

断層ダメージ領域内の応力不均一性が断層領域 の力学的挙動に与える影響

オノ木 敦士^{1*}・岩田 直樹²・朝比奈 大輔³・藍檀 オメル⁴

¹熊本大学 先端科学研究部 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1)

²中電技術コンサルタント 原子力本部 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

³産業技術研究所 活断層・火山研究部門 (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1中央第七)

⁴琉球大学 工学部 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地)

*E-mail: atsushi_sainoki@kumamoto-u.ac.jp

誘発地震は様々な工学プロジェクトと密接に関係しており、持続的かつ安定的な大深度地下開発を実現するために、その予測・抑制技術の開発が求められている。これまで、断層の構成則や地質構造スケールでの剛性不均質性を考慮した誘発地震シミュレーションが実施されてきたが、メートルスケールでの応力不均質性を考慮した数値解析は実施されていない。本研究では、断層破砕帯を構成するき裂群に起因する極めて複雑な応力不均質性を等価連続体モデルを用いて再現し、断層コアの有効応力を低下させることによって誘発地震シミュレーションを実施した。その結果、断層上の微小な応力変化に伴って生じる地震群のシミュレーションに成功し、せん断応力降下量は地震の規模と必ずしも一致しないことが示された。

Key Words : induced seismicity, fault damage zone, crack tensor theory, numerical simulation

1. 序論

誘発地震は、大深度トンネル掘削、地熱開発、二酸化炭素地下貯留、地下鉱山開発など様々な工学プロジェクトと密接に関係しており、その発生は社会的懸念を引き起こす可能性がある。したがって、持続的、安定的な大深度地下開発を実現させるために、誘発地震の抑制、予測技術の開発は必要不可欠である。

誘発地震と人為的な応力攪乱の関係を明らかにするため、過去数十年の間、世界各国の大深度地下鉱山で速度計・加速度計を用いた微小誘発地震観測が実施されてきた。その結果、誘発地震の震源域は応力攪乱領域の近傍に必ずしも存在するわけではなく、断層、せん断帯、貫入岩などの地質構造体の存在と深く関係することが明らかにされた。

例えば、Mgumbwa et al. (2017)¹⁾による地下鉱山での微小地震観測結果は、採掘域が断層帯や石英脈に接近したときに微小地震の発生頻度が増加し、クラスターが形成されることを示した。Smith (2018)²⁾によるカナダの大深度地下鉱山における微小地震観測では、誘発地震が活性化する領域には断層などの構造体が存在しており、鉱山開発域からの距離と地震の発生頻度には明確な関係がないことが示唆された。

上述した誘発地震観測から得られたデータから、せん断や引張などの地震のsource mechanismを推定することは可能であるが、原位置岩盤の力学的特性を含めた定量的な解釈は困難である。そこで、誘発地震の発生メカニズムを定量的に理解するため数値シミュレーションを用いた研究が数多く実施され^{3,4)}、人為的応力攪乱の影響範囲、地震発生中の断層の力学的挙動、地震波が周辺岩盤の動的挙動に与える影響などが調査されてきた。

しかしながら、これらの数値シミュレーションにおいて再現されてきた断層上の誘発地震は、主に単一のイベントであり、誘発地震観測結果が示すようなクラスター型の地震の数値シミュレーションに成功した事例は著者が知る限りはない。その要因として、従来の数値モデルでは、採掘前の初期応力状態が水平方向に均質であると仮定されているためである。近年、岩盤内の巨視的な剛性の不均質性を考慮した応力シミュレーションが実施されているが、単一の高応力域が局所的に形成されるだけであり、観測されるような微小地震群のシミュレーションには適さない。

本研究では、Sainoki et al. (2021)⁵⁾によって提唱されたメートルスケールの応力不均質性シミュレーション手法を大深度域の断層領域に適用し、断層コア内部で発生する誘発地震群の数値シミュレーションを試みる。

2. 断層領域のき裂特性

断層領域は、図-1に示すように、主に断層コアと断層ダメージ領域の二つに分けることができる⁹⁾。断層コアは、幅が1 m以下の狭い領域であり、断層の成熟に伴いせん断変位が蓄積する場所である。一方、断層ダメージ領域はき裂が発達した岩盤から構成され、断層コアと直交する方向に広がり、周辺の母岩よりもき裂密度が高い領域である。

断層ダメージ領域のき裂分布は、オイル・ガスの生産性や流体移動に起因した鉱床生成と深く関係するため、これまで数多くの研究が実施されてきた。既往研究の結論を整理すると、断層ダメージ領域幅は、断層コアのせん断変位と正の相関があるが、それだけが単一の因子ではない。種々の原位置計測は、母岩の力学的・物理的特性が、ダメージ領域内部のき裂の生成や分布特性に著しい影響を及ぼすことを示唆している⁷⁾。例えば、六甲淡路断層帯における原位置計測では、花崗岩で構成される断層ダメージ領域の幅は1000 mに達したが、流紋岩質凝灰岩で構成されるダメージ領域では、その幅は100 mに満たなかった⁹⁾。

このように断層ダメージ領域のき裂特性には様々な影響因子が存在するが、ダメージ領域内の巨視き裂密度が断層コアから離れるにつれて低下し、その減少特性がべき乗則で近似できるということは、多くの研究が示唆し

ている⁹⁾。また、べき乗則の係数に対応する断層コア近傍の最大き裂密度に関しては、少数の研究では100 本/mという観測結果が示されているが、多くの研究ではそれよりもかなり小さい値となっている。本研究では、これらの既往研究から得られた断層領域のき裂分布特性に基づき等価弾性体モデルで使用するき裂群を統計的に生成する。一方、微視き裂に関しては十分な研究が行われておらず、ダメージ領域内での分布特性が不明であるため、その密度は一定であると仮定した。ダメージ領域内部のき裂生成に関する具体的なパラメーターは後述する。

3. 数値解析モデルの構築

(1) 等価弾性モデル

図-2に断層領域の等価弾性モデル構築手順を示す。図に示すように、まず岩石供試体から得られるヤング率に対してメートルオーダー以下のき裂の影響をGeological Strength Index¹⁰⁾ (以下GSIと称す)を用いて考慮し、巨視き裂を含まない岩盤を等方弾性体と仮定した上で弾性率を計算する。微視き裂の密度は断層領域内で均質のため、この弾性率の値はモデル内で均質である。

次にクラックテンソル理論¹¹⁾を用いて、き裂の弾性的力学挙動を考慮した等価コンプライアンスマトリックス[C]を構築する。これに、微視き裂を含んだ岩盤の弾性

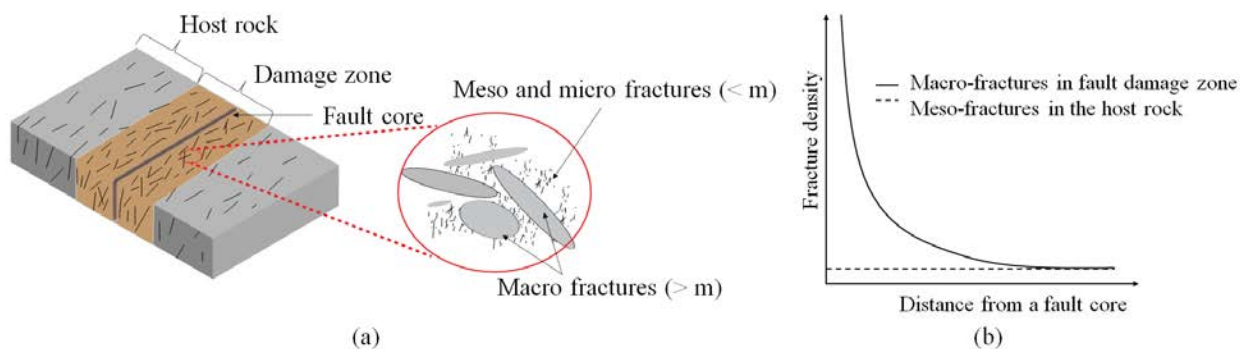


図-1 断層帯のき裂特性 (a)断層帯の構造及びき裂の種類 (b)巨視き裂及び微視き裂の密度と断層コアからの距離の関係

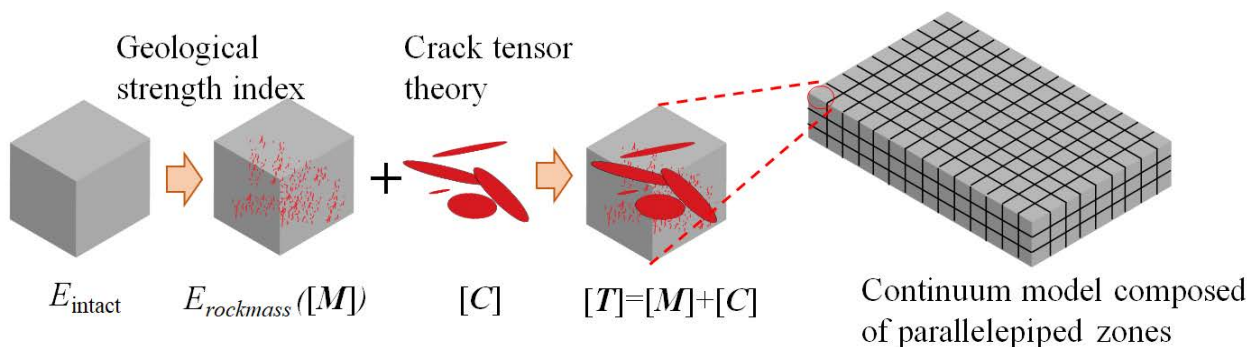


図-2 等価連続体モデル構築手順

マトリックス[M]を足し合わせることによって、断層ダメージ領域内の等価弾性マトリックスを構築する。この等価連続体モデルは、図-2に示す連続体モデルの各要素（ゾーン）に対して行われるため、等価弾性マトリックスはモデル内において不均質となる。

(2) 数値解析モデル

図-3(a)は、実際に作成した断層ダメージ領域内の巨視き裂群である。き裂は円盤で表現されており、モデル中央の断層コアに相当する領域のき裂密度が高いことが分かる。図-3(b)は等価弾性モデルを適用した連続体モデルであり、FLAC3Dを用いて構築した。今回は一辺100 mの立方体モデルを構築し、各辺を200分割した。つまり一辺0.5 mの8,000,000個のゾーンで構成される。図中の赤色のゾーンは等価弾性マトリックスが計算されたゾーンであり、各々異なった等価弾性マトリックスを有する。一方、グレーのゾーンは図-3(a)の巨視き裂を含まないゾーンであるため、弾性マトリックス[M]を有する。ま

た、図-3(c)に示すようにモデル中央にInterface要素を用いて断層コアを表現した。

(3) 境界条件

モデル内部の剛性の不均一性に起因する応力の不均一性を再現するためには、モデル境界に応力を与える必要がある⁹⁾。今回、地表面下2000 m、側圧比 $K=0.7$ に相当する応力を境界に付与した。ただし、断層の傾斜角が 70° となるように、図-4(a)に示すように応力テンソルの座標変換を実施した。これは図-3(c)でモデル化された断層は垂直であるため、断層面にせん断応力が発生する傾斜角にする必要があったためである。

図-4(b)に示すようにモデル底部の頂点4点を x, y, z 方向に固定し、それ以外は z 方向のみ固定した。これは、図-4(a)に示すようにモデルの側面に付与される応力の大きさが左右の面で異なるために力の不均衡が生じ、それによってモデルが平行移動し解が発散するのを防ぐことを目的としている。

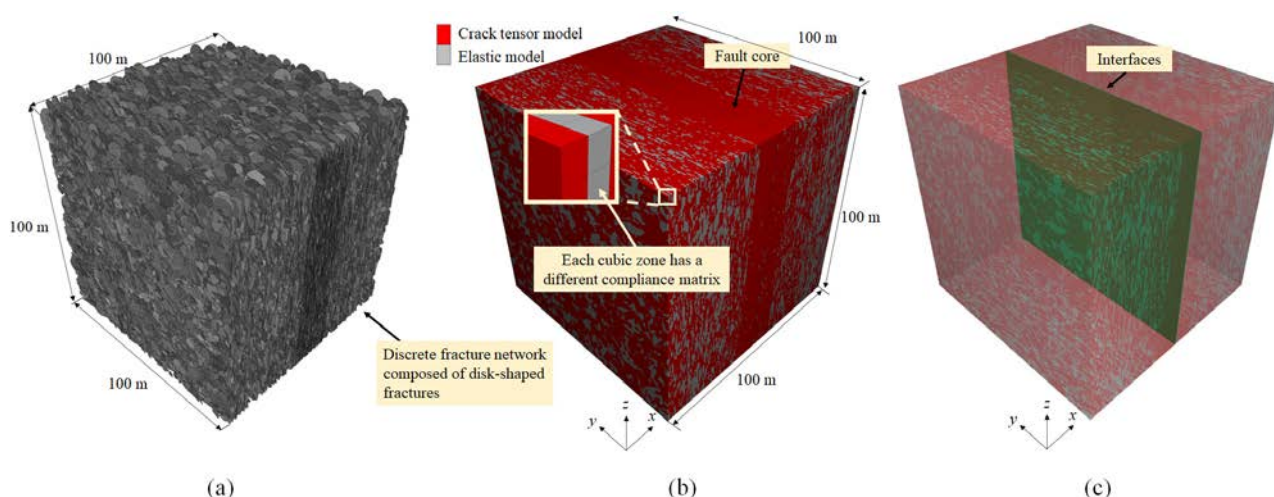


図-3 数値モデル構築 (a) Discrete fracture network (b) 等価弾性モデルを導入後の数値モデル (c) モデル内の断層コア形状

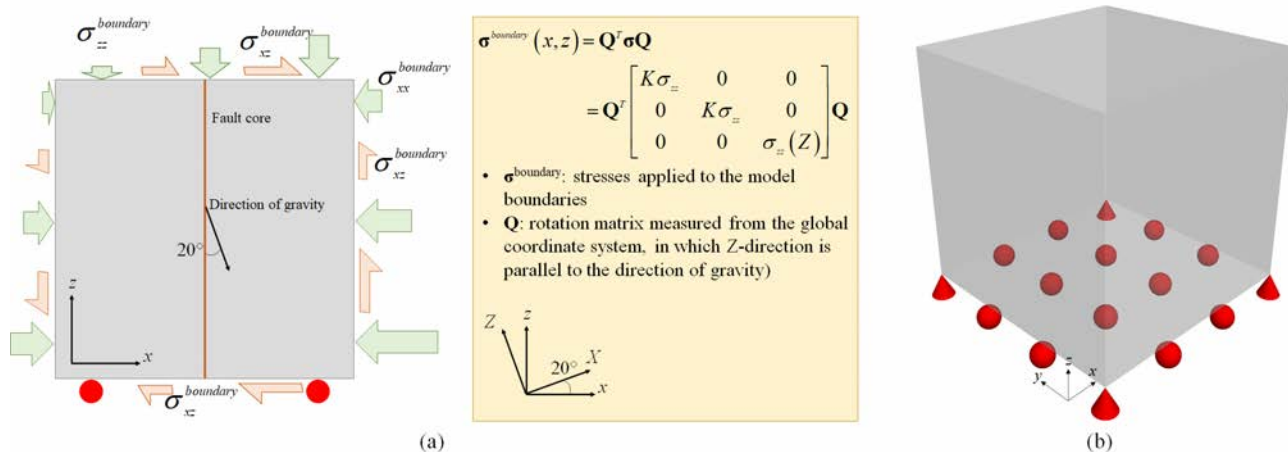


図-4 モデル境界条件 (a) 断面図で示したモデル外部境界に与える応力(σ^{boundary}) (b) モデル底部の変位拘束条件

(4) 数値解析手順

まず最初に図-4に示された境界条件を与え、初期応力解析を実施する。これによって、断層領域内の剛性不均一性に起因する複雑な応力状態を再現することができる。次に、図-5(a)に示すように断層表面上に円形の領域を設定し、この範囲内で断層の有効垂直応力を段階的に減少させる。ここで、初期間隙水圧として、図-5(b)に示すように地表面からの深さに相当する水圧を断層面に与えていることに注意されたい。円形領域内部の有効垂直応力の減少は図-5(c)に示すように各解析ステージにおいて0.5 MPa減少させた。

ここで、断層内における流体移動は考慮していないことに注意されたい。本研究では、鉾山掘削や流体注入に伴う一般的な断層の有効垂直応力低下を模擬するための手段として、静的に間隙水圧を変化させた。

(5) 数値モデル構築に係る物性値

a) 断層ダメージ領域内のき裂群生成パラメーター

断層領域内の巨視き裂長の累計密度分布は下記で示される式(1)に従うとし、 $l_{\max} = 10 \text{ m}$ 、 $l_{\min} = 2 \text{ m}$ とした。また式中の係数 a は2.5とした。

$$F(l) = \frac{l_{\min}^{1-a} - l^{1-a}}{l_{\min}^{1-a} - l_{\max}^{1-a}} \quad (1)$$

き裂の走行・傾斜の確率密度分布は式(2)で表されるFisher関数に従うとした。Fisher係数は40とした。

$$f(\theta) = \frac{\kappa \sin \theta \exp(\kappa \cos \theta)}{\exp(\kappa) - \exp(-\kappa)} \quad (2)$$

最後にき裂密度に関するべき乗則は、式(3)を用いた。

$$P_{10} = 30d^{0.8} \quad (3)$$

式中の P_{10} は1 m当たりのき裂本数、 d は断層コアからの距離(m)を示す。

b) 岩盤・断層に関する力学的物性値

先に述べたように微小き裂の影響はGSIを用いて考慮された。岩盤を構成する岩石として花崗岩を想定し、 $GSI = 60$ における弾性率を40 GPaと算出した。ポアソン比は0.2とした。これらの値は等価弾性コンプライアンスマトリックスを計算する際の[M]に代入される。断層コアの垂直剛性、せん断剛性はそれぞれ1 GPa/m、0.3 GPa/mとし、粘着力を0 MPa、摩擦角を30°、残留摩擦角を20°とした¹²⁾。つまり、断層は地震発生時にすべり軟化挙動を示す。また、今回は臨界すべり量は考慮しておらず、 $D_c = 0$ とした。

4. 数値解析結果及び考察

(1) 断層面上の変位増分

図-6に各ステージ間における断層面上のせん断変位増分を示す。図-6(a)は断層面の有効垂直応力減少量を4.5 MPaから5 MPaに増加させたときの変位増分であり、図

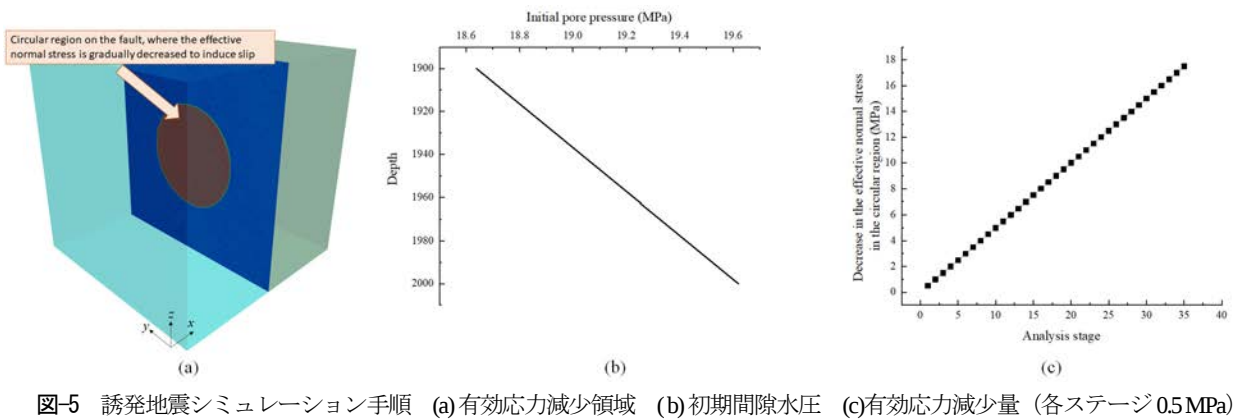


図-5 誘発地震シミュレーション手順 (a)有効応力減少領域 (b)初期間隙水圧 (c)有効応力減少量 (各ステージ0.5 MPa)

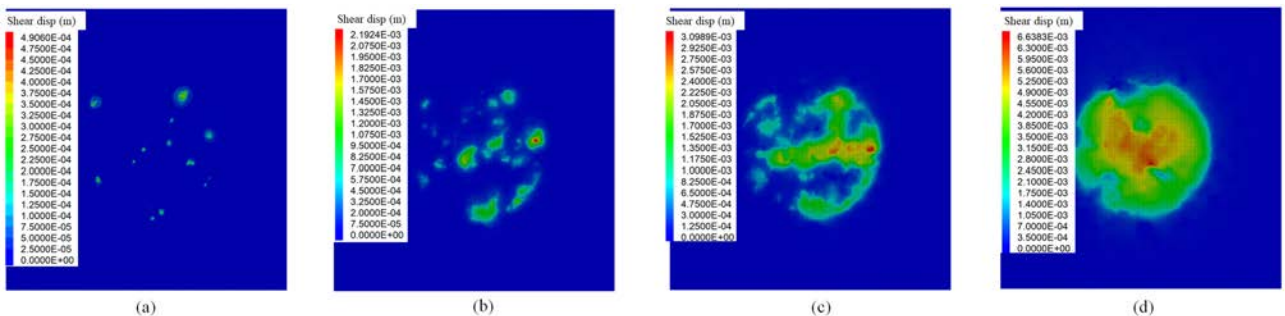


図-6 各ステージにおける断層面上の変位増分 (a)10 stage (b)15 stage (c)20 stage (d)25 stage

に示すように断層面の広い範囲で局所的にすべりが生じていることがわかる。断層中心部の全応力は約35 MPaであるため、有効応力変化量の5 MPaがそれと比較して小さい値であるということが分かる。すなわち、原位置応力と比較して比較的小さい応力変化でも誘発地震が生じることを示唆しており、実際の大深度における鉱山開発によって生じる誘発地震の特性と一致している。また多数の地震が断層面上に発生しており、これまでの数値シミュレーションでは再現が難しかった地震群を定性的に再現できている。

次に有効垂直応力をさらに減少させたときの断層面上の変位増分の特性について述べる。図-6(b)は有効応力減少量を7 MPaから7.5 MPaに変化させたときの結果であるが、図-6(a)ですべりが生じていた箇所ですべり領域が拡大しているだけではなく、単独で発生していたすべり領域が統合している。この傾向は、有効応力減少量が増大するにつれて顕著になり、最終的には図-6(d)に示されるように円形領域全域においてすべりが発生する。

次に断層面上で発生した地震の震源パラメーターをまとめ、それについて考察する。図-7(a)は断層面全域における累積seismic moment (M_0)を示している。つまり初期状態からのせん断変位増分に基づいて計算された値である。図に示すように有効垂直応力減少量が8 MPaまでは M_0 の増加率は大きくなく、有効応力減少量に対する断層の応答は小さいと考えられる。しかしながら、減少量が8 MPaを超えた付近から二次曲線的に急激に M_0 が増加している。これは、図-6の結果と合わせて考えると、有

効応力減少量が8 MPaを超えると断層の大部分ですべり領域が統合し、連結した要素全体ですべりが発生するために急激に M_0 が増加したと考えられる。この8 MPaという応力減少量は、断層面上の応力レベルの絶対値及び不均質性、つまり深度と剛性の不均質性に影響を受けると推察される。

図-7(b)は、各ステージにおける断層面上の最大せん断変位量を示している。こちらも M_0 と似た傾向を示し、有効応力減少量が8 MPaを超えたあたりから急激に変位量が増加しているが、先に述べたようなメカニズムに起因すると想定される。ただし、単調に増加を続けるのではなく、有効応力減少量が15 MPaを超えたあたりからせん断変位増分が小さくなっている。これは、原位置応力、初期間隙水圧分布から計算すると有効垂直応力が15 MPa程度減少すると断層の大部分の有効応力が0 MPaとなり、それ以上すべりが発生しない状態となるためである。

(2) 断層面上のせん断応力変化

図-7(b)は各ステージにおける断層面上の最大せん断応力減少量 (stress drop)を示している。定性的には先に述べたせん断変位同様に、有効応力減少量に応じてせん断応力減少量も増加している。しかしながら、有効応力減少量の増加に対して、stress dropの値はせん断変位ほど大きく変化していない。これは、比較的小さな地震においても、ある程度大きなstress dropが発生する可能性があることを示唆している。すなわち、震源域に近い領域では、地震の規模から推定されるよりも激しい岩盤振動が局所

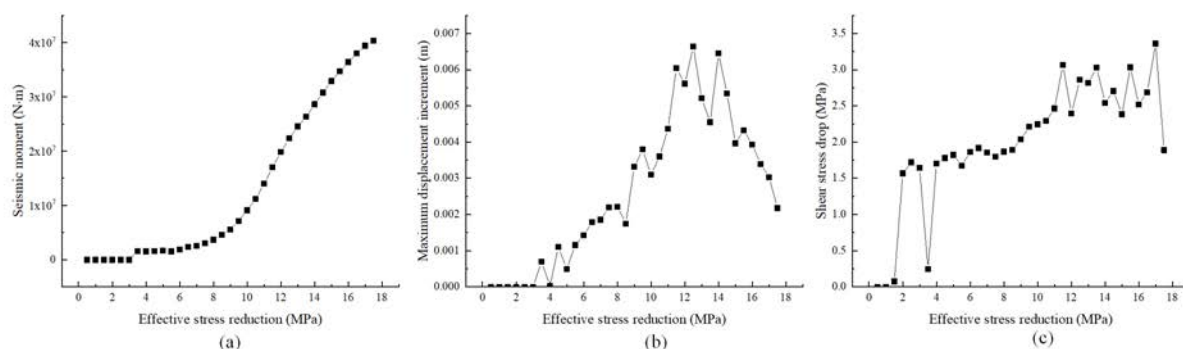


図-7 地震パラメーター (a) Cumulative seismic moment (b) 最大せん断変位増分 (c) 各ステージでのせん断応力低下量

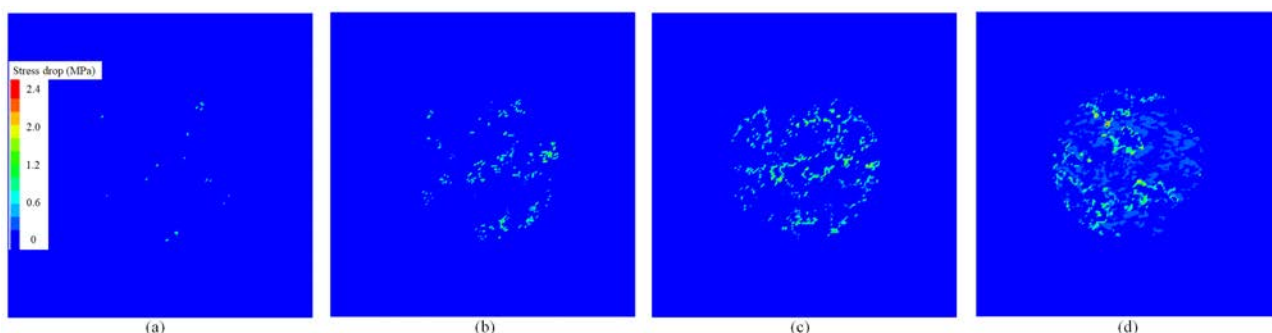


図-8 各ステージにおける断層面上のせん断応力低下量 (a) 10 stage (b) 15 stage (c) 20 stage (d) 25 stage

的に発生する可能性があることを示す結果となっている。

断層面上のStress dropに関してさらに詳細に検証するため、各ステージにおけるせん断応力減少量を図-8に示した。図から分かるように有効応力減少量が小さいステージにおいても、断層面上で局所的に大きなstress dropが発生している。また、図-6(d)との比較からstress dropの発生箇所は単発的であり、せん断変位の増加量と完全に一致していないことが分かる。過去、大深度地下鉱山において鉱山地震発生時に局所的に激しいダメージが発生する事例があったが、このような局所的に大きなstress dropが発生することによってその近傍の坑道に大きな地震エネルギーが伝達された可能性があることを今回の解析結果は示唆している。

今回の数値解析は準静的な解析を実施したが、今後動的な解析をすることによって、断層面上で生じた局所的なstress dropが地震波にどのような影響を及ぼすのかを定量的に調査することができると考えられ、微小地震による被害発生メカニズムの解明に貢献できると思われる。

5. 結論

本研究では、断層領域のき裂群に起因した複雑な初期応力状態を等価弾性モデルを用いてシミュレーションした後、断層面上で有効垂直応力を低下させることによって誘発地震の数値シミュレーションを実施した。その結果、断層面上の微小な応力変化によって生じる地震群の再現に成功し、さらに単独で発生していた地震群のすべり領域が統合し、規模の大きな地震の発生へと連鎖していく過程をシミュレーションすることができた。また、誘発地震においては、地震の規模に関わらず比較的大きなstress dropが局所的に発生し、近傍に存在する空洞（地下鉱山における坑道など）に大きなダメージが発生する可能性があることが示唆された。これらの数値シミュレーション結果は、大深度における人為的活動によって生じる誘発地震の発生メカニズム及びその予測手法の開発

に大きく貢献できると考えられる。

参考文献

- 1) Mgumbwa, J., Page, A., Human, L., Dunn, M.J. : Managing a change in rock mass response to mining at the Frog's Leg underground mine, *Deep Mining*, 2017.
- 2) Smith, S. V. L. : Retrospective analysis of mine seismicity: Glencore, Kidd mine, Master's thesis, Laurentian University, Sudbury, Canada, 2018.
- 3) Alber, M., Fritschen, R. : Rock mechanical analysis of a M1 = 4.0 seismic event induced by mining in the Saar District, Germany. *Geophysical Journal International*, 186, pp. 359-372, 2011.
- 4) Hofmann, G. F., Scheepers, L.J., Simulating fault slip areas of mining induced seismic tremors using static boundary element numerical modelling, *Mining Technology*, 120(1), 53-64, 2011.
- 5) Sainoki, A., Schwartzkopff, A.K., Jiang, L., Mitri, H.S. : Numerical Modelling of Complex Stress State in a Fault Damage Zone and its Implication on Near-fault Seismic Activity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, e2021JB021784, 2021.
- 6) Berg, S. S., Skar, T. : Controls on damage zone asymmetry of a normal fault zone: outcrop analyses of a segment of the Moab fault, SE Utah, *Journal of Structural Geology*, 27, pp. 1803-1822, 2005.
- 7) Laubach, S. E., Eichhubl, P., Hargrove, P., Ellis, M.A., Hooker, J. N. : Fault core and damage zone fracture attributes vary along strike owing to interaction of fracture growth, quartz accumulation, and differing sandstone composition, *Journal of Structural Geology*, 68, pp. 207-226, 2014.
- 8) Lin, A., Yamashita, K. : Spatial variations in damage zone width along strike-slip faults: An example from active faults in southwest Japan, *Journal of Structural Geology*, 57, pp. 1-15, 2013.
- 9) Johri, M., Dunham, E.M., Zoback, M.D., Fang, Z. : Predicting fault damage zone by modeling dynamic rupture propagation and comparison with field observations, *Solid Earth*, 119, pp. 1251-1272, 2014.
- 10) Marinos, P., Marinos, V., Hoek, E. : Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. *Underground works under special conditions*, pp. 13-21, 2007.
- 11) Oda, M. : An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses. *Water Resources Research*, 22(13), pp. 1845-56, 1986.
- 12) Sainoki, A., Hirohama, C., Schwartzkopff, A. : Dynamic modelling of induced seismicity by using seismic efficiency constraints and a new scaling law for slip-weakening distance. *Pure Appl. Geophys.* 177, pp. 637-659, 2020

EFFECT OF STRESS STATE HETEROGENEITY IN A FAULT DAMAGE ZONE ON THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF THE FAULT

Atsushi SAINOKI, Naoki IWATA, Daisuke ASAHINA, Ömer AYDAN

The mechanics of fault is investigated in the present study whilst simulating a fracture-induced complex, stress state in a fault damage zone with the combination of crack tensor theory and boundary traction method. The simulation result has demonstrated that a cluster of seismic events has been successfully simulated on the fault plane in contrast to previous studies predominantly simulating a single fault-slip event. Furthermore, the simulation result showed that the magnitude of shear stress drop taking place during fault-slip events does not necessarily correlate with their seismic moments, implying that even relatively small seismic events could locally cause intense damage to underground openings.