

横ずれ断層運動に伴うせん断帯発達過程 に関するDEMシミュレーション

竿本英貴¹・吉見雅行¹・国松直¹

¹産業技術総合研究所 活断層研究センター
(〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1)

E-mail: h-saomoto@aist.go.jp, yoshimi.m@aist.go.jp, s.kunimatsu@aist.go.jp

本研究では、横ずれ断層運動に起因して地盤内に生じる三次元的なせん断帯の発達や応力場など、従来行われている模型実験では定量的に把握することが困難である情報を三次元個別要素法を用いて取得することを試みた。結果として、リーデルせん断帯と考えられる一次的せん断帯、これに続く二次的せん断帯の形成までをシミュレートすることに成功し、変位場からせん断帯の三次元的な分布形態を視覚的に明らかにすることができた。同時に、これらのせん断帯が形成された時点での地盤内の応力分布も定量的に把握することができた。

Key Words : Strike Slip Fault, Shear-Band, Discrete Element Simulation

1. はじめに

1999年トルコ・コジャエリ地震、および同年に発生した台湾・集集地震では、断層運動に伴う地表のずれがインフラストラクチャーに大きな被害をもたらした。我が国においても、1891年濃尾地震や1995年兵庫県南部地震などの内陸地震では、断層に伴う地表のずれが数多く確認されている。断層近くの地域では、地震動のみならず、断層運動に伴う表層地盤の変形特性も検討し、設計指針や地域防災に反映させることが必要であり、断層運動に伴う地盤の変形特性を把握するために模型実験が近年広く行われている^{1)~5)}。

本研究では、未固結状態にある表層地盤中をどのようにせん断帯が進展し、どのように地表が変状していくのかという素過程を把握することを目的として、三次元個別要素法⁶⁾を用いて横ずれ断層を対象としたシミュレーションを行い、横ずれによって地盤内に生じるひずみ場および応力場など、実験では得ることが困難である情報の取得を試みた。

2. 横ずれ断層モデルと解析手順

図-1に用いた解析モデルを、表-1に用いた粒子の材料物性をそれぞれ示す。解析モデルは約26万個の等径球形粒子からなっており、サイズはx方向、y方向、z方向にそれぞれ100m、50m、30mである。

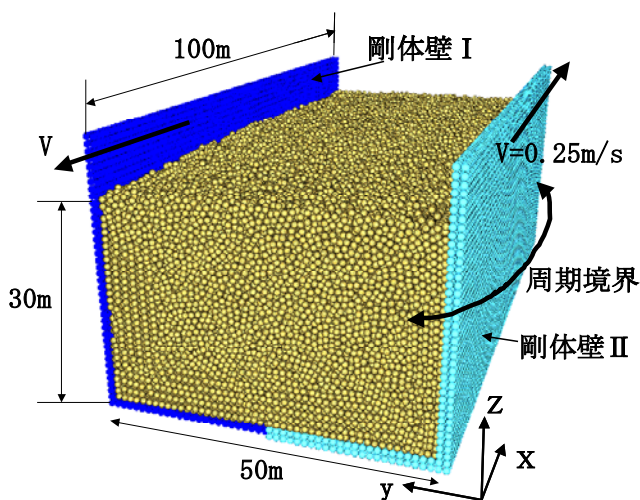


図 - 1 横ずれ断層モデル

表 - 1 粒子の材料物性

密度	2620 kg/m ³
粒子径	0.96 m
法線方向バネ定数	10 MN/m
接線方向バネ定数	2.5 MN/m
減衰定数(法線, 接線方向)	0.30
粒子間摩擦角	26 度

立方格子状に静止させた粒子にランダムな初速を与え、重力によりパッキングを行って作成した。このとき摩擦を無効にして、できる限り密に詰める工夫をしており、初期間隙比は0.40である。また、粒子集合材料としての内部摩擦角は、ピーク強度時で平均的に約32度、残留強度時で平均的に約25度である(付録を参照されたい)。x方向境界については周期境界条件を課しており、紙面奥行方向には半無限となる。y方向境界はx方向のみにスライド可能な剛体壁である。

数値解析はスライド可能な剛体壁 I および II について、x 方向にそれぞれ $\pm 0.25\text{m/s}$ の速度で強制変位を与え、左横ずれを生じさせる。ここでは、時間刻みを 1×10^{-4} 秒とし、40万ステップの計算を行ってそれぞれの剛壁を10mずつ変位させ、相対的に20mのずれを生じるまで計算した。

3. 解析結果と考察

(1) 剛体壁に作用する平均的なせん断応力と地表における変形

剛体壁に与えた強制変位をy方向のモデル長で除した工学ひずみ γ_{yx} を横軸に、剛体壁に作用する平均的なせん断応力 σ_{yx} を縦軸にとってプロットしたものが図-2である。 $\gamma_{yx}=0.08$ で双方の壁に作用するせん断応力はピークを迎え、その後ひずみが大きくなるとともに残留強度に遷移している。ピーク時における地表の変形状態を鳥瞰図として示したものが図-3であるが、地表に描いた正方格子の変形から、地表はほぼ一様にせん断変形していることがわかる。

この直後に、図-3の右上から左下にかけて、リーデルせん断帯と考えられる一次的せん断帯が直線状に一気に形成される。 γ_{yx} が0.20付近までこのせん断帯付近に変形が局所化し、せん断帯が図-4に示すように顕在化する。大まかに読み取った一次的せん断帯の走向(図中の赤線)は、主せん断方向(x軸方向)から約15度の傾きを有しており、Tchalenko⁷⁾の実験で得られている走向と整合的である。

γ_{yx} が0.30付近に至るまでは、x方向の境界付近、y方向中央1/3の領域(図-4の白線で囲んだ領域)では格子はあまりせん断変形せずに少し紙面手前側に盛り上がり、変形はこの領域を避けるように進展する。また、この時点では一次的せん断帯に沿うせん断変形はほとんど見られない。

γ_{yx} が0.30を超えた時点では、上述のせん断変形が促進されない領域の端部付近から、主せん断方向とほぼ平行に二次的なせん断帯が生成されはじめ、一次的せん断帯を放棄して、この二次的せん断帯付近に変形が局所化する。また、二次的せん断帯は壁面に作用する応力の低下を招いている(図-2, $\gamma_{yx}=0.32$)。小山・谷の実験²⁾では、二次的なせん断帯(低角リーデル、Pせん断)はリーデル

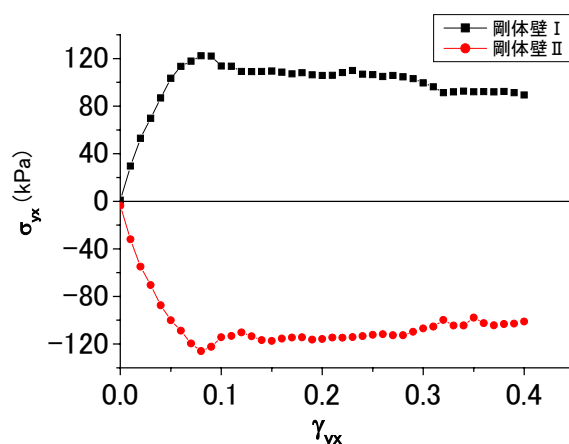


図-2 壁面に作用する平均的なせん断応力

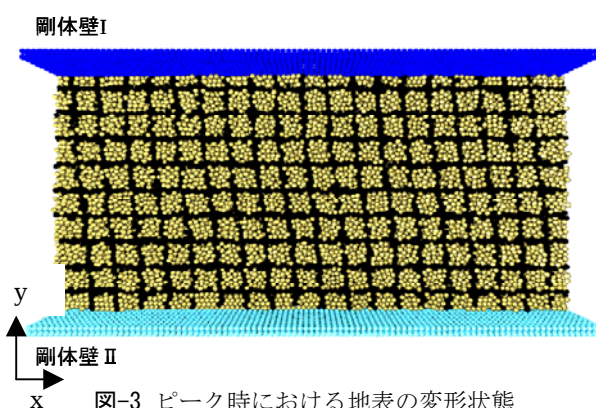


図-3 ピーク時における地表の変形状態

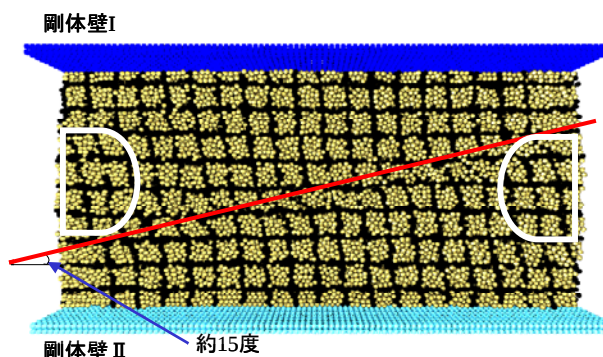


図-4 リーデルせん断帯の卓越 ($\gamma_{yx}=0.20$)

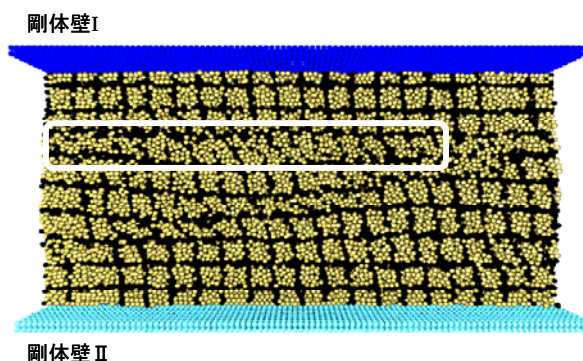


図-5 二次的なせん断帯の卓越 ($\gamma_{yx}=0.40$)

せん断帯が出現する変位量の1.5～2.3倍程度で現れると報告されている。本解析でも、同程度の変位量で二次的なせん断帯が出現していること、および一次的せん断帯と比べて地表面で観察される傾斜センスが僅かに逆であることから、本解析における二次的なせん断帯は小山・谷の実験におけるPせん断帯に相当していると考えられる。図-5は $\gamma_{yx}=0.40$ (本解析での最終状態)での変形状態を示しているが、主せん断方向にほぼ平行なせん断帯(白線で囲んだ領域)が明瞭に見て取れる。

以上、剛体壁に作用している平均的なせん断応力と地表の変形状態を示してきたが、今回用いたモデルでは、地表面の変形は基盤の断層線直上からy方向に±約10m(粒子径の約10倍)の範囲内に収まっている。次にモデル内部に生じるひずみ、および応力について述べる。

(2) モデル内部におけるひずみ分布

モデル内部に変位 $\mathbf{u}$ (参照フレームは初期状態)の評価点を x, y, z の各方向に0.5mずつずらして立方格子状に約110万点設け、各評価点近くに存在する粒子の変位ベクトルの算術平均を評価点にマッピングし、これらの空間勾配を用いて式(1)にしたがってひずみ ε を求めた。ただし、変位の平均は、評価点を中心とする1辺の長さが4mの立方体内で行っている。

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$(i, j = x, y, z)$

まず、リーデルせん断帯と考えられる一次的せん断帯の形態を把握するために、図-2のせん断応力ピーク時($\gamma_{yx}=0.08$)においてひずみ ε_{yx} の絶対値をとり、 z 方向に沿ってxy面内分布を示すこととした。

図-6から図-8は壁面応力ピーク時の、 $z=0, 7, 14$ mの各高さにおけるxy面内のひずみ成分 ε_{yx} の分布を示している。モデル底面(図-6)においては、ほぼ主せん断方向に沿って強いせん断領域が存在している。ところが、底面から7m離れたxy平面内では、面の中心を軸として、プロペラのようにくびれた、強いせん断領域が現れる(図-7)。地表に近づくにつれて、急激なせん断領域の折れ曲がりや平滑化され、せん断領域が直線的に配向する(図-8)。この直線的なせん断領域が、地表で観察された一次的せん断帯へと発達する。

次いで、強いせん断を受ける領域の三次元的な分布形態を把握する。図-9に $|\varepsilon_{yx}|=0.10$ および0.20の等値面を示す。強いせん断領域は x, y, z の各方向について、複雑に変化している様子が見て取れる。ひずみ0.10の等値面は、0.20の等値面を平滑化して全体に膨張させた形状をしており、基盤の断層線と交差するあたりでは、上方に卓越して発達している

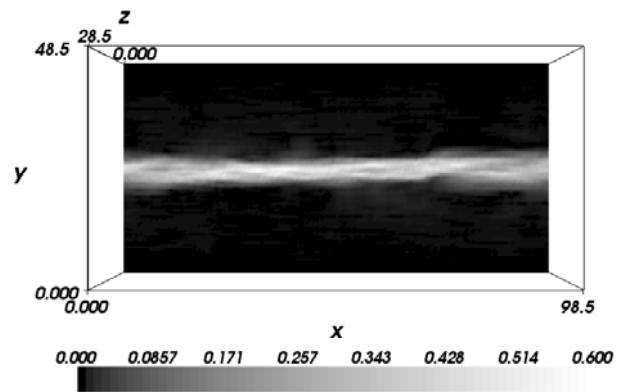


図-6 壁面応力ピーク時 $|\varepsilon_{yx}|$, モデル底面

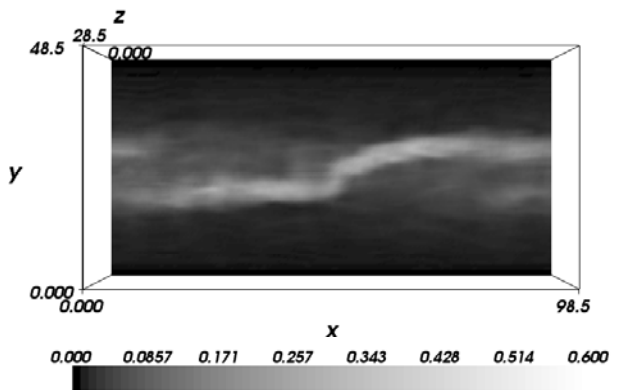


図-7 壁面応力ピーク時 $|\varepsilon_{yx}|$, $z=7$ m

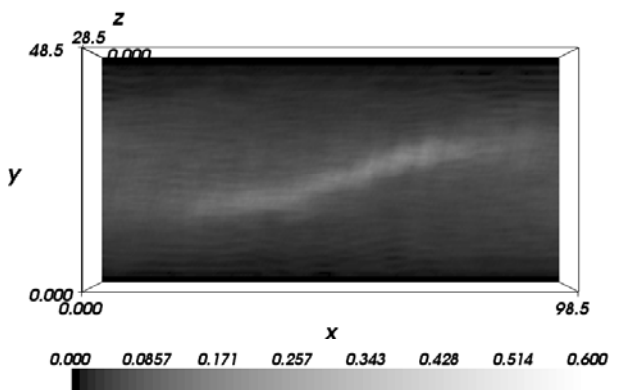


図-8 壁面応力ピーク時 $|\varepsilon_{yx}|$, $z=14$ m

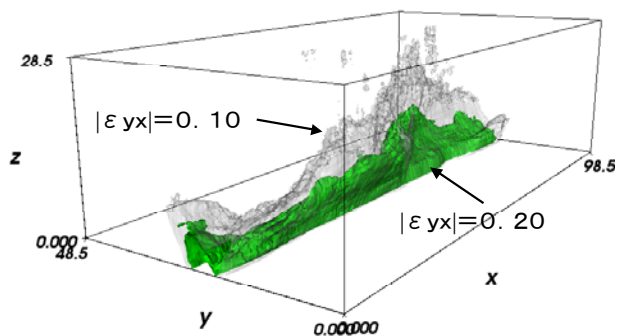


図-9 壁面応力ピーク時 $|\varepsilon_{yx}|=0.10, 0.20$

のが特徴的である(紙面のみで把握しづらい場合は、結論にある[URL](#)を併せて参照されたい)。このような分布形態は、谷・小山の横ずれ断層の模型実験³⁾でX線CTにより観察された「結合振りせん断帯」に対応していると考えられる。

壁面せん断応力がピークを超え、せん断が進むにつれてひずみの分布は図-9で示した等値面が高角度で基盤の断層線から地表に平面的に伸び、深さ方向の捩れは壁面応力ピーク時に比べて弱くなる。最終的には、地表の変形で見られた二次的せん断帯が図-4で示したせん断変形が促進されない領域を、放棄された一次的せん断帯とともに取り囲むように卓越し、図-10のようになる(紙面のみで把握しづらい場合は、結論にある[URL](#)を併せて参照されたい)。また、この等値面はx方向に沿って緩やかに蛇行しながら、z方向について下に凸となる。解析モデル周期長が短いため、モデルのx方向端部で粒子が双方向から直ちに充足され、端部周辺での拘束圧が他の領域に比べて大きくなり、この領域を避けるように二次的せん断帯が生成されたと考えられる。

(3) モデル内部における応力分布

応力 τ はひずみと同様にモデル内部に評価点を設け、評価点を中心とする代表体積Vの内部に存在する全ての粒子について、式(2)を適用することにより求めた。

$$\tau_{ij} = \frac{1}{V} \sum_k F_j^{(k)} B_i^{(k)} \quad (2)$$

($i, j = x, y, z$)

ここで、 k は粒子の接触点を、 F は接触力を、 B は粒子中心間を結ぶベクトルをそれぞれ表している。また、代表体積要素として、ひずみの算出を行った際に用いた立方体を採用している。

まず、せん断応力レベルに関する議論の見通しを良くするため、モデル内の応力評価点全点を対象として、偏差応力の第二不変量 J_2 の平方根をとった値 $(J_2)^{1/2}$ のヒストグラムを図-11に示す。ここでは工学ひずみ $\gamma_{yx} = 0.08$ (壁面応力ピーク時)における、 $(J_2)^{1/2}$ のヒストグラムを示しており、平均値は461 kPaである。 $\gamma_{yx} = 0.08$ 時点において、 $(J_2)^{1/2} = 922 \text{ kPa}$ (平均値の2倍)の等値面を、一次的せん断帯($|\varepsilon_{yx}| = 0.10$)とともに図-12に示しているが、一次的せん断帯が基盤の断層線と交差する箇所では、等値面は不連続(922 kPaよりも小さい)となっており、せん断帯がちょうどこの領域に収まっていることがわかる(紙面のみで把握しづらい場合は、結論にある[URL](#)を併せて参照されたい)。この領域における $(J_2)^{1/2}$ はおおよそ600 kPa程度(等値面の不連続が消失する)となっており、平均値の1.3倍程度の強度を有している。

次に図-4で観察された、せん断変形が促進されな

い領域の拘束圧と鉛直方向変位について検討する。

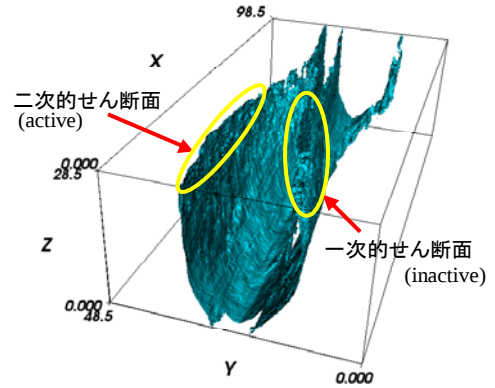


図-10 計算終了時 $|\varepsilon_{yx}| = 0.60$ の等値面

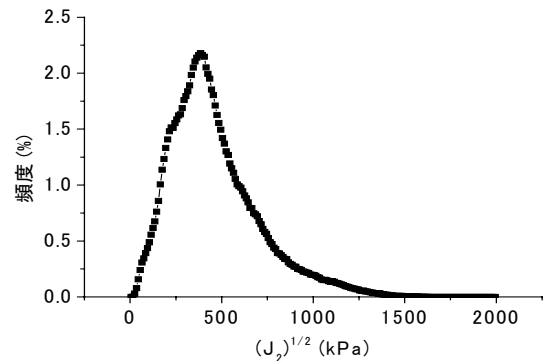


図-11 $(J_2)^{1/2}$ のヒストグラム ($\gamma_{yx} = 0.08$)

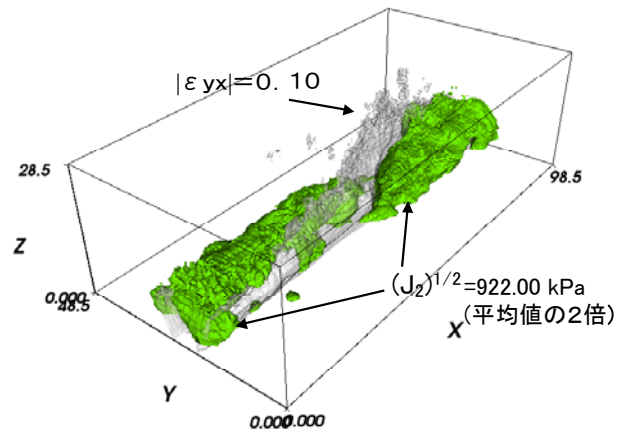


図-12 $(J_2)^{1/2} = 922 \text{ kPa}$ (平均値の2倍)の等値面
(壁面応力ピーク時 $\gamma_{yx} = 0.08$)

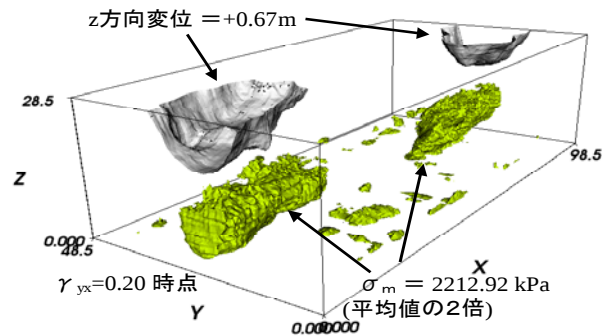


図-13 $\sigma_m = 2213 \text{ kPa}$ (平均値の2倍)の等値面と
z方向変位 = +0.67 m(粒径の0.70倍)の等値面

前述の偏差応力の第二不変量と同様に、まず平均応力 $\sigma_m (= \sigma_{ii}/3)$ に関するヒストグラムを求め $\gamma_{yx} = 0.20$ の時点に対して平均値 1115 kPa を得た。図-13 には、 $\gamma_{yx} = 0.20$ 時点における、平均応力が 2213kPa(平均値の2倍)の等値面と、 z 方向変位が +0.67m (粒径の0.70倍) の等値面をあわせて示している(紙面のみで把握しづらい場合は、結論にある URL を併せて参照されたい)。平均応力の等値面のほぼ直上に隆起を示す変位の等値面が配置されていることから、 $\gamma_{yx} = 0.20$ の時点において、これらは対応していると考えられる。また、隆起は地表面に近いほど大きい。このことは、地表面での拘束が零であることから、地表面に近いほど良く盛り上がるとう理解できる。

一方で、沈降している領域も存在しており、沈降領域はリーデルせん断帯付近に集中している(沈降量は0.30~0.6m程度)。例えば $\gamma_{yx} = 0.20$ の時点で、沈降量が0.5mである領域は、 $z=8\sim 21$ mの高さにあるxy平面内に分布している。図-14には、 $z=8$ mの位置における平均応力のxy面内分布(単位はkPa)を示しているが、一次的せん断帯付近の平均応力がかなり小さいことがわかる。すなわち、一次的せん断帯付近では、拘束圧が小さく、この領域でモデル底面の境界から与えられる断層運動に伴って伸張に近い状態となり、沈降が生じていると解釈できる。

最後に、二次的せん断帯が発現したために生じた応力の変化を示す。二次的せん断帯の発現時点は図-2において、 $\gamma_{yx} = 0.30$ 付近であることは読み取れるが、より正確にモデル内の応力分布状態から検討する。横軸に γ_{yx} を、縦軸に各時点でのモデル内 $(J_2)^{1/2}$ のヒストグラムから得られる平均値をとってプロットしたものが、図-15である。この図から、二次的なせん断帯は、 $\gamma_{yx} = 0.28$ から現れはじめたと考えられる。 $\gamma_{yx} = 0.40$ 時点での $(J_2)^{1/2}$ 分布から $\gamma_{yx} = 0.28$ 時点での $(J_2)^{1/2}$ 分布を差し引くことにより、応力の変化を検討する。結果、全応力評価点のうち、66.6%の評価点で $(J_2)^{1/2}$ の値が下がっていた。最大降下量は1118kPaで、 $(x,y,z)=(37.5, 29.5, 10.5)$ の位置で検出された。一方、 $(J_2)^{1/2}$ の最大上昇量は、 $(x,y,z)=(34.5, 32.5, 7.0)$ の位置で736kPaであった。二次的なせん断帯の形成により、 $(J_2)^{1/2}$ が降下した領域の一例を図-16にしているが、600kPa降下した領域が、300kPa降下した領域内に位置していることがわかる(紙面のみで把握しづらい場合は、結論にある URL を併せて参照されたい)。また、これらの領域の位置は、ひずみ場から観察された二次的なせん断帯の位置と整合的である。

4. 結論と今後の課題

横ずれ断層を対象として、三次元個別要素法を用いてシミュレーションを行い、解析モデルに生じるひずみ場および応力場を取得した。せん断帯の形成

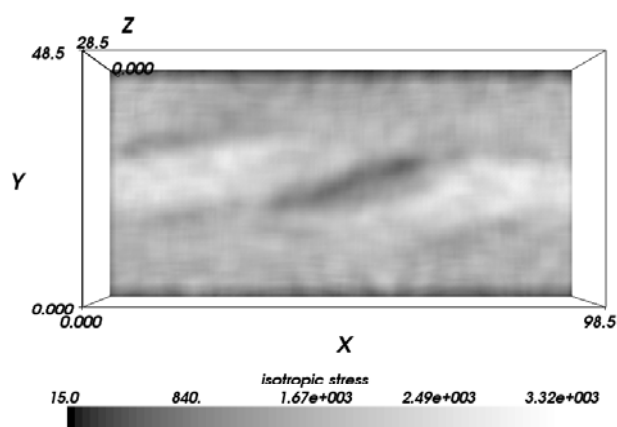


図-14 $z=8$ m の位置での平均応力の分布, $\gamma_{yx} = 0.20$

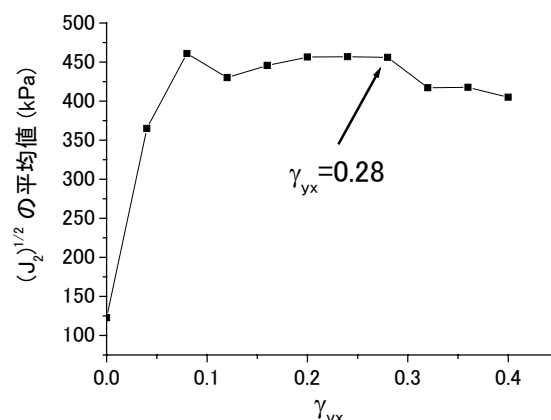


図-15 モデル内 $(J_2)^{1/2}$ の平均値の推移

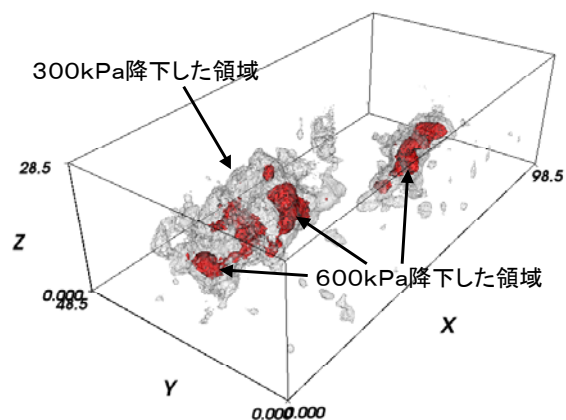


図-16 $(J_2)^{1/2}$ が降下した領域の一例 (300, 600kPa)

はリーデルせん断帯と考えられる一次的せん断帯お

よび二次的せん断帯の形成を再現することができた。一次的せん断帯については、三次元的な分布形態を明らかにした。この時、偏差応力の第二不変量が一次的せん断帯近傍で小さくなること(平均値の1.3倍程度)を示した。同様に、平均応力の分布を示し、一次的せん断帯付近で拘束圧が他の領域に比べ小さくなることを示し、この領域で地盤沈下が生じているという結果を得た。逆に、拘束圧が大きい領域の

上方では、地盤が隆起していることがわかった。

今回のシミュレーションでは、実験で観察されるスプレーせん断帯や、共役リーデルせん断帯、主変位せん断帯などのモードを再現できていない。この理由は解析モデルに与えたせん断変位量がまだ十分ではないこと、および粒子数が十分ではなく、モデルの規模が小さいためであると考えられる。

今後は今回のモデルをさらにせん断することからはじめ、横ずれ断層の最終形態である主変位せん断帯が再現できるかどうかを検討し、次にモデルの大規模化を図る。モデルの規模を大きくするための具体策として、大型計算機の使用やPCのクラスタリングが挙げられる。

なお、今回の数値解析は、Intel Xeon 3.06GHzプロセッサを搭載するPC(OS, redhat Linux8)で、40万ステップの計算を行うのに8日程度の時間を要した。また、計算中の消費メモリは約580MBであった。

紙面の都合上、計算結果の全てを掲載することはできないが、今回の計算結果から地表面が変形していくアニメーション、およびひずみの等値面を回転させ、様々な方向から観察するアニメーションを作成し、以下のURLに置いた。是非ダウンロードしていただき、ご高覧を賜りたい。

<http://staff.aist.go.jp/h-saomoto/strike/>

付録 集合材料としての内部摩擦角

今回用いた粒子の集合材料としての材料特性は本来、要素試験のシミュレーションを経て得ることが望ましいが、ここでは、せん断シミュレーション中の応力状態から粒子集合材料の特性として動員された内部摩擦角を求めた。モデルの各x, y, z方向中1/3の領域内に存在する応力評価点にて、せん断中の内部摩擦角を計算し、横軸に工学ひずみ γ_{yx} を、縦軸に動員された内部摩擦角をとってプロットしたものが図-17である。このとき、代表体積のサイズを変化させ、一辺が3m程度以上となる立方体を代表体積として採用すれば、立方体のサイズによらず図-17に示したグラフとほとんど変わらなくなることを確認している。図-17より、動員される内部摩擦角はピーク強度時で平均的に約32度、残留強度状態で平均的に約25度となっている。初期状態を除く各時点で内部摩擦角の最大値は40度程度となっているが、このような地点では、動的な影響が出ているように考えられる。そこで、せん断ひずみ速度を求め検討したが内部摩擦角が大きい箇所ではひずみ速度が卓越しているわけではなかった。また、地表面に近いということも当てはまらない。モデルが最密配置に近い状態であるため、集合材料として強いということが考えられ、吉村が求めたガラスビーズの内部摩擦角と間隙比の実験結果¹⁰⁾を、本モデルの初期間隙比0.4まで直線で外挿し、内部摩擦角を求めた。結果は約42度となり、計算結果の最大値と調和的であった。このことから間隙比が極めて小さいために、球形要素を用いたにも関わらず、内部摩擦角の最大値は大きくなったと考えられる。

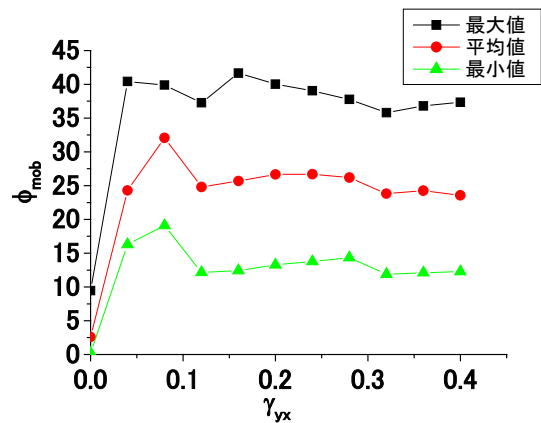


図-17 せん断中の動員された内部摩擦角

参考文献

- 1) 上田圭一，谷和夫：基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討(その3)－横ずれ，斜めずれ断層模型実験－，電力中央研究所報告U98049，1999.
- 2) 小山良浩，谷和夫：横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分析，土木学会論文集，No.750/Ⅲ－65，pp.171-181，2003.
- 3) 谷和夫，小山良浩：横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の内部に発達するせん断帯の構造分析，土木学会論文集，No.757/Ⅲ－66，pp.235-246，2004.
- 4) 鬼塚信弘，伯野元彦，鈴木崇伸，岩下和義，堀宗朗：基盤の縦ずれ断層運動に伴う表層地盤の破壊伝播に関する模型実験，土木学会論文集，No.701/Ⅲ－58，pp.29-38，2002.
- 5) Jea Woo LEE and Masanori HAMADA：AN EXPERIMENTAL STUDY ON EARTHQUAKE FAULT RUPTURE PROPAGATION THROUGH A SANDY DEPOSIT, Strut. Mech Earthquake Eng. JSCS, Vol22, No.1, 1s-13s, 2005.
- 6) 伯野元彦：破壊のシミュレーション－拡張個別要素法で破壊を追う－，森北出版，1997.
- 7) Tchalenko, J.S.: Similarities between shear zones of different magnitudes, Geological Association of America Bulletin, 81, pp.1625-1640, 1970.
- 8) 狩野謙一，村田明広：構造地質学，朝倉書店，1998.
- 9) 垣見俊弘，加藤碩一：地質構造の解析－理論と実際－，愛智出版，1994.
- 10) 吉村優治：砂のような粒状体の粒子形状と一次性質，二次性質に関する研究，長岡技術科学大学博士論文，p. 71，1994.

(2005. 3.2 受付)

DISCRETE ELEMENT SIMULATION OF SHEAR BAND EVOLUTION CAUSED BY STRIKE SLIP FAULTING

Hidetaka SAOMOTO, Masayuki YOSHIMI and Sunao KUNIMATSU

Shear band evolution caused by fault movement is a key component in terms of the earthquake hazard mitigation and the estimation of the ground surface rapture. We conducted a three-dimensional discrete element simulation of shear band formation due to strike slip faulting with a large number of particles to quantitatively clarify the strain and stress distributions during the faulting. From the simulation results, A shear band considered as the Riedel shear band having an inflexion along the x, y and z-direction of the model clearly appeared at the ground surface around the peak stage of the macroscopic shear stress acting on the lateral boundary walls. After the first shear band formation, the secondary shear band considered as the P-shear formed almost parallel to the lateral wall. Then, the macroscopic shear stress decreased. This simulation also revealed the stress distributions inside the ground when the foregoing events occurred.