net and Hi-net, provide valuable information for studies in engineering and seismology. Research related to the site effect of strong ground motion attenuation use the soil information (especially those extracted from Vs30) of the stations. Many other studies have been concerned with Vs30 at K-NET stations assuming this is the parameter that correlates with site effect. On the other hand, some networks (more than 1000 locations) that are operated by JMA or local prefectural administrations do not have soil information. While Vs30 is debated as the correct factor to evaluate site effects, Si et al, (2010) have proposed an effective yet easy methodology to assess site effect in attenuation relationships. This correction factor (CF) for site effect is not a function of Vs30 but instead is dependent on previous recordings. It is calculated by employing an average operator of the ratio of observed ground motion to a reference attenuation model. The advantage of the method is that the site effect can be estimate without soil information.

Kanno et al, (2006) proposed a standard attenuation relation considering acceleration response spectra for Japan. They used a CF function of Vs30 which were determined from KIK-net stations and summed these with spectral amplitudes in particular frequencies. They applied the CF to their data and were able to reduce the standard error. We use this attenuation relationship as a reference model in our analysis. The method was tested in an area bounded by 133-135E longitude to 32-36N latitude in which 152 K-NET stations are located. We focus on the Tottori region and have evaluated 46 crustal earthquakes with Mw>4.0. From over 7000 records we extracted 596 records that satisfied two criteria a) the stations were within 100 km hypocentral distance and b) the recorded seismic signal was larger than 10 gal.

The acceleration response spectra calculated attenuation model by Kanno et al, (2006) is shown in Figure 1a. Here, the K-NET station SMN016 with a Vs30 value of 259 m/s is given as an example. Figure 1b is acceleration response spectra estimated from 13 events recorded at that station from 1997 to 2010. The coefficient factors are plotted in Figure 1c. We observed that the method gave sufficiently good results if there are adequate station records. We find good agreement between our results and previously methods that use Vs30. Thus, the methodology used in this study is an alternative method for evaluating site effects to obtain more reliable attenuation relationship models.



キーワード: Site effects, acceleration response spectra, Tottori region
Keywords: Site effects, acceleration response spectra, Tottori region

いわゆる「トランポリン効果」の計算地盤力学による再現の試み An attempt to replicate the so called "trampoline effect" in computational geomechanics

浅岡 顕^{1*}, 野田 利弘², 山田 正太郎², 高稲 敏浩³
Akira Asaoka^{1*}, Toshihiro Noda², Shotaro Yamada², Takaine Toshihiro³

¹ (財)地震予知総合研究振興会, ²名古屋大学, ³(株)浅沼組

¹Association for the Development of Earth, ²Nagoya University, ³Asanuma co., Ltd.

緩く堆積した砂は、小さな振動を与えることによって徐々に締固まってゆく。このようにしてよく締固まった土に、大きなせん断力を繰返し作用させると、今度は逆に緩んで徐々に膨張してゆく。本研究では第一に、土のこのような挙動を、著者ら¹⁾の提案する土骨格の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model によって再現した。この弾塑性構成式は Cam-clay model に骨格構造概念 (構造・過圧密・異方性) の発展を取り入れたモデルであり、砂から粘土、中間土を含めあらゆる土骨格の力学挙動を再現する。

本研究ではさらに、上記のような土骨格の挙動を念頭に、超過圧密状態にある地盤に強震動が加えられると、地盤が徐々に緩んで膨張/隆起し得ることを、構成式に SYS Cam-clay model を搭載する水~土連成有限変形解析コード GEOASIA²⁾ によって示した。この解析コードは、あらゆる土を対象に、変形から破壊まで、あるいは液状化とその後の砂の圧密のように、不安定状態から安定状態まで、力学状態を限定することなく、そして静的と動的を問わず地盤に作用するあらゆる種類の外乱に対応して、地盤と土構造物に生じる現象の時刻歴解析を行うことを可能にする。今回の解析では、入力地震動に対し地盤が共振するような場合には、土エレメントには大きなせん断力が繰返し作用し、その結果、土骨格が緩んで、地震中に地盤が膨張/隆起し得ることを示した。また、基盤 (解析領域下端) への入力加速度が水平成分のみ有しているような場合でも、地表面応答は上下動を示すことを解析的に示した。しかもこのとき、水平方向の加速度波形が対称であるのに対し、鉛直方向には著しい非対称性を有した加速度波形が現れることを示した。2008年岩手・宮城内陸地震では、KiK-net, IWTH25 (一関西観測点) の地表面において、やはり鉛直方向成分にのみ強い非対称性を有する強震動が観測されている (Aoi, et al., 2008³⁾)。この加速度波形は、下向き成分に比べて上向き成分が大きく、かつ下向きの加速度が約 1g 程度で頭打ちになるという特徴や、上向きに比べて下向きの波形は幅が広くなるといった特徴を有することが指摘されている (図1)。解析に必要な地盤の物性値、入力地震波など、一関西のデータを基にして与えられたものではないが、一関西で観測された特徴的な地盤の地震時非線形応答が、土を弾塑性体として連続体近似する解析結果の中にも認められることを、本研究では示した (図2)。

1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 5, pp. 47-57.

2) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol. 48, No. 6, pp. 771-790.

3) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H. (2008): Trampoline effect in extreme ground motion, *Science*, Vol. 322, pp.727-730.

4) 青井 真 (2009): 地震動の非対称性の発見とトランポリン効果, *科学*, Vol.79, No.4, pp. 366-370.

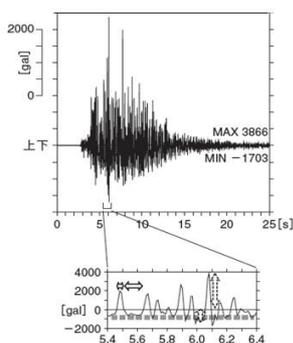


図1 地表面加速度応答時刻歴 (観測結果)⁴⁾

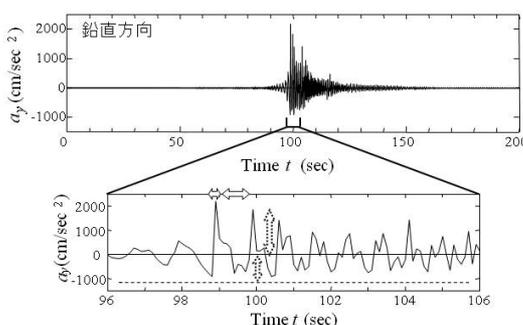


図2 地表面加速度応答時刻歴 (解析結果)

キーワード: 強震動, 膨張/隆起現象, 非対称波形, 弾塑性構成式, 緩み, 共振

Keywords: strong motion earthquake, swelling/rising phenomenon, asymmetric waveform, elastoplastic constitutive equation, loosening, resonance

等方成分を考慮した CMT 解析 断層性地震と火山性地震の震源メカニズムの違い

CMT inversion considering the isotropic component-Focal mechanism difference between a fault event and a volcanic one-

黒瀬 健^{1*}, 藤原 了¹, 秋山 伸一¹, 山中 浩明²

Takeshi Kurose^{1*}, Satoru Fujihara¹, Shinichi Akiyama¹, Hiroaki Yamanaka²

¹伊藤忠テクノソリューションズ(株), ²東京工業大学大学院

¹ITOCHU Techno-Solutions Corp., ²Tokyo Institute of Technology

現在、差分法や有限要素法などによる地震動シミュレーションにおける震源モデル(CMT解)としては、等方成分を考慮しないモデルを使用するのが一般的である。しかし、火山性地震などでは、等方成分も地震動特性に無視できない影響を及ぼすものと考えられる。震源メカニズムの異なる様々な地震を対象として地震動を評価するには、地震動に含まれる等方成分の影響も考慮する必要がある。このような背景から、本研究では最初のステップとして、等方成分を考慮した CMT 解析を行い、断層で発生する地震(断層性地震)と火山性地震の震源メカニズムの違いについて検討する。

断層性地震の震源メカニズムではダブルカップル成分が卓越し、等方成分はほぼ含まれないと考えられる。よって、断層性地震を対象にした CMT 解析では上述の通り、等方成分はゼロであると仮定するのが一般的である。この仮定によって、求めるモーメントテンソルの独立成分を6つから5つに減らすことができ、インバージョンにおける拘束条件となるため、安定した計算が行える。例えば、防災科研の F-net では、Dreger(2002)によって公開されている長周期表面波を用いた CMT 解析コードが使用されているが、このコードでは等方成分がゼロであると仮定されている。

本研究では、Dreger(2002)の公開コードに、等方成分が考慮できる機能を追加して断層性地震と火山性地震の記録に適用した CMT 解析を行い、両者の震源メカニズムの違いについて検討する。まず、断層性地震である 2008 年岩手・宮城内陸地震の記録に適用した結果、等方成分が 0% である CMT 解が得られた。なお、この結果は等方成分を考慮していない F-net による CMT 解とほぼ同等であった。

つぎに、火山性地震である 2000 年三宅島地震[菊地・山中(2000)]の記録に適用した結果、等方成分約 35%・震源深さ 2km と、断層性地震とは顕著に異なるメカニズムが得られた。なお、Dreger et al.(2000)は、火山性地震の CMT 解では等方成分が 30~40% 程度であることを示しているが、この結果と照らし合わせてみても本研究の結果は妥当であると考えられる。

以上より、断層性地震と火山性地震の震源メカニズムは顕著に異なり、等方成分を考慮した CMT 解析によってその違いを検出できることがわかった。今後は、このような CMT 解析結果を利用して、震源メカニズムの等方成分が地震動特性に及ぼす寄与について検討する予定である。

謝辞

本研究では防災科研 F-net による地震記録および CMT 解析用地下構造モデル[Kubo et al.(2002)]を使用させて頂きました。記して感謝いたします。

参考文献

- Dreger, D., H. Tkalcic, M. Johnston, 2000, *Science*, 288, 122-125
Dreger, D., 2002, Time-Domain Moment Tensor INVerse Code (TDMT_INV);
<ftp://www.orfeus-eu.org/pub/software/iaspei2003/8511.html>
Dreger, D., B. Woods, 2002, *Tectonophysics*, 356, 139-156
Jost, M.L., R. B. Herrmann, 1989, *Seism.Res.Lett.*, 60, 2, 37-57
菊地正幸・山中佳子, 2000, EIC 地震学ノート, No.82
(http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/EIC_News/000708.html)
Kubo, A., E. Fukuyama, H. Kawai, K. Nonomura, 2002, *Tectonophysics*, 356, 23-48

キーワード: CMT 解析, 等方成分, 断層性地震, 火山性地震, 震源メカニズム, 地震動特性

Keywords: CMT inversion, isotropic component, fault-type earthquake, volcanic earthquake, focal mechanism, earthquake ground-motion characteristics

規格化短周期エンベロープを用いた断層破壊の即時的イメージング Near-real-time imaging of earthquake rupture by normalized short-period envelopes

青木 重樹^{1*}, 吉田 康宏¹, 勝間田 明男¹
Shigeki Aoki^{1*}, Yasuhiro Yoshida¹, Akio Katsumata¹

¹ 気象庁気象研究所

¹ Meteorological Research Institute

1. はじめに

巨大地震の断層の広がりやアスペリティの配置は、津波や強震動の発生に直接結びつく重要な要素であるが、波形インバージョンによる震源過程解析は人の判断を必要とする場合が多く時間を要する。青木・他 [2010, 地震学会] は、地震発生直後に人手を介さず迅速にこれらを推定することを目指して、短周期エンベロープの規格化振幅分布を利用した震動源探索手法を開発し、2003年十勝沖地震に適用した結果、破壊強度の大局的な時空間分布の把握に成功した。本講演では、1994年三陸はるか沖地震に適用した結果のほか、本手法の精度評価も実施したので報告する。

2. 手法

本手法は、断層面の同定を目的に考案された Source-Scanning Algorithm [Kao & Shan, 2007] と同様に、断層面を事前設定することなく、破壊開始点（震源）周辺に3次元的に配置した格子上で、各観測点のエンベロープの最大値で規格化された振幅をS波走時分だけ時刻を戻して足し合わせることにより、震源域での時空間的な強度をイメージングする手法である。この手法の利点は、規格化短周期エンベロープ（5-10Hz）を利用しているため、観測点ごとのサイト増幅特性や震源放射特性の違い [釜江・他, 1990] や、表面波の影響 [Izutani & Hirasawa, 1987] が小さいことである。また、強度は各観測点からの寄与の平均値として定義しているため、多数の観測点を用いることにより、異常値に関してロバストになり、自動化に適した手法と言える。

3. 三陸はるか沖地震への適用

データは、気象庁87型強震計の震央距離500km以内の17観測点を利用した。震源格子は余震域とその周辺領域（南北200km × 東西400km × 深さ90km）に2km間隔で配置し、各格子では震源時から120秒間の強度を計算した。

強度の最大値（0.89）は、破壊開始後54秒に現れ、その格子位置は破壊開始点からN83°W方向に129kmの地点で、深さは26kmであった。これはSato et al. (1996) が指摘している高周波励起源（51秒, N82°W方向に137km, 深さ49km）に、分解能が乏しい深さ方向を除いて近接している。また、27.5-63.0秒の期間において最大強度が0.7以上を示しており、この期間の最大値の震央の軌跡はNakayama & Takeo (1997) の波形インバージョンによる大きなすべりの位置の推移に概ね対応している。

なお、本解析においては、データは震源時から5分程度必要であり、計算時間はIntel Xeon X5550(2.66GHz)を用いて約15分であった。気象庁津波地震早期検知網の加速度計24点（震央距離300km以内）を用いた2003年十勝沖地震の解析においては、解析期間（0.5倍）やデータのサンプリング（0.4倍）に違いはあるが、データ長は3.5分程度、計算時間は約4分で青木・他 (2010) の結果とほぼ同様の結果が得られた。なお、計算時間については、適切な格子数の設定や処理の並列化を行えば更なる低減が可能である。

4. 精度評価

本手法の強度分布は、実際の破壊の強度分布に、観測点分布や継続時間に依存する浸み出し効果や、散乱波などの直達S以外の波の効果が合わさったものであると考えられる。ここでは点震源と近似できる余震や、理論エンベロープを用いて、その影響を考察する。

十勝沖地震の強い強度が現れた地点周辺のM5.0の余震を、本震と同じ観測点配置で解析したところ、最大強度は余震の震源時の1秒後に現れ、余震の震央位置とは18km離れていた。また、三陸はるか沖地震においても、M5.6の余震で同様の解析を行ったところ、最大強度は震源時の5秒後で、位置は6km離れていた。強度が0.7以上の分布を見ると、いずれの場合も震源時の前後10秒程度の浸み出しがあり、水平方向としては35~55km程度の浸み出しがあることがわかった。

次に、十勝沖地震の上記余震と同じ震源で、Saito et al. (2002) による地震波散乱理論に基づく理論エンベロープと、散乱を考慮しないものを計算し、比較解析を行った。両者とも最大強度格子の位置は震央から10km以内となり、出現時刻は散乱ありの場合には、震源時から3.5秒遅れた。また、強度が0.7以上の浸み出しの分布を見ると、散乱なしの場合は

水平で 17km，時間的には前方 5.5 秒，後方 3.5 秒となった。散乱ありの場合は水平で 29km，時間的には前方 5.0 秒，後方 10.5 秒となり，現実の解析結果により近くなった。これは，実際の解析結果も，散乱によりエネルギーが後方に分配されエンベロープが拡大するという影響を受けていることを示唆するものである。

キーワード: 即時的処理, 震源過程解析, 1994 年三陸はるか沖地震

Keywords: Near-real-time processing, Source process, The 1994 Far E Off Sanriku Earthquake

震源インバージョン結果の不確かさに関する検討 2007年能登半島地震を例に Uncertainty of Kinematic Source Inversion Solution by Resampling Test in Case of the 2007 Noto Hanto Earthquake

浅野 公之^{1*}, 岩田 知孝¹

Kimiyuki Asano^{1*}, Tomotaka Iwata¹

¹ 京都大学防災研究所

¹ DPRI, Kyoto University

強震記録や GPS 記録を用いた震源インバージョン解析は、大地震時の震源断層における時空間的なすべりの進展過程（震源過程）を詳細に求めることができ、1980年代の先駆的な研究（例えば、Olson and Aspel, 1982; Hartzell and Heaton, 1983, Archuleta, 1984）以降、世界各地の主要な地震について震源過程が求められている。国内においては、1995年兵庫県南部地震以降に全国規模で稠密に整備された強震観測網や GPS 観測網の記録を用いた運動学的震源インバージョンが精力的になされておられ、推定された不均質な震源破壊過程と震源近傍強震動の関係も議論されている。また、これら震源インバージョン結果をコンパイルすることによって、震源パラメータのスケール関係や断層モデルに基づく強震動予測手法に関する研究が発展してきた（例えば、岩田, 2009）。しかしながら、一方であるイベントに対しての複数の結果が、同様のデータを使っているにもかかわらず、すべり分布の特徴が似ていないことがあることも事実である。結果の違いの要因には仮定する断層面やデータの周波数帯、グリーン関数の設定などの様々な理由が考えられる。そのため、震源インバージョン結果の信頼性やばらつきに関する研究が必要であり、震源インバージョン検証のための国際的な取り組みも始まりつつある（例えば、Mai *et al.*, 2010）。本研究では、2007年能登半島地震を対象として、強震記録と GPS 記録のジョイントインバージョンにより得られる解のばらつきや安定性を定量的に評価することを目的とし、リサンプリング法による解析を行った。

2007年能登半島地震については、強震記録と GPS 静的変位記録を併用した震源インバージョンを行い、詳細な震源破壊過程を既に得ている（浅野・岩田, 2007, 地震学会）。このときは、K-NET 及び KiK-net の強震観測点 12 点で得られた強震波形の S 波部分 20 秒間（速度波形, 0.05-1Hz）と GEONET の GPS 観測点 19 点で得られた最終水平変位をデータとして用い、マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法（Hartzell and Heaton, 1983）により震源過程を推定した。強震観測点に対するグリーン関数を計算するための一次元速度構造モデルは余震波形のモデリング結果に基づいて最適化したものを使用している。強震波形と GPS データの相対的な重み付けと平滑化の強さは ABIC を用いて最適な重みを決定した。その結果、破壊開始点近傍ですべり量が最大で、破壊開始点から浅部に向かってすべりの大きな領域が広がる比較的単純なすべり分布が得られた。

今回は、強震観測点から 3 観測点、GPS 観測点から 4 観測点をランダムに取り除いたデータセットを 1000 個作成し、同様の方法で震源インバージョンを実施した。得られた 1000 通りの解について、各小断層のすべり量や総地震モーメントの平均や標準偏差、変動係数を求めた。総地震モーメントの平均は 1.64×10^{19} Nm、最大すべり量の平均値は 4.8m であり、これらは全データを用いた場合の結果とほぼ同じであった。また、変動係数はそれぞれ 9% と 11% であった。各小断層のすべり量の標準偏差や変動係数の時空間的な特徴などについても検討していくが、これらの結果より、最適化された速度構造モデルを用い、十分な数の観測記録を使用すれば、信頼できる安定な解が得られていると考えられる。

謝辞：独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET 及び KiK-net、国土地理院 GEONET の日々の座標値を使用した。記して感謝する。

キーワード: 震源インバージョン, 解の不確かさ, 強震記録, GPS 記録, 2007年能登半島地震

Keywords: kinematic source inversion, uncertainty, strong motion data, GPS data, the 2007 Noto Hanto earthquake

Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS023-20

会場:国際会議室

時間:5月23日 15:00-15:15

Influence of super-shear on simulated near-source ground motion from the 1999 Izmit earthquake Influence of super-shear on simulated near-source ground motion from the 1999 Izmit earthquake

Hideo Aochi^{1*}, Virginie Durand², John Douglas¹
Hideo Aochi^{1*}, Virginie Durand², John Douglas¹

¹BRGM/RNSC, Orleans, France, ²ISTerre, Grenoble, France

¹BRGM/RNSC, Orleans, France, ²ISTerre, Grenoble, France

We numerically simulate seismic wave propagation from the 1999 Mw7.4 Izmit, Turkey, earthquake, using a 3D finite difference method based on published finite source models obtained by waveform inversions. This earthquake has been reported, based on observations at the near-fault station SKR, as an example of super-shear rupture propagation towards the east. Although the modeled ground motion does show a characteristic Mach wave from the fault plane, it is difficult to identify any particular effects in terms of peak ground velocity, an important parameter in earthquake engineering. This is because the fault spatial heterogeneity is strong enough to mask the properties of super-shear rupture, which has been reported through several numerical simulations mostly based on homogeneous fault conditions. This study demonstrates the importance of studying ground motions for known earthquakes through numerical simulations based on finite-fault source models.

キーワード: ground motion, super-shear rupture, Izmit earthquake, finite source models, finite difference simulation
Keywords: ground motion, super-shear rupture, Izmit earthquake, finite source models, finite difference simulation

SSS023-21

会場:国際会議室

時間:5月23日 15:15-15:30

2007年8月15日ペルー地震の強震動シミュレーション 特異な強震動への地震波放射特性の影響

Strong motion simulation of the 2007/9/15 Peru earthquake; Effect of radiation pattern on atypical strong ground motions

ブリードネルソン^{1*}, タベラ・エルナンド², アギラル・セノン³, 中井正一⁴, 山崎文雄⁴
Nelson Pulido^{1*}, Hernando Tavera², Zenon Aguilar³, Shoichi Nakai⁴, Fumio Yamazaki⁴

¹ 防災科学技術研究所, ² ペルー地球物理庁, ³ ペルー国立工科大学, ⁴ 千葉大学大学院工学研究科

¹Nat. Res. Inst. Earth Sc. and Dis. Prev, ²Instituto Geofísico del Perú, ³Universidad Nacional de Ingeniería, ⁴Chiba University

The 2007 Mw8.0 Pisco earthquake was a thrust event originating at the interface of the Nazca and South-American plates, in a region slightly north of where the Nazca ridge encounters the trench and is being subducted beneath the Peru margin. The source area of the Pisco earthquake was located 160 km south-east of Lima, off-shore of the Pisco city, in a region filling the gap between the 1974, Mw8.0 Lima earthquake, and the 1996, Mw7.7 Nazca ridge earthquake. The source model of this earthquake displays two distinct asperities, the first one located near the hypocenter at a depth of 39 km, and the second one located 60 km to the South at a depth of 17km (Sladen et al., JGR, 2010). The source time function of this earthquake was also characterized by two episodes of moment release, the first one at 10s and the second and largest one at 80s, separated by a very low apparent rupture velocity of 1.5 km/s. These features suggest that the earthquake may have been characterized by a delayed rupture of two isolated events, each with a conventional rupture velocity. Ground motions from this earthquake are also characterized by two clear sub-events originating from each asperity, as can be observed from strong motion recordings of the mainshock at Lima (NNA), and Parcona (PCN) stations. The acceleration waveform at PCN station, which is located above the source area of the earthquake, is characterized by an atypical pattern, namely that the peak amplitude corresponding to the first sub-event is more than 5 times larger than the peak amplitude from the second sub-event, despite the fact that the second sub-event has a much larger moment release and is located closer to PCN. To explain this unusual pattern one may think of large differences in the propagation characteristics between asperities 1, 2 and PCN, or differences originating at the source. We may rule out the contribution of site-effects to explain this difference as we can assume it is the same for both sub-events.

Based on the aforementioned source model we simulated the strong ground motions at PCN and compare it with the observed record. Our simulations show that a variable radiation pattern across the fault plane can provide an appropriate explanation on the relative differences in amplitude for the two sub-events at PCN. The radiation pattern of S waves for a point source at the centroid of asperity 2 shows that the location of station PCN is coincident with a nodal plane of SH waves. Therefore the large seismic radiation released from this asperity is dramatically reduced at PCN by a very small radiation pattern coefficient. In contrast the seismic radiation from asperity 1 is modulated by a large radiation pattern coefficient, as its azimuth relative to PCN differs by approximately 45 degrees with respect to the asperity 2 to PCN azimuth, thus enhancing the source contribution to amplitudes from the first sub-event at PCN. On the other hand the source model of the Pisco earthquake displays a small average rise time for asperity 1 (around 1s), as compared to a large rise time for asperity 2 (around 7s), which may also have contributed to magnify the amplitudes from asperity 1.

Acknowledgements

This study is being conducted within the framework of a JICA/JST project entitled " Enhancement of Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation Technology in Peru ". The strong motion data at NNA and PCN stations belongs to the strong motion network of the " Instituto Geofísico del Perú ".

キーワード: 2007年8月15日ペルー地震, 強震動, 地震波放射特性, ナスカプレート

Keywords: 2007 Peru earthquake, Strong motion, radiation pattern, Nazca plate

2004年新潟県中越地震による小千谷の波形を対象とした強震動シミュレーション Strong motion simulation for the 2004 Chuetsu earthquake with special reference to large velocity at Ojiya

野津 厚^{1*}, 坂井公俊²

Atsushi Nozu^{1*}, Kimitoshi Sakai²

¹ 港湾空港技術研究所, ² 鉄道総合技術研究所

¹Port and Airport Research Institute, ²Railway Technical Research Institute

1995年兵庫県南部地震後の研究により, 1) 震源近傍でのやや短周期パルスが大きな破壊能を有すること(例えば川瀬, 1998), 2) やや短周期パルスの再現に特性化震源モデルが有用であること(例えば釜江・入倉, 1997)が示されているが, その際のやや短周期パルスはフォワードディレクティビティの影響でもたらされたものであった. しかし, それ以降のわが国では, 2004年新潟県中越地震におけるK-NET小千谷の波形, 2007年能登半島地震におけるK-NET穴水の波形, 2007年新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所の波形など, 逆断層地震に伴い, 破壊伝播方向に該当しない観測点において, 約100km/sあるいはそれ以上の大振幅の速度波形が観測される例が相次いでいる. これらの波形は, フォワードディレクティビティ効果によって生じたものとして説明することはできない. これらの波形に対しても特性化震源モデルが有効であるかを確認しておくことは工学上重要な意義を有する.

このうち2004年新潟県中越地震については, 既往の研究で特性化震源モデルの作成が試みられてはいるものの(例えばKamae *et al.*, 2005), K-NET小千谷や川口町で観測された大振幅の速度波形を統一的に再現するものとはなっていない. そこで著者らは, 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法(古和田他, 1998; 野津他, 2009)を利用し, 2004年新潟県中越地震の特性化震源モデルに関する再検討を行った. その結果, K-NET小千谷や川口町をはじめ, 震源近傍の観測点でのやや短周期の地震動を良好に再現できる震源モデルを作成することができた(坂井・野津, 2011)ので, その結果の概要について報告する. 結論から言えば, 1) 位相特性として用いる余震記録の選定を慎重に行うこと, 2) 表層地盤の非線形挙動を考慮すること, 以上の2点が, 小千谷での波形を適切に再現する上でのkey factorであった.

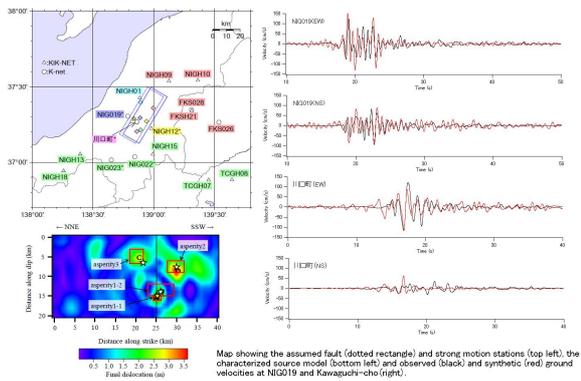
作成した特性化震源モデルは図の左下に示すとおりである. 波形インバージョン(野津, 2005)の結果(図のコンター)に基づき, 周囲よりも相対的にすべり量が大きいと考えられる場所にアスペリティを置き, それらのパラメータ(長さ, 幅, 地震モーメント)を変化させ, 震源周辺の観測点での0.2-2Hzの帯域での速度波形が出来るだけ良好に再現されるように, 特性化震源モデルを作成した. 破壊開始点付近のアスペリティを1-1と1-2に分けているのは, K-NET小千谷における18-19秒付近の特徴的なパルスを再現するためである. なお同様のパルスはJMA小千谷でも観測されており, 著者の震源モデルにより良好に再現されることが確認されている(福島, 私信).

経験的サイト増幅特性は原則として既往の研究(野津・長尾, 2005)のものを利用したが, 既往の研究の対象外である川口町については, 2007年新潟県中越沖地震による川口町とNIGH12でのフーリエスペクトルの比が両地点でのサイト増幅特性の比を表していると考え, これにNIGH12でのサイト増幅特性を乗じることにより, 川口町でのサイト増幅特性を評価した. 位相特性の評価に用いる余震記録は, 本震記録と位相特性の類似しているものを選定した. その結果, K-NET小千谷については2004/10/24 16:04の余震($M_j 4.2$)の記録が選定された. 川口町については選択肢があまり無く, 2004/10/23 18:57の余震($M_j 5.3$)の記録を用いた. その他の地点を含め, 震源断層面上で比較的観測点に近い位置で発生している余震が選定された.

K-NET小千谷の速度波形は, 18-19秒付近の大振幅に続く1.5Hz程度の後続波によって特徴づけられている. これに対応して, 観測フーリエスペクトルにも1.5Hz付近に顕著なピークがある. 一方, K-NET小千谷での線形時のサイト増幅特性は表層地盤に対応する4Hz付近の顕著なピークがあり, これをそのまま用いる限り, 1.5Hzの卓越した地震動を再現することはできない. K-NET小千谷の表層地盤については, 本震時に G/G_0 が約0.13であったこと(時松他, 2006), 減衰定数が0.06-0.15であったこと(時松・関口, 2006)などが指摘されている. そこで, これらを用い, 地表での合成波形をいったん線形の伝達関数で工学的基盤に引き戻し, 非線形の伝達関数を乗じることにより, 地表での波形の推定を行った. その結果, 図の右上に示す結果が得られた. 図の右下に示す川口町での結果とともに, 観測波の特徴が比較的良好に再現されていると考えられる.

今後は, 他の内陸地殻内地震との比較検討を行う予定である.

謝辞: 本研究では防災科学技術研究所のK-NET, KiK-net, 自治体震度計の強震記録を利用させていただいています. 記して謝意を表します.



キーワード: 強震動, 特性化震源モデル, サイト増幅特性, 位相, 非線形, 2004年新潟県中越地震

Keywords: strong ground motion, characterized source model, site amplification factor, phase, nonlinearity, The 2004 Chuetsu earthquake

宮城県沖地震の広帯域地震動予測 Broadband Ground Motion Prediction for Miyagi-oki Earthquake Scenarios

三宅 弘恵^{1*}, 纈纈 一起¹, 増田 徹¹, 鈴木 晴彦², 甲斐田 康弘²
Hiroe Miyake^{1*}, Kazuki Koketsu¹, Tetsu Masuda¹, Haruhiko Suzuki², Yasuhiro Kaida²

¹ 東大地震研, ² 応用地質

¹ Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, ² OYO Corp.

宮城県沖地震は、今後 30 年以内に M 7.5 前後の地震が発生する確率が 99% という長期評価がなされている（地震調査委員会, 2000, 2011）。この切迫性に基づき、これまでに様々な強震動予測が行われてきた。本研究では、海溝型地震における特性化震源モデルを用いた広帯域地震動予測における問題点を解決するため、二段階コーナー周波数震源スペクトル (Miyake and Koketsu, 2010) を用いた予測を実施した。

予測の対象は、1978 年宮城県沖地震が将来繰り返すと想定した Mw 7.6 のシナリオ地震と、この震源域のうち、2005 年宮城県沖の地震で破壊が及ばなかった領域をモデル化した Mw 7.3 の北部単独シナリオ地震とした。両シナリオ地震に対して特性化震源モデルを構築する際、広帯域地震動予測における長周期成分と短周期成分の乖離を防ぐため、二段階コーナー周波数震源モデルを採用した。二段階コーナー周波数震源モデルとは、長周期成分では震源インバージョン結果を尊重し、断層面積とアスペリティ面積のスケーリング則に基づいた特性化震源モデルを構築する。一方、短周期成分では、経験的グリーン関数法などによって推定された強震動生成域を尊重し、強震動生成域のスケーリングや応力降下量に基づき特性化震源モデルを構築する。この方法により、特性化震源モデルに周期依存性を与え、規模の大きな地震に見られていたアスペリティと強震動生成域の乖離をモデル化に取り込むことが可能となる。地下構造モデルは、長周期地震動予測地図 2009 年試作版（地震調査委員会, 2009）で用いられている全国 1 次地下構造モデル (Koketsu et al., 2008) の宮城県沖の領域を用いた。この地下構造モデルは、中小地震の波形シミュレーションにより周期 2 秒以上が担保されているが、本研究では radiation pattern の周期依存性を考慮して、ハイブリッド法における接続周期を 1.5 秒とした。接続周期より長周期側では、アスペリティに対する特性化震源モデルと差分法の組み合わせを用い、短周期側では、強震動生成域に対する特性化震源モデルと統計的グリーン関数法の組み合わせによって広帯域地震動予測を面的に実施した。

予測の結果、1978 年型のシナリオ地震の場合、強震動生成域としてアスペリティの半分の面積と倍の応力降下量を与えた場合に、1978 年宮城県沖地震の時刻歴波形やアンケート震度分布に近づく結果が得られた。また、北部単独シナリオ地震については、破壊が海側から陸側に進行するモデルを採用したため、予測震度分布は 1978 年型のシナリオ地震の分布と似通った結果となり、震度 6 弱を含む領域が見受けられた。

本研究は「宮城県沖地震における重点的調査観測」によった。

キーワード: 広帯域地震動予測, 宮城県沖地震, 特性化震源モデル, 全国 1 次地下構造モデル, ハイブリッド法

Keywords: broadband ground motion simulation, Miyagi-oki earthquake, characterized source model, Japan integrated velocity structure model, hybrid method

スラブ内地震の強震動予測手法の検討 Study on New Recipe for Predicting Strong Ground Motions from Intra-slab Earthquakes

石井 透^{1*}, 室谷 智子², 北川 貞之¹, 入倉 孝次郎³
Toru Ishii^{1*}, Satoko Murotani², Sadayuki Kitagawa¹, Kojiro Irikura³

¹ 文部科学省地震・防災研究課, ² 東京大学地震研究所, ³ 愛知工業大学
¹MEXT, Japan, ²ERI, Univ. of Tokyo, ³Aichi Institute of Technology

地震調査研究推進本部(以下「地震本部」と記す)は、日本全国の活断層で発生する地震と海溝型地震について、長期評価を順次実施すると共に、それらの強震動評価のために「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」(以下「レシピ」と記す)をまとめ、公表した(地震本部、2009)。海溝型地震にはプレート境界地震やスラブ内地震が含まれるが、スラブ内地震はプレート境界地震に比べるとその観測事例も少なく、これまでに得られたデータや知見に限られ、その発生様式も十分には明らかにされていない。従って、従来の海溝型地震の「レシピ」は主にプレート境界地震を対象としたものであるし、特定のスラブ内地震に対する長期評価やそれに基づく地震動予測地図の実現のためにも多くの課題が残されている。一方、この約10年間に、2001年芸予地震、2003年宮城県沖の地震、2008年岩手県沿岸北部の地震、2009年駿河湾の地震といったスラブ内地震が相次いで発生し、最新のデータや知見に基づく研究も試み始められると共に、特に重要構造物の耐震安全性検討・設計のためにはスラブ内地震を考慮する必要性が高まってきている。このような背景から、地震本部地震調査委員会の強震動評価部会と強震動予測手法検討分科会では、新たにスラブ内地震の「レシピ」の構築に向けて検討を開始した。

スラブ内地震を対象とした最近の研究として、壇・他(2006)、笹谷・他(2006)、Iwata and Asano(2010)などにより、その特性化震源モデルの作成方法が提案されている。スラブ内地震の特徴として、相対的に小さなアスペリティから相対的に多くの短周期地震波を発生することが挙げられ、特に短周期構造物の耐震安全性を考える上で重要である。そこでまず、経験的グリーン関数法によるスラブ内地震の解析によって、地震モーメント~アスペリティ面積関係式、地震モーメント~短周期レベル関係式をそれぞれ提案・検証しつつ現在の地震本部の「レシピ」の基本骨格を生かした特性化震源モデルの作成方法が提案されている壇・ほか(2006)や笹谷・ほか(2006)を用いて検討し、アスペリティ面積と短周期レベルを適切に評価することを優先して新たな「レシピ」を考えた。従来の「レシピ」では、巨視的断層パラメータである地震モーメントと震源断層面積との関係式から出発して微視的断層パラメータを順次推定する方法を採ってきたが、本検討では、巨視的パラメータから出発するのではなく、観測量を重視する方針のもと、まず予め設定された地震モーメントからアスペリティ面積と短周期レベルを推定した上で、Eshelby(1957)、Brune(1970)、Madariaga(1979)による理論式等を用いてアスペリティと震源断層全体の応力降下量を求める方法により、スラブ内地震の特性化震源モデルの作成手順を考えた。

今後は、実際に発生したスラブ内地震の観測記録を用いて今回提示した方法を検証しつつ、必要に応じて改良を加えながら、検討を進めていく予定である。

キーワード: 海溝型地震, スラブ内地震, 強震動予測, レシピ, 断層モデル, アスペリティ

Keywords: subduction-zone earthquake, intra-slab earthquake, strong motion prediction, recipe, fault model, asperity