

地震断層近傍における地震動の特徴とその評価

アイダン・オメル¹ 太田 良巳²

¹東海大学海洋学部海洋建設工学科

²日本物理探査株式会社

近年、国外においては1999年トルコ・Kocaeli地震、台湾・集集地震、2003年イラン・Bam地震、2004年スマトラ沖地震、2005年ニアス島沖地震、2005年パキスタン地震、国内においても1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震のような巨大地震が多数発生している。これらの地震の共通的な特徴としては、最大加速度の分布が断層を挟んで上盤と下盤で一様でない点である。また、断層に伴う地表面の永久変形が発生している。そこで本論文では地震動と断層の関係を調べると共に加速度記録から速度や永久変位などを求める手法の可能性について述べる。

1. 序論

近年、世界各地で巨大地震が発生している。国外においては1999年トルコ・Kocaeli地震、Düzce地震、台湾・集集地震、2003年イラン・Bam地震、2004年スマトラ沖地震、2005年ニアス島沖地震、パキスタン地震、国内においても1995年兵庫県南部地震、2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震、2003年宮城県北部地震、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震など非常に多くの巨大地震が発生している。各地震における共通的な特徴としては、最大加速度の分布が断層を挟んで上盤と下盤で一様でない点である。各地震における共通的な特徴としては、最大加速度の分布が断層を挟んで上盤と下盤で一様でない点である。集集地震や新潟県中越地震、パキスタン地震での地震の特徴として斜面崩壊の被害が非常に多いという点が挙げられる。兵庫県南部地震、集集地震、Kocaeli地震、Düzce地震などでは断層運動に伴う地表面の永久変形が特徴である。宮城県北部地震や新潟県中越地震では極めて短時間に震度6を超える地震が数多く発生している点が特徴的である。スマトラ沖地震は断層の変位量が大きく、算出されたマグニチュードも非常に大きな値であったのだが、地震動は非常にゆっくりとした長周期の地震で地震の被害よりも津波の被害が甚大であった。一方、スマトラ沖地震のすぐ近くで発生したニアス島沖地震ではスマトラ沖地震に比べて断層変位量もマグニチュードも小さい地震であった。しかしながら、ニアス島沖地震は非常に強い揺れによって多くの被害が発生した。スマトラ沖地震とニアス島沖地震は地震発生メカニズムも地質構造

も非常に似通っているにもかかわらず、なぜ地震の特徴が大きく異なるのであろうか。このように、単に地震といっても一つ一つの地震に特徴があり、その特徴が非常に重要になる。

本論文では、前記した地震に関する多くの疑問点について工学的に検討し、このような特徴がなぜ発生するのかについて述べる。地震断層と最大加速度の分布および地震断層に伴う地表面の変形特性について。スマトラ沖地震とニアス島沖地震の振動特性が、なぜ異なるのかについて。地盤の特性と断層の特徴を考慮した地表面最大加速度と速度の距離減衰に対する提案式を紹介する。日本では地震に関しては地震観測の技術の発展によって非常に細かくデータが採取されている。そこで、そのデータを用いて最大加速度と断層の関係を調べると共に加速度記録から速度・変位を求める手法の可能性について述べる

2. 室内破壊・断層試験

2.1 室内破壊試験

岩の破壊時の動的挙動についてさまざまな地盤材料を用いて異なった荷重条件での実験を行なった。いくつかの実験結果を紹介し、それに対して考察する。図-1に花崗岩ブロックの破壊実験の結果を示す。花崗岩ブロックの寸法は10×10×20(cm)である。花崗岩ブロックの強度が非常に強いため、破壊の際に計測された加速度は大変大きな値を示している。供試体の上部の加速度は供試体の下部の加速度より大きく計測された。また、最大加速度は岩盤の残留状態に至る直前に発生している。図-2は静岡県内にあるトンネルから採取した砂岩に対する各方向の加速度応答を示してい

る。基本的には、加速度応答を観察すると数値以外は先に紹介した例と似通った傾向にある。



写真-1：岩盤ブロックの圧縮破壊試験

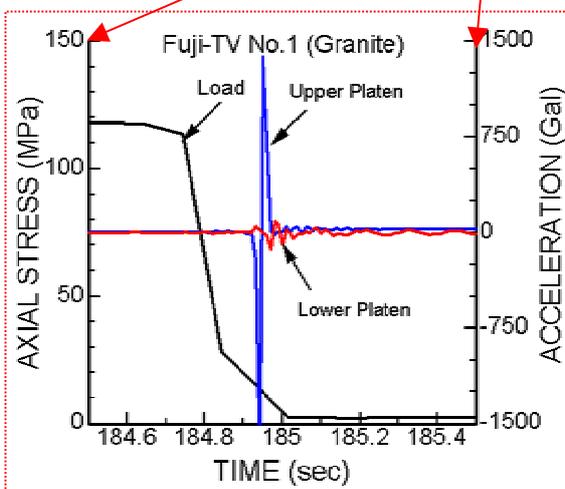
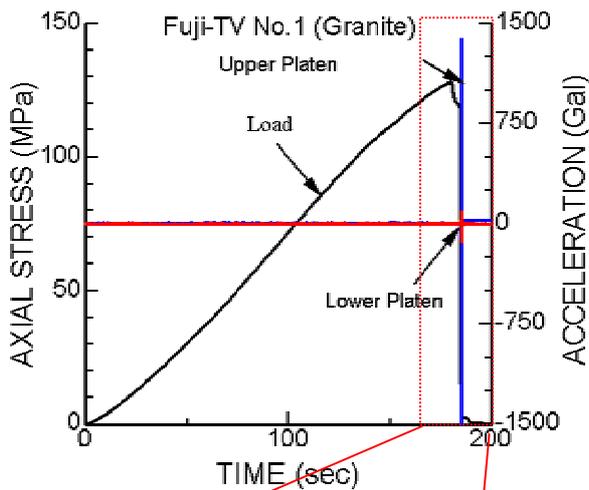


図-1：花崗岩の応力と加速動応答

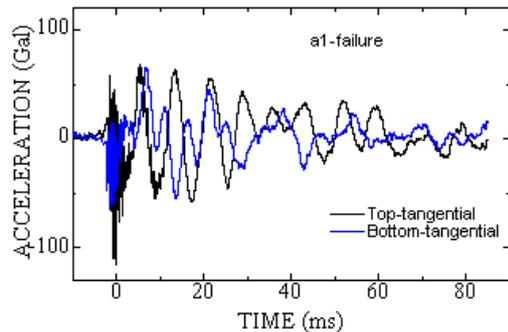
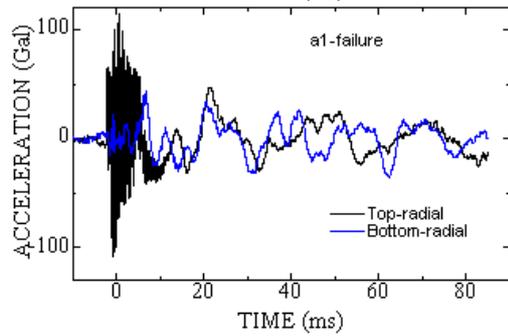
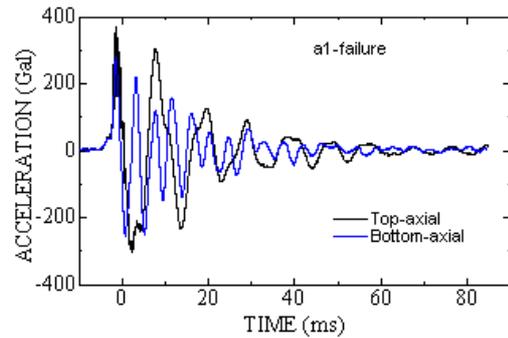


図-2：砂岩の破壊時の加速度応答

2.2 室内断層試験

断層運動を重力場における上部堆積地盤の自由落下により模擬し、堆積地盤内の断層亀裂伝達・変形のほか、地震断層の上盤と下盤の地震時の地震動について検討した。本実験装置は重力場のもとで断層運動中に発生する加速度応答や堆積地盤の変形を観測するために製作した。観測水槽の大きさは、長さ780mm・高さ300mm・奥行き3.50mmである。観測水槽のみ透明なアクリル板になっており、その他の部分は鉄製になっている。水槽の底盤は左右2つのブロックよりなっている。片方のブロックの下に底盤を支える棒があり、この棒はピンによりとめられている。このピンを引き抜くことにより一定の角度で底盤が落下し、その運動を断層運動としている。図-3は正断層90°で断層変位100mmに関して、上盤と下盤の加速度応答のほかに、変位記録を数値微分して求めた加速度応答を示している。変位記録を数値微分して求めた加速度応答は、実測された加速度応答に非常に類似している。図-3よりわかるように運動する側の地盤（上盤）における鉛直加速度は、停止している側の地盤（下盤）のものに比べて、大きな値を示してい

る。上盤の鉛直加速度の時間的な変化を見ると4つの領域が見受けられる。すなわち、それぞれの領域を立ち上げ、自由落下、運動拘束および運動停止と名づけることにする。落下する部分の運動が拘束始めると、加速度の値が逆の記号をもって最大に達する。

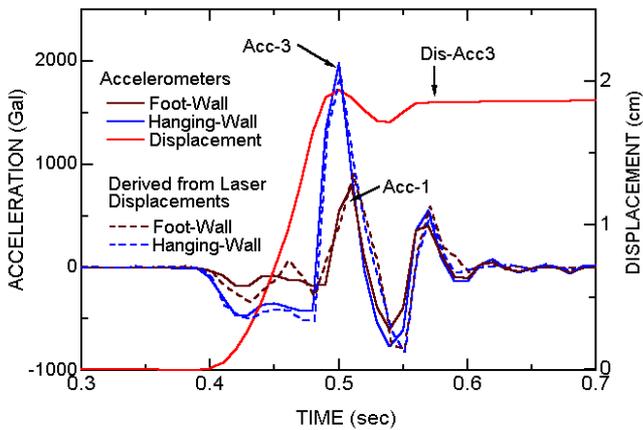


図-3 加速度応答と断層変位量の関係(Faulting displacement=100mm, Layer thickness=200mm)

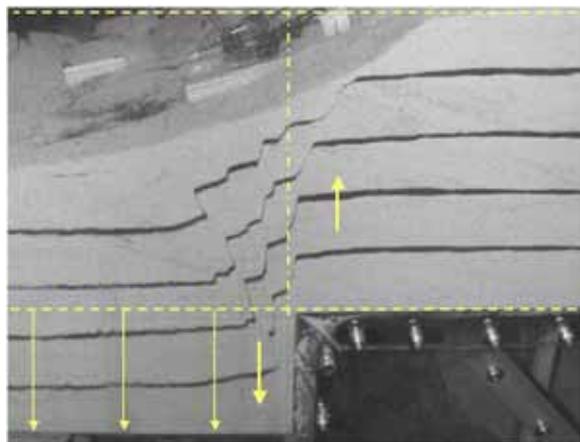


写真-2：正断層の場合の断層近傍の変形

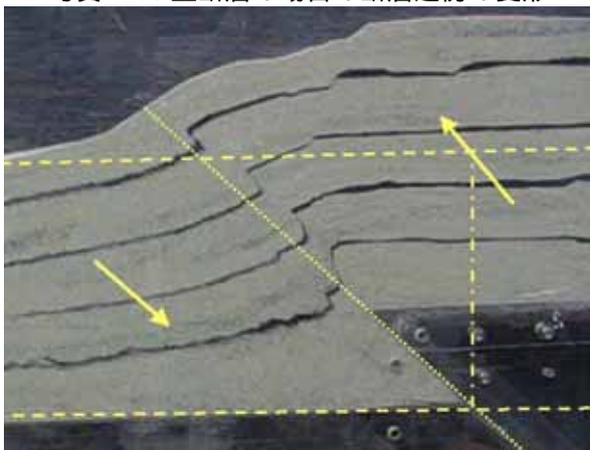


写真-3：逆断層の場合の断層近傍の変形

写真-2では水平だった地表面と水平層が、底盤の落下とともに垂直に運動し、階段状の亀裂が発生した様子が見受けられる。運動が静止している側の地盤に最初急な断層崖が形成され、その後、

地盤が粒状体であるため滑らかな斜面が形成されている。逆断層運動の場合の変形状況を写真-3に示す。この場合も、最初上盤の地盤に急な断層崖が形成され、その後、地盤が粒状体であるため滑らかな斜面が形成されている。

3. 断層タイプの違いによる地震動

3.1 逆断層：2005年新潟県中越地震

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震はマグニチュード6.8の逆断層に伴う地震である。新潟県中越地震におけるK-NETで提供されているデータを用いて地表面最大加速度について作成したコンター図を図-4に示す。図中に示した赤い点線は今回の地震の発生の起因となったと推定される地震断層の位置を示している。新潟県中越地震で推定される地震断層をはさんで地震加速度の分布の様子が大きく異なっていることが見受けられる。図-4より断層の上盤にその値と影響域は大きいことが明らかである。

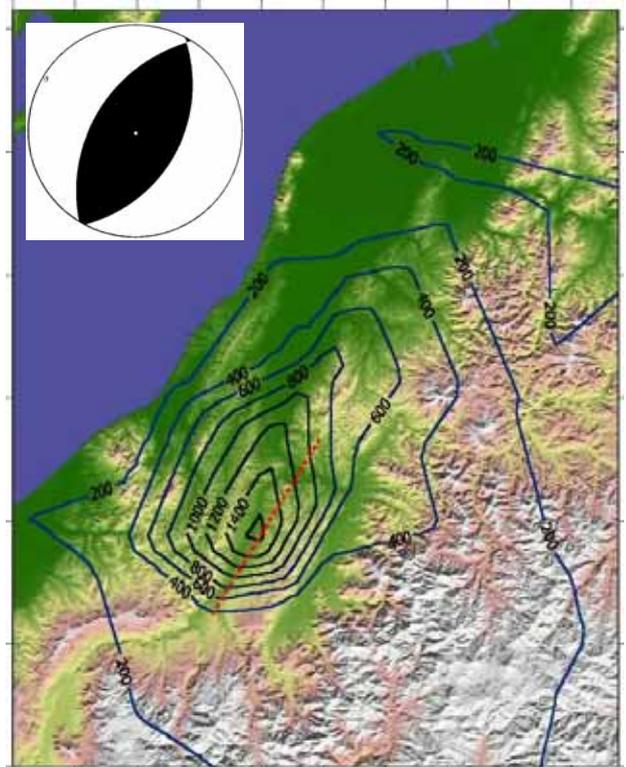


図-4：新潟県中越地震における地表面最大加速度コンター図

3.2 横ずれ断層：2000年鳥取県西部地震

2000年に発生した鳥取県西部地震は、マグニチュード7.3、深さ10km、震央35.30°N 133.40°E、左横ずれ断層地震である。地表面最大加速度について作成したコンター図を図-5に示す。地表面で計測された加速度応答は基盤のものに比べ、大きい値を示している。これは基盤面上部の地質構造に伴い増幅現象がおこると考えられる。また、地震に伴う最大加速度は断層をはさんで計測される値が大きく異なる。



図-5：鳥取県西部地震における地表面最大加速度コンター図

3.3 正断層地震：2001年静岡県中部地震

2001年4月3日23時57分、静岡県中部地区を震源とする地震が発生した。マグニチュード5.1の正断層地震である。最大震度5強を記録し、東海地方を中心に広く関東近畿地方でも地震の揺れが観測された。地表面最大加速度について作成したコンター図を図-6に示す。この場合も、断層の上盤に大きな加速度が記録された。

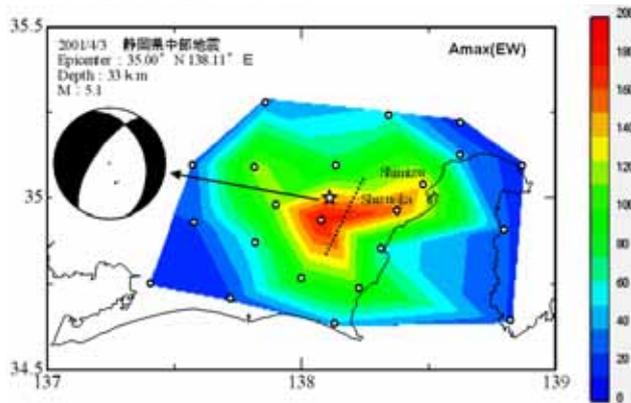


図-6：静岡県中部地震における地表面最大加速度コンター図

4. 断層と地盤の特性を考慮した地表面最大加速度と速度の距離減衰式

数多くの地表面最大加速度と速度の距離減衰式が提案されている。利用される観測データによってそれぞれの減衰式に違いが見られる。この違いは主に、地殻の構造と力学特性、地表面近傍の地盤のせん断波速度特性や断層の幾何学特性と破壊伝達仮定などに大きく依存する。地震の震央距離が震源距離と断層から直角の距離をパラメータとしている既存の減衰式が多い。この節で Aydan (1997, 1996, 2001)が加速度の距離減衰に関して提案した減衰式を地表面近傍の地盤速度特性や断層の幾何学形状と破壊特性を考慮して地表面最大加速度および最大速度に対して拡張したものを紹介し、その適用性を検証する。基本的に、地表面最大加速度および最大速度に関して提案する減衰式は数

学的に同様な形式で与えられるとする。例えば、最大加速度に対する減衰式を次式のように与える。

$$a_{\max} = F(V_s) * G(R, \theta) * H(M) \quad (1)$$

ここで V_s 、 R 、と M 地盤のせん断弾性波速度、震源からの距離、断層の走行（東から反時計回り計測するものである）、および地震の規模である。本論文で式(1)における各関数の具体的な形を次のように選定する。

$$F(V_s) = Ae^{-V_s/B} \quad (2a)$$

$$G(R, \theta) = e^{-R(1-D \sin \theta + E \sin^2 \theta)/C} \quad (2b)$$

$$H(M_s) = e^{M/F} - 1 \quad (2c)$$

ここにA, B, C, D, E, Fは係数であり、地域によってその値が異なる。地震の規模が0の場合、加速度も0であることに注意。

地表面最大速度に関して、上記と同様な形の減衰式を利用するが、その際、最大加速度の式との違いは係数の値が異なっていることである。内陸型地震に対する地表面最大加速度・速度に対する提案式の係数A, B, C, D, E, Fの具体的な値についての一例を表-1に示す。

表-1: 内陸地震に対する係数A, B, C, D, E, Fの値

| | A | B(m/s) | C(km) | D | E | F(M _s) |
|------------------|------|--------|-------|-----|-----|--------------------|
| A _{max} | 2.8 | 1000 | 40 | 0.5 | 1.5 | 1.11 |
| V _{max} | 0.15 | 1000 | 100 | 0.5 | 1.5 | 1.11 |

次に上記の提案式を2004年新潟県中越地震に適用し、その妥当性を検証する。図-7 から図-8に新潟県中越地震における地表面最大加速度と距離の関係を示す。各図において地盤のせん断弾性波速度を変化させた場合と断層の走行に対する計測方向を変化させた場合にして計算値と観測値を比較している。大変興味深い点としては観測データを計算した曲線で囲むことができる点である。これは、観測データのバラツキは地盤の条件や断層の破壊伝達過程や断層のタイプを考慮することによってそのバラツキについて説明が可能であると言える。

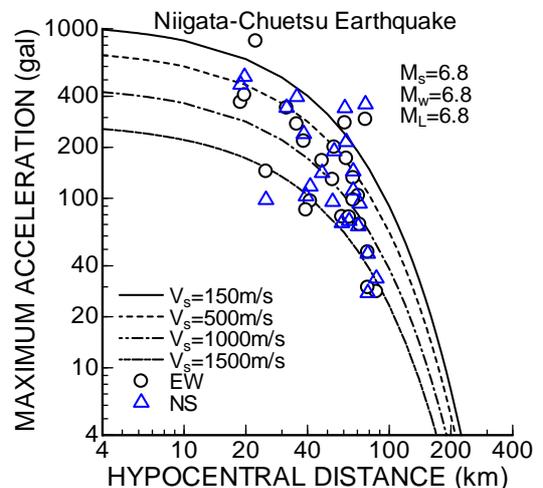


図-7：震源距離と最大加速度の関係（せん断波速度）

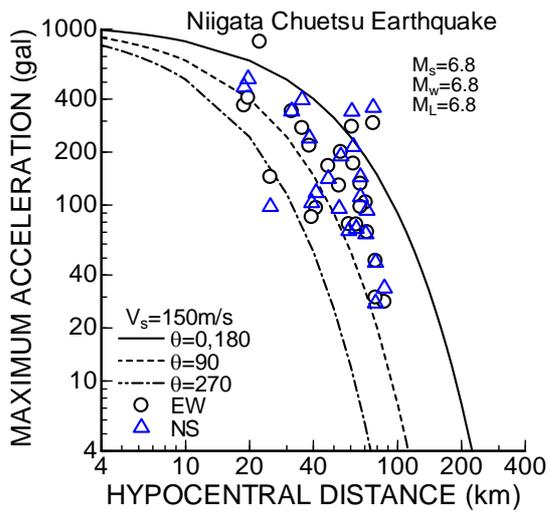


図-8：震源距離と最大加速度の関係（走行の変化）

次に先に紹介した2004年新潟県中越地震に適應した最大加速度と最大速度のコンター図を図-9、図-10に示す。図-8を図-4に示した実際の分布と比較した場合、その形と規模が非常に類似していると言える。

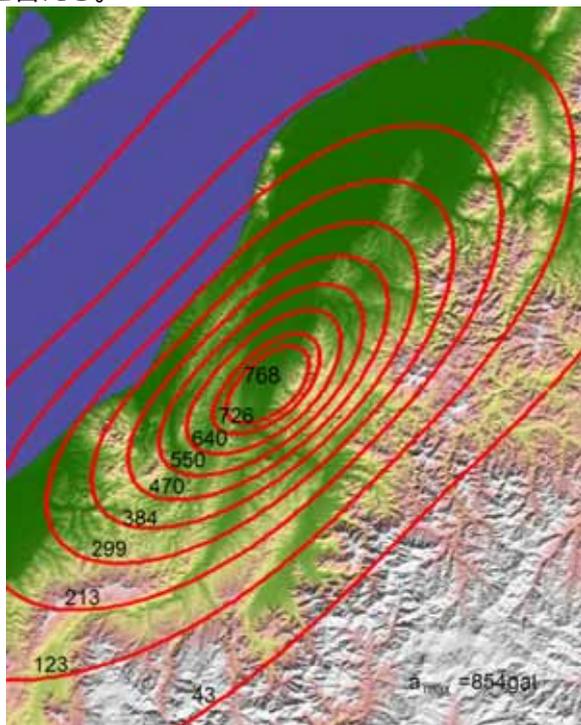


図-9：2004年新潟県中越地震における最大加速度コンター図

5. 強震記録より地表面の永久変位の推定

一般的に、位置・変位を一階微分すると速度になり、速度を一階微分する、つまり位置・変位を2階微分すると加速度を求めることができることはよく知られていることである。逆に加速度を1階積分すると速度が求められ、2階積分すると位置・変位が求められることも一般的によく言われている

ことである。ここで、記録される強震記録より地表面の永久変位を求められるかどうかを検証する。

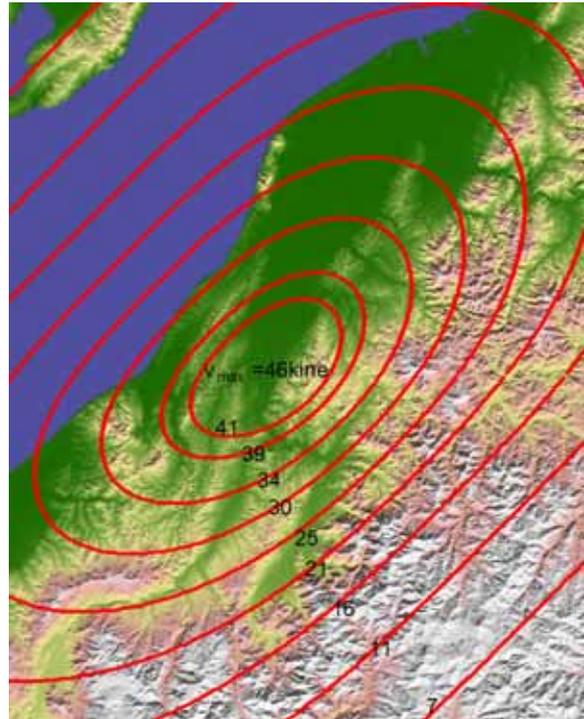


図-10：2004年新潟県中越地震における最大速度コンター図

直接に加速度を数値積分すると速度・変位を求めることは可能である。しかし、電子記録に存在するバックグラウンドノイズによって速度・変位のグラフが右肩上がりの応答を示している。数値積分より求められた速度・変位の応答には残留速度・残留変位が見られ、加速度が減衰しているのに対して応答が継続されているような応答を示している。このような応答を示す要因としては、バックグラウンドノイズに影響を受ける積分定数がある原因だと考えられる。加速度記録より積分されて得られる速度および変位応答においてバックグラウンドノイズの影響を計算過程から省きながら計算するEPS法と呼んでいる手法を導入した（詳細は太田(2006)を参照）。この手法で、数値積分する際、加速度記録の値はある一定の値（EPS）以下のものを計算から省くような計算過程を追加している。

室内で行った断層試験結果に適用したEPS法より得られた計算結果を図-11に示す。図中の青のラインが実験より計測された変位応答、黒のラインは前述したEPSを考慮した計算結果、赤のラインは変位応答が最終的には変位が0に収束すると仮定して計算した結果となっている。EPSを考慮した計算結果と実験結果では数ミリの誤差が見られるが波形の形状は非常に類似したものであるといえる。変位応答が最終的には0に収束すると仮定して数値積分を行った計算結果は最大変位が実験結果およびEPSを考慮した計算結果の半分程度しか見られない。

また、運動が発生していない時間帯であっても応答が見られるためこの考え方は有用でないといえる。

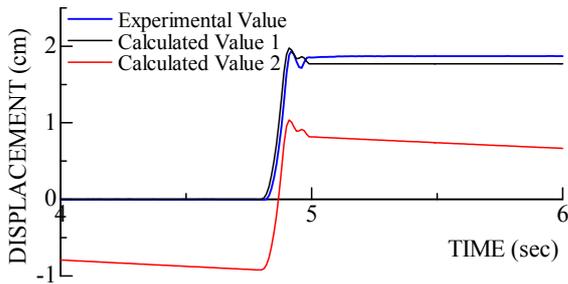


図-11：EPS法を用いた計算結果の比較

次にEPS法を実際の地震記録に適用し、地表面の永久変位を求めることにした。対象とする地震としては2005年のパキスタン地震である。震源近傍での加速度記録は計測されていないため震源から48km 離れている Abbotabad の記録を用いて Muzaffarabad や Balakot で発生した土質斜面崩壊を起こす加速度を求めた。得られた加速度記録にEPS法を適用して震源近傍の速度と永久変位を求め、その結果を図-12に示す。得られた最大速度と永久変位は他の手法(Aydan et al. 2006)で求めたものとほぼ同様である。

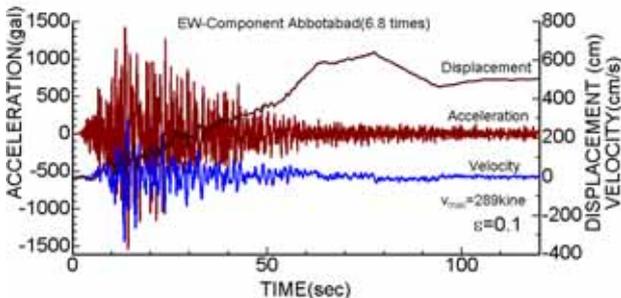


図-12：Muzaffarabad市における推定した加速度・速度・変位結果

6 結論

本論文で得られた結論について、以下に述べる。地震断層の近傍で計測された強震記録に類似し、動く方の加速度記録の波形は対称でない。破壊に伴う加速度の振幅は、軟質な岩石の破壊時に比べて硬質な岩石の破壊時の方が大きくなる。これは、破壊前の蓄えていたエネルギーに直接的に関係し

ていると思われる。

地震断層近傍における地震動および永久変形に関する実験より断層亀裂は複数であり、下盤よりも上盤に数多く発生する。また、伝達の幅は断層変位量に依存して変化する。運動する側の地盤が動かない側の地盤に対して破断・変形した領域が大きい。最大加速度の値は断層変位量に依存し、その値は下盤よりも上盤で大きく観測される。

地表面近傍の地盤速度特性や断層の幾何学形状と破壊特性を考慮して地表面最大加速度および最大速度に対して減衰式を提案し、適用性を検証した。最大加速度と最大速度の距離の関数として減衰は実際の分布と比較した場合、その形と規模が非常に類似している。

加速度記録を数値積分し速度・変位を求める場合の問題点の解決について提案したEPS手法を実際の地震加速度応答に適用し、加速度記録から観測点における地盤の変形を推定することができた。室内実験にこの手法を用いた計算結果は非常に実測値に近いもので、加速度から速度・変位を推定する可能性を示すことができた。

参考文献

- Aydan, Ö., 1997: Seismic characteristics of Turkish earthquakes. *Turkish Earthquake Foundation, TDV/TR 97-007*, 41 pages.
- Aydan, Ö. and Z. Hasegür 1997: Acceleration characteristics of Turkish earthquakes. The 4th National earthquake Engineering Conference, 30-37.
- Aydan, Ö., Kumsar, H. and Ulusay, R.(2001): How to infer the possible mechanism and characteristics of earthquakes from the stations and ground surface traces of existing faults. *Seismic Fault Induced Failures*, January, 2001, Japan, pp 153-162.
- Aydan, Ö., Hamada, M. and Konagai, K.(2006): An evaluation of strong ground motions and failures of natural and cut slopes induced by Kashmir earthquake of October 8, 2005. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Geneva, Switzerland, Paper Number:1352(in press)
- (独)防災科学研究所ホームページ (K-NET;KIK-NET) : <http://www.bosai.go.jp/>
- 太田良巴：地震断層の運動に伴う地震動および地表面変形に関する基礎的研究．東海大学大学院海洋学研究科．平成 17 年度修士論文、133pp .

THE CHARACTERISTICS OF STRONG GROUND MOTIONS IN THE NEIGHBOURHOOD OF EARTHQUAKE FAULTS AND THEIR EVALUATION

Ömer AYDAN¹ Yoshimi OHTA²

¹Department of Marine Civil Engineering, Tokai University, Shizuoka

²Nippon Geophysical Prospecting Company, Tokyo

It is well known that the shaking characteristics and the possibility of surface fault breaks depend upon the earthquake types. Experiments on fracturing of rocks and faulting have some similar characteristics and the maximum accelerations are always higher on the moving side or hanging wall side of the fault. The experimental observations confirm the physical foundation ground accelerations are higher on the hanging wall than those on the footwall side of the faults during earthquakes. A unified empirical relation for estimating maximum ground accelerations and velocities is proposed. This empirical relation estimates maximum ground motions using shear wave velocity of ground, earthquake magnitude and orientation from fault strike and distance from the hypocenter. The coefficients of the function for maximum ground acceleration and velocity varies while the same functional form is used. It is applied to ground motions observed in 2004 Chuetsu earthquake. The EPS method used for inferring the permanent ground deformations resulting from the earthquakes is experimentally validated in laboratory tests and this method yielded the maximum ground acceleration; velocity and displacement should be 1280gal, 289kine and 500cm in the epicentral area of 2005 Kashmir earthquake, respectively. These results also agree with the previously inferred results using different techniques.