

# 地震動強さ指標の分布に及ぼす 地盤の不整形の影響

小野祐輔<sup>1</sup>・清野純史<sup>2</sup>・秋吉将史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻助手 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

E-mail:ysk@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻助教授 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

E-mail:kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

E-mail:akiyoshi@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp

地震被害と地震動指標の間には相関関係があるといわれており、地震動指標は被害の状況把握などに活用されている。しかしながら、観測記録から計算される計測震度、PGA、PGVなどの指標は、地震計設置箇所の地盤条件によって異なる値を示すことが考えられ、地盤の不整形の影響がどの程度含まれているのかは明らかにされていない。そこで本研究では、不整形地盤が計測震度とPGA、PGVの増幅に与える影響について比較・検討した。その結果、計測震度とPGA、PGVではその値が最大となる位置が異なることがわかった。また、基盤の傾斜角からこれらの地震動強さ指標が最大となる位置を推定する評価式を示した。

**Key Words :** *irregular ground, JMA seismic intensity, Peak ground acceleration(PGA), Peak ground velocity(PGV)*

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、震度7の震災の帯と呼ばれる局所的に被害が集中する地域が見られた。これは地下構造の不整形性が原因となって地震動が増幅されたことが明らかにされている<sup>1)</sup>。顕微鏡<sup>2)</sup>によれば、地下構造の不整形性が地震動に及ぼす影響が初めて注目されたのは1985年メキシコ地震である。この地震では盆地内で周期2から3秒の大振幅の波が100秒を超えて継続した。この現象を解明するために多くの研究者が様々な手法を用いたシミュレーションを行い、不整形地盤の影響によることが明らかにされた。中でも、盆地端部の軟弱地盤と硬質地盤の接続部で発生する表面波が重要な役割を果たしたことが確認された<sup>2)</sup>。

これらの研究の多くは地下構造の詳細が十分に明らかにされていないといった事情から、定性的な検討にとどまっていることが多い。その一方で、耐震設計上の必要性から応答スペクトルや所要降伏度スペクトルに及ぼす地下構造の不整形性の影響については、パラメータスタディに基づいた詳細な分析が成されており<sup>3)</sup>、特に鉄道構造物等設計標準・同解説では詳細な評価方法が述べられている<sup>4)</sup>。

一方、人的被害や構造物被害と最大地表面水平加

速度(PGA)、同速度(PGV)といった地震動強さ指標との間には強い相関関係がある<sup>5-7)</sup>ことが知られており、地震発生直後の即時的な被害推定システムの開発に活用されている。これらの指標はいずれも観測された地震記録に基づき算定される値である。地震記録には、地点の地盤特性の影響としては、1次元的な増幅特性と2次元あるいは3次元的な増幅特性である不整形地盤の影響が含まれている。したがって、観測記録に基づき算定される地震動強さ指標にもその影響が含まれている。

一般に、地震動強さ指標を用いた被害推定では、ある領域の代表的な値として、その領域に含まれる一観測点で得られた値を用いる。先に述べたように、この値は地下構造の不整形性による極めて局所的な影響を受けている可能性がある。たとえば、地下構造の不整形性による影響を強く受ける地点で得られた指標を、影響が現れる領域よりも広い領域の被害推定に利用すれば、その領域の被害を過大評価することになる。逆に、不整形性の影響の含まれない値を用いて、影響を受けた領域の被害推定を行えば、その評価は過小評価となる。

本研究では、地震発生直後の即時的な被害推定への適用を念頭に置き、地下構造の不整形によって最大地表面加速度(PGA)、最大地表面速度(PGV)、

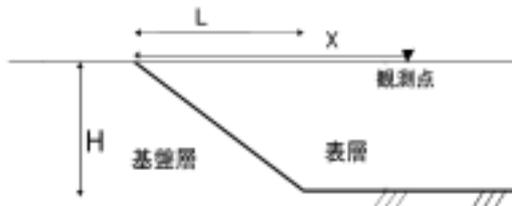


図- 1 解析モデルの概略図

表- 1 解析モデルの地盤パラメータ

	ポアソン比	せん断波速度 (m/s)	単位体積重量 ( $kN/m^3$ )	減衰定数
表層	0.45	100	15.7	0.05
基盤層	0.45	V	15.7	0.05

計測震度<sup>8)</sup>といった地震動強さ指標が受ける影響について、その分布特性を詳細に検討することを目的とする。検討の方法としては、2次元有限要素法を用いた不整形地盤モデルを対象としたパラメータスタディを行い、得られた結果の整理と考察を行った。

## 2. 解析モデル

本研究では2次元有限要素法コード7S<sup>9)</sup>を用いて解析を行った。平面ひずみを仮定した通常の2次元FEMを用いるため、水平・上下動の影響を扱える面内問題として解析を行う。本研究で用いた解析モデルについて以下に述べる。

### (1) 解析モデルの概要

本研究では、耐震設計上の基盤面が20mの深さにある浅層地盤の不整形性が、地表面の地震動に及ぼす影響を検討する。そこで、図- 1に示すような片側傾斜基盤モデルを用い、基盤の傾斜(H/L)を4, 2, 1, 1/2, 1/3, 1/5と変えて6種類の不整形地盤モデルを作成した。ここで、Lは傾斜部分の地表面における水平長(単位:m)、Hは表層の層厚であり、本研究を通じて20mとした。

次に表層と基盤層の地盤パラメータを表- 1に示す。地盤が層構造をなす場合には、層間の動的剛性比(波動インピーダンス比)によって震動振幅の増幅率が異なる。そこで表層と基盤層のインピーダンス比も重要なパラメータと考え、基盤層のせん断波速度 $V=200,300,600(m/s)$ と変えることでインピーダンス比が2, 3, 6と変化させて解析を行った。なお、地盤はすべて線形弾性とした。

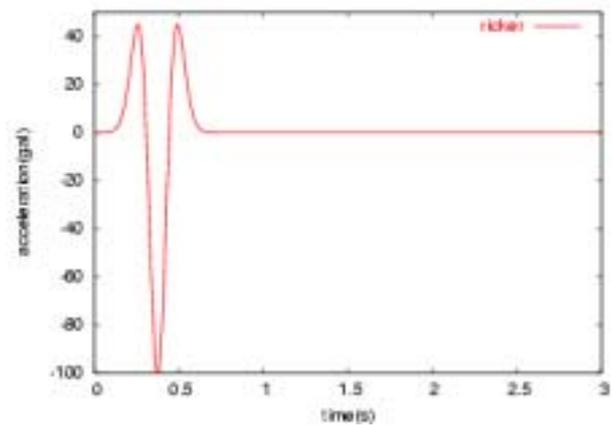
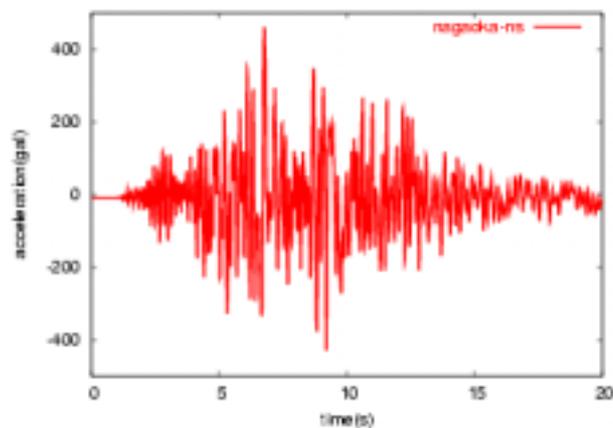
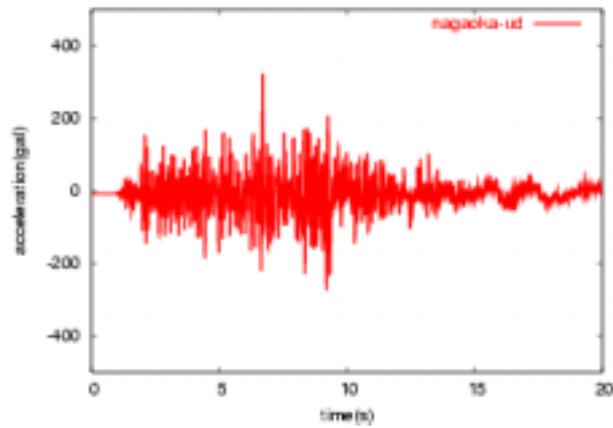


図- 2 中心周期0.3秒のRicker-Wavelet波



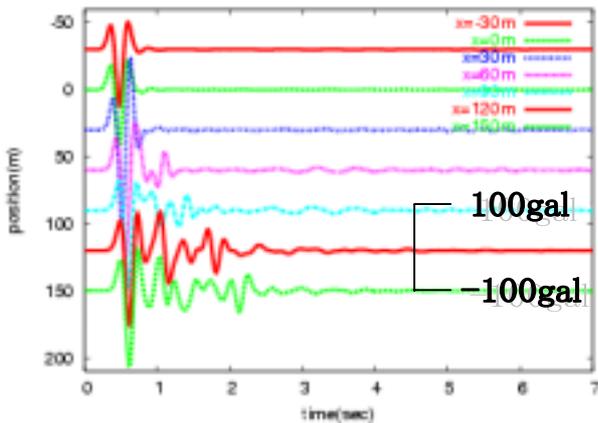
(a) NS成分



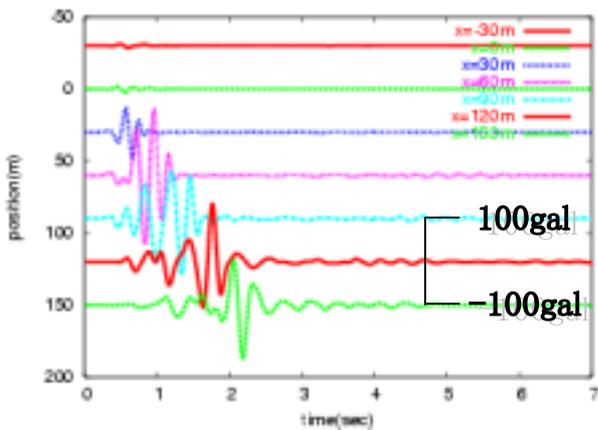
(b) UD成分

図- 3 2004年新潟県中越地震長岡記録

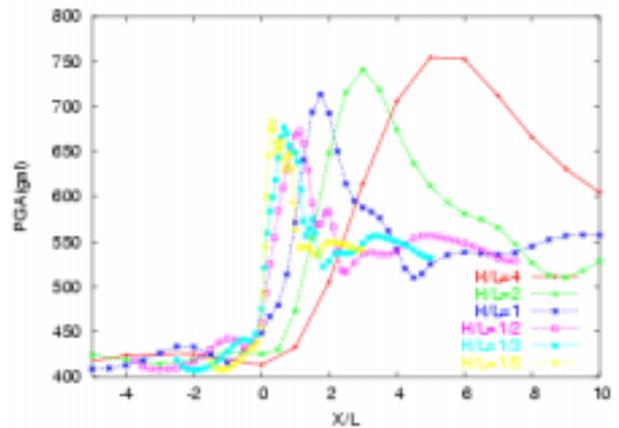
境界条件については、側方、底面ともにLaysmer<sup>10)</sup>によるダッシュポットを設けることで解析領域内部から外部への逸散波を吸収するようにした。しかしながら、これだけでは側方境界からの反射波を完全に抑えることができなかったため、反射波の影響が現れないように解析領域側方に材料減衰の大きな領域を設けた。



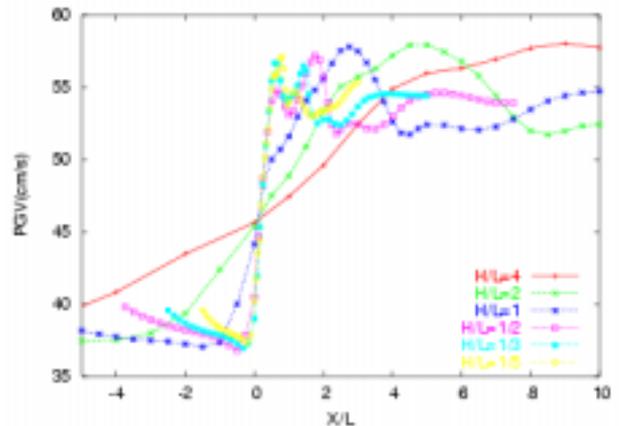
(a) 水平成分



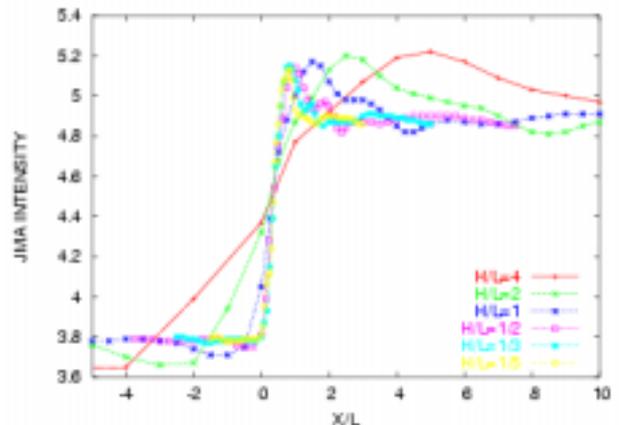
(b) 鉛直成分



(a) 最大加速度



(b) 最大速度



(c) 計測震度

図- 4 片側不整形地盤における地震応答

図-5 地震動指標の分布

## (2)解析に用いた地震波

本研究で検討の対象とした片側不整形地盤の基本的特性と解析手法の妥当性を調べるために、3章で図- 2のRicker wavelet波を用いて解析を行う。

4章では実際の地震動を用いて解析を行い、地震動強さ指標の地表面に沿った分布特性を検討する。解析に用いる地震記録は、2004年10月23日17時56分に発生した新潟県中越地震(マグニチュード6.8)における新潟県長岡市のK-NETの強震計で観測された記録のNS成分とUD成分を用いた<sup>11)</sup>。この地震波の加速度時刻歴波形を図-3に示す。

## (3)地震動強さ指標を算定する地点

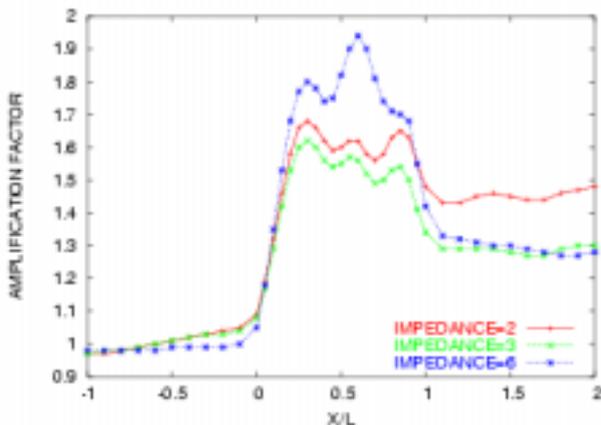
傾斜部での増幅特性を見るため、地震動強さ指標を各モデルの地表面に基盤面が傾斜している区間では5m間隔、成層区間では10m間隔で算定した。

## 3. 片側不整形地盤における地盤震動特性

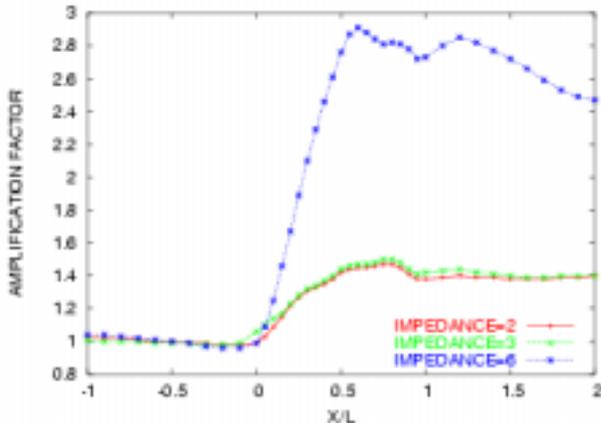
ここでは本研究で用いた片側傾斜基盤モデルの基本的な震動特性を確認し、さらに解析手法の妥当性

を検証することを目的として、基盤傾斜部の長さLを100m、基盤のせん断波速度Vsを300m/sとしたモデルに対し、図- 2に示した中心周期0.3秒、最大値100galのRicker-Wavelet波を解析領域鉛直下方から入力したときの結果を示す。地表面における加速度応答波形の分布は図- 4のようになった。

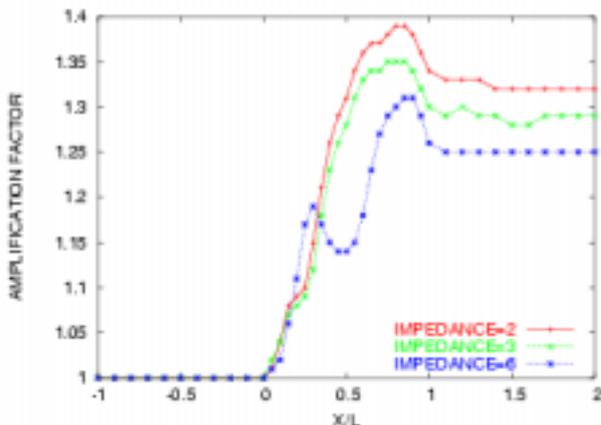
この結果を見ると、水平動のみを入射させたにも



(a)最大加速度



(b)最大速度



(c)計測震度

図-6 インピーダンス比の影響

かわらず地表面において鉛直動が生じていることがわかる。水平動については、基盤傾斜端部 ( $x=0$ ) から地表面に沿って伝播する波の存在が認められ、これに伴い継続時間が長くなっている。これらの波は、傾斜基盤端部で生成されたレイリー波であることが神山<sup>12)</sup>によって明らかにされている。

ここで用いた地盤モデルは、神山<sup>12)</sup>が疑似スペクトル法を用いて解析したモデルとは  $V_s$  が  $250\text{m/s}$  であ

った以外は全く同じであり、良く似た結果が得られている。これに加えて、これらの結果には側方境界からの反射波の影響は見られないことから、本研究で用いた解析手法が妥当なものであることが分かる。

#### 4. 解析結果

##### (1) 基盤の傾斜と地震動強さ指標の分布の関係

基盤のせん断波速度を  $300\text{m/s}$  とし、 $L$  を変化させて解析を行い、地表面における最大加速度、最大速度、計測震度を求めた。これらの指標の分布を図-5に示す。図-5の横軸は傾斜基盤端部からの水平距離  $x$  を傾斜部の長さ  $L$  で割って正規化したものである。すなわち、 $x/L$  が  $0$  より大きく  $1$  より小さい領域は、基盤が傾斜している箇所に対応する。

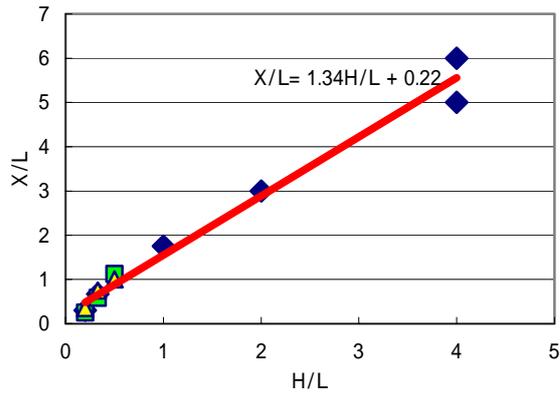
まず図-5(a)のPGAの分布について見ると、PGAの分布の最大値が基盤の傾斜角によって異なり、基盤の傾斜角が大きくなるにしたがって大きくなる傾向が認められる。また、PGAが最大となる地点も、傾斜角の増加に伴ってグラフの右側へ移動している。

次に図-5(b)に示したPGVの地表面分布について見ると、傾斜角の増加にしたがって最大のPGVを与える地点が傾斜基盤端部から離れていく傾向はPGAと同様である。しかしながら、分布の形状はPGAの場合よりもなだらかで、PGVの最大値は傾斜角の大きさによらずほぼ一定で  $55$  から  $58\text{cm/s}$  となっている。また、PGAの場合とは異なり、傾斜基盤端部よりも左側の領域 ( $x < 0$ ) においても地盤不整形の影響が現れている。この領域ではPGVの値が一定の値に収束していないため、ここで示した結果には解析モデルの境界の影響が含まれていると考えられる。したがって、この現象に関しては、解析範囲を広げた検討が必要である。

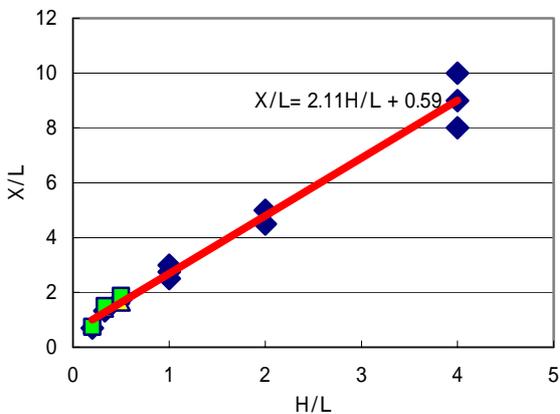
図-5(c)は計測震度の地表面に沿った分布を示したものである。計測震度の最大値について見ると、基盤の傾斜角によらずおよそ  $5.2$  で一定の値になっている。傾斜基盤の傾きが大きくなるにしたがって計測震度が最大となる位置が右側に移動しているのは、PGA、PGVと同じであるが、分布の形状はPGAの場合よりもなだらかでPGVよりは鋭い形になっている。この結果は、計測震度がその算定方法から加速度と速度の中間的な性質を持つことによく整合する現象である。また、傾斜基盤端部よりも左側 ( $x < 0$ ) の領域では  $L$  が  $5$ 、 $10\text{m}$  である場合を除き、計測震度は  $3.8$  になっており、基盤の傾斜角が大きい場合には計測震度についても、傾斜基盤が表層地盤の存在しない側にも影響を及ぼしていることがわかる。

##### (2) インピーダンス比と地震動強さ指標の分布の関係

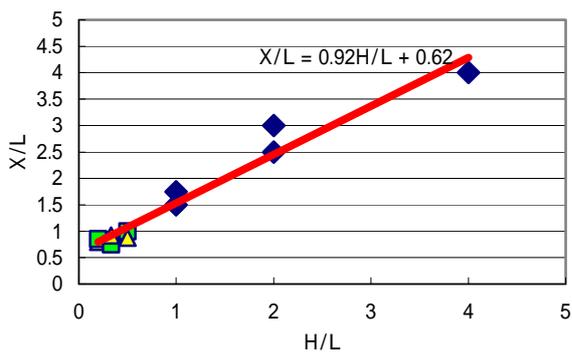
次に  $L = 100\text{m}$  である片側傾斜基盤モデルにおいて、基盤層と表層のインピーダンス比を  $2$ 、 $3$ 、 $6$  と変化させ、地表面におけるPGA、PGV及び計測震度の分



(a)最大加速度



(b)最大速度



(c)計測震度

図-7 地震動強さ指標が最大となる地点と基盤傾斜角

布を求めた．インピーダンス比は基盤層のせん断波速度の値を変えることで変化させた．図-6にその結果を示す．この図において横軸は(1)と同じく傾斜基盤端部を原点とする水平距離Hを傾斜部の長さLで

割ったものである．縦軸は傾斜基盤端部よりも左側の領域( $x < 0$ )における値の平均値に対する比を用いて表している．

この図によると，PGA，PGV，計測震度のいずれもインピーダンス比によって最大値が変化している．また，いずれの指標についても，分布形のピークを与える位置は変化していないことから，これらの地震動強さ指標が最大となる位置に対してインピーダンス比はほとんど関係しないことがわかる．

## 5．最大増幅地点の予測式の提案

前章では地震動強さ指標としてPGA，PGV及び計測震度を選び，これらの地表面に沿った分布と傾斜基盤の傾斜角との関係を求めた．その結果，傾斜基盤の影響によって，これら3つの地震動強さ指標は傾斜部と周辺において増幅されることがわかった．ここでは，傾斜部の長さとして指標の増幅率が最大となる位置の関係について考察する．

縦軸にX/L(位置/傾斜区間の水平長)を，横軸に基盤傾斜角H/Lをとり，地震動強さ指標が最大となった位置Xをプロットしたものが図-7である．ここで，黄緑のポイントがインピーダンス2，同様に黄色が6，紺が3の結果を表している．これらの図において，地震動強さ指標の最大値を与える位置が一つに決められないものは複数プロットしている．

この図によれば，PGA，PGV，計測震度ともに不整形地盤の影響によって最大となる位置と基盤傾斜角の間には線形関係が認められる．そこで，X/LとH/Lについて1次の回帰式を求めた結果，次のような関係が得られた．

最大加速度：

$$\frac{X}{L} = 1.34 \frac{H}{L} + 0.22 \quad (1)$$

最大速度：

$$\frac{X}{L} = 2.11 \frac{H}{L} + 0.59 \quad (2)$$

計測震度：

$$\frac{X}{L} = 0.92 \frac{H}{L} + 0.62 \quad (3)$$

前章で基盤層と表層のインピーダンス比の影響について検討したが，これら3つの地震動強さ指標が最大となる位置はインピーダンス比に大きな影響を及ぼさなかった．したがって，上に示した3つの式はそれぞれPGA，PGV及び計測震度が最大となる位置を予測する簡易推定式として利用できると考えられる．しかし，本研究では限られた条件でのケーススタディしか行っていないため，一般性を持たせるためには，入射波の周期特性によって指標が受ける影響，表層のVsをパラメータとしモデルの周期特性を

変化させることによって指標が受ける影響を明らかにした上で、その影響を提案した評価式に組み入れる必要がある。

## 6. まとめ

本研究では、片側不整形地盤の影響が地震動強さ指標の地表面分布に及ぼす影響について検討した。本研究の成果は以下の通りである。

- ・時間領域での有限要素法を用いて、片側傾斜基盤モデルを対象としてRicker-Wavelet波と実際の観測記録を入力とした地震応答解析を行った。
- ・傾斜基盤の存在によるPGA, PGV及び計測震度の3つの地震動強さ指標の分布の変化を求めた。
- ・傾斜基盤の影響を受けてPGA, PGV及び計測震度が最大となる地点は、表層と基盤のインピーダンス比によって変化しないことを明らかにした。
- ・基盤の傾斜角からPGA, PGV及び計測震度が最大となる地点を推定する評価式を示した。

今後の課題として、地盤が非線形化した場合について検討すること、片側傾斜基盤に対して表層の存在しない側において地震動強さ指標が受ける影響を明らかにすること、また5章で述べた入射波の周期特性やモデルの周期特性によって指標が受ける影響を明らかにした上で、その影響を提案した評価式に組み入れることなどがあげられる。

謝辞: 本研究では、独立行政法人防災科学技術研究所, Kyoshin Net(K-NET)の地震記録を利用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Masato Motosaka and Masayuki Nagano: Analysis of amplification characteristics of ground motions in the heavily damaged belt zone during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 377-393, 1998.
- 2) 瀧藤一起: 不整形地盤における地震動, 土木学会論文集, No.437/I-17, pp.1-18, 1991.
- 3) 江尻穰司, 後藤洋三: 基盤不整形の影響の設計震度スペクトルへの導入に関する基礎的検討, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.173-182, 1994.
- 4) 鉄道構造物設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.
- 5) 林康裕, 宮越淳一, 田村和夫: 1995年兵庫県南部地震の地震動強さと建物被害の検討, 清水建設IRI 研究報告97-01, 1997.
- 6) 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, No.527, pp.189-196, 2000.
- 7) 岡田成幸, 鏡味洋史: 震度による地震被害系統評価のためのバルナラピリティ関数群の構成, 地震, 第44巻, 第2号, pp.93-108, 1991.
- 8) 震度を知る - 基礎知識とその活用 -, ぎょうせい, 1996.
- 9) 土岐憲三, 三浦房紀: 地盤 - 構造物系の非線形地震応答解析, 土木学会論文報告集, 第317号, pp.61-68, 1982.
- 10) J. Lysmer, R. L. Kuhlemeyer: Finite dynamic model for infinite media, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.95, No. EM4, pp.859-877, 1969.
- 11) 防災科学技術研究所: <http://www.k-net.bosai.go.jp>
- 12) 神山真, 佐藤勉, 鈴木猛康: 不整形地盤の地震応答における短周期表面波の工学的重要性に関する研究, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.225 ~ 243, 2001.

(2005. 3. 15 受付)

## EFFECT OF LATERALLY INHOMOGENEOUS GROUND ON SEISMIC INDICES

Yusuke ONO, Junji KIYONO and Masafumi AKIYOSHI

To examine the effect of irregular underground structure on seismic ground motions, six two-dimensional irregular underground structure models composed of a shallow surface layer and a basement layer were analyzed with 2D wave propagation models using the Finite Element Method.

Analytical results in terms of Peak Ground Acceleration (PGA), Peak Ground Velocity (PGV), and instrumental seismic intensity show that ground motions at the surface are amplified due to the irregular underground structures.