

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760346

研究課題名（和文） 断層極近傍の塑性化に伴う特徴的な地震動の生成メカニズムの分析

研究課題名（英文） Generation mechanism of ground motion due to off-fault plasticity

研究代表者

後藤 浩之（GOTO HIROYUKI）

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：70452323

研究成果の概要（和文）：地震断層を伴うような地表断層地震と、地表断層を伴わない潜在断層地震では、同じ規模の地震の場合に潜在断層地震の方が強い地震動を生成する。本研究では、震源深さと地殻の地震発生層の下部深さの関係に着目し、潜在断層地震で強い地震動が生成される力学的な背景を明らかにした。潜在断層地震の場合にはパルス状の破壊、すなわち同じ地震規模でも短時間にエネルギーの集中した地震動を発生させる傾向にあることを、数値実験により示した。

研究成果の概要（英文）：Ground motion generated by buried rupture earthquake is empirically larger than that generated by surface rupture earthquakes. I focus on a relation between a hypocenter depth and bottom depth of seismogenic zone in a crust, and perform physics-based rupture simulations numerically. For the buried rupture earthquake, pulse-like rupture becomes major. That causes seismic radiation energy be compact in time.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

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：地震工学，防災，地震，シミュレーション工学

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震のように、内陸地殻内で発生する地震は地震工学において無視することのできない重要な地震である。内陸地殻内地震は、地表断層を伴う地表断層地震と、地表断層を伴わずに地下でのみ断層運動が生じる潜在断層地震とに分類することができ、一般の印象は地表断層地震の方が危険であるというものである。ところが、既往の研究（Somerville, 2003）によると、同じマグニチュードの地震で工学的に重要である

0.3-3秒の周期帯域に着目すると、潜在断層地震の方が強い地震動を生成することが知られている。この事実は、一般の印象と相反することであるため、この力学的な背景を理解することは、工学的に重要である。

Kagawa et al. (2004), Dalguer et al. (2008), Pitarka et al. (2009)は、潜在断層地震と地表断層地震の震源過程および生成される地震動の違いを、応力降下量の分布の違いとしてそれぞれ特徴付けてモデル化し、説明した。すなわち、潜在断層地震と地表断層地震が与え

られた応力状態や摩擦状態などあらかじめ系によって定まるものであるという立場を取っている。これは、シナリオを定める立場として工学的には許容できるが、自然現象としてその立場を許容できるかは、議論の余地があると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、断層極近傍に生じるとされる塑性域の影響を考慮した数値実験を行うことで、力学的に潜在断層地震と地表断層地震の生成メカニズムそのものの違いを定性的に説明することが目的である。破壊の先端である破壊フロントでは、断層面上に応力集中が生じると共に、破壊面の外側の媒質において塑性化する現象がある (Templeton and Rice, 2008 など)。岩の塑性現象は拘束圧に依存することから、深さ方向の拘束圧依存性によってもたらされる塑性現象の違いによって、潜在断層地震と地表断層地震を特徴付けることができないか、と考えた。

後述するように、結果として塑性現象そのものは両地震を特徴付ける主要な原因ではないことが明らかとなったが、塑性化による破壊伝播速度の減少が間接的に影響することとなる。

3. 研究の方法

研究は数値実験によって実施した。有限要素法をベースとして近年開発された拡張有限要素法 (X-FEM: Belytschko and Black, 1999, Moes et al., 1999) を採用する。X-FEM は、要素内で変位の不連続を許容するために不連続なエンリッチ関数を変位の近似関数に加えることが特徴である。これにより、要素レイアウトとは独立に自由に不連続面である断層を配置できる (図1)。

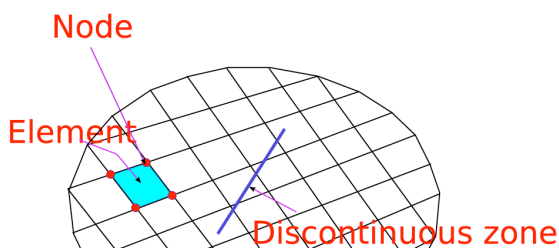


図1 X-FEM の概念図

X-FEM は準静的な破壊の進展問題に積極的に適用されてきたが、断層破壊のような高速破壊であり、摩擦則で変位—応力関係が規定される問題への適用例は少ない。このため、まずは X-FEM の断層破壊問題への適用性をあらかじめ確認した (和田・後藤, 2010)。

4. 研究成果

解析対象は、図2に示すように地殻構造を模した2層系にある傾斜角 45° の逆断層とする。一般の震源に相当する破壊核形成領域は断層に沿って 3km 幅であるとし、その深さは震源深さとして解析上のパラメータであるとする。テクトニックな応力場は、逆断層地震をもたらす応力場として水平方向に最小主応力が発生するように定める。この応力場と断層傾斜角から初期せん断応力が一意に定まり、これを断層面上の初期応力状態とする。

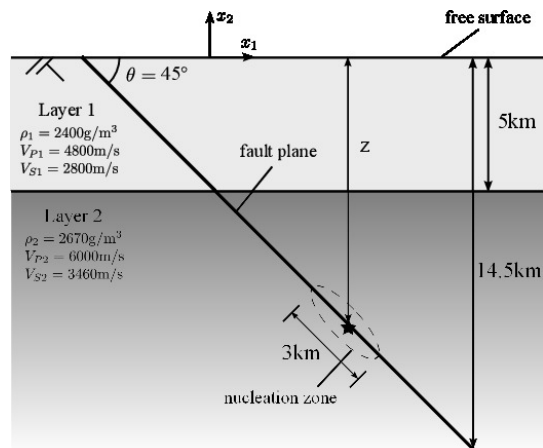


図2 解析対象とする構造と断層モデル

まず、予備検討として Layer2 の応力降下量が深さ依存する場合と一定の場合とで比較した。計算されたすべり量の深さ分布を確認すると、すべり量が最大となる領域と震源深さの位置関係に違いが見られ、応力降下量が深さ依存する場合は震源より深い領域にすべり量の大きな領域が位置し、応力降下量が一定の場合は震源とほぼ等しいかやや浅い領域にすべり量の大きな領域が位置する。過去の地震の分析から、内陸地殻内の逆断層地震において、すべりのおおきな領域が震源の下部に位置する例はみられず、震源とほぼ同じ深さか、震源より浅い領域に位置することが知られているため、応力降下量は一定である方が適切であるとの結論を得た。

この条件下で、地殻浅部 (Layer1) の材料の内部摩擦角を変化させた2ケースについて解析を実施して比較した。1ケースは、材料の内部摩擦角が断層面の摩擦角に等しい場合であり、もう1ケースは材料の内部摩擦角を断層面の摩擦角よりも低く設定したものである。断層面が弱面であるという観点から見れば、明らかに後者は現実的ではない設定であるが、これは断層の破壊エネルギーを媒質の塑性化に強制的に誘導するために設定した人為的なものである。

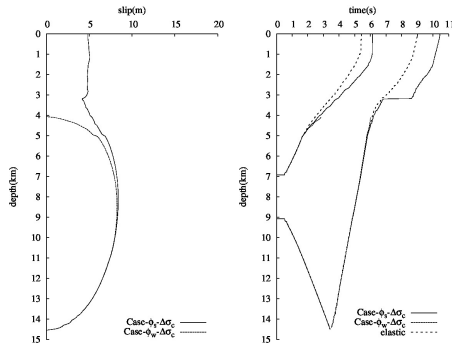


図3 地殻浅部 (Layer1) の内部摩擦角を変えた2ケースの比較 (左: 最終すべり量分布, 右: 破壊・停止フロントの伝播)

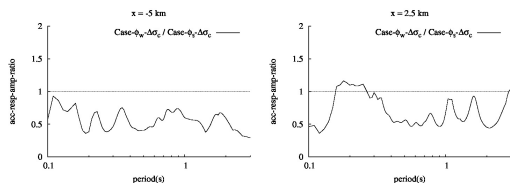


図4 加速度応答スペクトルの比 (潜在断層地震/地表断層地震)

図3は、両ケースの最終すべり量分布と破壊フロント・停止フロントの伝播の様子を描いたものである。内部摩擦角を低く設定したケースでは、すべり量が地表に至っておらず、潜在断層地震を実現できている。一方、内部摩擦角を断層面の摩擦角と等しくしたケースでは地表ですべり量が発生しているため、地表断層地震となっている。それぞれのケースで生成される地震動について、加速度応答スペクトルの比を計算して図4に示している。この比が1を超えるならば、潜在断層地震の方が強い地震動を励起することになり、Somerville(2003)の指摘と合致する。しかし、両地点において、おおむねスペクトル比は1を下回っており、現実の潜在断層地震/地表断層地震の地震動の特徴と合致しているとは言いがたい。すなわち、地殻浅部が塑性化することで潜在断層が生じるメカニズムは、実際の現象であるとは考えにくい。

そこで、過去の地震における地表断層地震と潜在断層地震に共通する特徴的な違いを調べると、潜在断層地震は系統的に地表断層地震より震源深さが深いことが明らかとなった。すなわち、震源断層深さを変化させることによって生成される断層破壊パターンと地震動の特徴を比較することによって、再度検討を進める。地殻浅部の内部摩擦角は断層面の摩擦角と等しいと仮定し、震源深さを8kmと12kmの2つのケースで比較を行った。

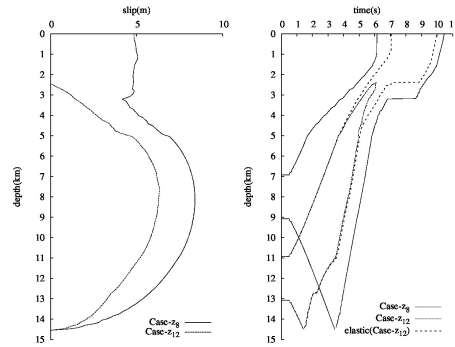


図5 震源深さを変えた2ケースの比較 (左: 最終すべり量分布, 右: 破壊・停止フロントの伝播)

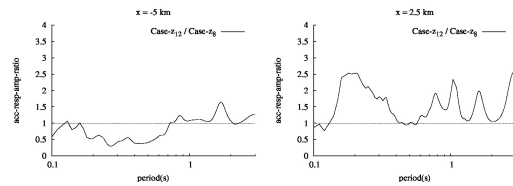


図6 加速度応答スペクトルの比 (潜在断層地震/地表断層地震)

図5は両ケースの最終すべり量分布と破壊フロント・停止フロントの伝播の様子を描いたものである。すべり分布から、震源深さが浅い場合には地表断層地震となるが、震源が深い場合には潜在断層地震となることが認められる。図3と比べて特徴的なのは右図の破壊・停止フロントの様子である。先のケース(図3)では、停止フロントが到達する前に破壊フロントが停止しているのに対し、本ケースでは下部からの停止フロントが破壊フロントと交わることによって破壊が停止していることがわかる。図6には、先のケースと同様に加速度応答スペクトルの比を示している。右に示す上盤側の観測点ではおおむね全ての周期帯域で比が1を上回っており、潜在断層地震の方が強い地震動を生成しているという特徴を表現している。一方、下盤側の左図は図4に比べて1に近づいているものの、まだやや1を下回っているようである。いずれにしても、潜在断層地震の方がすべり量で規定されるマグニチュードが小さいにも関わらず、地震動レベルが同等かそれ以上であることが示された。

下盤側のスペクトル比が1を下回るということは、地表断層地震の地震動がやや過大に評価されている可能性がある。先のケースでは、地表面まで最大静止摩擦角と動摩擦係数の差が一定であると仮定していたが、地表に近づくにつれて実際には断層面での摩擦条件と媒質の塑性化とに顕著な差が見られなくなると考えられる。塑性モデルには弱化を示さないモデルを使用していることから、これと同様に、摩擦係数も徐々に弱化を呈さ

ないように線形に変化させる方が適切であると考えられる。すなわち、動摩擦係数が地表に近づくにつれて最大静止摩擦係数に漸近するような深さ分布をしていると仮定する。この時、有効拘束圧も深さ分布しているため、その積で表される応力降下量は2次曲線となり、このため負の応力降下量が自然に誘導される。

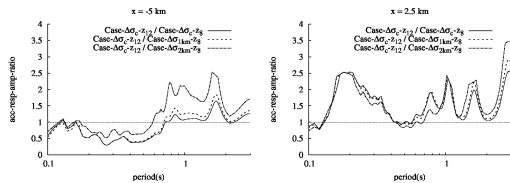


図7 加速度応答スペクトルの比
(潜在断層地震/地表断層地震)

図7は、上で述べた浅部での摩擦条件を反映したモデルで計算した加速度応答スペクトルの比である。動摩擦係数を増加させる遷移点を深くするにつれて、左図に示す下盤側のスペクトル比が1を上回る傾向を示すようになる。すなわち、潜在断層地震のメカニズムは変えずに、浅部の摩擦モデルをより現実に即したものにすることで、スペクトル比がより強調される結果となる。

以上の議論により、震源過程や地震動の特徴を反映し、かつ力学的背景をもつような潜在断層地震と地表断層地震の違いを特徴付けることができる。主たる要因は、震源の深さである。潜在断層となる地震は、破壊の進展が、断層端などの拘束により抑制されるために生じるものと考えの方が適切で、破壊エネルギーが周囲の媒質の塑性化によるエネルギー吸収によって破壊の進展が抑制されると考えると現実と矛盾する。

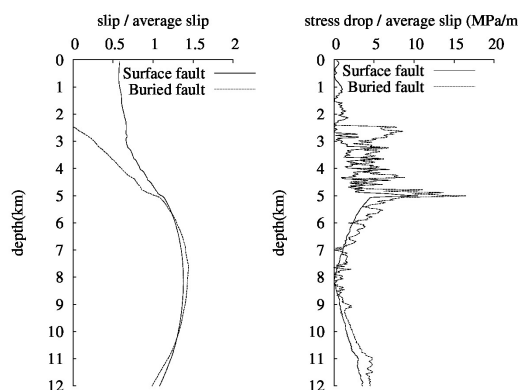


図8 正規化したすべり量分布と
運動学的な応力降下量分布

本研究で得られたすべり分布から運動学的な意味での応力降下量(すべり量の空間微

分)を計算し(図8)、Kagawa et al.(2004)で特徴付けられている潜在断層地震と地表断層地震の応力降下量分布と比較すると、非常によく対応を示す。Kagawa et al.(2004)のモデルでは、地表断層地震において5kmより浅い領域に小さな応力降下量をもつすべりの大きな領域が存在する。図8に見られるように、地表断層地震では浅部ですべりが発生しているにもかかわらず、その運動学的な応力降下量は非常に小さな値を示している。これはKagawa et al.(2004)のモデルと調和的である。

すなわち、既往の研究と矛盾しない震源過程でありながら、本研究のモデルは力学的な背景を持たせることに成功している。また、従来のモデルは応力降下量の違いによって潜在断層地震と地表断層地震を特徴付けているが、本研究では主たる要因は震源深さであって、運動学的な意味での応力降下量はその結果として生ずるものである。さらに興味深い点は、同じ媒質モデル、応力場、摩擦パラメータでありながらも震源深さの違いだけで潜在断層地震と地表断層地震を表現できている。このことは、同じ断層でありながらも、破壊がどの深さで始まるかによって地表断層地震になったり潜在断層地震になったりすることができる、ということを示している。

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7件)

- 1) 奥村与志弘, 後藤浩之, 海溝型地震の分岐断層破壊シナリオで発生する津波の特徴に関する一考察, 土木学会論文集 A1 (地震工学論文集), 査読有, 印刷中.
- 2) Hiroyuki Goto, Yojiro Yamamoto and Saeko Kita, Dynamic rupture simulation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake: multi-event generation within dozens of seconds, Earth, Planets and Space, 査読有, Vol.64, No.12, pp.1167-1175, 2012. DOI:10.5047/eps.2012.06.002
- 3) Kazunori Wada and Hiroyuki Goto, Generation mechanism of surface and buried faults: Effect of plasticity in a shallow crust structure, Bull. Seism. Soc. Am., 査読有, Vol.102, No.4, pp.1712-1728, 2012. DOI:10.1785/0120110212
- 4) 後藤浩之, 佐藤芳樹, 澤田純男, 高橋良和, BE-FE 融合要素を用いた微小空隙を含む2次元媒質の静弾性解析, 土木学会論文集 A2, Vol.67, No.2 (応用力学論文集 Vol.14), 査読有, I_153-159, 2011. DOI:10.2208/jscejam.67.I_153

- 5) Hiroyuki Goto, Leonardo Ramirez-Guzman and Jacobo Bielak, Simulation of spontaneous rupture based on a combined boundary integral equation method and finite element method approach: SH and P-SV cases, *Geophys. J. Int.*, 査読有, Vol.183, No.2, pp.975-1004, 2010.
DOI:10.1111/j.1365-246X.2010.04772.x
 - 6) 和田一範, 後藤浩之, 拡張有限要素法 (X-FEM) を用いた自発的な断層破壊の数値解析手法の開発, 応用力学論文集, 査読有, Vol.13, pp.667-674, 2010.
 - 7) Hiroyuki Goto and Sumio Sawada: Trade-offs among dynamic parameters inferred from results of dynamic source inversion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 査読有, Vol.100, pp.910-922, 2010.
DOI:10.1785/0120080250
- [学会発表] (計 10 件)
- 1) 後藤浩之, 海溝型地震の分岐断層破壊シナリオで発生する津波の特徴に関する一考察, 土木学会地震工学研究発表会, 2012 年 10 月 26 日, 東京大学 (東京).
 - 2) 後藤浩之, 海溝型地震の分岐断層破壊シナリオで発生する津波の特徴, 日本地震学会 2012 年秋季大会, 2012 年 10 月 18 日, 函館市民会館 (函館市).
 - 3) Kazunori Wada, Hiroyuki Goto, Generation mechanism of surface and buried faults: Effect of plasticity in a shallow crust structure, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012 年 9 月 25 日, ポルトガル・リスボン.
 - 4) Hiroyuki Goto, Generation mechanism of surface and buried faults considering the effect of plasticity in a shallow crust structure, 2011 AGU Fall Meeting, 2011 年 12 月 8 日, Moscone Convention Center, San Francisco, アメリカ・サンフランシスコ.
 - 5) 和田一範, 後藤浩之, 浅部地殻での塑性化を考慮した地表断層と潜在断層の生成メカニズム, 日本地震学会 2011 年度秋期大会, 2011 年 10 月 12 日, 静岡県コンベンションアーツセンター・グランシップ (静岡市).
 - 6) 和田一範, 後藤浩之, 浅部地殻での塑性化を考慮した地表断層と潜在断層の生成メカニズム, 土木学会平成 23 年度全国大会第 66 回年次学術講演会, 2011 年 9 月 7 日, 愛媛大学 (松山市).
 - 7) Hiroyuki Goto, Trade-offs among dynamic parameters inferred from 2D dynamic source inversion results, 2010 AGU Fall Meeting (招待講演), 2010 年 12 月 16 日, Moscone Convention Center, San Francisco, アメリカ.
 - 8) 和田一範, 後藤浩之, 拡張有限要素法 (X-FEM) を用いた弾塑性媒質中の自発的な断層破壊の解析, 日本地震学会 2010 年秋季大会, 2010 年 10 月 29 日, 広島国際会議場 (広島市).
 - 9) Hiroyuki Goto, Hybrid multidomain finite element and boundary element method for dynamic rupture in heterogeneous media, Workshop Earthquake Source Dynamics, 2010 年 6 月 30 日, Smolenice Castle, スロバキア.
 - 10) Hiroyuki Goto, Simulation of spontaneous rupture based on a combined boundary integral equation method and finite element method approach, Workshop Earthquake Source Dynamics, 2010 年 6 月 29 日, Smolenice Castle, スロバキア.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
後藤 浩之 (GOTO HIROYUKI)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号: 70452323