

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に関電美浜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

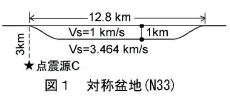
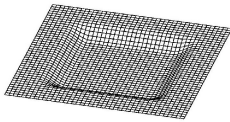


図1 対称盆地 (N33)

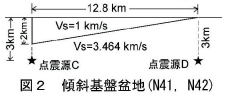
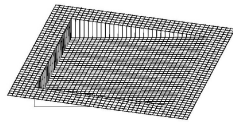


図2 傾斜基盤盆地 (N41, N42)

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

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パ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. レーパ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パー関数1)を算出した。レーパー関数の算出には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パー関数を用いて焼きなまし法2)を用いた。同定に用いるレーパー関数の理論値は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は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

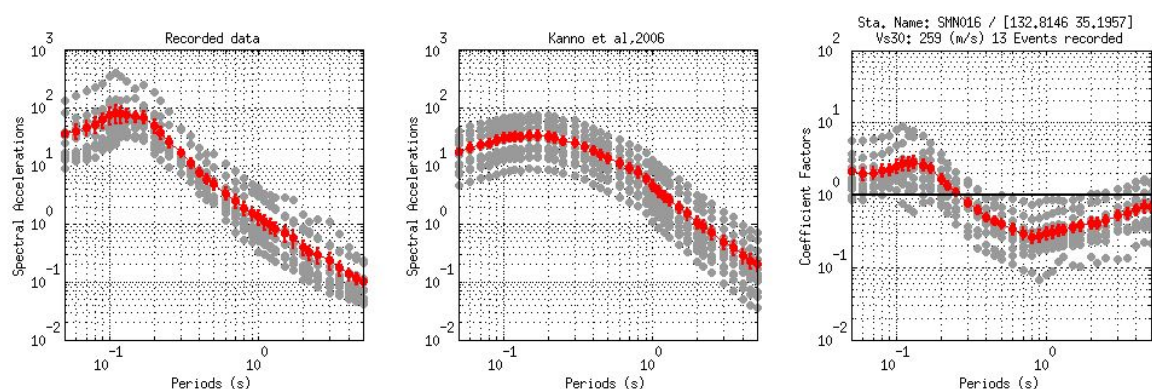
¹Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

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う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.

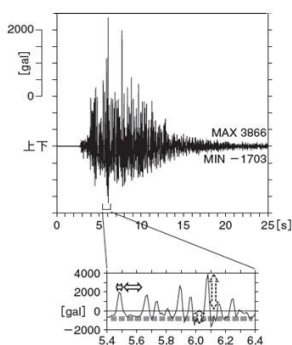


図1 地表面加速度応答時刻歴 (観測結果)⁴⁾

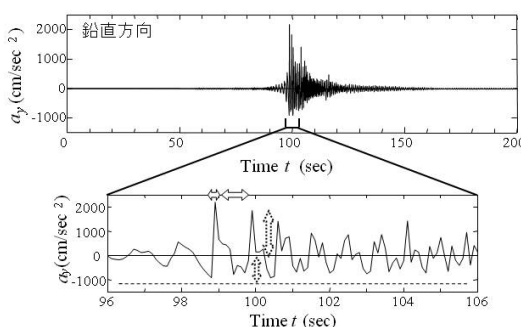


図2 地表面加速度応答時刻歴 (解析結果)

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. Tkalčić, 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で、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

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.

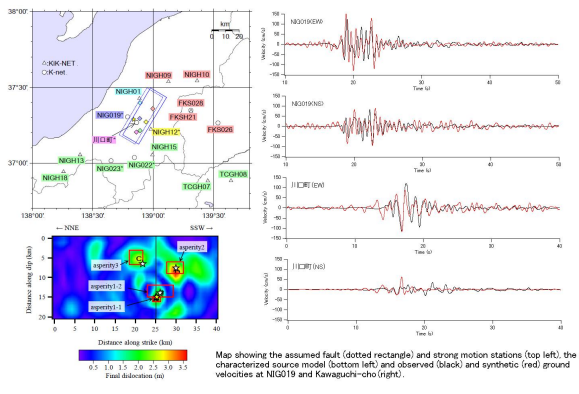
作成した特性化震源モデルは図の左下に示すとおりである. 波形インバージョン(野津, 2005)の結果(図のコンター)に基づき, 周囲よりも相対的にすべり量が大きいと考えられる場所にアスペリティを置き, それらのパラメータ(長さ, 幅, 地震モーメント)を変化させ, 震源周辺の観測点での0.2-2Hzの帯域での速度波形が出来るだけ良好に再現されるように, 特性化震源モデルを作成した. 破壊開始点付近のアスペリティを1-1と1-2に分けているのは, K-NET小千谷における18-19秒付近の特徴的なパルスを再現するためである. なお同様のパルスはJMA小千谷でも観測されており, 著者の震源モデルに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

Japan Geoscience Union Meeting 2011

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

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS023-P01

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

IISEE 地震カタログのウェブインターフェースの改善 Improvement of web interface of the IISEE earthquake catalog

原 辰彦^{1*}, 横井 俊明¹

Tatsuhiko Hara^{1*}, Toshiaki Yokoi¹

¹ 建築研究所 国際地震工学センター

¹IISEE, BRI

We introduce recent developments of the web interface of the IISEE (International Institute of Seismology and Earthquake Engineering) earthquake catalog, "IISEE's CMTs, Aftershock Distributions, Fault planes, and Rupture processes for recent large earthquakes in the world" (http://iisee.kenken.go.jp/eqcat/Top_page_en.htm). In this catalog, we have been providing earthquake information (CMT, aftershock distribution, fault plane, and rupture process) determined by the analytical techniques developed by the IISEE and visiting researchers since 2008.

We have modified the top of the search page of this catalog so that registered events are shown on the Google Map. Users can select an event on the Google Map, and display earthquake information for that event in another window. In the web interface, we have implemented a function to forward earthquake information to web calculators of PGA, PGV, intensities, etc. using a set of attenuation equations. Calculation results are shown on maps drawn by the GMT (Generic Mapping Tools. Wessel and Smith, 1998). Earthquake source parameters for this calculation can be changed by users for their purposes and conditions such as soil, earthquake type, etc. This improved web interface is now available at our web site as a test version (http://iisee.kenken.go.jp/cgi-bin/eqcatalog.newv4/eqcatalog2_eng.cgi). We plan to implement a function to download calculation results using attenuation equations. Through these developments, we are improving combination among this earthquake catalog, strong motion calculations, and the other earthquake catalog available at our web site, "Catalog of Damaging Earthquakes in the World" (Utsu, 2004. The later updates are added by the IISEE).

キーワード: 地震カタログ, 減衰式, ウェブインターフェース

Keywords: earthquake catalog, attenuation equation, web interface

SSS023-P02

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

強震波形データの即時連続伝送実験 - リアルタイム強震動モニタリングの実現に向けて -

A feasibility study of fast and continuous strong-motion observation

功刀 卓^{1*}, 中村 洋光¹, 青井 真¹, 内藤 昌平¹, 安達 繁樹¹, 藤原 広行¹

Takashi Kunugi^{1*}, Hiromitsu Nakamura¹, Shin Aoi¹, Shohei Naito¹, Shigeki Adachi¹, Hiroyuki Fujiwara¹

¹ 防災科学技術研究所

¹ NIED

緊急地震速報をはじめとする現在の地震早期警報の多くは、震源近傍の観測点の地震記録から地震諸元（震央位置、深さ、規模）を推定し、距離減衰式を用いて任意の点の強震動指標（震度、最大加速度、等）を予測する手法をとっている。当然ながら、この予測値は、震源諸元の推定と距離減衰式に起因する誤差を含む。一方で、地震発生から一定の時間が経過すれば各観測点には主要動が到達し、これまで予測対象としていた強震動指標の実測値が観測されはじめる。これらの実測値を予測に組み合わせれば、地震早期警報における強震動指標予測の確度は向上すると考えられるが、そのためには強震動情報をリアルタイムに得る必要がある。防災科学技術研究所では、地震早期警報の高度化および、発災可能性の早期把握に資するため、リアルタイム強震動モニタリングシステムの開発に着手する。このシステムの中核の一つは、強震波形データをリアルタイムで連続収集することである。本講演では、このために行った、K-NET 観測点を利用した強震波形データの即時伝送実験の結果について報告する。なお、本実験で収集している強震波形データは、長周期地震動による長尺物揺れを予測する、超高層建築物への around-site warning system（中村・他、本連合大会）の実証実験において、入力波形（代用波）として用いることも計画している。

K-NET で運用中の強震計は、当初より波形連続伝送の機能を持っている。この伝送はパケット長を 1 秒単位で行うものであったが、今回の実験では伝送の即時性を向上させるためパケット長を 0.1 秒単位で行うようにした。波形フォーマットは WIN32 型式を拡張した強震 WIN32 型式を用いている。通信は TCP を用いて、輻輳制御および伝送順序の保証を行っている。標準的な構成の K-NET 観測点の場合、3 成分の 100Hz サンプルングデータを 64kbs のベストエフォート型回線で伝送している。35 観測点の 38 時間の波形データを対象に伝送遅延について調査したところ、97% のパケットでサンプルングから伝送完了までが 0.2 秒以内であり、パケット長の短縮による伝送の即時性の向上が予想通りに達成されていることがわかった。

キーワード: 強震観測, 強震計, 地震早期警報

Keywords: strong-motion observation, strong-motion seismograph, earthquake early warning

SSS023-P03

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

常時微動から建物の応答特性を抽出する新しい方法の提案 A New Method to Extract Building Response Parameters from Microtremor Data

王 欣^{1*}, 入倉 孝次郎¹, 正木 和明¹

Xin Wang^{1*}, Kojiro Irikura¹, Kazuaki Masaki¹

¹ 愛知工業大学

¹ Aichi Institute of Technology

Generally, a building can be considered as a system which is composed of the upper structure, the base, and the supporting ground of the building. Therefore, the response of a building system can be seen as a composition of the response of the upper building (fixed-base building) and the response of rigid-body due to the soil-structure interaction including rocking and horizontal vibration (sway). In order to fulfill the building damage analysis meticulously, extracting the response parameters of (A) the building system, (B) the fixed-base building, and (C) the soil-structure interaction from ground motion records of buildings is very necessary. There have been proposed many methods to extract the building response parameters (A)-(C) respectively. The methods so far used need to have many observation points on the first and top floors. We proposed a simple and easy method to extract all of the building response parameters (A)-(C) from the fewest points, one on the first floor and one on the top of the building. Microtremor records are often used to extract building response parameters, because they can be easily obtained at any time.

The new method to extract the building response parameters (A)-(C) from microtremor records of the 1F and the top of the building is presented based on the Deconvolution method, which was proposed by Snieder and Afak (2006) based on the interferometry method and was improved by Todorovska (2009a, 2009b). It is a very good method to extract the response parameters of fixed-base buildings and the base rocking vibration. The feasibility of this method to extract the response parameters from observed records on buildings during earthquakes has already been proved by the proposers. Based on the deconvolution method, in this paper, a method to extract the response frequencies of the building system (), the fixed-base building (), rigid-body rocking (), and rigid-body sway () from microtremor records on the top and the base of buildings is proposed. The feasibility of our method is examined by comparing the extracted building response parameters from microtremor data recorded on a 6-story building (Building No.2 in the Yakusa campus of the Aichi Institute of Technology) with those extracted from earthquake records on the same building and the numerical analysis results obtained based on the multi-degree-of-freedom model of this building. This method not only makes the extraction of building response parameters easier using only the records of the base and the top floor of buildings, but also provides an approach to extract the S-wave velocity traveling within the buildings using the records of the inter floors.

キーワード: 常時微動, 構造物の応答パラメータ, Deconvolution Method, 被害度, S波伝播速度

Keywords: Microtremor, Response Parameters, Deconvolution Method, Damage Level, S-wave Velocity

SSS023-P04

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

Multiple, Three-Dimensional Interactions between the Ground and a Group of Structures Subjected to Seismic Impact Multiple, Three-Dimensional Interactions between the Ground and a Group of Structures Subjected to Seismic Impact

上西 幸司^{1*}, Ioan R. Ionescu²
Koji Uenishi^{1*}, Ioan R. Ionescu²

¹ 神戸大学都市安全研究センター, ²LPMTM, University of Paris 13

¹Res Ctr Urb Safety & Security, Kobe Univ, ²LPMTM, University of Paris 13

In our earlier study, using a fully coupled, two-dimensional ground-structure model, we have investigated the dynamic interactions between a set of identical buildings in a town and shown the collective behavior of the buildings during a seismic excitation: Due to the multiple interactions through (the waves in) the ground, the eigenfrequencies of the collective building system, i.e., town, become lower than the resonant frequency of a single building. This shift of eigenfrequencies may be called the "town effect" (or "city effect"). Our analysis is different from the conventional ones where each structure is handled individually, and the frequency shifts and "unexpected" structural behavior may be recognized only if the mechanical movement of the structural group is analyzed jointly. In the study, however, we have just considered the anti-plane shearing of a linear elastic half space on which identical buildings, each consisting of an elastic spring that connects a concentrated mass at the top and the rigid foundation at the bottom, stand. In this contribution, we shall briefly summarize some quantitative information about the two-dimensional anti-plane town effect and show its significance by investigating the actual structural damage patterns found on the occasions of several earthquakes in Europe and Japan. Then, we shall further consider the in-plane and three-dimensional cases and generalize the mathematical statement of the related problems. Since the "town effect" may be induced by dynamic structural impact in general (e.g., blasting), the simple analytical models handled here may contain the essential features that will play an important role in evaluating the dynamic performance of a group of structures in urban environments around the world.
Keywords: earthquake hazard, collective behavior, city effect, town effect, dynamic ground-structure interaction

SSS023-P05

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

アンケート震度調査にもとづく2009年12月の伊豆半島東方沖地震の詳細震度分布 Seismic intensity of the two earthquakes (Dec.17-18,2009) off the east Izu Peninsula, based on a questionnaire survey

望月 麻紗樹^{1*}, 小山 真人², 林 能成³

Masaki Mochizuki^{1*}, Masato Koyama², Yoshinari Hayashi³

¹ 静岡大学教育学部, ² 静岡大学防災総合センター, ³ 関西大学社会安全学部

¹ Faculty of Education, Shizuoka University, ² CIREN, Shizuoka University, ³ Faculty of Safety Science, Kansai Univ.

1978年以降46回目となる伊豆半島東方沖の群発地震が2009年12月に発生し、17日23時45分、18日8時45分には伊東市大原で最大震度5弱を観測する大きな揺れが起こった。この地震によって、これまでにない多数の家屋の一部損壊・半壊が伊東市内で発生した。震度5弱の揺れでこれほどの被害が出ることは通常考えにくく、また被害の局地性が強いことから、地盤特性に左右されたとみられる。そこで、伊東市内の詳細な震度分布と地盤特性を調べるために、2010年2月中旬から末にかけて伊東市内の10の小学校の全保護者世帯、ならびに特に被害の大きかった2地区(長美代町、小室1丁目)とそれに隣接する2地区(城星町、小室2丁目)の町内会の全世帯に対して質問紙による調査を行った。それらの設問ならびに震度の算出と気象庁震度への変換は、太田ほか(1998, 自然災害科学)のアンケート震度調査法にもとづいた。

回収された2990枚の調査票の内、2557枚を有効回答とした。なお、12月17日と18日の二つの地震を区別するための設問を用意したが、両地震の発生間隔が短かったことと、地震発生からアンケート調査までやや間が空いたことから、実際の区別は難しかった。そこで、両地震の震源と規模がほぼ同じであることから、両地震を一つの地震とみなして分析した。

伊東市内は地形の起伏が激しいことから、メッシュ単位で平均をとらずに、近傍三点の平均値として各地の震度を求めた。その結果、気象庁の震度観測点のある伊東市大原付近では平均震度5弱(4.6)となって気象庁の発表と一致したが、小室1丁目と長美代町はともに平均震度5強(5.4)、最頻値は震度6弱相当となり、気象庁発表を上回る強い揺れが起きたことが判明した。一方、城星町の平均震度は5強、最頻値は5弱、小室2丁目では平均震度・最頻値ともに震度5弱に留まった。

次に、レーザー測量による1mメッシュの標高データを用いた赤色立体地図、ならびに既存の火山地質図(小山, 2010, 伊豆新聞社など)を用いて、地形・地質と震度分布とを比較した。上記4地区は標高100?150mの平坦な台地上にある。この台地は新第三系の火山岩類を基盤として、その上位を伊豆東部火山群起源の厚さ数m?10数mの溶岩流・火山灰・火山礫層・褐色ロームなどが覆うが、厚い溶岩流に覆われるのは小室2丁目のみである。上記したように震源に近い2地区(小室1丁目、長美代町)の震度が大きい一方で、ほぼ同じ距離にある小室2丁目の震度が小さいのは、厚い溶岩流(小室山火山起源)が強固な地盤をつくっているためであろう。

複数の活断層が破壊する地震の震源モデル化手法の検討 - 地盤条件を考慮した震度分布に基づく濃尾地震の断層モデルと強震動評価 Examination of construction methodology of source model in case of multi-segment rupture

栗山 雅之^{1*}, 佐藤 浩章¹

Masayuki Kuriyama^{1*}, Hiroaki Sato¹

¹ 電力中央研究所

¹ CRIEPI

複数の活断層が同時に破壊した地震の一例である 1891 年濃尾地震の震源像を調べておくことは、連動性を考慮した強震動予測のための震源モデル化手法を確立するために重要である。Kuriyama and Iwata(EPS in press) は、濃尾地震を対象として複数の特性化震源モデル(入倉・三宅, 2001)を構築し、仮定したモデルごとに、経験的グリーン関数法(Irikura, 1986)を用いて地震動を計算して求めた震度と、アンケート調査に基づく震度分布(村松・小見波, 1992)から推定した震度を比較することで、複数の活断層が同時に破壊する地震の震源モデル化手法を検討してきた。彼らが比較に用いたアンケート調査に基づく震度(村松・小見波, 1992)は濃尾平野で空間的に高密度であり、その震度の発生要因を精査することで、濃尾地震の震源像について更に詳細な議論ができると考えられる。

栗山・佐藤(2010)では、濃尾地震時に濃尾平野内で認められた激震域のアンケート調査地点を必須として、地盤の卓越周期と震度・被害率の関係を調べるために常時微動観測を行った。我々はその関係に基づいて表層地盤の影響を取り除いた震度分布を推定した。その結果、震度7の地点は、活断層研究会(1991)が示した伏在断層(岐阜-一宮線)の推定位置の北側部分に沿って直線状に分布することが分かった。これは、愛知県(1998)の反射法探査の結果とも調和的と考えられる。そこで、本研究では、岐阜-一宮線がないとした場合、岐阜-一宮線の全域が活動した場合、および、北側部分のみが活動した場合について強震動シミュレーションを行い、シミュレーション結果による震度分布を用いて 1891 年濃尾地震の震源像について検討する。

強震動シミュレーションを行うための震源モデルとして、広帯域の強震動予測で広く用いられている入倉・三宅(2001)の特性化震源モデルを用いた。ここでは、岐阜-一宮線がないモデル、岐阜-一宮線の全域が破壊するモデル、および、北側部分のみが破壊するモデルという3つのモデルを構築した。尚、Kuriyama and Iwata(EPS in press)を参考に、アスペリティの断層面積に占める割合は、Somerville et al. (1999)に従って22%とし、破壊開始点は温見断層の北西端と仮定した。強震動シミュレーションは、根尾谷断層の南部から濃尾平野南部にかけての地域で、基準地域メッシュ(3次メッシュ)ごとに、統計的グリーン関数法を用いて行った。本稿では、特徴的な被害分布の発生への震源断層の影響を調べる目的で、地震基盤上面での水平成分の加速度波形を計算して震度分布を求めた。尚、速度構造モデルは、堀川・他(2008)を用いている。

本稿では、地震基盤上面でのシミュレーション結果による震度分布と、栗山・佐藤(2010)による表層地盤の影響を取り除いた震度分布を比較した。その結果、岐阜-一宮線が無いとした場合にシミュレートした震度分布では、震度7の地点が直線上に認められた濃尾平野の北西部において、比較的大きな震度が直線状に分布することはなかった。また、岐阜-一宮線の全域が活動したとする場合には、岐阜-一宮線の南側半分の直上周辺で北側部分と同程度の震度が計算され、濃尾平野で見られた震度分布のように、岐阜-一宮線に沿った南北での相対的な震度の差は認められなかった。一方で、北側部分のみが活動した場合のシミュレーション結果による震度の分布は、栗山・佐藤(2010)の震度分布と整合する結果となった。尚、ここでは、地震基盤上面でのシミュレーション結果と比較したが、岐阜-一宮線に沿った南北方向で、地震基盤から $V_s600\text{m/s}$ 相当の工学的地盤までの増幅率のレベルは著しく変化しないため、面的分布の特徴は工学的基盤でも同様のものになると推察される。これについては、今後、地震基盤から工学的基盤までの増幅率を考慮した比較検討を行う。

謝辞 本研究では、濃尾平野の速度構造モデルとして、堀川・他(2008)を使用させて頂きました。

キーワード: 1891年濃尾地震, 常時微動のH/Vスペクトル比の卓越周期, アンケート震度, 強震動評価, 震源モデル化手法
Keywords: The 1891 Nobi earthquake, Predominant period of H/V spectral ratio of microtremors, Questionnaire-based intensity,

Strong ground motion simulation, Source-model construction methodology

震源パラメータのばらつきを考慮した相模トラフ沿いの地震の震源モデルと地震動の予測

Broadband ground motion simulation for great earthquakes along Sagami Trough

関口 春子^{1*}, 吉見 雅行², 堀川 晴央²

Haruko Sekiguchi^{1*}, Masayuki Yoshimi², Haruo Horikawa²

¹ 京都大学防災研究所, ² 産総研 活断層・地震研究センター

¹ DPRI, Kyoto University, ² AFERC GSJ/AIST

関東地震は、陸域直下の比較的浅いところで起きる海溝型巨大地震である。1923年の大正関東地震は、日本で史上最大の被害を生んだ。繰り返し間隔は200年程度であり、重要構造物の寿命と比較すれば十分近い将来に次の関東地震が起こる可能性がある。

我々は、波形インバージョンによる震源モデル (Sato et al., 2005) に、より短波長の不均質を追加して1923年関東地震の広帯域震源モデルを作成し、関東平野の広帯域地震動をシミュレーションし、震度分布や地震動波形の再現に一定の成功を収めた (Sekiguchi and Yoshimi, 2010)。しかし、次に相模トラフ上で起きる地震は、1923年の地震と同じとは限らない。実際、同じく相模トラフ沿いで発生した1703年元禄関東地震は、1923年の大正関東地震の破壊域に加え、さらに東の領域へ破壊が伝播し、その結果、房総半島の地殻変動量や九十九里での津波高が、大正関東地震より有意に大きくなったと解釈されている (松田・他, 1974; 宍倉, 2000; 羽鳥・他, 1973)。

ひとつの震源域で起こる地震は、ほぼ一定の境界条件 (ほぼ一定したプレート境界形状、沈み込み速度など) から生じる固有性と、複雑系に発生する非線形現象が本質的に持つ変動性とを合わせもつと考えられる。例えば福島沖などのプレート境界面上で繰り返し活動しているとされるアスペリティ (永井・他, 2001) は、固有性の現れと考えられる。一方、そのような固有の場があっても、地震破壊がトリガーされる場所、そのときの応力蓄積レベルやその分布が変動することによって、破壊の広がり方が変わり、応力降下量、破壊域、地震規模が変わる。地震動を特徴付けるパルスの周期は比較的安定するかもしれないが、地震動の大きさも、地震動が最大となる地域も変わる。

本研究では、相模トラフ沿いの大地震について、アスペリティ分布は震源域に固有としつつ、各震源パラメータに変動を織り込んで地震シナリオ群を作成し、地震動分布がどのような幅で変化するかを把握する。考慮する破壊域は、相模トラフのうち、大正関東地震の断層面で、かつ、元禄関東地震でも動いたとされる部分、および、その南東側の、大正関東地震では破壊がおよばず元禄関東地震で動いたとされる部分とする。この想定震源域内の固有アスペリティとして、大正関東地震の断層面上には、この地震のインバージョン解析で共通して得られている2つのアスペリティを設定する。それ以外の断層セグメントでは、そのサイズに応じて適当なアスペリティを仮定する。

変動幅を与える震源パラメータは、平均応力降下量、平均破壊伝播速度、破壊開始点位置、すべりと破壊伝播速度の空間的に小スケールの不均質成分である。平均応力降下量と平均破壊伝播速度については、過去の地震の震源モデルのコンパイルから推定される変動量を用い、平均値 ± 1 を変動幅として設定する。破壊開始点については、地震記録から決められた大正関東地震の開始点のほかには、候補地点を挙げる有力な根拠が見つからないため、地震動分布への影響を考えていくつか設定する。

地震動の計算は、工学基盤面を地表とする地震動を低周波数成分と高周波数成分に分け、低周波数成分 (< 0.5 Hz) は3次元差分法 (Pitarka, 1999)、高周波成分 (> 0.5 Hz) は統計的グリーン関数法 (大西・堀家 (2004) を基本に一部改変) で行い、これらを足し合わせてから浅層地盤の応答を等価線形化手法 (DYNEQ: 吉田・末富, 1996) で付加する、というハイブリッド法を採る。3次元差分法計算に用いる地盤構造モデルは、内閣府中央防災会議 (2004) にて使用されているものを採用する。

計算された地震動分布の比較から、関東平野中心部の広い領域で地震動レベルを大きく変化させるのは、応力降下量の変化と破壊開始点の移動であることが分かった。破壊伝播速度の変動幅はあまり大きくないため、影響は相対的に小さい。大正関東地震で破壊の広がらなかった千葉県沖の断層セグメントの影響は、神奈川県から千葉県南部下に広がる大正関東地震の断層セグメントに比べると非常に小さい。

キーワード: 地震動予測, 関東地震, 海溝型地震, アスペリティ, ばらつき

Keywords: ground motion prediction, Kanto earthquake, interplate earthquake, asperity, variation of parameter

規格化短周期エンベロープを用いた想定東南海・南海地震の断層破壊の即時的イメージング実験

Feasibility of near-real-time imaging of the rupture of megathrust earthquakes 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), (2011, 本大会)] 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年十勝沖地震や1994年三陸はるか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。

今世紀前半にも発生が懸念されている東南海・南海地震については、連動して発生した場合、マグニチュードはM8.5前後、断層の全長は500km程度 [地震調査委員会, 2001] となると想定されている。また、複数のアスペリティが存在し、紀伊半島沖の破壊開始点からバイラテラルに破壊が進行すると想定されている。今まで本手法を用いて解析した地震は、高々M8.0程度までで、主としてユニラテラルに破壊が進行したもののみを取り扱ってきた。そのため、このような巨大で複雑な破壊に対して、本手法の適用可能性を調査することは重要であり、本講演ではこの点について理論エンベロープを用いて考察した結果を報告する。

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。

今までは、断層長が100km~150km程度の地震を対象としてきたため、震源域全体を単一の観測点グループを用いてイメージングしてきた。しかし、東南海・南海地震のように数百kmにも及び震源域に複数のアスペリティがあるような場合の適用可能性は未知である。そこで本報告では、従来のように震源域を一体として強度をイメージした場合(ケース1)と、震源域を分割して、その周辺の観測点のみを用いて解析した場合(ケース2)の両者を比較することとした。

理論エンベロープについては、中央防災会議(2005)が連動型の強震動予測に用いたアスペリティ分布に基づいたエネルギー時刻歴に、内部減衰を考慮した地震波散乱理論 [Saito et al., 2002, 2005] に基づくエンベロープを畳み込むことにより算出した。

3. 想定東南海・南海地震への適用実験

震源格子は、ケース1の場合、想定震源域とその周辺領域(トラフ軸と平行1000km×トラフ軸と直交200km×深さ95km)に4km間隔で配置した。ケース2の場合は、ケース1の領域をトラフ軸と平行方向に200km間隔で100kmずつオーバーラップさせながらの9分割した。各格子では震源時から180秒間の強度を計算した。理論エンベロープは、気象庁津波地震早期検知網の加速度計と、気象庁および海洋研究開発機構の既設のケーブル式海底地震計の設置点において計算した。

ケース1の場合は、破壊開始点から500km以内の84観測点を用いた。その結果、東南海地震側の最も破壊開始点に近いアスペリティは、おおそイメージ出来たものの、それ以外は最大強度0.7を超えてイメージすることは出来なかった。

ケース2の場合は、各領域内の基準点から250km以内の20~37観測点を用いた。その結果、9か所設定したアスペリティのうち、最も小さな二つのアスペリティを除いて、その時空間的に近接した場所にピークが現れ、その強度は0.7を超えていた。なお、解析領域の端において、偽の強度が出現しやすい傾向があったが、領域を重ね合わせて解析することにより、信頼度の評価を行うことが可能となった。

以上のように、東南海・南海地震のような巨大で複雑な破壊をする地震については、解析領域を分割し、その領域に近接したデータのみを用いたほうが、良好にイメージングを行える可能性があることがわかった。今後は、偽の像の出

現を抑え、分解能を高める領域の設定方法についても検討が必要であろう。

なお、本解析においては、データは震源時から7分程度必要であり、計算時間はIntel Xeon X5550(2.66GHz)を用いてケース1の場合15.4分で、ケース2の場合は、各領域は48~99秒で、全領域合せても約10.6分であった。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。

キーワード: 即時的処理, 震源過程解析, 数値実験, 東南海・南海地震

Keywords: Near-real-time processing, Source process, Simulation, The Tonankai and Nankai Earthquakes

曲面断層モデルを用いた震源過程解析 東北日本で発生した2つのスラブ内地震への適用

Source inversion using curved fault model: Application to the two intraslab earthquakes in northeast Japan

鈴木 亘^{1*}, 青井 真¹, 関口 春子²

Wataru Suzuki^{1*}, Shin Aoi¹, Haruko Sekiguchi²

¹ 防災科学技術研究所, ² 京都大学防災研究所 / 防災科学技術研究所

¹NIED, ²DPRI, Kyoto Univ./NIED

複雑な断層面形状を持つ地震の震源過程解析を行うために、我々は曲面断層モデルを用いた震源インバージョン手法の開発を行ってきた。同手法では、断層面の通る点列を設定し非一様有理 B スプライン (Non-Uniform Rational B-Spline; NURBS) を用いて補間することにより曲面断層面を構築する。この曲面断層に対し、マルチタイムウィンドウ線型波形インバージョン法を適用して断層破壊過程を推定する。本研究では、強震記録を用いた震源過程解析から断層面が単純な平面ではないことが示唆されている 2003 年宮城県沖の地震 (Wu and Takeo, 2004; 青井・他, 2005) および 2008 年岩手県沿岸北部の地震 (Suzuki et al., 2009) の東北日本で発生した 2 つのスラブ内地震を解析対象として、曲面断層モデルを用いた震源インバージョン手法の適用性、有用性などについて検討を行う。これらのスラブ内地震で観測された波形記録の多くでは、浅部の地下構造により二次的に生成された地震波の影響が小さいため、理論的グリーン関数を用いた波形モデリングに基づいて震源メカニズムの変化を検出することが比較的容易であった。

2008 年岩手県沿岸北部の地震について、まず Suzuki et al. (2009) の提案した 2 枚矩形断層モデルの断層面間の隙間を埋めるように曲面断層モデルを構築し震源過程解析を行った。2 枚矩形断層を用いた解析では北部の断層面に大きいすべりが得られていたが、曲面断層を用いた解析では隙間であった領域まですべりが広がり、最大すべり量は 2 枚矩形断層を用いた結果と比べて小さく推定された。また隙間を挟んだ南部の断層面の断層端に推定されていた面積の小さなアスペリティが、曲面断層を用いた解析では明瞭には見られなくなった。推定された地震モーメントはともに F-net と Global CMT のモーメントテンソル解析による値の 1.3 ~ 1.6 倍ほど大きかったが、曲面断層を用いて推定された値は 2 枚矩形断層を用いた解析の値より 10% ほど小さかった。これらの結果は、矩形断層を用いた解析では手法上の制約のために断層端となっていた領域ですべりが過大に推定されていたが、曲面断層を用いて現実に近い断層形状を考慮したことで妥当なすべり分布を推定できた可能性を示している。しかしながらすべり分布から計算されるモーメントテンソルより震源メカニズム解を描くと、曲面断層を用いた結果は 2 枚矩形断層を用いた結果とほぼ同じ形状をしており、モーメントテンソル解析の結果とは異なっている。2 枚矩形断層モデルは破壊開始点の位置する南部では P 波初動解、北部ではモーメントテンソル解の節面に対応しており、曲面断層モデルもこの形状に基づいて構築されているが、必ずしも断層面の北部の形状がモーメントテンソル解の節面と対応する必要はない。

そこですべり分布から得られるモーメントテンソルとモーメントテンソル解析の結果との差異を小さくすることを目的に、断層面北部の形状の検討を行った。走向を反時計回りに 20 度回転した曲面断層モデルを用いた解析から、当初の曲面断層モデルを用いた解析結果よりもモーメントテンソル解のメカニズムに近い結果が得られた。ただし地震モーメントは当初の結果と同程度であり、モーメントテンソル解の値とは開きがある。今後はモーメントテンソル解との差異を生じる原因を精査し、曲面断層形状の修正を図る。

2003 年宮城県沖の地震については、Wu and Takeo (2004) では傾斜方向に、青井・他 (2005) では走向方向に異なる矩形面を配置した断層面モデルが提案されている。針生・小原 (2005) が均質観測点法を用いて推定した詳細な余震分布を参照すると、深さ断面では深さ方向に傾斜角が変化し折れ曲がるような形状を示し、水平分布では余震域の南部と北部で走向の違いが見られる。この余震分布のように走向、傾斜ともに変化する断層面を構築するには、曲面断層モデルが有効である。そこで P 波初動解、モーメントテンソル解および余震分布を参考に曲面断層モデルを構築し震源過程解析を行った。大局的には 2 枚矩形断層を用いた青井・他 (2005) と整合的なすべり分布が推定された。合成波形は基本的に観測波形に一致しているが、十分に再現できていないフェイズも存在する。1 枚の矩形断層を用いた解析から、再現が充分でない理由は、断層面形状の設定に適切でない点が残っており、震源メカニズムの変化を完全には説明できていないためと考えられる。今後は波形やモーメントテンソルの再現を参照して最適な震源モデルを推定し、解析した 2 つのスラブ内地震についてアスペリティの広がりや応力降下量分布に注目して曲面断層モデルを用いた震源過程解析手法の有用性について検討を行う。

キーワード: 震源インバージョン, 曲面断層, 強震記録, スラブ内地震

Keywords: source inversion, curved fault, strong motion, intraslab earthquake

2008年 Wenchuan 地震における震源モデルの改良 Improvement of Source model for simulating strong ground motions during the 2008 Wenchuan earthquake

倉橋 奨^{1*}, 入倉孝次郎¹

Susumu Kurahashi^{1*}, Irikura Kojiro¹

¹ 愛知工業大学

¹ Aichi Institute of Technology

1. Introduction

The Wenchuan earthquake with a moment magnitude of 7.9 (United States Geological Survey, USGS) struck the western part of Sichuan Province on 14 May 2008, China, resulting in about 70,000 fatalities as well as huge damage to infrastructures and buildings. Causes of serious damage of structures should be attributed to characteristics of strong ground motions and vulnerability of structures.

The strong motion records during the Wenchuan earthquake will be very useful not only in making source modeling for estimating strong ground motion but also in clarifying the relation between structural damage and strong ground motions through reproduction of ground motions at damage sites. We estimated the characterized source model for simulating ground motions using the empirical Green's function (EGF) method and the hybrid method for the 2008 Wenchuan earthquake (Kurahashi and Irikura, 2010). However, it has some problems. One of the problems is that the ground motions at Wolong station (WCW) in backward direction to Asperity 2 have smaller amplitudes, compared with the observed. Second, the contribution from asperities on the north-east segment to ground motions was not considered. In this study, to improve these two problems, the analysis was performed by the discrete wave number method. This model is a tentative version.

2. Analysis

We adopt basically the characteristic source model for the south-west segment reported by Kurahashi and Irikura (2010). The best model was determined by try and error. We used the observed records at 13 stations including the WCW, SFB and MZQ near the source fault. We find that the observed records at WCW are reproduced considering the rupture starting point of Asperity 2 not at the edge of the asperity area but inside it. This means that the rupture on Asperity 2 propagated not uni-laterally but bi-laterally. As a result, the area of Asperity 2 became larger of fit the observed records in forward direction such as SFB and MZQ as well as those in backward direction such as WCW.

Next, we estimated the contributions of asperities on the north-east segment to ground motions as stations in north-east direction.

There are several observation stations near the northeast segment. Remarkable wave pulses at the stations were not observed.

In this study, the best model was determined by try and error comparing the observed and the calculated motions. As a result, we presumed four asperities at the north-east segment. The stress drops on asperities are taken from 10 to 13 MPa. In future, we attempt to simulate ground motions using the empirical Green's function method.

経験的グリーン関数法と3次元有限要素法による2009年駿河湾の地震の強震動シミュレーション Simulation of Strong Ground Motions during the 2009 Suruga-bay Earthquake using Empirical Green's Function and 3D-FEM

佐口 浩一郎^{1*}, 倉橋 奨², 正木 和明², 入倉 孝次郎²
Koichiro Saguchi^{1*}, Susumu Kurahashi², Kazuaki Masaki², Kojiro Irikura²

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

2009年8月11日に発生した駿河湾の地震の際、中部電力浜岡原子力発電所構内において5号機では他の観測点に比べ2倍程度の地震動が観測された。本研究では、鉛直アレイ観測点である3号機(3G1S)の地中観測点(深度150m)における中小地震記録から経験的グリーン関数法により2009年駿河湾の地震の本震時における浜岡原子力発電所直下の入射地震動の推定を行い、NIED(J-SHIS)による深部地盤モデルに中部電力の調査による浅層地盤を反映させた地下構造モデルを用いて3次元FEM解析による強震動シミュレーションを実施することにより、特に地震動の大きかった5号機における本震記録の再現を試みる。

2. 経験的グリーン関数法による入射地震動の推定

既往の震源モデル¹⁾では、原子炉建屋に設置されている観測波形の特徴から、アスペリティ1の解析には8月13日12:42の余震を、アスペリティ2の解析には8月13日18:11の余震をグリーン関数として用いた波形の合成が行われている。本研究においても、同様にこれらの2つの余震を用いて原子力発電所敷地直下の地震基盤内(深度6km)における入射地震動の波形合成を行った。なお、グリーン関数として用いる余震記録は3号機地盤系の記録から1次元重複反射理論により地震基盤における入射波を算出し使用した。3号機において合成した波形は最大振幅および各パルスともに概ね観測波形を再現しており、地震基盤内における入射地震動の合成波形が妥当であると思われる。

3. 3次元有限要素法による深部地盤構造モデル

2009年駿河湾の地震の後、中部電力浜岡原子力発電所の敷地内および周辺地域では、反射法による地下構造探査が実施されている²⁾。本研究では、この反射法探査結果から震源(各アスペリティ)と浜岡原子力発電所が含まれるよう50km×50km×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、反射法探査結果による浅部地下構造が存在する部分については、反射法探査結果をそのまま用い、探査結果のない部分についてはNIED(J-SHIS)モデル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強震動シミュレーション

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³⁾⁴⁾を用いる。浜岡原子力発電所直下の地震基盤内(深度6km)における入射地震動の3成分を、各アスペリティからの合成波形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解析を行った。対象とする周期帯域は0.5秒以上とし、入射角は各アスペリティから入射地震動の合成位置(3号機直下6km)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理的であった。

謝辞

本研究では、中部電力 から提供された地震観測記録を使用しています。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 倉橋奨・入倉孝次郎・宮腰研: 近地強震記録を用いた2009年駿河湾を震源とする地震の震源モデルの構築と強震動シミュレーション, 日本地震工学会・大会 - 2009 梗概集, 216-217, 2009
- 2) 中部電力(株): 地下構造調査結果を踏まえた解析用地盤モデルに基づく検討について(検討資料集), 原子力安全保障院, 耐震・構造設計小委員会, 地震・津波・地質・地盤合同WG資料, 合同 W42-1-1, 2010.1
- 3) 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

4) 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: 経験的グリーン関数法, 3次元有限要素法, 2009年駿河湾の地震, 強震動シミュレーション

Keywords: empirical Green's function method, 3-D finite element method, 2009 Suruga-bay earthquake, simulation of strong ground motions

3次元速度構造モデルを考慮した理論的グリーン関数による2007年新潟県中越沖地震の震源過程解析 Source process inversion of the 2007 Chuetsu-oki earthquake using theoretical 3-D Green's functions

引間 和人^{1*}, 植竹 富一¹

Kazuhito Hikima^{1*}, Tomiichi Uetake¹

¹ 東京電力(株)技術開発研究所

¹R & D Center, TEPCO

1. はじめに

2007年新潟県中越沖地震(Mj 6.8)では震源近傍に位置する柏崎刈羽原子力発電所(KKサイト)において複数の強震計において大振幅の加速度波形が観測された。これらの観測記録には同じ発電所敷地内であるにも関わらず観測波形の特徴に相違が存在し、特に波形に見られる3つの明瞭なパルスの振幅およびパルス間の大小関係がサイト内の北部と南部の観測記録で異なっていた。東京電力(2008)や徳光・他(2009)は、2次元断面での地震動シミュレーションを行い、サイト内の褶曲構造がこれらの要因の一つであることを明らかにした。それらの結果を受け、早川・他(2011)では、サイト近傍の3次元速度構造モデルを構築し、余震記録のシミュレーションによりモデルの有効性を確認した。

一方、中越沖地震に対する強震記録を使用した震源過程解析では、例えば、引間・纈纈(2008)では観測点毎に最適化された速度構造モデルを使用してグリーン関数を計算してはいるものの、1次元成層構造モデルを仮定しているため、得られた結果の精度・分解能には限界があった。そこで、本研究では、より詳細な震源像を得ることを目標とし、早川・他(2011)により構築された3次元速度構造モデルにより計算されるグリーン関数を使い、あらためて震源過程解析を試みた。

2. 解析データ・解析方法

解析には、引間・纈纈(2008)と同様に震源周辺に設置されたK-NETおよびKiK-netの地中波形記録に加えてKKサイトの観測波形を使用した。K-NET, KiK-net観測点は加速度波形に0.03~0.5Hzのバンドパスフィルタをかけ積分した速度波形を0.2s間隔でリサンプリングし、KKサイト内の観測波形は、0.03~1.0Hzのバンドパスフィルタを適用し、0.1s間隔のサンプリングとした。

グリーン関数の計算は、KKサイト内の観測点については、早川・他(2011)の3次元速度構造モデルを水平方向50m間隔で格子化したグリッドモデルを使い、速度-応力型のスタガードグリッドによる3次元差分法により計算した。一方、周辺の観測点に対しては、現段階では、使用している3次元速度構造モデルのチューニングが必ずしも十分ではないこと、また計算機能力の制約から計算領域を大きくとることができないため、引間・纈纈(2008)の1次元速度構造と同じものを使用している。なお、引間・纈纈(2008)に比べてKKサイトでのグリーン関数の信頼性は向上していると考えられるため、サイト内の波形のウェイトを他地点に比べて重くして解析を行った。

断層面については、引間・纈纈(2008)と同じ長さ30km×18km、走向=38deg、傾斜=34degの震源から南西に延びる南東に傾き下がる面とした。この断層面を2km×2kmの小断層に分割してmulti-time windowによるインバージョンを行った。なお、芝・他(2011)と同様に走向方向に傾斜角が変化するような断層面についても検討する予定である。

3. 解析結果

予察的な解析では、破壊開始点の南側(破壊開始点とKKサイトの間)、およびKKサイトの南西の沖合に最終すべりが大きな領域(アスペリティ)が存在する結果が得られた。サイト内の観測記録の特徴は十分再現されている。すべり分布の主要な特徴は以前の結果と大きくは変わらないが、南部のアスペリティは以前よりも南側の陸に近い領域に移動した。

しかし、multi-time window解析を行っているため、同じ小断層で複数回のすべりが生じたり、南部で局所的に破壊伝播速度および伝播方向が急変しているように見えるなど、すべりの時間変化は複雑である。これらは解析上の誤差である可能性もあるが、芝(2008)は南部のアスペリティ(第3アスペリティ)での破壊伝播速度の加速または海側からの破壊を指摘しており、それらに対応している可能性もある。

4. おわりに

予察的な結果であるが、3次元速度構造を考慮した解析により、KKサイトでの観測記録を再現可能な結果が得られた。また、他の解析結果(例えば、芝(2008))などとも概ね調和的なすべり分布となっている。しかし、サイト外の周辺の観測点については、3次元速度構造モデルが十分なものとはなっていないため、従来のグリーン関数を使用せざるを得なかった。引き続き構造モデルの改良を行いながら、震源像の精度向上を目指したい。

キーワード: 中越沖地震, 震源過程, 3次元速度構造, 強震動

Keywords: Chuetsu-oki earthquake, Source process, 3-D velocity structure, strong motion

高精度余震分布と三次元速度構造モデルに基づく2007年新潟県中越沖地震の震源モデルの再評価

Source model of the 2007 Chuetsu-oki earthquake based on precise aftershock distribution and 3-D velocity structure

芝 良昭^{1*}, 引間 和人², 植竹 富一², 水谷 浩之², 津田 健一³, 早川 崇³, 田中 信也⁴

Yoshiaki Shiba^{1*}, Kazuhito Hikima², Tomiichi Uetake², Hiroyuki Mizutani², Kenichi Tsuda³, Takashi Hayakawa³, Shinya Tanaka⁴

¹ 電力中央研究所, ² 東京電力, ³ 大崎総研, ⁴ 東電設計

¹ CRIEPI, ² TEPCO, ³ ORI, ⁴ TEPSCO

一般に震源インバージョン解析では、断層のすべり分布を求める前提となる初期断層面をメカニズム解や余震分布に基づき先験的に決定しておく必要がある。しかしながら2007年新潟県中越沖地震では、震源が海域に位置していたことや、震源域の地下構造が複雑であったことなどから、本震発生直後における余震の震源決定精度が低く、本震の断層面推定が困難であった。その後、海底地震計による震源直上での余震観測が行われた結果、高精度の余震分布が求められ、本震の断層面は南東傾斜であることが明らかとなっている(Shinohara et al., 2008)。一方で、海底地震計記録に基づく余震分布を詳細に検討すると、本震断層の北部から南部に向かって断層傾斜角が浅くなっているようにも見える。本検討ではこれらの知見を参考にして、断層の傾斜角が変化する曲面断層を初期モデルとして設定し、震源インバージョン解析、ならびに特性化震源モデルを用いた広帯域強震動シミュレーションを実施した。

本検討では、本震断層面を北部、中部、南部の三領域に分割し、北部は傾斜角40度、南部は同30度の平面断層として、両者を繋ぐ遷移領域(中部断層)において傾斜角が徐々に変化するものとした。断層の走向は全領域で39度としている。北部と南部の傾斜角の差は10度と小さいため、中部断層の傾斜角は直線状に変化するものとし、全体として想定している地震発生層(上限6km, 下限17km)の範囲内で余震の断面分布とできるだけ調和するように断層面を求めた。初期断層面全体の断層長は28kmで、北部、中部、南部の各領域はそれぞれ7km, 10km, 11kmである。解析には芝(2008)と同様に、経験的グリーン関数法と焼きなまし法を組み合わせた非線形解探索手法を用いた。得られたすべり分布モデルと、1枚平面断層を仮定した芝(2008)のモデルとを比較した結果、すべり量が相対的に大きいアスペリティの位置は、震源に最も近い第一アスペリティがやや北西に移動した以外に大きな変化は見られず、平面断層の仮定はおおむね妥当であることがわかった。さらにインバージョン結果を基に特性化震源モデルを作成し、柏崎刈羽原子力サイト内の原子炉建屋基礎版上観測記録、およびサービスホール鉛直アレイ最深部の記録を対象に広帯域シミュレーションを実施し、モデルの妥当性を検証した。その結果、芝(2008)による平面断層の特性化モデルと比較して、第一アスペリティの面積を20%縮小し、かつ応力降下量を10%低減したモデルが観測記録をよく説明できることがわかった。

一方、柏崎刈羽原子力サイトでは、断層南部のアスペリティから放射されるパルス波の振幅が敷地北部と南部で大きく異なり、断層北部の領域で発生した余震記録を経験的グリーン関数を用いたシミュレーションではこうした差異を再現できないことが問題となっていた。ここではサイト直下の褶曲構造を含む詳細な三次元速度構造モデル(早川・他, 2011)を用いた差分法による理論合成波形と、第三アスペリティ近傍で発生したMw3.5の余震記録から、ハイブリッド法による広帯域の本震波形の合成を試みた。その結果、大振幅のパルス波が観測されたEW成分について敷地北部と南部の観測速度波形記録の違いを定量的に再現することができた。

謝辞: 東京大学地震研究所 篠原教授には海底地震計記録に基づく余震分布データを提供して頂きました。

キーワード: 2007年新潟県中越沖地震, 震源モデル, 余震分布, 三次元速度構造モデル, 震源インバージョン解析, ハイブリッド法

Keywords: the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake, source model, aftershock distribution, 3-D velocity structure model, source inversion analysis, hybrid simulation

2007年新潟県中越沖地震震源域の3次元速度構造モデルの検討 - 柏崎刈羽原子力発電所直下の褶曲モデルの取り込み - Modeling 3D Velocity Structure in the Fault Region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake with Folding Structure

早川 崇^{1*}, 津田 健一¹, 植竹 富一², 引間 和人², 徳光亮一², 南雲 秀樹³

Takashi Hayakawa^{1*}, Kenichi Tsuda¹, Tomiichi Uetake², Kazuhito Hikima², Ryoichi Tokumitsu², Hideki Nagumo³

¹(株)大崎総合研究所, ²東京電力(株), ³東電設計(株)

¹OHSAKI RESEARCH INSTITUTE, INC., ²TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, ³TOKYO ELECTRIC POWER SERVICES CO.,LTD.

・はじめに

2007年新潟県中越沖地震(M6.8)では柏崎刈羽原子力発電所において大振幅の地震動が観測された。また発電所サイトの南側では地震動の最大速度が北側に比べて大きく、サイト内でも地震動の相違が認められた(例えば 土方, 2011)。徳光他(2009)では、サイト内の大振幅や地震動の相違の原因としてサイト直下の褶曲構造を指摘している。本研究では、この研究を進展させ、褶曲構造をモデル化した3次元速度構造モデルを構築し、その検証を行った。

・3次元速度構造モデルの作成

独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES)による中越地域の広域の3次元速度構造モデル(JNES, 2008)(以後、広域モデル)に、徳光・他(2009)による柏崎刈羽原子力発電所直下の精緻な二次元褶曲構造モデルを補間して作成した詳細な三次元速度構造モデル(以後、ローカル褶曲モデル)を取り込み、新たに3次元速度構造モデルを構築した。

広域モデルの地層は、魚沼層群+灰爪層(S波速度0.70~1.08km/s)、西山層(0.70~1.08)、椎谷層(0.84~1.68)、上部寺泊層(1.87)、下部寺泊層(2.20)、七谷層+グリーンタフ(2.64)、基盤岩類(3.15)からなる。発電所をほぼ中心とした東西方向に7.5km、南北方向に9.5kmの矩形の領域で、広域モデルの下部寺泊層より上層をローカル褶曲モデルで置換した。発電所近傍において、広域モデルの下部寺泊層はローカル褶曲モデルの下部寺泊層より深いため、ローカル褶曲モデルの下部寺泊層の上面とその上層の褶曲構造は保持されている。置換したままではローカル褶曲モデルと広域モデルの鉛直境界面で速度構造の不連続が発生するため、広域モデル側の接続部で滑らかに速度層が変化するように修正して不連続面からの人工的な波を低減した。

・3次元速度構造モデルの検証

モデルの検証として、中越沖地震の余震2007年7月16日21:08のM4.4の地震(以後、EQ1)と2007年7月16日17:42のM4.2の地震(以後、EQ2)、2004年中越地震の余震2004年10月23日19:46のM5.7の地震(以後、EQ3)の発電所内の観測記録を三次元差分法(Pitarka, 1999)によりシミュレーションした。対象周期は0.25秒以下とし、震源は点震源でモデル化した。震源およびメカニズムは、観測波形をもとに再検討したが、メカニズムとモーメントはF-netによる推定値を用いるのが適当と判断した。震源位置については、全地震とも震央は気象庁による推定値を用いたが、深さについては、EQ1は気象庁の値を用い、EQ2は震源近傍の発電所とK-NET柏崎等の記録の水平2成分の振幅比が再現できる深さとして7kmを採用した。震源時間関数の形状は二等辺三角形とし、継続時間は震源に近い岩盤の観測記録のS波初動のパルス幅から読み取った。その結果、EQ1は0.7秒、EQ2は0.4秒、EQ3は1.44秒とした。

シミュレーションの結果、全地震とも原子炉建屋1号機と5号機の観測記録をほぼ再現することができた。3次元速度構造モデルはこれらの地震に対して有効と考えられる。第三アスペリティ近傍で発生したEQ2は、観測波では1号機が5号機に比べ2倍程度振幅が大きい。計算波でもこの相違が再現されている。EQ2によるサイト周辺の計算波は褶曲構造による波動の集中により向斜軸付近で大きいことがスナップショットなどで確認されており、向斜軸の上に位置する1号機の記録が大きい原因として褶曲構造の影響が強く示唆される結果となった。

・まとめ

発電所付近の褶曲構造を取り込んだ3次元速度構造モデルを構築した。中小地震の発電所内での観測記録のシミュレーションを行い、速度構造モデルの有効性を確認した。震源域の南部で発生した余震(EQ2)の観測記録に見られる敷地の南部と北部での振幅の相違が確認されるなど、敷地内で観測された地震動の特徴が再現されることが確認された。発電所内で観測された地震動の変動が敷地内の比較的微細な褶曲構造によって生じていることを強く示唆しているものと思われる。

参考文献

芝：2007年新潟県中越沖地震の震源過程の解明と広帯域強震動評価、電力中央研究所報告、2008年、N08007

徳光亮一・他：2007年新潟県中越沖地震で見られた柏崎刈羽原子力発電所における地震動特性と地質構造の関係、第120回物理探査学会学術講演会論文集、2009年、pp.113-116.

土方勝一郎：新潟県中越沖地震の地震動と原子力発電所の建物挙動、日本地震工学会誌、2011年

独立行政法人原子力安全基盤機構、平成19年度 2007年新潟県中越沖地震・震源周辺域の地下構造モデルの作成技術資料、2008年

Pitarka, A.: 3D Elastic Finite-Difference Modeling of Seismic Motion Using Staggered Grids with Nonuniform Spacing, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 1999年, pp.54-68

キーワード: 2007年新潟県中越沖地震, 柏崎刈羽原子力発電所, 3次元速度構造モデル, 褶曲, 地震動シミュレーション

Keywords: 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake, Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant, 3D velocity model, Fold, ground motion simulation

近畿北部地殻内の三次元減衰構造手法を用いた Q_s 値の検討 Three Dimensional Attenuation Structure beneath the Northern Kinki Region, Japan

中村 亮一^{1*}, 川里 健²

Ryoichi Nakamura^{1*}, Kawasato Takeshi²

¹ 東電設計株式会社, ² 日本原子力発電株式会社

¹Tokyo Electric Power Services Co.,Ltd., ²The Japan Atomic Power Company

1. はじめに

均質 Q_s 構造を仮定したスペクトルインバージョン (以下「UQSI」と称する) が、全国各地で検討されている。天池ほか (2006) は、地殻内地震では、用いるデータの震源距離の範囲が小さくなるほど小さな Q_s が求まる傾向があることを指摘した。それによると震源距離が 80 km 以内で $[35 \sim 70]f^{(0.8 \sim 1.0)}$ 程度、震源距離が 60 km 以内で $[20 \sim 50]f^{(0.8 \sim 1.0)}$ 程度である。しかし、その原因は解明されているとはいえない。一方、三次元 Q_s 構造を仮定したブロックインバージョン (以下「3DQSI」と称する) において、最近、日本列島全体を対象にして詳細なブロックサイズ ($0.1^\circ \times 0.1^\circ \times 10$ km) による検討がなされ、中越地域など上部地殻は下部地殻より Q_s 値が小さいことが示された (Nakamura et al., 2010)。本研究では、これよりもやや粗くしたブロックサイズを採用した 3DQSI を実施した。その結果、近畿北部において良好な解像度が確保でき、この地域における既往の UQSI による Q 値と比較できたので、ここに報告する。

2. 方法及びデータ

本研究では、東経・北緯方向に 0.2° とし、深さ方向は 10 km のブロックサイズを用いた。参考として深さ方向に 20 km のケースも実施した。

データは、Nakamura et al.(2010) と同じで防災研 K-NET 及び KiK-net による 1997 年～2007 年の浅発中小地震 ($h = 30$ km, $M = 6.0$) による 14,831 記録である。その他の解析条件は中村 (2009) と同様である。

ほとんどの UQSI では、伝播の波線を直線と仮定しているのに対して、本検討 3DQSI では地殻の速度構造の変化に対応した波線が用いているため曲線である違いがある。速度構造には気象庁の震源決定に用いられている JMA2001 の構造を用いた。

3. 結果及びまとめ

チェッカーボード解析を実施し、中越地域や飛騨地域のほか、近畿北部地域で深さ 0-10 km 及び 10-20 km において、良好な解像度であることが確認できた。求まった Q_s 構造は、深さ 0-10 km において活火山及び第四紀火山の地域で Low- Q_s とある傾向がある。

このうち、近畿北部地域においてこれらの火山が含まれない地域として、3つの区域 (A 区域: $135.4^\circ \sim 136.6^\circ$ E, $35.0^\circ \sim 36.0^\circ$ N, B 区域: $135.2^\circ \sim 136.2^\circ$ E, $35.0^\circ \sim 36.0^\circ$ N, C 区域: $135.4^\circ \sim 136.6^\circ$ E, $35.0^\circ \sim 35.5^\circ$ N) をとり、平均 Q_s を求めた。それを、Fig.1 に示す。A, B 区域は、若狭湾を含むがその部分は、解像度がやや劣るが、C 区域は若狭湾を含まず解像度の良い場所である。区域による違いはほとんどなく、また、深さ 0-10 km よりも 10-20 km の方が Q_s 値は大きい。図中に記した佐藤ほか (2007) が震源距離 60 km 以内の観測点のデータから求めた値 ($Q_s = 50f^{1.1}$) と比較すると、深さ 0-10 km の結果との対応がよい。

ブロックサイズを深さ方向に 20 km をとった場合には、深さ 0-20 km での Q 値は、 $Q_s = 50f^{1.1}$ より大きくなるが、扱う観測点を 60 km 以内に制限すると $Q_s = 50f^{1.1}$ とほぼ同等となることが確認された。

現在、気象庁が震源決定に用いている速度構造 (JMA2001) に基づき、波線追跡してみると、震源深さ 10 km 程度の場合に、60 km 以内の観測点までの震源からの波線はほぼ上向きになり、100 km 程度では震源から下向きに射出された波線が深い場所にいったんもぐってから観測点に到達する。

佐藤 (2007) ほかの結果は、震源距離 60 km 以内のデータに基づくものであることから、上向きの波線が多く、このため求めた Q 値は浅い部分を主に反映したものと考えられ、本研究の 0-10 km の結果がこれに整合したと考えられる。

謝辞: K-NET, KiK-net のデータを使用させていただきました。また、東京電力植竹富一博士には、データの扱いにおいてご配慮いただきました。文献: 佐藤智美・壇一男・岡崎敦・羽田浩二 (2007) 地震学会大会予稿集, P3-066, 天池文男・植竹富一・八代和彦 (2006) 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 210-213, 中村亮一 (2009) 学位論文, Nakamura, Uetake and Midorikawa (2010) 第 13 回日本工学シンポジウム論文集, CD-ROM

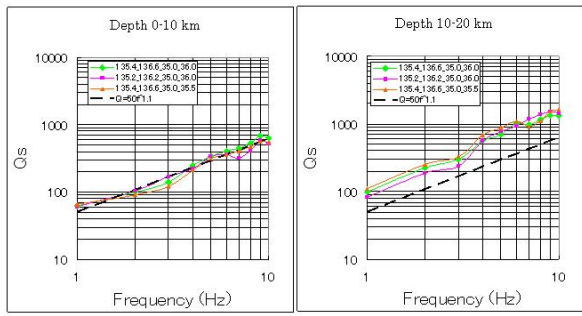


Fig.1 Comparison of Q_s values at the north Kinki region. Color solid lines: average Q_s by 3DQSI method (This study). Broken line: Q_s by UQSI method after Satoh et al(2007)

キーワード: 三次元減衰構造, スペクトルインバージョン, Q_s , トモグラフィー, 深さ依存性, 近畿地方
 Keywords: 3-D attenuation structure, Q_s , spectral inversion, tomography, depth dependence, the Kinki region

東京湾岸におけるやや長周期地震動特性 Characteristics of long-period ground motion in the Tokyo bay area

東 貞成^{1*}, 植竹 富一², 佐藤 浩章¹
Sadanori Higashi^{1*}, Tomiichi Uetake², Hiroaki Sato¹

¹ 電力中央研究所, ² 東京電力株式会社

¹CRIEPI, ²TEPCO

大規模堆積平野である関東平野の周期数秒から十数秒の帯域のやや長周期地震動特性について把握するため、著者らは東京湾岸の火力発電所に設置された広帯域強震計の観測記録と3次元数値シミュレーションによる波形計算結果との比較を行ってきた。今回は2006年に伊豆半島東方沖で発生したM5クラスの地震について検討を行い、後続波群の現れ方に震源の深さと相模湾の厚い堆積構造の位置関係が影響を及ぼしている可能性を指摘した。

関東平野のやや長周期地震動特性の検討には、表面波の励起が顕著な伊豆半島東方沖地震がよく用いられるが、今回は2008年5月8日に茨城県沖で発生した気象庁マグニチュード7.0の地震(深さ50km)を対象として、地震波が平野の反対側から到来したときの地震動特性を東京電力東京湾岸観測点だけでなくK-NET, KiK-net記録も含めて検討した。

地下構造モデルは茨城県沖の震源域までがモデル化されて公開されている、地震調査研究推進本部(2009)の「長周期地震動予測地図」2009年試作版モデルを用いた。モデル化領域は東経138.2~142.0度、北緯34.5~36.5度の範囲である。3次元シミュレーションは差分法を用い、格子点間隔は水平方向400m、鉛直方向100m~400m、時間間隔は0.01秒として30,000ステップ(300秒間)の計算を行った。観測記録及び計算結果には0.08~0.12Hz(7~12秒)のバンドパスフィルターをかけ、震源から東京湾岸西部と東部の観測点を結ぶ測線上で比較した。

計算ケースとしては、震源モデルは点震源を仮定し、気象庁震源(深さ50km)でF-netによるメカニズム解を用いて、Q値をオリジナルモデルの $Q=Vs/5$ の場合と $Q=Vs/2.5$ とした場合、及び $Q=Vs/5$ で震源モデルとして気象庁震源でF-netによるメカニズム解を用いた場合と、気象庁年報のCMT解を用いた点震源(深さ28km)の場合の合計3ケースを検討した。差分計算におけるQ値の導入はGraves(1996)に従い、レファレンス周波数は0.1Hzとした。震源モデルはF-net、気象庁CMT解ともメカニズムはほぼ同じであるが、CMT解の方が南側に震央がずれており、深さが50kmから28kmへとかなり浅く求まっている。この地震の気象庁初動押し引きに基づくメカニズム解は求められておらず、気象庁震源の位置でF-netメカニズム解を用いたが、実際にはF-netメカニズム解は深さ35kmに求まっている。そこで便宜上、F-netメカニズムを用いた震源を深い震源、気象庁CMT解を浅い震源と呼ぶことにする。

深い震源でQ値を変化させた場合の計算結果を比較した結果、0.08~0.12Hzの周期帯域においては振幅、波群の性状ともほとんど変化は見られなかった。震源に最も近いIBR018, IBRH20からCHB004, CHB006では計算振幅は観測振幅より1/3~1/4の過小評価となっており、特に東岸側の観測記録に見られる振幅の大きな後続波群の再現ができていない。西岸側では東京~横須賀の波形の再現性は東岸側に比べると良い。

次に、 $Q=Vs/5$ のモデルで2種類の異なる震源を用いたケースを比較すると、波群の現れ方が大きく異なる結果となった。浅い震源の方が、全体的に振幅が大きい。また、CHB009, CHBH10では観測記録ではいくつかの波群に分かれている様子が見られるが、深い震源では再現できていないのに対して、浅い震源では振幅も含め再現されている。そのほかの地点でも、深い震源の場合と比較して浅い震源の方が大振幅の後続波群が見られる観測記録の再現ができており、波形の再現性から見て震源深さは50kmよりも浅い可能性がある。ただし、M7.0にもかかわらず点震源を仮定している影響があるので断定はできない。

今後、伊豆半島東方沖の地震による地震動特性とあわせて地震波の伝播特性を把握し、やや長周期地震動特性の詳細把握と地下構造モデルの改良に向けた検討を行う。

本報告では防災科学技術研究所K-NET, KiK-netの記録を利用させていただきました。

キーワード: 長周期地震動, 関東平野, 堆積盆地, 3次元シミュレーション, 広帯域強震観測, 2008年茨城県沖地震

Keywords: Long-period seismic ground motion, Kanto plain, Sedimentary basin, Three-dimensional simulation, Broadband strong motion observation, Off Ibaraki Pref. earthquake in 2008

2010年12月22日父島近海の地震 (Mj7.4) による東京湾岸地域の長周期地震動 Long-Period Ground Motion in the Tokyo Bay area from the Chichi-jima Kinkai earthquake (Mj=7.4) of Dec. 22, 2010.

植竹 富一^{1*}

Tomiichi Uetake^{1*}

¹ 東京電力

¹Tokyo Electric Power Company

1. はじめに

2010年12月22日に父島近海で、気象庁マグニチュード7.4の地震が発生した。この地震により、東京都小笠原村で震度4、関東地方を中心に、北海道の一部から中部地方にかけて震度2~1が観測された。震源深さが8kmと浅く、規模の大きな地震であったため、長周期地震動の励起が期待される。東京電力では2005年9月より長周期地震動の記録の蓄積を目的に、東京湾岸で速度型強震計による地震観測を実施している。父島近海の地震でも記録長1800秒(30分)にわたる長周期地震動が卓越する記録を観測することができたので、観測記録の特徴について報告を行う。

2. 観測地点

東京湾岸における速度計観測点は、東京湾東岸に5点(富津、袖ヶ浦、姉崎、五井、千葉)、西側に8点(横須賀、南横浜、横浜、鶴見、東扇島、川崎、大井、品川)である。センサーは速度型強震計(東京測振:VSE-355G3)を用い、100Hzサンプリングで観測を行っている。なお、センサーは低層建物のコンクリート床面に設置されているが、長周期地震動の観測上は影響が少ないと考えられる。震央と観測点の距離は、990kmから1030kmである。震央から見た観測点の方位は337度から340度である。

3. 観測記録の特徴

東京湾岸ではトリガー方式ではあるが、後続波群が長時間継続し、1800秒に及ぶ記録が得られている。東側と西側では波形の特徴が異なり、東側ではS波到達後180秒後に大振幅の後続波が目立ち、この波群は観測点毎に大きく異なっている。一方、西側では後続波群の中で特別に振幅の大きな波群はない。水平動の最大振幅は、東京湾西岸で0.5~0.8cm/s、東京湾東岸では1.1~1.7cm/sで、東岸は西岸に比べ2倍以上となっている。一方、上下動は0.2~0.3cm/sで最大振幅は東西で同程度である。なお、最大速度値は、表面波と考えられる後続波部分で発生しており、S波到達から3分以上経過してから最大振幅を記録している場合もある。観測波形のマルチプルフィルター解析結果をみると、後続波は周期10秒前後の波動成分で成り立っており、西岸の大井と東岸の姉崎を比較すると、大井では8秒が、姉崎では10秒強の周期が卓越している。

減衰常数5%の速度応答スペクトルの周期2秒以上を見ると、西側では、周期10秒を中心に8秒から12秒にかけて、ピーク値が3~4cm/sの幅広い山となっているのに対し、東側では10秒付近に6~9cm/sの顕著なピークが見られる。10秒付近のピークは東側が西岸に比べ2倍以上の応答値を示している。この差は、減衰が小さくいとより顕著で、0.1%の応答スペクトルでは、東京湾西側では10cm/s程度であるのに対し、東側の千葉や姉崎では30cm/sに達する。ただし、上下動には特徴的なピークが無く、応答値も水平動に比べて小さく、減衰5%で1cm/s、減衰0.1%で2cm/s程度である。なお、減衰が小さい場合、後続の小振幅の繰り返し波の影響が大きく、最大応答値は観測された速度波形の最大値発生時刻よりも遅れて生じる。ちなみに加速度波形では、継続時間が1分程度であり、加速度の大きな時間帯から何分も遅れて最大値を示すことになる。

4. まとめ

東京湾岸で得られた父島近海の地震の記録について特徴を抽出した。東京湾岸では概ね周期10秒前後の地震動が卓越し継続時間が長い。東岸の水平動波形には大振幅の後続波が見られ、最大振幅は西岸の2~3倍の値を示している。一方、上下動の振幅値は同程度であった。応答スペクトルを作成すると低減衰ほど西側との差が大きくなる。応答波形の最大値発生時刻は、地動の加速度最大値や速度最大値発生時刻より何分も遅れる。長周期で減衰が小さな構造物の応答は、加速度の大きな時間帯から何分も遅れて最大値を示すことは重要である。

Keywords: Long-period Ground Motion, Tokyo Bay Area, Chichi-jima Kinkai Earthquake, Response Spectrum

SSS023-P18

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

稠密強震観測データを用いた長周期地震動の地域性に関する検討 超高層建築物への around-site warning に向けて Regional characteristics of the long-period ground motion observed at the super-dense seismic observation network

中村 洋光^{1*}, 功刀 卓¹, 青井 真¹, 藤原 広行¹, 西山 秀樹², 渡邊 明彦², 岩田 雅史³, 中井 敦子³, 早川 俊彦⁴
Hiromitsu Nakamura^{1*}, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Hideki Nishiyama², Akihiko Watanabe², Masafumi Iwata³, Atsuko Nakai³, Toshihiko Hayakawa⁴

¹(独) 防災科学技術研究所, ²三菱電機ビルテクノサービス株式会社, ³三菱電機株式会社, ⁴三菱スペース・ソフトウェア株式会社

¹NIED, ²MELTEC, ³Mitsubishi Electric Corporation, ⁴MSS

2003年十勝沖地震では、震央から約250km離れた苫小牧市の石油タンクに火災や浮屋根沈没等の大きな被害が発生し、長周期地震動によって励起されたスロッシングがその原因として指摘された。また、2004年新潟県中越地震では、震央から約200km離れた首都圏で、長周期地震動により超高層ビルが共振し、エレベータにロープの損傷等の多くの被害が発生した。これらの地震被害を契機として長周期地震動対策の重要性が再認識され、昇降機耐震設計・施工指針(2009)においては、長周期地震動対策として、120mを超える高さの構造物に設置されるエレベータに対して長尺物振れ管制運転を標準仕様として定める等している。しかしながら、長周期地震動を検知するためには、P波管制運転用のセンサ(P波センサ)と比較して観測精度の高い地震計が必要とされ、そのような地震計を含む装置は高価である。更に、整備の行き届いた状態でないと長周期地震動を計測することが難しいため、メンテナンスにかかる費用も高く、既存の超高層ビルではこのような装置の普及が十分に進んでいない現状がある。

一方、一般的に地震波の周期が長くなると、局所的な地盤構造の影響を受けにくくなるため、距離が離れている地点でもそれよりも十分に波長の長い長周期帯域では地震記録が同程度となることが知られている。この性質を用いれば、対象となる超高層ビル群の周辺域で観測された地震記録を、それぞれのビルに入力された地震波として代用し(代用波)、個々のビル及びエレベータロープの揺れを推定することで長周期地震動に対応した安価な管制運転を行うシステム(around-site warning system)を構築できる可能性がある。そこで、本研究では上記システム構築の可能性を検証することを目的として、日本でも有数の超高層ビルが建ち並ぶ新宿区に設置された地震計(K-NET 新宿;新宿区上落合)で得た強震記録を代用波として利用できる可能性を、東京ガスの超高密度リアルタイム地震防災システム(SUPREME)で得た記録を用いて検討したので報告する。

検討対象とした地震は、SUPREMEで多くの加速度記録が得られている2004年新潟県中越地震、2005年宮城県沖の地震、2007年新潟県中越沖地震である。データは、加速度記録から、周期3秒から8秒まで0.5秒ごとにそれぞれ減衰率0, 1, 2, 5%とした速度応答及び変位応答を用い、K-NET 新宿の応答値を基準とした応答値比を算出した。その結果、応答値比の空間分布と地下構造との関係について、2004年新潟県中越地震や2007年新潟県中越沖地震では、周期5秒以下の短周期側ではJ-SHISで公開している浅部地盤の増幅率とよい相関を示し、5秒以上の長周期側ではS波速度900m/s下面の深さ分布とよい相関を示した。対象とした3地震の解析結果を総合すると、K-NET 新宿から数kmの領域内における周期3~8秒の応答値のレベルは、K-NET 新宿で観測されるレベルのファクター2程度以内であった。今回は限られた地震での解析結果ではあるが、ファクター2の範囲であれば、K-NET 新宿の記録を限られた領域で長周期地震動の代用波として利用することは可能であることが示された。

謝辞

本研究では、東京ガス株式会社の超高密度リアルタイム地震防災システムの記録を使わせて頂きました。

キーワード: 強震観測, 長周期地震動, K-NET, 超高層, エレベータ, 警報システム

Keywords: strong motion observation, long-period ground motion, K-NET, skyscraper, elevator, warning system

擬似逆行列法を使った地下構造の推定 Estimation of Underground Structure with Pseudo-Inverse Matrix Calculation

今枝 佑輔^{1*}, 盛川 仁¹

Yusuke Imaeda^{1*}, Hitoshi Morikawa¹

¹ 東京工業大学大学院総合理工学研究科

¹Tokyo Institute of Technology

目に見えない地下構造を探るには、重力や磁場といった遠隔作用で働く力・物理量を使って調べることが必要である。例えば地下の密度構造は、万有引力の法則により地表面の重力場分布に反映されている。地球規模で大局的に決まる重力加速度 g に比べて局所的な密度構造が作り出す重力異常(加速度)が十分小さい場合には、密度分布と異常重力の鉛直成分の間には線形関係が成り立つ。数式を使って表現すれば $Ax=b$ 、ここでベクトル x は M 個の点での異常密度を決める密度データ、ベクトル b は N 個の点での重力異常値を表す観測量、大きさ $N \times M$ の行列 A は密度ベクトル x と観測量ベクトル b を線形に結びつける万有引力から決まる変換行列である。つまり観測データの逆変換を行うことで、地下密度構造を決定できることが期待される。

そこで今回は、異常重力場データから地下の密度構造を推定するためのプログラムを開発し、これについて発表する。

地下密度構造から重力場を計算する $Ax=b$ の逆変換を行うには、行列 A の逆行列計算が必要になる。通常、逆行列は正方行列に対してしか定義されていない。一方で観測点の数 N と地下構造モデルの代表点の数 M は一般には一致しない。そこで正方行列でない場合にも拡張定義された擬似逆行列の使用を考える。

擬似逆行列を求める手順は以下の通り。

1. 行列 A に左右から直交行列を掛けて二重対角行列 $B=Q_L A Q_R$ を作る
2. $B^T B$ から正方三重対角行列を作り、この行列の固有値と右固有ベクトルを求める
3. M 個の右固有ベクトルを規格化して並べた直交行列 Q_V と Q_R から右直交変換行列 $V=Q_R Q_V$ を作る。
4. 行列 A と行列 V の積を直交行列 U と三角行列 の積に分解する ($AV=U$)
2. の段階で行列 $V^T B^T B V$ が対角化されているので、三角行列 は対角成分以外が 0 になり対角行列になる
5. 以上の操作により行列 A は直交行列 U と V 、対角成分に特異値 σ_i が並んだ特異値対角行列 を使って
$$A = U \Sigma V^T$$

と分解される。(特異値分解)
6. 対角成分に $1/\sigma_i$ が並んだ対角行列 Σ^+ を定義する
7. 擬似逆行列 $A^+ = V \Sigma^+ U^T$ を定義する。

ここで手順 2. において行列の固有ベクトルを求めるには、一般に QR 法と呼ばれる反復手法が使われることが多い。これには通常 $O(M^3)$ 程度の計算量が必要である。そこで今回は QR 法による固有ベクトル計算の代わりに I-SVD 法を使うことでこの部分の計算量を $O(M^2)$ に抑えることにし、プログラム中最も重い部分の計算時間を劇的に軽減することに成功した。但し、その前処理段階である 1. の部分の計算量が $O(M^3)$ であるのでプログラム全体の計算量としては $O(M^3)$ のままである。

一方、ほぼ二次元平面上に分布する観測量から地下に三次元分布する密度構造を決定するような問題は、非常に悪条件な問題になることが多い。そのため計算機の丸め誤差の影響が数値計算の限界を決めてしまう。そこで今回は非常に悪条件な問題に対しても計算続行が可能になるように、多倍長計算のライブラリを組み込んだプログラムを開発した。丸め誤差を非常に小さく取れるため、悪条件の問題からそうでない問題まで、同一プログラムを使い統一的に理解することが可能になった。

また様々なテスト計算の結果、観測データに含まれるノイズレベルを正しく把握した上で、ノイズレベル以下に対応する特異値を 0 とした近似擬似逆行列を定義し、これにより逆変換を行うことが有効であることがわかった。一方、精度のみを追求して実装した今回の多倍長計算は通常の倍精度計算に比べて極度に遅い(100 倍以上)。今後は無駄な多倍長計算部を極力減らし計算の高速化を図ると共に、重力異常データのみならず磁気異常データを使用することで、問題自体が内包する悪条件性を回避できるかについて検討する予定である。

キーワード: 密度構造, 重力探査, インバージョン, 擬似逆行列

Keywords: density structure, gravity survey, inversion, pseudoinverse

SSS023-P20

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

比較的長い波長のレイリー波基本モードの位相速度と深部地下構造の平均 S 波速度の関係

Prediction of average S-wave velocity for deep subsurface structure from fundamental mode Rayleigh wave phase velocity

糸井 達哉^{1*}
Tatsuya Itoi^{1*}

¹ 東京大学大学院工学系研究科

¹The University of Tokyo

レイリー波基本モードの位相速度と深部地下構造の平均 S 波速度の経験的な関係を提案する。

J-SHIS の全国の深部地下構造から約 5km 間隔で海上部分を除く地点で、最表層（工学的基盤相当）から S 波速度が 2.5km/s 以上となる層までの層構造の一次元鉛直分布を抽出し、その中で最表層の S 波速度が 1km/s 以下の約 15000 地点を検討対象とする。水平成層地盤を仮定し、波長が 100m から 1000m の範囲で各地点におけるレイリー波基本モードの位相速度分散曲線を透過反射マトリクス法（久田、1997）で計算する。

位相速度分散曲線と平均 S 波速度の関係はよく似ており、ある平均深さの平均 S 波速度は同じ長さの波長の位相速度よりも 1.1 倍程度大きい。波長ごとにもとめた両者の比率は、幾何平均値が 1.1 程度、常用対数標準偏差は 0.02 から 0.05 程度となった。またこの比率は波長と無関係にほぼ一定であり、波長 100 から 1000m で幾何平均も 1.1 となる。

以上の結果を用いると、今後、微動アレイ観測から求める位相速度分散曲線から深部地盤構造の初期モデルが簡易に評価できるようになる可能性がある。

謝辞

防災科学技術研究所（J-SHIS）の公開深部地下構造モデル（藤原・他、2009）を利用しました。また、レイリー波の位相速度分散曲線の計算には久田嘉章先生（工学院大学）のプログラム（久田、1997）を利用しました。記して謝意を表します。

参考文献

藤原広行、河合伸一、青井真、森川信之、先名重樹、工藤暢章、大井昌弘、はお憲生、早川譲、遠山信彦、松山尚典、岩本鋼司、鈴木晴彦、劉瑛：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討、防災科学技術研究所研究資料、第 337 号、2009 年。

紺野克昭、片岡俊一：レイリー波の位相速度から地盤の平均 S 波速度を直接推定する方法の提案、土木学会論文集、No.647 / I-51、2000 年、pp.415-423。

長郁夫、多田卓、篠崎祐三：極小アレイによる新しい微動探査法：浅部地盤平均 S 波速度の簡便推定、物理探査、61(6)、pp.457-468、2008 年。

久田嘉章：成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法、日本建築学会構造系論文集、第 501 号、1997 年、pp.49-56。

キーワード: レイリー波, 平均 S 波速度, 深部地下構造, 位相速度

Keywords: Rayleigh wave, Average S-wave velocity, Deep subsurface structure, Phase velocity

地表・地中地震計アレー記録による複素スペクトル比の推定法と数値実験 Estimation of Complex Spectral Ratio of Surface and Borehole Seismometry and Numerical Tests

吉田 邦一^{1*}

Kunikazu Yoshida^{1*}

¹(財)地域地盤環境研究所

¹Geo-Research Institute

地表・地中記録のスペクトル比の計算法について、最小二乗法を元に誤差の取り扱いを変えたいいくつかのスペクトル比の推定法をあげ、スタッキング法と平滑化の影響を考慮した簡単な数値実験を行った。観測点付近の表層の構造が地震動に与える影響を評価するため、鉛直アレーの地震動記録のスペクトル比から求めた伝達関数をもとに表層付近の地盤の速度・減衰構造の同定がしばしば行われている。ところが、同定の対象となるスペクトル比の推定においてノイズの考慮が不十分なため、不適切な減衰が求められている可能性がある。

N個のイベントで記録が得られているとき、イベント*i*での地表と地中の記録のフーリエ変換をそれぞれ $y_i(f)$, $x_i(f)$ とする。鉛直アレーに限らずスペクトル比のスタッキングは、幾何平均 H_G あるいは幾何平均と等価な対数平均 H_L により行われることがある。ところが、幾何平均ではノイズを必ずしも正しく評価できないことが知られている上、複素スペクトル比を推定できない。複素数でノイズを考慮したスタッキング法としては、最小二乗法として直線のあてはめを行う手法がある。 $y_i(f)$ にノイズ n が含まれる場合は $y_i(f)=H_1 x_i(f)+n_i(f)$ と書ける。この式の H_1 に関する最小自乗法の解は $H_1=C_{xy}(f)/S_{xx}(f)$ である。ここで、 $C_{xy}(f)$, $S_{xx}(f)$ はそれぞれ $x(f)$ と $y(f)$ のクロススペクトルと $x(f)$ のパワースペクトルの平均である。一方、 $x_i(f)$ にノイズ $e_i(f)$ が含まれる場合の最小二乗解を求めると $H_2=S_{yy}(f)/C_{yx}(f)$ となる。ここで、 $S_{yy}(f)$ は $y(f)$ のパワースペクトルである。位相差スペクトルは、 H_1 , H_2 共に C_{xy} の位相成分で求められる。ノイズを考慮したときに、 C_{xy} の期待値にはノイズの項が残らないことから、位相差スペクトルはノイズの影響を受けにくいことが予想される。 H_1 や H_2 は誤差の仮定に非対称性を持つので、石田(1992)に準じ、これらの幾何平均 H_3 を計算する場合も検討した。

鉛直アレー記録への適用を念頭に、これらのスペクトル比の推定法を数値実験で比較した。数値実験では入射波の振幅は周波数によらず一定とし(すなわち時間領域での地表波形はデルタ関数)、周波数領域において半無限均質媒質中に鉛直入射する平面波による鉛直アレーでの地表と地中の擬似観測記録を作成した。この擬似観測記録に一樣乱数を加え、20通りのノイズを含む擬似観測記録を作成した。

スタック方法の違いによる推定値の差を求めるため、ノイズの含まれる20通りのスペクトルの組から、上記4通りの推定方法によりスペクトル比を推定した。 H_1 では、スペクトル比は低周波数側や谷の部分でほぼ1を示し、ノイズにもかかわらずよく推定されているが、スペクトル比の山の部分は頭打ちとなり、ピーク周波数付近では逆に谷となっている。 H_2 では、スペクトル比のピーク形状が最も明瞭に求められているが、谷の部分で1にならず過大評価になっている。 H_3 では、 H_1 と H_2 の中間の値を示し、滑らかな結果を示すが、スペクトル比のピーク形状は H_2 によるものほど明瞭ではない。 H_G は、この計算では H_1 に近く、スペクトル比の谷は1に近づくがピークでは大きな凸凹が見られノイズの影響を強く受けている。 H_1 と H_2 のスペクトル比のピーク周辺の形状は、これらの周波数では地中記録のS/N比が非常に悪い条件下での処理となるため、地中ノイズの取り扱いの差が大きく影響し、 H_2 で明瞭なピークが見られるのに対し、 H_1 で大きく形が歪む。一方で、スペクトル比の谷の部分では、地表のノイズが結果に影響し、 H_2 が過大評価となる。位相差スペクトルは安定して求められた。

スペクトルの平滑化が結果に与える影響について考察する。ノイズの含まれない擬似観測記録のスペクトルから S_{xx} , S_{yy} , C_{xy} を計算し、これらをParzenウィンドウにより平滑化した。求めた S_{xx} , S_{yy} , C_{xy} を用いて H_1 , H_2 , H_3 を求めた。 H_G はフーリエスペクトルを平滑化して求めた。ノイズの含まれないデータであるが、スタック処理によるものと同様の傾向が見られた。すなわち H_1 ではスペクトル比のピーク周波数で谷が見られる一方、 H_2 によるピークは平滑化にもかかわらず非常に明瞭に見られる。スタッキングと平滑化を同時に適用した結果は、スタッキングのみで求めたスペクトル比と比べ、滑らかなスペクトル比となった。計算手法による傾向の違いはスタッキングのみや平滑化のみで求めたものと同様であった。

以上の検討から、全体のスペクトル比を俯瞰する場合は H_3 あるいは H_G が適し、ピークが重要な時は H_2 を、谷が重要な時は H_1 が有用である。また、位相差スペクトルの推定値は安定している。

キーワード: 地震計鉛直アレー, 複素スペクトル比, 伝達関数

Keywords: seismic vertical array, complex spectral ratio, transfer function

SSS023-P22

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

雑微動データのフーリエ変換振幅スペクトルに基づいて地盤振動特性を推定する試み

Estimating small-scale site effect as functions of the frequency range from 2 to 4Hz by observing microtremors

田中 寅夫^{1*}, 大久保 慎人¹, 青木 治三¹
Torao Tanaka^{1*}, Makoto OKUBO¹, harumi aoki¹

¹ 東濃地震科学研究所

¹ TRIES

地下浅部の地盤が地震動を大きく増幅して地震災害をもたらすことは良く知られた事実である。わが国で一般的な低層木造建造物の固有振動数が2~4 Hzであることから、この振動数では地下浅部地盤による地震波の増幅が大きく影響する。したがって地震波を増幅する site effect を詳細に調査して最大地震動の増幅を確度高く決定することが、地震動被害を減少させるためにも基本的な課題となる。このためには、簡便な計測により何時でも簡単に調査が可能な雑微動の測定による方法を確認することが有効であると考えられる。このような観点に立って、われわれは1999年から東濃地域で展開されてきた TRIES 高密度地震観測網によって得られた地震記録および雑微動記録のフーリエ変換による振幅スペクトル解析を進めてきた。これまでの連合大会において2004年の紀伊半島南東沖地震、07年の能登半島地震について報告した結果に加えて、TRIES 観測網周辺で発生した局所地震、小地震について順次解析をすすめてきた。TRIES 観測網では加速度地震計による1/100秒サンプリングの地震データを集録している。表面波が最大振幅となる規模の大きい地震の場合は、20秒間の表面波データを解析したが、近地地震や小地震では最大振幅が3~5秒間に現れることから、原記録上で最大振幅を与えるS波部分を3~5秒間解析した。他方、雑微動の解析にはこれらの地震動によってトリガーが作動してからP波初動が到達する直前までの約10秒間のデータを使用した。振動数帯域2~4Hzでの雑微動の上下・南北・東西3成分をそれぞれスペクトルで表し、これを site effect とした。予備的な解析から、この site effect と、観測された最大地震波の振幅スペクトルとの間には0.7程度の相関が得られた。地震発生メカニズムや地震動の到来方向など様々な要因が site effect に関係するため、単純で防災に有効なパラメータをどのように選ぶかが今後の課題である。また「約10秒の間に観測される雑微動は、どの程度定常的であるか」という本研究の前提条件もさらに詳しく調べる必要がある。データ解析を更に進めて、最大地震動の予測を試みるなど、site effect を改良して行きたい。

キーワード: ザツビドウ, ジバン, サイトクセイ, コユウシンドウ, フーリエヘンカン, サイダイシンプク

Keywords: microtremor, ground soil, site effect, characteristic oscillation, Fourier transform, maximal amplitude

高知市平野部における常時微動H/Vスペクトル卓越周期の空間分布 Spatial distribution of predominant period derived from H/V spectra in Kochi Plain

久保 篤規^{1*}, 田嶋 佐和², 原 忠³

Atsuki Kubo^{1*}, Sawa Tajima², Tadashi Hara³

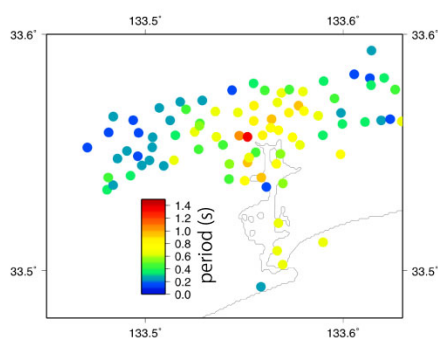
¹ 高知大学理学部地震観測所, ² 高知大学理学部応用理学科, ³ 高知大学南海地震防災支援センター

¹Earthq. Obs. Fac. Sci. Kochi Univ., ²Fac. of Sci. Kochi Univ., ³Sect. of Disast. Prev. Kochi Univ.

高知市は、南海地震の際に強震動、地盤沈下と津波による浸水被害に襲われることが予想される。平野部の堆積層形成は、強震動には増幅率の増大をもたらす、低地帯において進行が激しいと考えられる。このような特徴から、強震動による被害分布と浸水による被害分布は、空間的にかなり相関の高いものになる可能性がある。高知平野の堆積層/基盤構造を明らかにしていくことは、防災対策を考える上でも重要である。

ここでは常時微動のH/Vスペクトルに注目し観測を実施した。すでに高知平野（高知市）における微動H/Vスペクトルの研究は複数あるが（森伸一郎ら, 2001; 岡崎, 2009）、これまでの研究では測線に沿った測定が多く、まだ高知平野においてはまだ面的な研究には至っていない。そこで本研究では特に測線を設定せず、高知市平野部において平均0.5kmから1km間隔の観測点間隔を目標にして観測を実施し、結果として88点の観測を実施した。観測には白山工業（株）JU210微動計を用いた。各観測点では11分以上の観測を行い、そのうち20秒から40秒分のデータを選びH/Vスペクトルを計算した。解析には先名・藤原（2008）により公開されているソフトウェアを用いた。

議論の緒として、H/Vスペクトルの卓越周期の分布を調べた（図）。高知市平野部は東西に伸びており、その西端の朝倉では0.3s以下で、や南国市との境界付近0.6s以下であった。これに対して海域へ開口部である浦戸湾周辺（潮江、本町、高須など）では0.6s以上で最大1.45sの卓越周期を有する。このような卓越周期の分布を説明する堆積層/基盤構造を推定していく必要がある。比較的長い周期の領域は、南海地震時の地盤沈下・津波浸水域に一致しており、このような地域では対応する周期の増幅による強震動被害と浸水被害の両方の対策を重点化する必要性が見えてくる。



キーワード: 常時微動, 卓越周期, 表層地盤, 高知平野

Keywords: Micro tremor, Predominant Period, Surface Basement, Kochi Plain

島原半島地域における微動 H/V スペクトル比を用いた地盤構造推定 Estimation of subsurface structure using microtremor H/V spectral ratio in the Shimabara peninsula

糸谷 夏実^{1*}, 松島 健¹

Natsumi Itoya^{1*}, Takeshi Matsushima¹

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

¹SEVO, Kyushu University

近年、構造物の長大化に伴い、長周期地震動の被害予測が重要となっている。全国の長周期地震動の卓越周期分布図(中央防災会議, 2008)によると関東平野などの第四紀層が厚い堆積盆地の他、火山地域である長崎県島原半島地域も長周期地震動が増幅されることが推定されている。特に半島中央部にある雲仙地域においては、関東平野と同程度に長周期地震動が増幅するという結果が得られている。そこで本研究では、地盤構造の評価法として微動 H/V スペクトル比(水平動/上下動スペクトル比)に着目し、島原半島内 60 箇所にて微動観測を行い、半島内の地盤構造の推定を試みた。

<観測方法>

微動 3 成分の移動観測を行った。微動測定は、固有周期 120 秒の広帯域地震計を用い、各観測点で基本 3 日間地震計を土中に埋設して測定した。データロガーは LS7000XT を使用し、100Hz サンプリングで記録した。

<解析方法>

水平動(NS・EW)・上下動(UD)の3分間データを選び出し、FPAC(大崎, 1994)よりパワ・スペクトルを算出する。それぞれ成分ごとに30回のアンサンブル平均を行う。水平動と上下動のパワ・スペクトルの比を計算し、H/V スペクトル比を導出する。ここで水平動の合成についてはNS成分とEW成分の相乗平均とした。

島原半島内の60観測点より、各点H/Vスペクトル比の1次卓越固有周波数(0.1~1.0Hzで存在する最も低い卓越周波数)を周期に換算し、コンターマップを作成した。新期火山噴出物が堆積している島原半島東部の雲仙地溝内では5~6秒のピークが見られ、水平動の長周期成分が卓越している。特に科学掘削が行われたUSDP2地点では、雲仙火山噴出物が厚さ約1.2kmにわたり堆積していることが分かっており(星住他, 2001)、この厚い火山噴出物が水平動長周期成分の卓越の原因と考えられる。

また人工地震探査の報告(雲仙火山人工地震探査グループ, 1995)によると、雲仙岳西部域では $V_p=3.5\text{km/s}$ の速度を持つ高速度層が地表近くまで迫っている。この地点での微動H/Vスペクトル比は、この構造を反映してH/Vスペクトル比に明瞭なピークが現れず、H/Vスペクトル比の値はほぼ一定になった。

次に、人工地震探査で求められているP波速度からLudwig et al. (1970)を用いてS波速度や密度を算出し、観測H/Vスペクトル比とレイリー波から計算された理論H/Vスペクトル比の1次卓越固有周波数が合うように層厚のみを調整し、トライアンドエラーで構造を決めた。USDP2地点では $V_s=600\text{m/s}$ 層の深さが約1.2kmとなり、科学掘削によって得られた雲仙火山噴出物の厚さとよく一致している。

島原半島中央部の矢岳観測点を中心とした約4kmの範囲においても、局所的に水平動長周期成分が卓越している。周囲の地点と同じ速度パラメーターを使用して構造を決めると、矢岳観測点の基盤深度は約1000mと求まる。しかし、付近の地質構造図や人工地震探査の結果ではこのような局所的な凹地は見られない。そこで、基盤深度を大きく変えずに第1層、第2層のS波速度を約50%小さくして構造を決めた。矢岳観測点付近には豊富な温泉源もあることから、半島中央部の長周期地震動の要因として低速度層の存在も十分に考えられる。

本研究で求められた微動H/Vスペクトル比の卓越周期分布図は、地質図や人工地震探査の結果とよく対応し、島原半島の地盤構造を強く反映している。島原半島における長周期地震動の増幅は、厚い火山噴出物層や低速度層の存在が原因と考えられる。

キーワード: 微動, H/V スペクトル比, 地盤構造, 長周期地震動

Keywords: microtremor, H/V spectral ratio, subsurface structure, long-period ground motion

SSS023-P25

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

Period-Dependent Site Amplification and Source Process for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake Sequence Period-Dependent Site Amplification and Source Process for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake Sequence

Rami Ibrahim^{1*}, Kazuki Koketsu¹, Hiroe Miyake¹, Kazuhito Hikima²
Rami Ibrahim^{1*}, Kazuki Koketsu¹, Hiroe Miyake¹, Kazuhito Hikima²

¹Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, ²TEPCO

¹Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, ²TEPCO

The 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake on 14 June 2008 mainly struck the Tohoku region, northeastern Japan. The JMA magnitude M_{JMA} was estimated to be 7.2 and the moment magnitude M_W by Global CMT Project was 6.9. The 5% damped acceleration and velocity response spectra maps reveal different features in the source area and at other stations out of the source area. The predominant period was shown in a short period range of 0.1-0.2 s. AKTH04 station which is located at 22 km away from the source area was recorded a JMA-intensity of 6 upper as large as in the source area. The large acceleration amplitude was observed at short periods at the same station. Large velocity amplitudes at stations MYG005 and MYG006 were observed at periods of 2, 3, and 5 s to the south of the source area. In this study, we use aftershock data to obtain amplification factors in and around the source area. The H/V spectral ratios were investigated at 27 station sites close to the source area. The data recorded by K-NET and KiK-net were used for five aftershocks. The spectral ratios of the horizontal components (H/H spectral ratio) of surface and borehole data were investigated for KiK-net stations. H/H spectral ratios of soft soil sites to hard rock sites were also calculated for comparison with previous studies. Amplification factors of 3 to 6 at short periods of 0.1 to 0.5 s are observed at many stations such as AKTH04, AKTH06, IWTH19, and so on. The stations of MYG005, MYG006, IWT011 and IWTH20 have shown amplification factors of 3 to 5 at long periods of 3 to 5 s. On the other hand AKT023, IWT010, and MYGH04 show flat response spectra compared to hard rock sites. The results reveal that the different features shown by response spectra can be attributed to the site effects. The H/V and H/H spectral ratios were used to get information about the predominant periods and the amplification factors at the station sites. The peak velocity amplitude distribution maps were calculated for different period ranges of 0.1-0.2, 0.2-0.3, 0.3-0.5, 0.5-1, 1-2, 2-3, 3-5, and 5-10 s. We are going to collect site amplification factors for the mentioned period ranges. The collected data will be used to retrieve the period-dependent source process for the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake.

キーワード: 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, source process, amplification

Keywords: 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, source process, amplification

SSS023-P26

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

大阪平野南部における微動アレイ探査 Microtremor array survey in southern Osaka plain

吉見 雅行^{1*}, 関口春子², 浅野公之², 堀川晴央¹, 岩田知孝², 木村治夫¹

Masayuki Yoshimi^{1*}, haruko Sekiguchi², kimiyuki Asano², haruo Horikawa¹, tomotaka Iwata², haruo Kimura¹

¹産総研 活断層・地震研究センター, ²京都大学防災研究所

¹Geological Survey of Japan, AIST, ²DPRI, Kyoto Univ.

大阪平野南部地域の S 波速度構造を得るため、泉大津市夕凧 (YNG)、堺市中区八田荘 (HAT)、堺市東区日置荘 (HKS)、堺市南区富蔵 (TMK)、羽曳野市羽曳が丘 (HBK)、和泉市いぶき野 (IBK) の 6 地点にて 2010 年 11 月 5-10 日に微動アレイ探査を実施した。最大アレイ半径は、YNG: 750m, HAT, HKS, HBK で 1000m, IBK:400m, TMK:300m である。場所に応じ 2 個ないし 3 個の同心正三角形の頂点および重心に地震計を配置し、大アレイでは 60-120 分程度、中アレイ (半径 100-300m 程度) では 30-60 分、小アレイでは 30 分程度の観測を昼間に行った。使用機器は VSE-15D1 (東京測振) と LS7000XT (白山工業) である。得られた測定記録から SPAC 法および拡張 SPAC 法により位相速度を求めた結果、高周波数領域 (3-5Hz) では 0.3-0.5km/s に漸近し低周波数領域 (0.3-0.5Hz) で 1.5 km/s に達する分散曲線が得られた (YNG では 0.3Hz で 1.0km/s)。ただし、0.4Hz 以下の帯域でコヒーレンスが低い観測記録が多く、低周波数側の観測位相速度については今後検討が必要である。

次に、分散曲線を満足する S 波速度構造を推定した。S 波速度 3.2km/s の基盤の上に、3 層の堆積層 ($V_s=0.35, 0.55, 1.0$ km/s) を仮定したモデルと、ミラージュー的な速度構造 ($V_s \text{ max}=1000\text{m/s}$) を仮定したモデルにつき別々に GA により速度構造を探索した。その結果、両者とも基盤深度についてはほぼ同様で、YNG で 1400-1600m, HAT で 1000-1200m, HBK で 700-900m, HKS で 1100-1400m, IBK で 500-700m, TMK で 400m 程度の値が得られた。これらは、既存ボーリングや反射法による推定深度と整合的である。今後は基盤深度に影響する低周波数側の位相速度について別途観測するなど再検討し、3次元速度構造モデルの改良へつなげる予定である。

謝辞

本研究は、文部科学省平成 22 年度科学技術基礎調査等委託事業「上町断層帯における重点的な調査観測」によって行われました。

キーワード: SPAC 法, S 波速度構造, GA

Keywords: SPAC method, S wave velocity structure, GA

SSS023-P27

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

石垣島・西表島の強震観測点におけるS波速度構造探査 Explorations of S-wave velocity structure around the K-NET stations in Ishigaki and Iriomote island, Japan

山田 伸之^{1*}, 竹中 博士², 奥平 良太², 後藤 史紀², 藏本 稔大²

Nobuyuki Yamada^{1*}, Hiroshi Takenaka², Ryota Okudaira², Fuminori Goto², Toshihiro Kuramoto²

¹ 福岡教育大学, ² 九州大学

¹Fukuoka University of Education, ²Kyushu University

琉球海溝に沿って点在する南西諸島では、島ごとに頻度の程度にばらつきはあるものの、過去に主にプレート境界で発生する地震による被害に見舞われている。また、一部の島々では、近い将来に震度6弱以上の強い揺れに見舞われる可能性が高いと評価されているとともに、活断層の存在も指摘される島もあり [例えば、地震調査研究推進本部ホームページ]、将来的に地震による被害を受ける危険性は低くないといえる。

これまでに、山田・他(2010a, b)などでは、沖縄島南部の那覇市内や宮古島における微動アレイ探査実施の結果を報告し、S波速度構造を解明してきている。また、著者の一人の山田は、今回の地点を含め、奄美大島から西表島までの南西諸島の各島のK-NETやF-net観測点周辺を中心に20地点以上の微動アレイ観測をすでに実施してきている。なお、これらについては、別途報告を行う予定である。こうした一連の探査によって、具体的な物性値であるS波速度構造情報を蓄積させることは、地震動を評価する上で意義あることであると考えられる。今回の対象地域周辺である西表島近海では、1991~92年の群発地震に関連した各種調査分析もなされ [例えば、瀬戸・他(1993)]、また、例えば、藤井・木崎(1983)などでは八重山諸島に関する地質構造について示されているが、S波速度構造に関する情報は示されていない。

本発表では、先島諸島南部の石垣島および西表島の国内最西端に位置する強震観測点周辺で実施した微動アレイ探査結果について報告する。ここで報告する探査結果は、石垣市新栄町(IGK)、石垣市伊原間(IBM)、竹富町上原(UHR)であり、それぞれK-NET観測点のOKN009, OKN010, OKN011に隣接する地点である。なお、石垣島の中央部にはF-net観測点も存在する。微動アレイ観測は、2010年9月7, 8日の日中から夜間に実施した。いずれの地点も、海岸に近い位置であり、IGKとIBMで数mから10m程度、UHRで20~30mの標高であった。アレイ配置はやや長周期帯域をターゲットとして、最小半径100mから最大半径500m程度とした。IGKのみは、最大半径1km程度のやや大きめの配置を設定した。アレイ半径に応じて30分から60分間の常時微動の収録を行った。観測には、ポータブル地震計(SMAR-6A3P)を7セット用いた。現段階では、上記の観測で得られた微動記録の分析作業中であるが、後の解析には十分耐えうる微動記録が得られている。なお、いずれの地点も微動の卓越周期は約4.0sとやや長くなっていた。宮古島の場合も同様に、微動のスペクトル性状は周期数秒のやや長周期帯域で卓越する傾向があった。今後解析を進め、先の沖縄島や宮古島でのS波速度構造を参照にし、詳細な速度構造の解明を行う予定である。また、強震記録を参考にしながら、逆解析で得られた速度構造の妥当性についても視野に入れたいと考えている。

キーワード: 微動アレイ観測, S波速度構造, 石垣島・西表島

Keywords: Microtremor array measurements, S-wave velocity structure, Ishigaki & Iriomote Islands

SSS023-P28

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

常時微動観測による鳥取砂丘・湖山池周辺の地盤構造推定

Determination of subsurface structure of Tottori dunes and around Koyama Pond in Tottori Plain from Microtremor Observat

石田 勇介^{1*}, 大永夕陽¹, 野口竜也¹, 香川敬生¹

Yusuke Ishida^{1*}, Yuhi Onaga¹, Tatsuya Noguchi¹, Takao Kagawa¹

¹ 鳥取大学

¹Tottori University

鳥取平野では常時微動や重力異常を用いた地盤構造探査 (Noguchi and Nishida, 2002) がこれまでも精力的に実施されているが、市街域を除いては観測点間隔が概ね 500 m とやや粗く、地域毎の地盤震動特性を把握しきれないでいた。そこで、データを補間するために湖山池の北・東岸域および鳥取砂丘地内で、高密度の常時微動 3 成分単点観測と 4 点微動アレイ観測を実施し、詳細な地盤震動特性の把握と地下構造の推定を試みた。

3 成分単点観測にはアカシ GPL-6A3P (過減衰電磁式加速度計) を用い、約 10 分間の記録から交通振動の影響の小さい区間を複数選定し、その平均スペクトル比から卓越周期を推定した。微動アレイ観測には勝島製作所 PK-110V (電磁式 1 秒速度計) および Geo Space の 2Hz 速度計、4.5Hz 速度計を用い、ケーブルを用いて 1 収録機で同時観測を行った。アレイの径を 2.5 m ~ 50 m の範囲で複数実施し、解析にあたっては SPAC 法 (岡田・他, 1990) および CCA 法 (長・他, 2004) を用いた。

3 成分観測記録を用いた H/V 解析により対象地域の地盤卓越周期分布を推定したところ、これまでにみられなかった分布形状が得られた。これは地形・地質図などの資料から古地形を反映した結果となっているものと考えられる。

アレイ解析からは、ボーリングなどの既存調査や先に実施した H/V 解析による卓越周期と矛盾しない地下構造を推定することができた。これらの物性値を用いることにより、調査地域の卓越周期分布から基盤深度分布を推定することが可能となる。

今後は、鳥取平野における詳細地下構造モデルを用いた地震波伝播シミュレーションを実施する基礎を固めてゆきたい。

謝辞 観測にあたっては、鳥取大学工学部地圏環境研究室の方々に協力頂きました。

キーワード: 常時微動, 鳥取砂丘, 湖山池, 地盤構造

Keywords: Microtremor, Tottori dunes, Koyama Pond, subsurface structure

SSS023-P29

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

微動観測によるインドネシア・パダンの地下構造推定

Determination of underground structure of Padang, Indonesia by microtremor observations

野口 竜也^{1*}, 上村 修史¹, 佐藤 篤², Rusnardi Rahmat Putra², 小野 祐輔¹, 清野 純史², 池田 達紀², 香川 敬生¹
Tatsuya Noguchi^{1*}, Shuji Uemura¹, Atsushi Sato², Rusnardi Rahmat Putra², Yusuke Ono¹, Junji Kiyono², Tatsunori Ikeda²,
Takao Kagawa¹

¹ 鳥取大学, ² 京都大学

¹Tottori Univ., ²Kyoto Univ.

パダン市では2009年スマトラ島沖の地震(Mw7.6)の際,特に沖積平野に位置する市街地で甚大な被害が発生している。野口ら(2010)により,インドネシア・パダン市において60点の単点3成分観測および12地点の微動アレイ観測を実施され,地盤構造や地盤の卓越秋季分布が得られている。本研究ではさらに深部の地盤構造を推定するために,3地点で大規模の微動アレイ観測を実施した。また,微動単点3成分観測を新たに63点で実施した。

その結果,アレイ観測記録の解析より,工学的基盤より深部のS波速度1500 m/sまでの4層の地盤構造モデルを得ることができた。S波速度1500 m/sまでの基盤深度は,最深部で約200mに達することがわかった。3成分単点観測記録から得られたH/Vは,2~3秒にみられる明瞭な一つのピークを持つ単峰型,2~3秒の長周期側と0.1~1秒の短周期側に二つのピークをもつ複峰型の地点に分類できた。ピーク周期分布については,詳細な分布図が得られ,長周期側のピーク周期は1.5~3.0秒で,海岸部で長くなる傾向があり,また南側平野部の内陸部で山地側から平野部にかけて急変する地域が,南北方向に分布することがわかった。

キーワード: 微動観測, S波速度構造, H/V, インドネシア・パダン

Keywords: Microtremor observation, S-wave velocity structure, H/V, Padang, Inonesia

地震波干渉法を用いた台湾新竹市の地盤構造の推定 Estimation of velocity structure using seismic interferometry at Hsinchu, Taiwan

松本 敬太郎^{1*}, 盛川 仁¹, 谷川 正真¹, 陳 慧慈², 曹 栄凱²

keitaro matsumoto^{1*}, Hitoshi Morikawa¹, Masachika Tanigawa¹, Huei-Tsyr Chen², Tsao Jung-Kai²

¹ 東京工業大学大学院総合理工学研究科, ² 台湾国立中央大学土木系

¹Tokyo Institute of Technology, ²National Central University

新竹市は、成長著しい台湾におけるハイテク産業の中心地であると同時に、周辺には大きな断層が複数存在する地震危険度の高い地域である。台湾史上最大の被害を出した1935年の新竹・台中地震では中心被災地であり、近年では1999年の集集地震でも被害が出たことが記憶に新しい。今後の地震防災の観点から、地震動予測を行う必要性が高く、そのための地盤モデルの構築は不可欠である。

過去の研究で既に、新竹市において重力探査に基づく基盤形状の三次元モデルの構築(正坂ほか, 2007)小アレイを用いた微動探査などが行われている(川連ほか, 2009; 岩堀ほか, 2009)。しかし、重力探査の結果からは市の北西臨海部から南東内陸部に向かって基盤面が深くなっていくような構造が示唆されたが、一方の微動観測においては深部構造を探査するために必要な微動の長周期成分が捉えられておらず、重力探査の結果との整合性がはっきりしていない。

そこで、本研究では新竹市内の複数の観測点で長期間の微動観測を実施し、地震波干渉法を用いた解析を通じて地盤構造の推定を試みた。地震波干渉法は、2つの観測点で同時記録された地震波の相互相関関数からインパルス応答関数(グリーン関数)を求めることができ、近年世界的に注目を集める地下探査法である。計算の特性上、より多く、より長期のデータを用いることによって関係のない信号を打ち消し、2点間のグリーン関数を表す波形を得ることができる。相似地震や人工震源のコーダ波などを用いることも多いが、上記のような性質があるため、長期間に渡って連続した大量のデータを集めることができる微動とは相性が良い解析手法であると言える。また、長期間の記録をスタックすることでノイズを抑えることができ、同じ微動を用いた地下探査法でも、過去に行われた微動アレイ探査より長周期成分を捉えることが期待できる。

これまでの微動観測で、微動の長周期成分のパワーが非常に小さく、深い構造を知るためには非常に高感度、低ノイズでの観測が必要であることが明らかとなっていた。そのため、新たに、超低ノイズのデータロガーを開発し、また、動コイル型の速度計および加速度計を用いて観測を行った。新竹市南東部に位置する基盤が深いと推定された地域を取り囲む点、また、もっとも基盤が深いと考えられる位置の直上にも観測点を設置した。基盤の深い地域を挟んで東西および南北に測線を設定し、5台の速度計、2台の加速度計を国民小学校内に設置した。観測はサイトによって異なるが8月末から10月下旬までの約50日間で、24時間の連続観測を行った。カットオフ周波数が40Hzの1次のベッセル型フィルタをアンチエイリアスフィルタとし256倍のゲインをかけて0.01秒間隔のサンプリングでローカルなSDカード上に記録した。時刻はGPSを用いて校正され、サンプリング間隔以上の精度で各地点のデータは同期されている。GPSの受信のエラーや電源環境の変動により、ごく一部の時間帯で数分間のデータが欠測したが、それ以外はほぼ完全な連続観測を行うことができた。また、速度計については設置状態でステップレスポンスを記録し、後処理で厳密な計器補正をすることで長周期領域での精度を確保している。

得られた記録の上下動成分から相互相関関数を計算し、各観測点間のグリーン関数を求めた。得られたグリーン関数がRayleigh波によるものであると云う仮定のもとで、マルチプルフィルタ解析を行い、表面波群の周期帯ごとの群速度を算出した。さらに、この周期と群速度の関係を満たすような地下構造モデルを逆解析によって求め、これを既往の研究結果と比較した。その結果、重力探査から求められる密度構造と微動から求められる速度構造が必ずしも整合しない場合のあることがわかった。現時点では、2地点間の地盤構造モデルは平均的な成層構造モデルであるため、複雑な三次元構造を反映したものではない。したがって、現時点での結果がそのまま結論となるわけではないことを考慮したうえで、今後は密度構造と速度構造の不整合性についてより詳細な検討を行っていく予定である。

キーワード: 地震波干渉法, 地盤構造解析, グリーン関数, 微動探査

Keywords: Seismic interferometry, Green's function, microtremor

大阪堆積盆地構造モデルの検証と高度化 - 関西地震観測研究協議会の連続観測記録を用いた解析 -

Estimation of inter-station Green's functions by CEORKA continuous data for validating velocity model of Osaka basin

赤澤 隆士^{1*}, 染井 一寛¹, 浅野 公之², 岩田 知孝²

Takashi Akazawa^{1*}, Kazuhiro Somei¹, Kimiyuki Asano², Tomotaka Iwata²

¹ 地盤研究財団, ² 京大・防災研

¹G.R.I., ²DPRI, Kyoto Univ.

関西地域に強震計を展開している関西地震観測研究協議会(関震協)は、広帯域速度計の利点を活かし、大地震から近地で発生したMJ2程度の小地震に至るまで、高精度な地震観測記録を多数得てきた。同協議会では、1994年4月の観測開始以来、地震観測記録の収録にトリガ方式を採用してきた。一方で、2009年から、リアルタイム地震速報を目指した連続観測データのリアルタイム送信が可能な観測システムの構築に取り組んでおり(赤澤・他, 2009, 2010)、大阪堆積盆地内の観測点から順次、連続記録観測を進めている。

新しく導入したデータロガーにより収録される観測記録の精度評価を行うため、新データロガーの観測データと微動観測に広く利用されているSMAR-6A3Pで常時微動記録を同時収録し、それらの比較検討を行った。新データロガーで収録された記録には、0.2~30Hzの範囲で微動が確認された。本研究では、この微動を十分に記録している連続観測記録を用いて、地震波干渉法を適用して観測グリーン関数を求め、それを利用した堆積盆地構造モデルの検証およびその高度化を目指す。このような方法は、山中・他(2009)が関東平野に適用しており、都市圏の強震動予測の高度化に資することができると思われる。本報告はその序報である。

地震波干渉法による相互相関解析処理には、山下・他(2010)での解析手法を参考にする。これまでに、堺新湊観測点(SNM; 堺市堺区)と福島観測点(FKS; 大阪市福島区)の記録を利用して両地点間の観測グリーン関数を抽出した。相互相関関数の計算に使用する1つの記録長は、観測点間の距離(約14km)を考慮して10分間とし、1ヶ月程度の連続記録により、約4千スタックを行った。信号波群の粒子軌跡はRayleigh波基本モードの特徴を有し、信号波群には分散性が見られた。現在連続観測が行われている観測点ペアデータを使って解析を行い、大阪平野全体での空間的な特徴把握を進めるとともに、地下構造モデルとの関係を検討する。

参考文献

赤澤・他(2009)、関西地震観測研究協議会の強震観測システムのリアルタイム化に関する検討、日本地震学会講演予稿集、2009年度秋季大会、A21-6。

赤澤・他(2010)、関西地震観測研究協議会の強震観測システムのリアルタイム化に向けた取り組み、日本地球惑星科学連合2010年大会予稿集、HDS023-09。

山下・他(2010)、地震波干渉法による西日本の地殻速度構造(1) - 表面波群速度の推定 -、京都大学防災研究所年報、第53号B、175-180。

山中・他(2009)、南関東および相模湾地域の堆積層のS波速度構造モデルの検証のための地震波干渉法による表面波群速度の推定、日本地震学会2009年度秋季大会講演予稿集、B31-05。

SSS023-P32

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 16:15-18:45

地震波干渉法によるグリーン関数の合成に関する数値シミュレーション Simulation for retrieving Green's function with seismic interferometry

堤 若菜^{1*}, 山中 浩明¹, 地元 孝輔¹

wakana tsutsumi^{1*}, Hiroaki Yamanaka¹, Kosuke Chimoto¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo institute of technology

地震波干渉法とは、ある2観測点における微動の長期観測記録の相互相関から観測点間のグリーン関数を合成するという手法であり、近年注目を集めている。たとえば、南関東地域で観測された微動に地震波干渉法を適用した山中ほか(2010)は、地震記録との比較から地震波干渉法によりグリーン関数の表面波成分を抽出できることを確認し、深部地盤における既存のS波速度構造モデルの検証が出来る可能性を示した。しかし、微動の観測によって得られた相互相関関数の中には、理論的には正負の遅れ時間で非対称な波形などの解釈の困難なものがあり、振動源の非等方的な分布や局所的地下構造の強い不均質性の影響を受けていると考えられている。

そこで、微動の観測データを用いる場合を想定し、差分法を用いた3次元弾性媒質での地表震源における波動場の計算を行い、地震波干渉法によってグリーン関数の合成を試みた。水平成層構造と振動源の水平面における等方均質分布を仮定した場合、地震波干渉法によってグリーン関数の表面波成分が合成できることを確認した。しかし、実体波の反射波や屈折波などz方向に伝播する波は合成されない可能性があることが分かった。これは地表に振動源があるとしている微動に地震波干渉法を用いる場合の本質的な問題である可能性がある。また、局所的に停留位相点(Snieder et al., 2006)以外に強い振動源が存在すると、相互相関関数の正側と負側で大きく波形が変わってしまうことからグリーン関数の合成は困難であることがわかった。しかし、波形の位相は一致しており、群速度の評価などでは大きな問題にならない場合も多いこともわかった。不整形な地下構造の例として、観測点の一方がS波速度の小さい盆地の内部にある場合は、相互相関関数の正側と負側で波形が異なるものの、位相はグリーン関数との類似性を示した。一方で観測点の両方が盆地の内部にある場合は2つの観測点に対する地下構造の対称性にかかわらずグリーン関数との一致度合いが低かった。不整形な地下構造では、S波速度の異なる媒質の境界における表面波の反射が、2次的振動源となって相互相関関数の対称性とグリーン関数の合成に及ぼす影響が大きいと考えられる。

キーワード: 地震波干渉法

Keywords: seismic interferometry

数値シミュレーションによる地震波干渉法の適用条件に関する検討 Estimation of application conditions for seismic interferometry based on numerical simulation

染井 一寛^{1*}, 宮腰 研¹, 羽田 浩二²
Kazuhiro Somei^{1*}, Ken Miyakoshi¹, koji hada²

¹ 地盤研究財団, ² ニュージェック

¹G.R.I., ²NewJec Inc

地震波干渉法によって地下構造イメージングを行うためには、観測波形記録の自己相関解析、あるいは相互相関解析による仮想震源に対するレスポンス関数の合成を行い、さらにレスポンス関数に対して重合処理を行う、という大まかに分けてこの2段階を踏むこととなる。自然地震記録を用いる場合、使用する地震の数や震源分布、その震源特性、また、解析周波数範囲によって、レスポンス関数の特徴が異なると予想される。地下構造イメージングを正確に行うためには、観測記録から得られたレスポンス関数に対する適用条件について予め想定しておくことが重要である。そこで本研究は、地震波干渉法による地下構造イメージングのための適用条件について、数値シミュレーションを用いた定量的な評価を行った。

本研究では、シミュレーション波形を用いた自己相関解析による2つの検討を行った。1つは、対象とする地下構造モデルの地震基盤上面深度(対象深度)と解析に使用する適切な周波数範囲の関係を評価する。また、地震記録を用いる場合、震源のライズタイムも観測記録の周波数特性に影響するものと考えられるため、対象深度と解析周波数範囲、ライズタイムに注目した。評価基準は、設定した対象深度と評価された深度との差とした。もう1つは、重合処理を施す地震数とS/Nの関係である。1地震の相関関数からでは、屈折波や透過波等の影響により、明瞭な反射波位相を検出できないことが多い。このため、S/Nを上げる目的で、通常、複数の地震の相関関数を重合(スタック)する。ここでは、具体的にどの程度の地震数を重合することで、顕著な反射波位相が見られるか、という点に注目し検討を行った。評価基準は、得られるレスポンス関数のS/N値とした。また、これらの検討に用いる理論波形は、擬似的な観測点と震源を幾つか仮定し、離散化波数法(Bouchon, 1981)、反射透過係数行列法(Kennett and Kerry, 1979)による数値シミュレーションを基に作成した。

結果は、地震基盤上面深度が浅いほど高周波数帯域の情報が必要であることがわかった。対象深度100 - 1000mの範囲では、ライズタイム0.5秒以下の地震を扱う方が良いこと、また、500m以浅の深度に対しては、低周波数側のカットオフ1.0Hz以上の処理を施したものが望ましいと考えられる。さらに、重合地震数とレスポンス関数のS/Nは明瞭な比例関係を示したが、重合地震数50程度で十分なS/Nが得られていることが確認できた。ただし、理論波形はノイズの影響を含んでいないため、実際の観測記録を利用する際、ここで示した重合数以上の地震数や、適切な地震を精査する必要があると考えられる。

以上を踏まえて、大阪堆積盆地の強震観測記録を用いて自己相関解析を行い、地震基盤深度を推定した結果、既往の構造モデル(例えばKagawa *et al.*, 2004)の基盤深度と概ね良い対応を示した。

謝辞

独立行政法人防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net の強震波形記録, F-net のモーメントテンソル解, 気象庁一元化震源カタログによる震源情報を使用しました。記して感謝致します。

キーワード: 地震波干渉法, 自己相関関数, 数値シミュレーション, 適用条件, 大阪堆積盆地

Keywords: seismic interferometry, auto-correlation function, numerical simulation, application conditions, Osaka basin