Slip-weakening distanceのスケール効果の検討

才ノ木 敦士1*・廣濵 千明2

¹熊本大学 国際先端科学技術研究機構(〒869-1102 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1) ²熊本大学 大学院(〒869-1102 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1) *E-mail: atsushi sainoki@kumamoto-u.ac.jp

誘発地震のリスクおよび被害を推定するために、高精度な誘発地震シミュレーションを実施する必要が ある.そのためには、断層滑りを記述する構成則に係る二つの物性値であるすべり軟化距離と動摩擦係数 を決定する必要がある.しかしながら、すべり軟化距離にはスケール依存性があることが知られており、 地震の規模によって大きく異なる.本研究は、地震エネルギーに関するパラメーターの一つであるseismci efficiencyを拘束条件として適用することによって数値シミュレーションを用いてすべり軟化距離のスケー ル効果を定量的に評価する手法を提案する.

Key Words : induced seiswmicity, slip-weakening distance, seismic efficiency, scale effect

1. 序論

(1) 誘発地震

誘発地震とは大深度地下における人為的活動によって 発生する断層の動的挙動であり、大深度地下鉱山開発、 地熱開発における熱流体生産、二酸化炭素の地下貯留、 水力発電のための空洞掘削によって引き起こされる.大 深度地下鉱山では、規模の大きな誘発地震が発生した際 には、広範囲に渡る坑道や鉱床のストープなどが壊滅的 な被害を被ることも珍しくない.地熱開発においては、 還元井からの流体注入や大深度地下高温岩体での水圧破 砕などによって安定だった断層が再活性化され、断層す べりにより生じた地震波が地表面に振動を発生させるた めに周辺住民に不安・懸念が広がる.これによって、地 熱開発の継続が難しくなる事例が報告されている^り.

(2) 誘発地震の数値シミュレーション手法

過去数十年間に渡り誘発地震に関して、数値解析、現 場計測,室内試験に基づき様々な研究が行われてきた. 室内試験に関しては、最終的な岩盤破壊および地震発生 に結び付くき裂発生・進展メカニズムの解明に向けた実 験が実施され、現場計測においては誘発地震観測システ ムが設置され鉱床採掘、流体注入、水圧破砕によってい つ、どこで地震が発生するのか調査がなされた.そして、 上記の研究と合わせて、定量的な地震規模推定や原位置 断層の力学的物性値の同定を目的として誘発地震シミュ レーションが行われた.

過去研究における誘発地震シミュレーションでは、原 位置断層のせん断すべりをシミュレーションするために 静的解析が主に実施された²⁾. この解析によって断層上 のせん断すべり規模を定量的に見積もることができ、イ ベントのseismic momentを推定することが可能となる. し かしながら、上記のような静的解析では断層滑りによっ て地震波として解放される地震エネルギーの定量評価は 困難である. 地震エネルギーは、地震発生時の断層周囲 の岩盤の振動速度と直接的に関係するために、地震によ る被害を正確に評価するために必要不可欠なパラーメー タである.この点を克服するために、近年いくつかの研 究において誘発地震の動的解析が実施されており、それ によって断層のすべり速度、周辺岩盤の加速度および粒 子速度といった地震発生中の断層の動的挙動解析が可能 となった³. したがって, 誘発地震によって解放される 地震エネルギーの定量評価がなされ、静的解析からは得 られなかったサイズミックソースパラメーターの計算が 可能となった.

(3) 問題点

前述したように,近年動的解析の誘発地震シミュレー ションへの適用が行われるようになったが,断層の動摩 擦則に関係する力学的パラメーター決定に関して,断層 の動的挙動の観点から十分な検証がなされいない.つま り,動的解析から得られた誘発地震のマグニチュードが 妥当であったとしても,地震エネルギーや断層のせん断 すべり速度は非現実的なものとなる可能性がある.これ は地震波の強度や解放エネルギーの非正確な推定へと繋 がる可能性がある.実際,断層の動摩擦則の重要なパラ メーターであり,地震発生中のすべり軟化挙動を決定づ けるすべり軟化距離(D)にはスケール依存性があるこ とが知られている.すなわち,地震の規模に応じてD。を 補正する必要がある.補正しない場合,シミュレーショ ンされた誘発地震のサイズミックソースパラメーターは 現実の地震とかけ離れたものとなる場合がある.様々な 実験や地震波の解析からいくつかのスケーリング則が提 唱されているが,D。とマグニチュードの関係性は未だ十 分には解明されていない.本研究は,seismei efficiencyを 考慮することによってDのスケール依存性を推定する手 法を考案する.

2. 地震エネルギーに関する指標

(1) 地震エネルギーの収支

図-1はサイズミックイベントにおけるエネルギー収支 を概念的に示したものであり, EG, ER, EFはき裂エネル ギー,解放された地震エネルギー,摩擦によるエネルギ ー損失をそれぞれ示す.図から分かるように,き裂エネ ルギーの大きさは、すべり軟化距離によって決定される. 断層に働くせん断応力は、相対せん断変位がすべり軟化 距離へ増加するに従いせん断ピーク強度(n)から残留 強度(n)へと低下する.一方,図中の破線は地震発生 中の周辺岩盤の応力変化を示しており、断層上のせん断 強度低下に応じて徐々に低下する.図から分かるように、 地震による解放エネルギー量は、断層のせん断応力と周 辺岩盤応力の差によって定義されるため、すべり軟化挙 動のみだけではなく周辺岩盤のせん断剛性の影響も受け る.その3種類のエネルギーの合計が地震発生中のポテ ンシャルエネルギー量変化の総量と対応している.



図-1 地震のエネルギー収支の概念図

(2) Seismic efficiency

Seismic efficiency (η) は地震のサイズミックソースパ ラメーターの一つであり、地震によって解放されたエネ ルギーとポテンシャルエネルギーの変化の比を表し、下 記式によって記述される.

$$\eta = \frac{E_R}{E_R + E_G + E_F} \tag{1}$$

過去研究によると、自然地震や誘発地震において地震 の規模にかかわらず seismic efficiency は 0.06 を超えないと いう結果が報告されている ⁴. Seismic efficiency の非スケ ール依存特性は下記のように説明することができる. 過 去研究で議論されたようにすべり軟化距離にはスケール 依存性があり、室内試験では数マイクロメートル程度の 値が観測されるが、巨大地震においては数メートルとな ることが示唆されている. 重要なことは、せん断すべり が発生している断層周囲の岩盤剛性も同様に下記のよう に地震の規模の影響を受ける.

$$k = \frac{G \cdot \alpha}{L} \tag{2}$$

上式において、kは断層すべりが発生している領域の岩盤の せん断剛性を示し、G,a,Lは実験から得られる岩盤のせん断 剛性、すべり領域の形状を考慮するための係数、せん断す べりが生じている断層の長さをそれぞれ示す.

すべり軟化距離と周辺岩盤の剛性の両方がスケール依存 性を有するため、地震によって解放されるエネルギーと ポテンシャルエネルギーの比は地震マグニチュードによ らず一定となることが示唆される.

(3) すべり軟化距離のスケール効果に関する仮説

ここで、前節で述べた断層すべり中の周辺岩盤のせん断 剛性に対するスケール依存性は数値解析の中で自然に考慮 されことに注意されたい.一方、すべり軟化距離はひずみ 軟化則における入力物性値であるために決定する必要があ る.もし、seismic efficiencyが主にすべり軟化途中の断層の 剛性と周辺岩盤の剛性によって決定されると仮定した場合、 これは、任意のマグニチュードを持つ誘発地震イベントに 対して $\eta \leq 0.06$ を拘束条件として適用することによってす べり軟化距離を補正することができることを示唆してい る.

本研究では、間隙水圧の上昇に起因して発生する誘発 地震をすべり軟化則を適用することによってシミュレー ションし、seismic efficiencyを定量的に評価することによ ってこの仮説を実証し、数値解析から得られたすべり軟 化距離と過去研究で提唱されたスケーリング則との比較 を行う.

(1) 数値解析モデル

本研究では、地下鉱山や地熱貯留層において断層に沿 った領域で有効垂直応力が減少することによって発生す る誘発地震を想定した誘発地震シミュレーションを行っ た.地下鉱山の場合、これは大規模領域における鉱床採 掘によって発生する広域的な断層の拘束圧の低下に相当 し、地熱貯留層においては還元井からの流体注入による 間隙水圧増加による不連続面の有効応力低下に対応する.

図-2(a)は数値解析モデルの鳥観図を示す. 図中の断層の傾斜は60°であり,走向はy軸と一致する. 外部境界は,境界が断層の力学的挙動に影響を及ぼさないように決定された. また,モデルの細緻化に関しては,誘発地震の変位が十分に収束するまで分割した. 図-2(b)は,誘発地震をシミュレーションするために断層上の有効垂直応力を減少させる領域を示す. 円形領域の半径は,異なった規模の地震を発生させるために変数とし,37.5 mから150 mの範囲で解析を実施した. 後に示すようにそれぞれのケースに対して, seismic efficiencyに基づきすべり軟化距離の補正を行った.



図-2(a)鳥瞰図、(b) 断層の正面図

(2) 摩擦則

動摩擦則に関しては、下記の式に従うすべり軟化則を採 用にした.

$$\tau = \sigma_n \left(\mu_d - \left(\mu_d - \mu_s \right) \exp\left(\frac{-d_s}{A} \right) \right)$$
(3)

$$\mu_s = \tan \phi_s \tag{4}$$

上式中のて、のは断層に作用するせん断応力、垂直応力を 示す.μ,μは断層の静摩擦係数、動摩擦係数をそれぞれ 示す.d,Aは断層の相対せん断変位とひずみ軟化とせん 断変位の関係性を決める係数をそれぞれ示し、体は断層 の基本摩擦角を示す.Aを調整することによって様々な 断層のひずみ軟化挙動をシミュレーションすることが可 能である.ただし、式(3)から分かるように指数タイプ のひずみ軟化則を採用したのでD。を正確に決定すること はできない.これは相対せん断変位増分に対して、せん 断応力が常に低下し一定とならないためである.このた め、本研究では、せん断応力低下量がピークせん断強度 と残留せん断強度の差の1%に達した時点でのせん断変 位をすべり軟化距離として定義した.

(3) 物性值

表-1は数値解析モデルに適用された岩盤と断層の物性 値を示す.岩盤の物性値は、大深度地下鉱山における岩 盤内のき裂を考慮した上で、深成岩の物性値に基づき決 定された.具体的に述べるとHoek and Brownによって提 唱されたGeological Strength Index⁹を60と仮定し、供試体 から得られた物性値を岩盤の物性値へと変換した.60と いう値は大深度地下鉱山の岩盤のフラクチャー度合とし て一般的に推定される値である.

断層に関しては、断層表面の劣化を考慮した上で断層 表面の垂直剛性、せん断剛性を推定した。断層表面は程 度の激しい劣化・風化を過去に受けたと考えられる。ここで、断層の垂直剛性とせん断剛性は断層すべりに顕著 な影響を及ぼさないことに注意されたい。これは、断層 のすべり挙動は、主に断層のすべり軟化挙動と周辺岩盤 の剛性によって決定されるためである。表-1から分かる ように、断層の静的摩擦係数として0.58が想定された。 これはクーロンの摩擦則において摩擦角が30°の場合に 相当する。この値は、岩盤の基本摩擦角として一般的な 範囲であると考えられる。

表-1	物性値
_	

	Rockmass			Fault	
Ε	ν	γ	kn	ks	$\mu_{\rm s}$
(GPa)		(kN/m^3)	(GPa/m)	(GPa/m)	
10	0.28	25.5	3	1.25	0.58

(3) 数值解析手順

図-3は誘発地震のシミュレーション手順を示す.図に示すように、まず静的解析による初期応力解析が実施される.初期応力状態を求めるために、モデル上部境界に土被り1000mに相当する垂直応力を与え、側面には側圧比0.7に相当する水平応力を加えた.下部境界は、境界と垂直方向の変位を拘束した.

初期応力状態を求めるための解析において、モデル内部 で十分に力が均衡したのち、図-2に示した円形領域の有効 垂直応力を徐々に減少させた.有効垂直応力の減少は、円 形領域内部の断層パッチのせん断応力がピークせん断強度 に達するまで継続される.その後、最低でも1つの断層パッ チがクリティカルな応力状態に達した時点で、解析条件を 静的条件から動的条件へと変更した.ここでは、モデルの 外部境界を地震波の反射を防ぐための粘性境界へと変更し た.同時に式(3)で表されるひずみ軟化則を動的すべりが生 じている断層パッチへと適用した.動的解析中、円形領域 内の各々の断層パッチの応力状態が常にモニタリングされ、 せん断応力がクリティカルな状態が満たされると同時に、 ひずみ軟化則をインターフェイス要素に与えた.これによ り、せん断すべりの伝搬を再現することができる.



4. 結果と考察

(1) モデルパラメトリックスタディ

図-3に示した数値解析手順に従い、断層上の円形領域の 直径Lに対してモデルパラメトリックスタディを行った. 各々の解析において動摩擦係数の値を0.42とし、式(3)中のA の値をシミュレーションされた誘発地震のseismic efficiency が0.06となるように補正した.こうすることによって、す べり軟化挙動によるせん断応力低下量は全てのケースでほ ぼ等しくなる.一方、シミュレーションされた誘発地震は、 その規模に応じて異なるすべり軟化挙動を有する.また、 それぞれの地震に対してseismic momentを数値解析結果から 求めた.

図-4にモデルパラメトリックスタディの結果を示す. 図から分かるようにすべり軟化距離はseismic momentと共に減少しており、すべり軟化距離のスケール効果が十分に再現されていると考えられる.例えば、L=150 mobースにおいて、seismic momentと補正されたすべり軟化距離は7.3×10¹¹ N·m と3.64 mmであるが、L=37.5 mobケースにおいては、seismic momentとすべり軟化距離はそれぞれ7.3×10¹¹ N·m と0.72 mmである.過去研究によると、すべり軟化挙動は誘発地震のapparent stressにも依存する.このため、すべり領域のスケール効果のみを調査するために、断層の動摩擦係数は全てのケースにおいて一定とした.



図-4 /に関するモデルパラメトリックスタディの結果

(2) 過去研究で提唱されたスケーリング則との比較

図-5に数値解析から得られたすべり軟化距離と過去研究で提唱されたスケーリング則[®]の比較結果を示す.図に示されているようにseismic efficiencyを拘束条件として補正したすべり軟化距離はOhnaka (2000)によって提唱さ

れたスケーリング則と調和的であることが分かる.ここで、図-5に示したスケーリング則には過去研究で採用されたものと同等の値が代入されている.すなわち、数値 シミュレーションの応力低下とは差異がある.それにも かかわらず、数値計算で補正されたすべり軟化距離と過 去研究のスケーリング則は良い一致を示している.

この結果は、seismic efficiencyがすべり軟化距離を拘束 するために有効であることを示している. さらに、数値 解析によるすべり軟化距離の補正はOhnaka (2000)によっ て求められたスケーリング則よりもさらに厳密な推定が 可能であることを示している. これは、Ohnaka (2000)の 式は地震エネルギーパラメーターを含んでいないためで ある. 本研究で提唱された補正手法はその影響を考慮す ることができる. 例えば、すべり軟化距離を小さくする と、より瞬間的にせん断応力が低下するためseismic efficiencyが増加する. 本研究においてすべり軟化距離の 補正は、seismic efficiency=0.06の仮定に基づき行われた. これに関して、さらなる研究を行うことによって、すべ り軟化距離がseismic efficiencyに及ぼす影響が明らかとな り、新たなスケーリング則が得られると考えられる.





5. 結論

断層のすべり軟化距離はスケール依存性を有することが 知られている.従って、誘発地震シミュレーションにおい てその値をどのように決定するかが極めて困難な問題とな る. 不正確な値を用いた数値解析は、非現実的な地震ソー スパラメーターを有する地震へのシミュレーションへと繋 がる. 本研究は、誘発地震数値シミュレーションにおいて seismic efficiencyを拘束条件として用いることによって、す べり軟化距離のスケール効果を考慮した上でその推定が可 能であることを実証した. 異なったマグニチュードを有す る地震に対して推定されたすべり軟化距離は、過去研究で 提唱されてスケーリング則と比較された. その結果, 数値 シミュレーションによって推定されたすべり軟化距離は十 分に過去研究のスケーリング則と調和していることが判明 した. さらに、本研究で考案した手法は過去研究では考慮 していなかった地震エネルギー指標を考慮しているため、 すべり軟化距離をさらに厳密に推定できる可能性がある. これには, seismic efficiencyをパラメーターとした更なる数 値解析が必要である.

6. 参考文献

- Majer, E., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., and Asanuma, H. Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. Geothermics, 36, 185-222, 2007
- Hofmann, G.F. and Scheepers, L.J. Simulating fault slip areas of mining induced seismic tremors using static boundary element numerical modelling, Mining technology, 120, 53-64
- Sainoki, A. and Mitri, H.S. Back analysis of fault-slip in burst prone environment, 134, 159-171
- Mcgarr, A. Some comparisons between mining-induced and laboratory earthquakes. *PAGEOPH*, 142, 467-489, 1994
- Hoek, E. and Brown, E. T. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 34, 1165-1186, 1997
- 6) Ohnaka, M. A constitutive scaling law and a unified comprehension for frictional slip failure, shear fracture of intact rock, and earthquake rupture. *Journal of Geophysical Research*, 108, ESE 6-1, 2000

STUDY ON THE SCALE DEPENDENCY OF SLIP-WEAKEING DISTANCE

Atsushi SAINOKI, Chiaki HIROHAMA

The accurate simulation of induced seismicity is crucial in estimating its risk and evaluating the damage caused by seismic waves. To achieve this, two important mechanical parameters that dictate the severity and magnitude of induced seismicity need to be determined, which are the coefficient of kinetic friction and critical slip-weakening distance. The slip-weakening distance is known to be scale-dependent. The present study proposes a methodology to take into account the scale-dependency by considering seismic efficiency in the dynamic modelling of induced seismicity.