

機関番号：12401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560439

研究課題名（和文）断層変位による構造物被害の軽減方法に関する研究

研究課題名（英文）study on mitigation of damage to structures due to earthquake faults

研究代表者

谷山 尚 (TANIYAMA HISASHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：80236710

研究成果の概要（和文）：地下の岩盤で断層が動いた際に、表層地盤内を断層のすべりがどのように進展するかについて検討した。数値解析により、表層地盤内に形成される種々のすべり面の3次元形状を示すとともに、地盤内部に作用する力や地盤粒子構造との関連からすべりの進展過程や進展メカニズムの解明を進めた。野島断層を対象とした解析と、実際に計測された値がある程度一致する結果を得た。また、粒径の大きな地盤材料を使うことで、構造物被害を軽減できる可能性があることを示した。

研究成果の概要（英文）：Propagation of fault displacement through subsurface layer due to basement-fault movement was examined. 3D morphology of shear bands was shown by numerical analysis. The process and the mechanism of the development of shear bands were analyzed in terms of stress inside the subsurface layer and the soil particle structure. The numerical simulation result of Nojima fault showed resemblance to the results of observations. It was shown that there is a possibility that the damage to structures due to fault displacement is mitigated by using materials of large grain size.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：地震工学

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：減災、耐震、地震

1. 研究開始当初の背景

内陸の浅いところで地震が起きると、断層のすべりが地表に現れることによって構造物が被害を受けることがある。表層が未固結の堆積物で覆われている場合には、断層が表層地盤底部から地表へと進展する過程で、地盤の連続的な変形によってすべりの一部または全部が吸収される。断層のすべりによる構造物被害を軽減することが望まれるが、表

層が堆積層で覆われている都市部においては特に、表層地盤による影響を考慮する必要がある。

どの程度の基盤変位量によってすべりが表層地盤内を進展して地表に達するかについて、実験・数値解析による研究がなされてきており、ある程度明らかになっていた。また、断層変位による構造物の被害についても実験・数値解析によって検討されつつあった。

断層付近に構造物を造らなければ被害を受けずに済むが、ライフライン施設のように断層を跨がざるを得ないものもあり、また、断層の位置が正確に分からない場合に広い範囲に渡って建設を制限するのは特に都市部においては非現実的である。

一方、変位を吸収しやすい地盤材料を利用することで断層変位を小さくしたり、変形を広範囲に分散させることで構造物の被害を軽減できる可能性がある。また、変形しやすい材料と変形しにくい材料を組み合わせることで、変形や断層変位を特定の場所に集中させることができれば、構造物は被害を免れたり、被害を受けても事後の対策を容易にすることができると思われる。このような観点からの研究はほとんどされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、様々な地盤材料の内部を断層のすべりが進展するプロセスを解明し、断層変位による構造物被害を、地盤や構造物に対策を施すことで軽減可能かどうか明らかにすることを目的として行った。具体的には以下の3点について解明することを目的とした。

(1) 表層地盤内部をどのように基盤の断層変位は伝播していくか、その進展過程とメカニズムを解明する。特に横ずれ断層の場合には、形成されるすべり面(せん断帯)が3次元的に屈曲した構造を持つ上、基盤の断層変位が増すとともに新たなすべり面が形成されるため、進展プロセスは非常に複雑である。本研究では、特に横ずれ断層を対象として、3次元個別要素法によって、

①模型実験のシミュレーション

②実際に観察された地震断層のシミュレーション

を行い、せん断帯の形成過程やメカニズムを明らかにするとともに、実験や実際に観察された断層との整合性について調べる。

(2) 様々な地盤材料が開発されており、地盤材料によって断層変位の進展にも影響が現れると考えられる。地盤の材料特性、特に本研究では地盤材料の粒径によってすべりの伝播にどのような影響を与えるか明らかにする。

(3) 想定しているサイトでどの程度の断層変位あるいは地盤のひずみが生じるかの予測へ結びつけることを目指して、観測された地震記録から震源の断層の動きを求めて、基盤上でどのように変位するかについて明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 基盤の横ずれ断層運動に伴って表層地

盤内部に形成されるすべり面の解析については、3次元個別要素法を用いて行った。

①模型実験のシミュレーション

砂箱を用いた模型実験によって表層地盤内部に形成されるせん断帯について調べられてきている。模型実験をシミュレートするために、88万個あまりの球形粒子を用いて模型地盤を作った。粒子径は3mm、4mmまたは5mmとし、相互に接触しないように粒子を発生させた後、重力をかけてパッキングした。パッキングの際摩擦係数を0として密に詰まるようにした。底面と側壁には変位を拘束した粒径3mmの粒子を並べた。地盤の大きさは、走向(x)方向57.6cm、断層直交水平(y)方向35.1cm、平均高さ(z)21.5cmとなっている。走向(x)方向には周期境界条件を課した。底面をy方向に2つに分け、底面の片側は固定し、もう一方の底面と側壁をx方向に動かすことで、地盤に左横ずれ変位を加えた。底面は基盤の断層に対応する。速度2.5cm/sで変位させ、基盤変位10cmまで解析を行った。

②地震断層(野島断層)のシミュレーション

1995年兵庫県南部地震の際には、淡路島北西部において顕著な地震断層が発生した。この地震断層は多くの研究者によって調べられている。野島地震断層を対象とした解析を行うために、直径9cmから12cmの球形粒子をランダムに発生させ、それらの粒子を10.9m×34.6mの領域に堆積させて、地盤を作成した。野島断層上の未固結被覆層の厚さは、場所によって異なるが、4mから10m程度と見積もられており、230万個あまりの粒子を用いて厚さ約4.9mの地盤を作った。地盤底面と側面には変位を拘束した粒子を配し、それらの粒子を断層位置(底面中央部)で2つに分け、断層走向方向に相対速度1m/s(断層面より一方を0.5m/s、もう一方を逆向きに0.5m/s)で動かすことで、模型地盤に右横ずれ変位を加えた。断層走向方向には周期境界条件を課した。

(2) 地盤材料の粒径の影響

地盤の一部に粒径の大きな地盤材料を用いることで断層変位の進展にどのような影響を及ぼすかについて3次元個別要素法を用いた解析によって調べた。71万個の球形粒子(粒径2.5mm、3.1mm、3.7mm、5.0mm、平均粒径3.0mm)を用いた、走向(x)方向40.4cm、断層直交水平(y)方向33.6cm、平均高さ(z)13cmの模型地盤モデルと、その一部(地表から深さ6cmまで、走行方向20cm、断層線位置を挟んで幅8cm)を平均粒径4.2mmの粒子で置換した地盤モデルに対して、横ずれ変位を加え、せん断帯の形成過程・形成メカニズムについて調べた。

(3) 震源の断層の動き

2000年鳥取県西部地震を対象とした。震源断層をサブフォルトに分割し、サブフォルト上で単位応力変化が起きた際の観測点での波形を求め、それらの波形の重ね合わせで観測波形を表すことで、観測された波形から断層面上の応力の時間・空間変化を求める。応力の変化量にスムージングの条件を加え、赤池のベイズ型情報量基準 (ABIC) を用いて条件の重みの最適値を求める。

4. 研究成果

(1) 基盤の横ずれ断層運動に伴って表層地盤内部に形成されるすべり面

① 模型実験のシミュレーション

地表面においては、基盤変位量が比較的小さい段階 (4cm から 6cm 程度) では基盤の断層と斜めに交差 (交差角度 15 度程度) するように変形の大きな領域が分布し、基盤変位量が大きくなる (6cm 以上) と断層線に近いところで、断層線と低角度 (7 ~ 8 度) で交差するように変形が起こる結果を得た。x 方向に周期境界条件を課していることから、走向方向の地盤モデル長 57.6cm 間隔で雁行状に変形が集中することになる。

模型実験では、基盤の横ずれ変位の増加と共に、基盤断層と斜めに交差するリーデルせん断が雁行状に形成され、その後、隣接するリーデルせん断の間に P せん断や低角リーデルせん断などの 2 次的なせん断帯が形成されることが示されている。本解析において横ずれ断層で典型的なリーデルせん断や 2 次的な低角リーデルせん断の形成が再現された。

地盤内部においては、歪みの大きな領域は、変形の初期段階では地盤底部の断層線付近から断層の両側で斜め上方へ広がるように伸びているが (図 1)、断層の変位が大きくなると、最もひずみが大きな領域は断層を横切る方向に形成されるようになった (図 2)。

砂箱を用いた模型実験において、初期段階では断層線から上方へ広がる花弁状構造を持ったせん断帯 (傾斜帯状せん断帯、覆瓦せん断帯) が形成され、その後、断層を横切る結合振りせん断帯が形成されることが報告されており、これらの地盤内部のせん断帯についても解析で再現された。

せん断帯の形成メカニズムに関して、地盤内部に作用する応力の観点から議論し明らかにした。すなわち、水平面内では単純せん断が支配的であるが、鉛直面内の応力は、変形の初期段階では特に地盤下部でダイラテンシーによる影響が大きく、これらによって断層線から上方へ広がる花弁状構造を持ったせん断帯が形成される。一方、地盤の変形は、深部では基盤断層位置周辺に集中し、浅くなるほど広範囲に変形が及ぶため、深さに

よって走向方向の変位が異なり、このため下部の粒子に上部の粒子が引きずられるような形の応力が作用する。変形が進むと鉛直面内ではこの影響が大きくなり、断層を横切る結合振りせん断帯が形成される。リーデルせん断が形成されると、せん断帯に沿った方向に圧縮を受けるため、リーデルせん断に挟まれた領域でより低角度の 2 次的なせん断帯が形成される。

横ずれ断層によって形成されるせん断帯を地盤内部の応力分布やその変化とあわせて解析で示したのものとしては最初の例である。

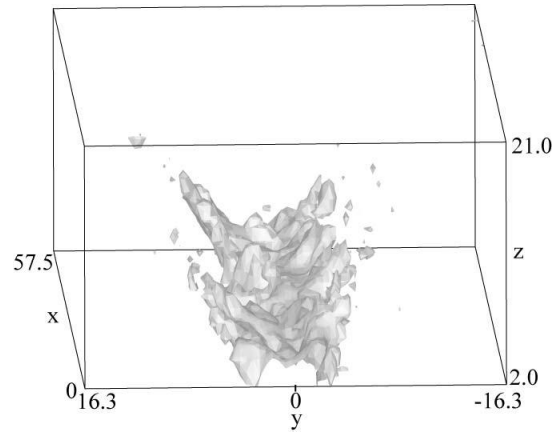


図 1 基盤変位 0.4cm から 1.0cm の間の最大せん断ひずみ増分 ($\Delta \gamma_{\max}$) = 0.07 の分布。

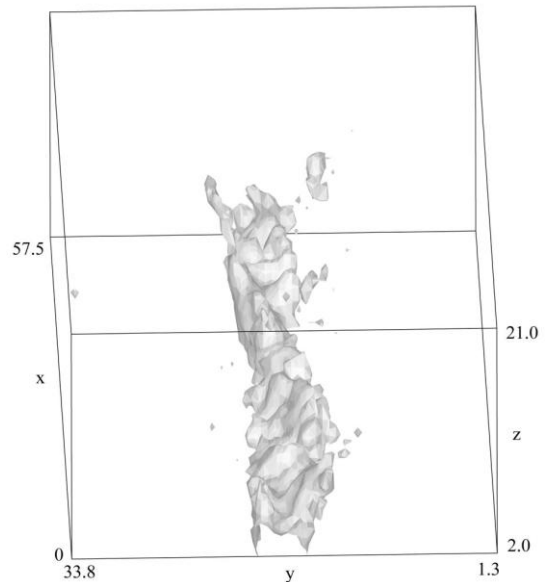


図 2 基盤変位 1.6cm から 2.2cm の間の最大せん断ひずみ増分 ($\Delta \gamma_{\max}$) = 0.11 の分布。

② 地震断層 (野島断層) のシミュレーション

地表面においては、基盤の断層と斜めに交差するように変形の大きな領域が分布した後、基盤変位量が大きくなると断層線に近い

ところで、断層線と低角度で交差するように変形が起こる結果を得た。大変形領域の間隔は、明瞭なところで10m程度、やや不明瞭な領域で5mから8mとなった。基盤の断層線となす角度はリーデルせん断に対応すると考えられる1次的に形成された変形領域では10-15度、低角リーデルせん断に対応すると考えられる2次的な変形領域では6-10度であった。リーデルせん断に関する解析結果は野島断層で計測された中で梨本1の調査結果(未固結被覆:砂層・砂礫層約10m、リーデルせん断の斜交角度7度から14度、間隔8.1mから10.7m)に近い。地盤厚さの近い梨本3(未固結被覆:粘土砂礫層4mから6m、リーデルせん断の斜交角度22度から35度、間隔4.2mから5.1m)とは異なった結果となった。2次的なせん断帯の斜交角度については、里地区(7度から16度)や梨本3(-4度から12度)と整合性がよく、また、そのほかのほとんどの地点のぼらつきの中に収まる値であった。せん断帯の形状などについては、ほぼ同じ地盤の厚さを持つ地点で観察された値とは一致しなかったが、野島断層で観察された値の範囲内におさまる値であった。

地盤内部の応力に関して、リーデルせん断に挟まれた領域、特に変形の大きな地盤下部において、せん断面に沿った粒子の移動により、鉛直面内の応力がより水平方向を向くことがあること、また、微視的には、大きな圧縮力を受ける粒子が圧縮方向に並ぶ柱状構造が形成され、柱状構造が座屈することがせん断帯の形成に関わっていることについても示した。

(2) 地盤材料の粒径の影響

粒径の大きな領域では広範囲に渡る緩やかな変形が起き、粒径が小さな領域では早い段階から変形が集中する結果となった(図3)。

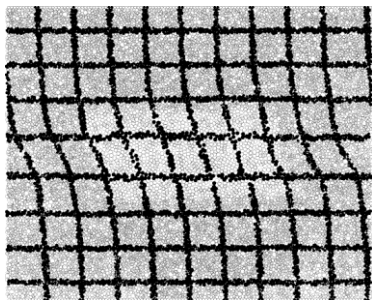


図3 地表面での変形形状。基盤断層変位5cm

粒径が小さい方が断層線を挟んだ狭い領域に走向方向の変形が集中するために、粒径の境界部において、断層線を境に一方で走向方向の圧縮が作用し、もう一方で走向方向の引張が作用することになる。その結果、より破壊基準に達しやすい引張側で断層線と高

角度で交差するせん断帯が形成され、粒径が大きな領域は、そのようにして形成されたせん断帯に両側から挟まれる形になる。さらに断層変位が大きくなると、形成されたせん断帯に沿ったすべりにより粒径の大きな領域に水平方向の圧縮力が作用することになり、その内部においてもせん断帯が形成される。粒径の大きな地盤材料を用いることで、その領域においては、初期段階では、広範囲に渡る緩やかな変形とすることが可能であり、断層変位による被害の軽減法の1つとして有用であるが、断層変位が大きい場合には、水平方向に圧縮されることについても考慮する必要があることを示した。

(3) 震源の断層の動き(2000年鳥取県西部地震)

応力の変化は、断層走向方向に作用している応力の方が顕著であり、特に、断層中央浅部で走向方向に作用している応力が大きく低下している結果が得られた。また震源真下から5km程度南東までの間の深部でも比較的大きな応力降下が起きているが、これらの領域での応力降下は、破壊開始後4sから5sにかけておきており、また、ほぼ単調に応力は低下し、破壊後に大きく応力が回復する様子は見られない結果となった。深さによって系統的に応力降下過程に違いが生じている様子は見られなかった。

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9件)

(1) Hisashi TANIYAMA, Stress change history of the 2000 Tottori-ken-seibu earthquake, Research Report of Department of Civil and Environmental Engineering, 査読無, Vol. 37, 2011, 33-38

(2) Z. Mahmood and K. Iwashita, A simulation study of microstructure evolution inside the shear band in biaxial compression test, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 査読有, 35, 2011, 652-667

(3) Chotesuwan, A., Mutsuyoshi, H., Maki, T. and Koyama, J., Seismic Behavior of Bridge Pier and Foundation after Strengthening, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 32, 2010, 841-846

(4) Mahmood Z., Dhakal S. and Iwashita K., A simulation study of microstructure evolution inside the shear band in biaxial compression test, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 査読有, DOI:

10.1002/nag.917, 2010

(5) 牛山直美、谷山尚、角田史雄, 六甲地塊の強震動とその地震応答解析, 地球科学, 査読有, 63, 2009, 343-354

(6) Chotesuwan, A., Mutsuyoshi, H., Suzuki, Y. and Maki, T., Influence of strengthening of bridge piers on seismic behavior of foundation, Proceedings of the Japan Concrete Institute, 査読有, 31, 2009, 877-882

(7) Z. Mahmood and K. Iwashita, Measurement of particle dynamics in rapid granular shear flows, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 査読有, 135(4), 2009, 285-294

(8) 谷山尚, 横ずれ断層によって表層地盤に形成されるせん断帯-DEMによる解析-, 土木学会論文集C, 査読有, 64, 2008, 485-494

(9) 谷山尚, 2000年鳥取県西部地震の断層面上の応力変化と断層近傍の強震動, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 73, 2008, 1201-1208

[学会発表] (計2件)

(1) 谷山尚, 個別要素法による野島地震断層の解析, 土木学会年次学術講演会, 2009年9月4日, 福岡大学

(2) 谷山尚, Analysis of shear bands formed in sedimentary overburden by strike-slip faults, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 2008年5月27日, 幕張, 幕張メッセ

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷山 尚 (TANIYAMA HISASHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 80236710

(2) 研究分担者

岩下 和義 (IWASHITA KAZUYOSHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 40203377

牧 剛史 (MAKI TAKESHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 60292645

(3) 連携研究者

()

研究者番号: