

研究種目：基盤研究 (C)	
研究期間：2006 ～ 2008	
課題番号：18560463	
研究課題名 (和文)	地盤の不整形性が堆積層の非線形地震応答に与える影響とそれに基づく実地震被害の検討
研究課題名 (英文)	Effects of irregular topography on nonlinear earthquake ground motions and earthquake damage
研究代表者	
茂木 秀則 (MOGI HIDENORI)	
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授	
研究者番号：80261882	

研究成果の概要： 不整形地盤によって生じる複雑な地震応答を検討するために、SH波動場、P-SV波動場における境界要素-摂動解法による散乱波解析を行い、不整形地盤の地震応答は着目する点の周囲から到達する散乱波の干渉によって説明されることを示した。また、中越沖地震と岩手・宮城内陸地震における鉛直アレー観測記録を用いて、本震前後の地盤の非線形性状について検討した。その結果、本震主要動時の地盤の非線形化によって、剪断剛性率が大きく低下し、かつ、本震後数ヶ月以上の長期にわたり剛性低下が認められることを指摘した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,200,000	0	2,200,000
2007 年度	700,000	210,000	910,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	360,000	3,760,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：散乱波，不整形地盤，地盤ひずみ，非線形応答

1. 研究開始当初の背景

2004年新潟県中越地震では地盤被害に加え、土木構造物、建築物の被害が多く生じた。この地震の被害地域は震源域の直上に位置する山地地帯とそれに隣接する川口町、小千谷市などの平地に広がっており、前者は地滑りなどの地盤被害、後者は激しい地震動による構造物の被害が目立っている。このうち後者の地域では被害の分布に偏りが見ら

れ、震源断層からの距離だけからでは説明できない。特に震度7が観測された川口町市街地では市街地の全体に家屋被害が分布していたが、その北北西1km程度の、山裾の緩い傾斜地域に位置する武道窪地区では、地域の上部(山際)に家屋被害が多いのに対して低地側では家屋被害は余り見られず、明瞭な被害の分布が見られた。

現在の地震工学において地盤構造が頻繁

に論じられるようになった契機はメキシコ地震の被害であろう。これは、震源から 200 km 以上離れたメキシコシティで生じた地震被害であり、軟弱な表層地盤によって地震動がトラップされて次第に増幅されていく現象（重複反射による増幅効果）と理解されている。そして、この効果は構造物の建設や地震防災計画の立案などに際しては常に検討されている。一方で、上記の中越地震の被害地域のような（工学的）基盤岩がすぐ近くに露頭しているような場所では、軟弱な堆積層が一般の平野部に比べて薄く、工学的に問題となる振動数帯域では重複反射による増幅効果がほとんど見られないため、このような場所の地震動についてはあまり問題視されていない。

しかし、1995 年兵庫県南部地震では内陸地域に大きな地震被害が生じたのに対して、海側の厚い堆積層が存在する地域では、強い地震動による家屋の倒壊などは比較的少なかった。また、ポートアイランドの鉛直アレー観測の結果では、地盤の非線形挙動（この場合は液状化現象）によって地表の水平動成分は低減されていた。このように震源域近傍の激しい地震動に対しては、軟弱な堆積層が非線形挙動（塑性変形）することで地震動を遮断する効果も明らかに存在する。

著者等は、このように軟弱な堆積層が有する、相反する二つの効果の発現が地形の不整形性によって複雑な分布を示すために、中越地震の局地的な被害分布が生じたともと考えており、本計画調査はこの現象を実地盤や観測記録の調査・検討と数値解析で検証しようとするものである。

2. 研究の目的

上記の背景に基づいて、本研究では(1)地盤の不整形性に伴う地震動の増幅的干渉現象、(2)強震動による地盤の非線形性の発現と地震動の遮断効果について、波動理論ならびにアレー観測記録と地盤構造に基づく数値解析によって検討した。

3. 研究の方法

(1) 地盤の不整形性による地震波の散乱

地表面の起伏に着目し、複雑な地震応答を引き起こすメカニズムを検討するための手法として、境界型の解法の一つである境界要素法と摂動解法を組み合わせた新たな手法を展開した。まず、地盤の地震応答解析手法として振動数領域での境界要素法を用い、地表面の応答振幅と入射波の振幅に関する代数方程式を求めた。次に、この代数方程式の係数行列である境界要素行列をノイマン級数に展開し、地表面の応答振幅の級数解を得た。この級数解は基本解の境界積分を要素と

する行列のべき乗の和で陽に表されているため、地震応答を入射波と次数ごとの散乱波の寄与に分解して求めることができ、かつ、これに基づいて散乱波の性質を解析的に検討できる利点がある。

さらに、本解析手法の有効性を示すため、正弦波形の起伏を有する地形モデルに適用し、求められた散乱波の寄与分布に基づいて、地震応答が生じるメカニズムについて検討した。

(2) 被害地震における地盤の非線形応答の検討

東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所における加速度時刻歴波形データから、2007 年新潟県中越沖地震とその余震、ならびに、本震以前の地震を選び、「サービスホール」における鉛直アレー観測記録に NIOM 解析を適用して、それぞれの地震計を S 波が通過する時間差を求め、S 波の伝播速度を算定した。同様に KiK-net 一関西観測点における 2008 年岩手・宮城内陸地震とその前後の観測記録についても NIOM 解析を行い、S 波の伝播時間の変化を検討した。

4. 研究成果

(1) 地盤の不整形性による地震波の散乱

不整形地盤によって生じる複雑な地震応答を検討するために、①境界要素法による応答解析と Huygens の原理に基づいた定性的な検討、②SH 波動場における境界要素－摂動解法に基づく定量的な散乱波解析、③P-SV 波動場における境界要素－摂動解法に基づく定量的な散乱波解析を行った。

この結果、①不整形地盤の複雑な地震応答は着目する点の周囲から到達する散乱波の干渉現象として解釈することが可能であること（図 1）、②本研究で新たに展開した境界要素－摂動解法によって得られる級数解が Huygens-Fresnel の定理と類似した形式を有する変位表現であり、また、散乱波の影響を考える上で傾斜係数が有効な指標となること、③谷底の点では、向かい合う斜面部分から入射波と同じ極性（正の極性）を持つ散乱波が、また、周囲の谷地形から入射波と逆の極性（負の極性）を持つ散乱波が生じ、どちらも一次散乱波によるものが支配的であること、④山頂の点では、この点の属する凸地形の全域から正の極性を持つ非常に強い寄与が生じており、この寄与波形についても一次散乱波が支配的であること、⑤P-SV 波動場においても一次散乱波の性質を近似的に傾斜係数によって解釈することが可能であることなどを明らかにした。

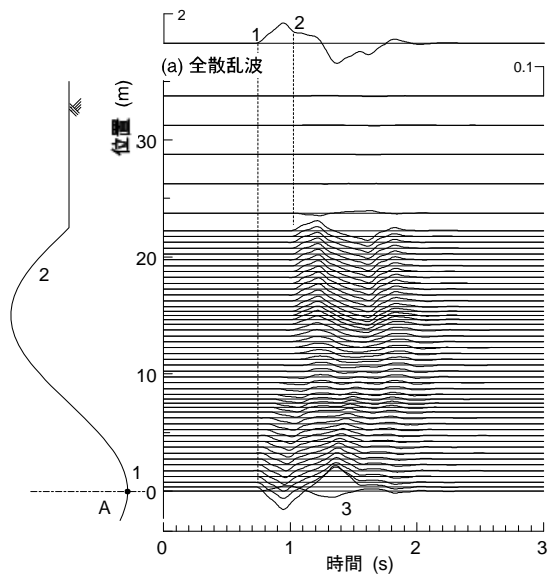


図1 不整形地盤の応答解析例. 上図: 点 A における応答波形, 下図, 地表面の各点において生成される散乱波が点 A に与える寄与波形. これらの寄与波形と入射波の和として上図の応答波形が生じることがわかる.

(2) 被害地震における地盤の非線形応答

2007 年新潟県中越沖地震とその余震, ならびに, 本震以前の地震を選び, サービスホール (KSH) における鉛直アレー観測記録に NIOM 解析を適用して, 中越沖地震とその前後の S 波速度の経時変化を検討した.

その結果, ①本震主要動において表層, 中間層では著しい速度低下が検出されること, 主要動直後から S 波速度の上昇が見られたが主要動以前の値までは回復しなかったこと

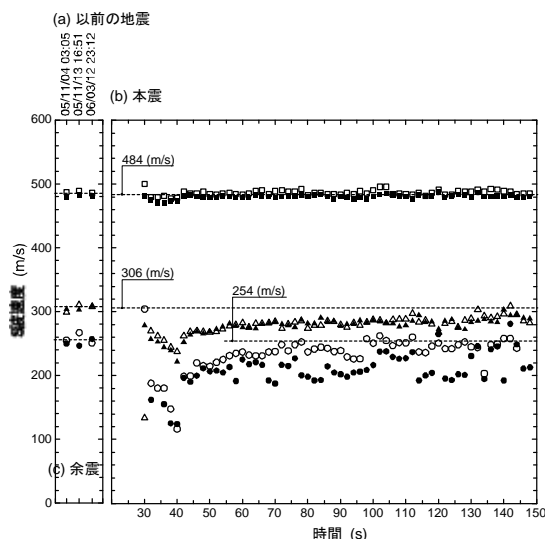


図2 新潟県中越沖地震における S 波速度の経時変化. 表層○●印, 中間層△▲印の S 波速度低下が著しい.

(図 2), ②余震の解析から, これらの層では本震から 8 ヶ月経過しても S 波速度は以前の値までには回復していないこと, ③主要動による非線形化後に表層の S 波の伝播速度には異方性が見られること, ④基盤層では主要動時においても S 波速度の低下はごくわずかであり, 強震動による非線形化の影響は殆ど生じていないと考えられること, などを明らかにした.

同様に, 2008 年岩手・宮城内陸地震における防災科学技術研究所 KiK-net 一関西観測点の鉛直アレー観測記録の解析からも, ①本震主要動において, 強震動に起因する地盤の非線形化による S 波の伝播速度の低下がみられること, ②上記の伝播速度の低下は, 剪断剛性率が初期剛性の 30~40%程度まで低下したことに相当し, このときの最大剪断歪は 0.1%以上に達するものと推定されること (図 3), ③本震コーダ部や本震直後の余震の解析から, 本震直後の S 波の伝播速度が本震以前の伝播時間よりも小さい値を示し, 緩やかに増加する傾向が見られるものの, 本震から 6 ヶ月程度経過した時点においても完全には回復していないこと, などが明らかになった.

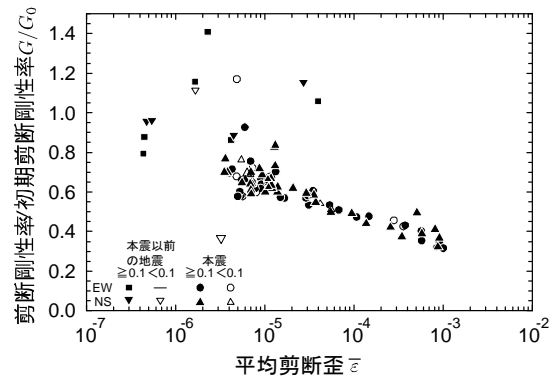


図3 2008 年岩手・宮城内陸地震, KiK-net 一関西観測点における表層の剪断剛性低下率. 主要動において, 剪断歪が最大で 0.1%に達し, 剪断剛性率は初期剛性の 30~40%程度まで低下したものと考えられる.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. E. A. Tingatinga, H. Kawakami, and H. Mogi, Gravity Effects on Earthquake Response of a Flexure Building: A Shear Building Comparison, International Journal of Structural Stability and Dynamics, YBY-121 (in press). (査読有)

2. 茂木秀則, Shrestha, S. M., 川上英二, 岡村真也 柏崎刈羽原子力発電所内の鉛直アレーにおける新潟県中越沖地震とその前後のS波速度の経時変化, 日本地震工学会論文集, 9.1, 2009, pp.19-31. (査読有)

3. 茂木秀則, 高橋学, 長田昌彦, 荒井進吾, 常時微動観測による岩塊の振動特性の検討, 第12回岩の力学シンポジウム, CDROM, 2008 (査読有).

4. Tingatinga, E., Kawakami, H. and Shrestha, S. M., Three-dimensional Seismic Collapse Analysis of Wooden Houses Using Rigid Body-Spring Method, The Open Construction and Building Technology Journal, 2, 2008, pp. 116-123. (査読有)

5. Kawakami, H., Mogi, H. and Tingatinga, E., A Note on Spatial Variations in Response Spectra of Earthquake Ground Motions, ISET Journal of Earthquake Technology, 44.1, 2007, pp.101-110. (査読有)

6. 茂木秀則, 川上英二:境界要素-摂動解法による起伏地形の散乱波の波形の検討, 土木学会論文集A, 63.3, 2007, pp.454-463. (査読有)

7. Mogi H. and Kawakami H.: Analysis of Scattered Waves on Ground with Irregular Topography Using the Direct Boundary Element Method and Neumann Series Expansion, Bull. Seism. Soc. Am., 97.4, 2007, pp.1144-1157. (査読有)

8. Chang H.Y. and Kawakami H., Effects of Ground Motion Parameters and Cyclic Degradation Behaviors on Collapse Response of Steel Moment-Resisting Frames, Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, 132.10, 2006, pp.1553-1562. (査読有)

[学会発表] (計 3 件)

1. 茂木秀則, Shrestha, S. M., 川上英二, 岡村真也 柏崎刈羽原子力発電所内の鉛直アレー観測記録のNIOM解析, 日本地震工学会第6回年次大会, 2008/11/3, 仙台市.

2. Mogi, H., Osada, M. and Hashida, T., Microtremor measurement for rock-fall hazard assessment, 6th Asian Regional Conference on Geohazards in Engineering Geology, 2007/10/17, Seoul.

3. Mogi, H. and Kawakami, H., Scattered Waves Induced by Irregular Topography, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, p.332, 2006/9/6, Geneva.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

茂木 秀則 (MOGI HIDENORI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 80261882

(2) 研究分担者

川上 英二 (KAWAKAMI HIDEJI)

埼玉大学・地圏科学研究センター・教授

研究者番号: 50125887

(3) 連携研究者