

甲^A
第
327
号
記

Title	動力学的断層破壊シミュレーションを用いた内陸横ずれ断層の強震動予測のための震源特性に関する研究
Author(s)	入江, 紀嘉
Citation	
Issue Date	2014-03-20
URL	http://hdl.handle.net/10129/5393
Rights	
Text version	author



<http://repository.ul.hirosaki-u.ac.jp/dspace/>

動力的断層破壊シミュレーションを用いた
内陸横ずれ断層の強震動予測のための震源特性に関する研究

弘前大学大学院理工学研究科

博士後期課程

博士論文

2014年3月

入江 紀嘉

目次

第1章 序論

1.1 本研究の背景および目的	1-1
1.2 本論文の構成	1-4

第2章 地表地震断層と地中震源断層を繋ぐ動力的断層モデルの構築

2.1 2章の概説	2-1
2.2 地表地震断層と地中震源断層における断層パラメータ間の経験的関係の既往文献	2-2
2.3 地表地震断層と地中震源断層を繋ぐ動力的断層モデルパラメータの算定法	2-19
2.4 動力的断層モデルおよび動力的断層破壊シミュレーション結果	2-26
2.5 議論	2-38
2.6 2章のまとめ	2-65

第3章 一様な動的応力降下量を考慮した長大横ずれ断層のパラメータ算定式の構築

3.1 3章の概説	3-1
3.2 震源断層を特定した地震の強震動予測手法における長大断層の断層パラメータ算定	3-2
3.3 一様な動的応力降下量を考慮した動力的断層モデルパラメータの算定法	3-12
3.4 動力的断層モデルおよび動力的断層破壊シミュレーション結果	3-16
3.5 議論	3-42
3.6 3章のまとめ	3-50

第4章 不均質な動的応力降下量を考慮した長大横ずれ断層のパラメータ算定式の構築

4.1 4章の概説	4-1
4.2 不均質な動的応力降下量を考慮した動力的断層モデルパラメータの算定法	4-2
4.3 動力的断層モデルおよび動力的断層破壊シミュレーション結果	4-6
4.4 議論	4-62
4.5 4章のまとめ	4-79

第5章 結論

5.1 総括-----	5-1
5.2 今後の課題と展望-----	5-4

第4章 不均質な動的応力降下量を考慮した長大横ずれ断層のパラメータ算定式の構築

4.1 4章の概説

2011年東北地方太平洋沖地震が、プレート間地震の複数の想定震源域の連動破壊によるものであったことから、内陸地殻内地震の強震動予測においても、複数の活断層の連動破壊による長大断層を想定する場合が急増している。しかし、従来の強震動評価における断層モデルのパラメータ算定法では、長大断層を想定した地震動を評価する際に、背景領域のすべり量が負の値となり、断層モデルが設定できなくなる問題があり、長大断層にも適用できる断層モデルのパラメータ算定手法の確立が早急な課題となっている。

前章（第3章）では、一様な動的応力降下量を考慮した動学的断層モデルを用いて、長大断層にも適用できる、円形クラック式に代わる平均動的応力降下量の算定式を求めた。しかし、実地震では、地震発生時に震源断層上での応力降下量は一様ではなく、不均質な応力降下量分布となっている。強震動評価手法における断層モデルを想定する際には、断層内に応力降下量が生じる領域（アスペリティ）と、応力降下量ゼロの領域（背景領域）を想定したアスペリティモデルがよく用いられる（例えば、地震調査推進本部，2008，など）。アスペリティは、断層の固着が強い領域であり、アスペリティが破壊した場合、応力の降下とともに大きいすべりが発生する。運動学的モデルにおいては、すべり量が大きい領域をアスペリティとする場合もあるが、本研究では、応力降下量の大きい領域をアスペリティと呼ぶこととする。

本章では、動的応力降下量が一様ではなく、応力降下量の不均質性（アスペリティ）を考慮した動的断層モデルを想定し、前章と同様の検討方法を用いて、長大断層にも適用できるような円形クラック式に代わる平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ の算定式を求める。具体的には、動的応力降下量を持つアスペリティ領域と動的応力降下量ゼロの背景領域を設けた動学的断層モデルを仮定し、断層の大きさ（ここでは断層長さ）を変化させた場合における、 $\Delta\sigma^{\#}=c\times M_0/(LW^2)$ （ここに、 M_0 は地震モーメント、 L は断層長さ、 W は断層幅である）に含まれる応力形状係数 c の変化を検討する。つぎに、求めた平均動的応力降下量算定式をもとに、実地震の震源データの動的応力降下量の平均値を求めるとともに、断層パラメータの経験的關係式を求める。さらに、求めた断層パラメータの關係式を用いて、長大断層に適用できる断層モデルのパラメータ算定手法を提案する。

4.2 不均質な動的応力降下量を考慮した動学的断層モデルパラメータの算定法

本節では、アスペリティを考慮した動学的断層モデルでの断層パラメータの算定手順について述べる。

4.2.1 アスペリティを考慮した動学的断層モデルのパラメータ

地震発生時に破壊する領域は、図 4.2-1 に示すように、地震発生層中にある震源断層と地震発生層よりも浅い表層の破壊部分で構成される。本章では震源領域における断層の破壊特性を対象とするため、表層部分を取り去った震源断層のみの断層モデルを設定する。なお、震源断層は地震発生層の厚さで飽和するとして、震源断層の幅 W には添字 max をつける。震源断層の面積 S は、下式により表される。

$$S = LW_{max} \quad (4.2-1)$$

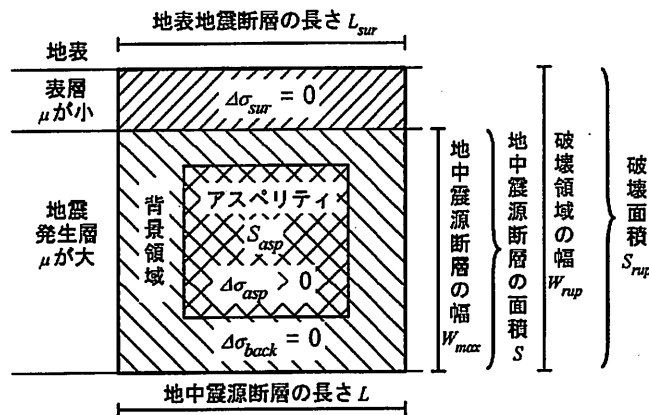


図 4.2-1 破壊領域と地中震源断層のイメージ

破壊面積 S_{rup} は $L \times W_{rup}$ の領域で、地中震源断層の面積 S は $L \times W_{max}$ の領域である。

地盤モデルと断層モデルは主に下のようなパラメータで表される。

1) 地盤モデル

地盤モデルは密度、 P 波速度、 S 波速度で表される。本研究では、震源断層のみを対象としているため、解析地盤は地震発生層の媒質で表されるような地盤モデルとする。地震発生層の密度 ρ を 2.7 g/cm^3 、 P 波速度 α を 6.0 km/s 、 S 波速度 β を 3.5 km/s とする。このとき、せん断剛性率 μ は $\mu = \rho \beta^2$ で算定され、 $\mu = 3.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ となる。

2) 断層モデル

断層モデルは、震源断層の長さ L 、震源断層の幅 W_{max} 、震源断層の面積 S 、アスペリティの面積 S_{asp} 、平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、およびアスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ で表される。このうち、震源断層の面積 S は(4.2-1) 式で表される。また、平均の定義により、平均応力降下量 $\Delta\sigma$ は下式で表される。

$$\Delta\sigma = (S_{asp} / S)\Delta\sigma_{asp} \quad (4.2-2)$$

地震発生による地震動は震源スペクトルで代表され、長周期領域の震源スペクトルは地震モーメント M_0 で、短周期領域の震源スペクトルは短周期レベル A で表される。また、地震モーメント M_0 と短周期レベル A はそれぞれ下の(4.2-3) 式と(4.2-4) 式で表される。

$$M_0 = \mu DS \quad (4.2-3)$$

$$A = 4\pi(S_{asp} / \pi)^{1/2} \Delta\sigma_{asp} \beta^2 \quad (4.2-4)$$

ここに、(4.2-3) 式中の D は地中震源断層における平均すべり量である。また、(4.2-4) 式は短周期レベルの式であり、円形クラックモデルの周囲で破壊が停止する際に短周期地震動が発生すると考えた Brune (1970) の短周期レベルの式を、Boatwright (1988) がアスペリティ周辺でも同様に短周期地震動が発生するものとして求めた式である。

4.2.2 断層モデルのパラメータの算定方法

現在、強震動の予測のためによく用いられているアスペリティモデルを記述する主なパラメータは、震源断層の面積 S 、断層長さ L 、断層幅 W_{max} 、地震モーメント M_0 、短周期レベル A 、断層面の平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、断層面の平均すべり量 D 、アスペリティの面積 S_{asp} 、アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ の 9 個である。ここで、本研究では動学的断層モデルを用いており、以下、平均応力降下量 $\Delta\sigma$ は平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^\#$ 、アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ はアスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^\#$ と記載することとする。これらのパラメータの間の関係式に、前述の(4.2-1) 式～(4.2-4) 式に加えて以下の 3 つの関係式を用いる。

$$\Delta\sigma^\# = c \frac{M_0}{LW_{max}^2} \quad (4.2-5)$$

$$M_0[\text{Nm}] = \frac{4.4[\text{MPa}]S[\text{km}^2]W_{max}[\text{km}]}{2/\pi \times \left\{1 + 4.2e^{-S[\text{km}^2]/(W_{max}[\text{km}])^2}\right\}} \times 10^{15} \quad (4.2-6)$$

$$M_0[\text{Nm}] = \frac{(A[\text{Nm/s}^2])^2 W_{max}[\text{km}]}{32(\beta[\text{km/s}])^4 \left\{1 + 4.2e^{-S[\text{km}^2]/(W_{max}[\text{km}])^2}\right\}} \times 10^{15} \times 9.5[\text{MPa}] \quad (4.2-7)$$

ここに、(4.2-5) 式は破壊が地表まで達している断層長さが十分に長い横ずれ断層の平均応力降下量が $\Delta\sigma = (2/\pi)[M_0/(LW^2)]$ で表されることを参考に想定した関係式であり、定数 c は断層の形状と境界条件により決まる応力形状係数を示す。また、(4.2-6) 式および(4.2-7) 式は、前章の一般的な動的応力降下量を考慮した場合における動学的断層モデルの検討結果から得られた経験的関係式である。

以上より、震源断層を記述するパラメータの数は、9個のパラメータに応力形状係数 c を加えたので、10個に増えている。対して、パラメータを求める関係式の数は、(4.2-1)式から(4.2-7)式の7つの式である。断層長さ L と震源断層の幅 W_{max} が与えられた場合、震源断層の面積 S が(4.2-1)式より、地震モーメント M_0 が(4.2-6)式より、平均すべり量 D が(4.2-3)式より、短周期レベル A が(4.2-7)式より求まるので、6つのパラメータは確定できる。一方、平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^\#$ 、アスペリティの面積 S_{asp} 、アスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^\#$ および応力形状係数 c の4つのパラメータは、(4.2-2)式と(4.2-4)式と(4.2-5)式だけでは確定できない。そこで、本研究では、動学的断層破壊シミュレーションを繰り返し行うことで、これらの4つのパラメータを確定した。

具体的には、はじめに、前章で求められた平均動的応力降下量の平均値を $\Delta\sigma^\#$ とし、これをもとに、(4.2-2)式と(4.2-4)式と(4.2-5)式から算定されるアスペリティの面積を S_{asp}^* 、アスペリティの動的応力降下量を $\Delta\sigma_{asp}^\#$ 、応力形状係数を c^* とする。ついで、これらのパラメータを用いて設定した暫定的な動学的断層モデルに対して、第1回目の動学的断層破壊シミュレーションを行う。その結果得られた最終すべり量から地震モーメント M_0^* を算出し、これが(4.2-6)式で確定した M_0 と異なる場合は、下式を用いて算定される平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#\#}$ をもとに動学的断層モデルを設定し直して、第2回目の動学的断層破壊シミュレーションを行う。

$$\Delta\sigma^{\#\#} = (M_0 / M_0^*) \Delta\sigma^\# \quad (4.2-8)$$

ここに、動学的断層破壊シミュレーションは非線形計算であるので、(4.2-8)式による平均応力降下量の補正では必ずしも解の収束性は保証されていないが、傾向としては、平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^\#$ と地震モーメント M_0 は比例すること（例えば、大中・松浦, 2002）を利用した。また、収束計算を適用したのは、平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^\#$ を変化させると、短周期レベル A も変化するため、アスペリティの面積 S_{asp} を再調整する必要があるためである。以上の手順を繰り返すことで、4つのパラメータ ($\Delta\sigma^\#$, S_{asp} , $\Delta\sigma_{asp}^\#$, c) を確定した。

以上による断層パラメータ算定の具体的な流れを図 4.2-2 に示す。

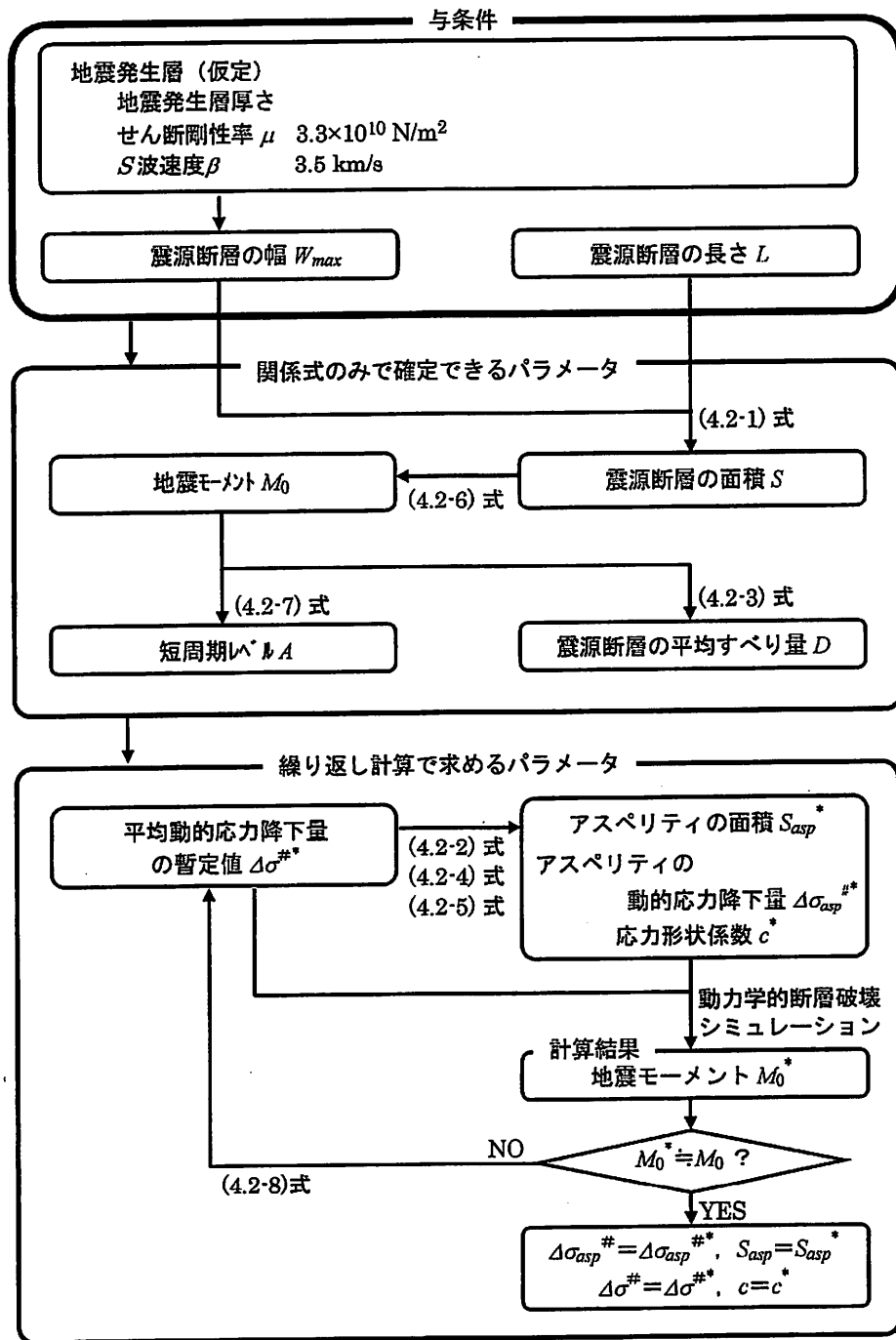


図 4.2-2 アスペリティを考慮した動力学的断層モデルのパラメータ算定の流れ

4.3 動力的断層モデルおよび動力的断層破壊シミュレーション結果

4.3.1 動力的断層モデル

(1) 巨視的断層モデル

検討に用いた動力的断層モデルの概要を図 4.3-1 に示す。対象とする断層のタイプは鉛直横ずれ断層とした。断層の破壊は地震発生層の上端から下端まで達すると想定し、断層幅 W_{max} を 15 km に設定した。断層規模の変化は断層長さ L により表現し、断層長さ L を 15 km, 20 km, 25 km, 30 km, 35 km, 50 km, 100 km, 300 km の 8 ケースを設定した。アスペリティは断層面内に 1 つとし、アスペリティ位置によるバラツキを考慮して、断層の左上端、断層の左下端、断層中心、断層中央上端、断層中央下端にそれぞれアスペリティを置いた 5 ケースを設定した。よって、検討する断層ケースは、断層長さ 8 ケース \times アスペリティ位置 5 ケースの計 40 ケースとなる。破壊開始点に相当する初期破壊領域は、アスペリティの中心位置に $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ の大きさで設置し、破壊が断層全体に至らない場合には、断層全体が破壊するまで初期破壊領域面積の大きさを 1 km 四方ずつ大きく設定した。

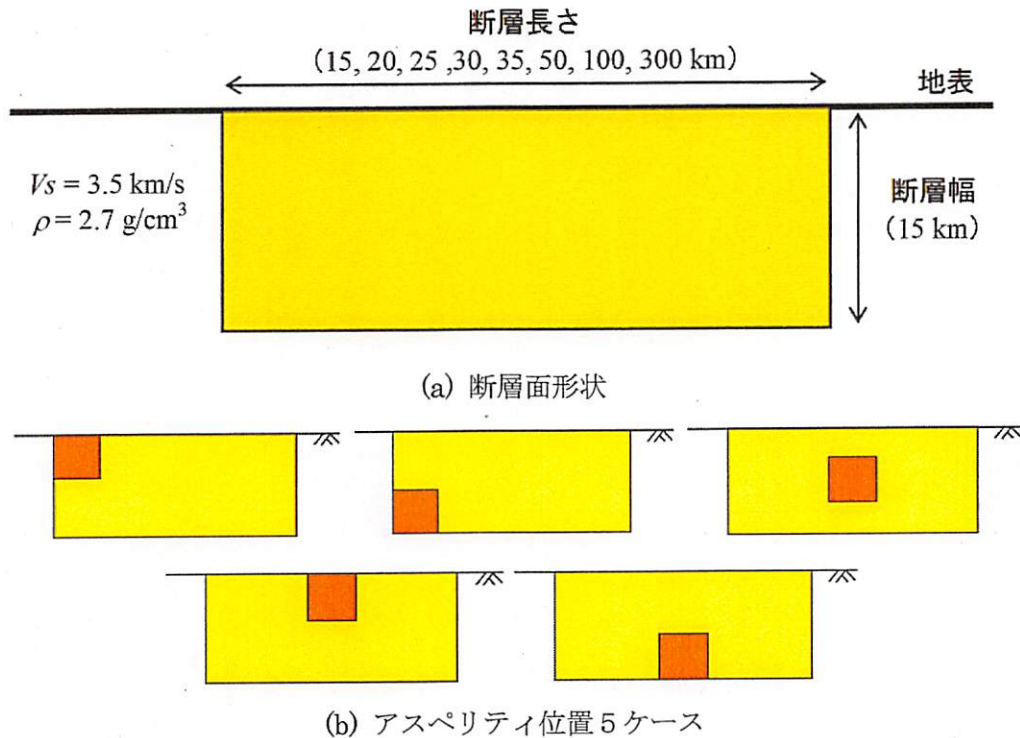
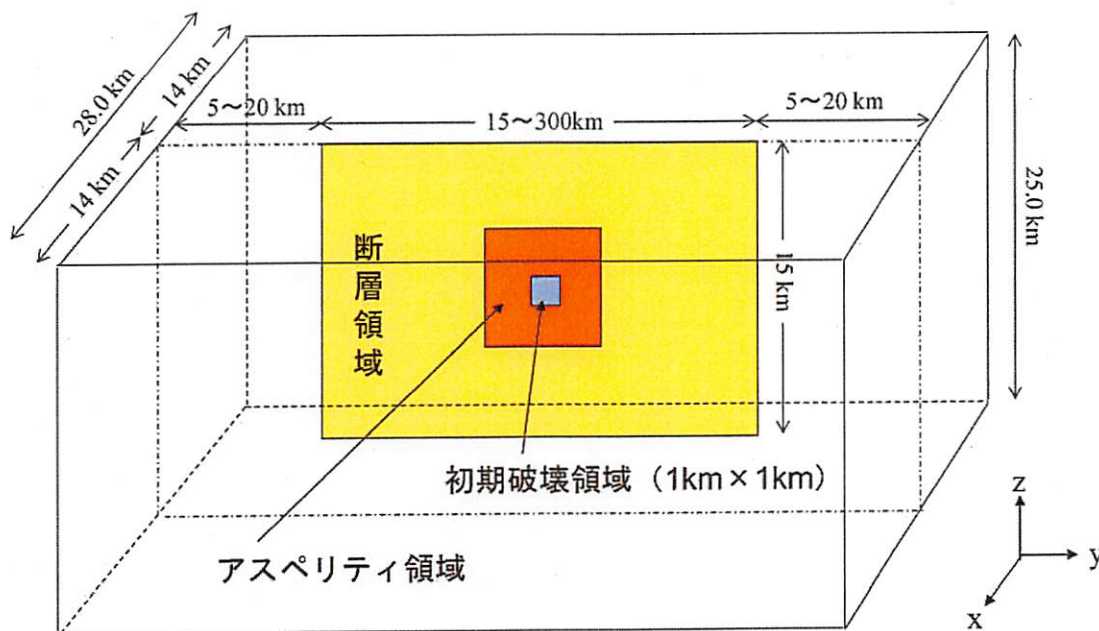


図 3.4-1 設定した断層モデルの概要図

(2) 動学的断層破壊シミュレーションと解析領域

動学的断層破壊シミュレーションは、3次元有限差分法 (Pitarka and Dalgner, 2003; Pitarka, 2005; Pitarka *et al.*, 2005) を用いた。差分格子幅は一辺が 0.1 km の立方体とした。解析領域は、断層面を中心として、断層の面外方向に 28 km、深さ方向に 25 km の範囲に固定し、断層面内方向は断層の両端からそれぞれ 5~20 km 延ばした規模に設定した。解析領域の媒質は地震発生層相当の、P 波速度 6.0 km/s, S 波速度 3.5 km/s, 密度 2.7 g/cm³ の均質地盤とした。解析領域の概要図を図 4.3-2 に示す。



解析媒質：均質【 $\alpha=6.0$ km/s, $\beta=3.5$ km/s, $\rho=2.7$ g/cm³】 格子間隔： $dx = dy = dz = 0.1$ km

図 4.3-2 動学的断層破壊シミュレーションの解析領域概要図

(3) すべり弱化則

動力的断層破壊シミュレーションでは、媒質を弾性体とし、その中に断層面を設定して、断層面の両側の媒質を摩擦構成則のひとつであるすべり弱化則（例えば、大中・松浦, 2002）に従ってつないだ。すべり弱化則の模式図を図 4.3-3 に示す。図中、横軸は断層の各グリッドにおけるすべり量 D で、縦軸はせん断応力 σ である。すべり弱化則における破壊プロセスは前章 3.4 節に記載している。本研究におけるアスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ は、前節で説明したとおり、動力的断層破壊シミュレーションの繰り返し計算で決めた。また、初期破壊領域の動的応力降下量はアスペリティと同じとし、背景領域の動的応力降下量は 0 とした。強度超過 SE は、初期破壊領域では破壊が始まるように -0.1 MPa とし、アスペリティおよび背景領域では破壊が断層全体に進行するように極めて小さい値 (0.01 MPa) とした。また、応力降下が安定するすべり量となる臨界すべり量 D_c は、断層全領域において、(4.2-3) 式から算定される平均すべり量 D の 0.3 倍に仮定した。

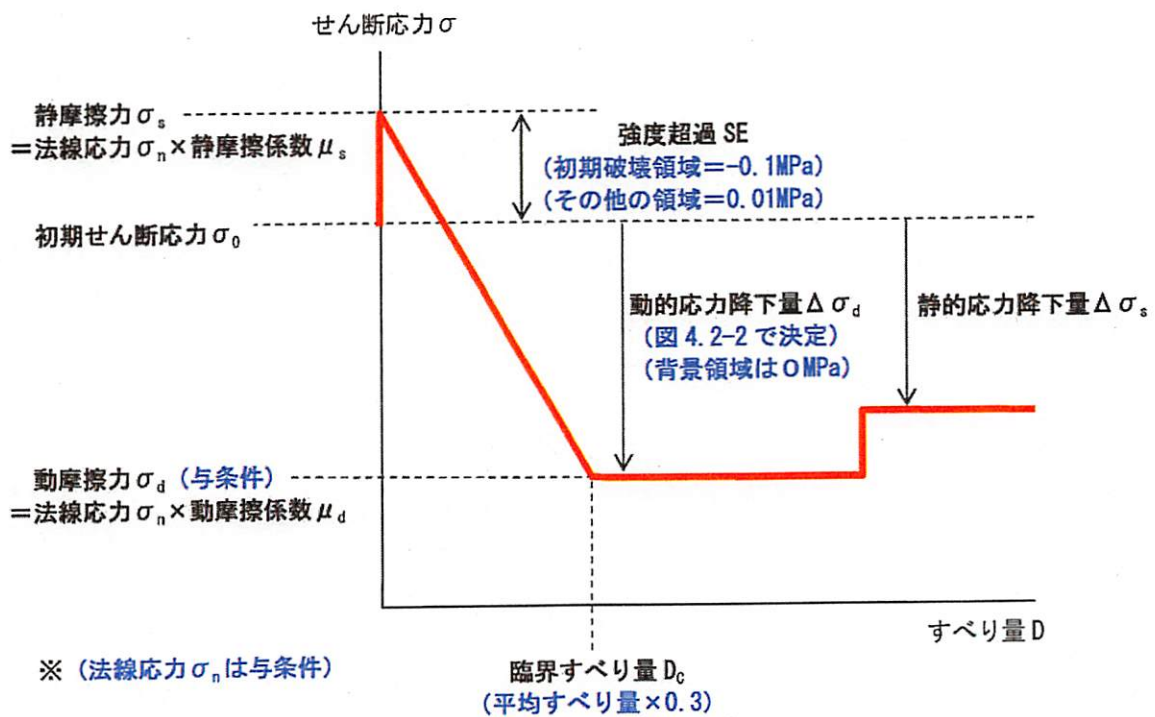


図 4.3-3 すべり弱化則の模式図 (青文字は与条件を示す)

(4) 動力的断層モデル

以上により設定した各断層ケースにおける動力的断層モデルのパラメータ諸元を表 4.3-1 に示す。また、各ケースにおける断層形状およびすべり弱化則のパラメータを図 4.3-4～図 4.3-43 にそれぞれ示す。なお、アスペリティの形状は正方形を原則としているが、アスペリティが設置していない側の断層端部（例えば、アスペリティを断層左上端に置いたケースでは、断層の左下端）まで達する場合には、断層端部とアスペリティの間に幅 1 km の背景領域を設けている。また、断層の最終すべり量は応力の絶対値に関わらず、応力降下量などの相対的な変化量に大きく依存することが経験上わかっていることから、すべり弱化則における法線応力（120 MPa）と動摩擦力（62.5 MPa）は、第 2 章で設定した値を仮定値として転用した。

表 4.3-1 動力学的断層モデルのパラメータ諸元一覧

(1) アスペリティ位置=断層左上端

断層長さ L [km]	断層幅 W_{max} [km]	アスペクト比 L/W	断層面積 S [km ²]	(4.2-6)式による地震モーメント M_0 [Nm]	(4.2-3)式の平均すべり量 D [m]	臨界すべり量 D_c [m]	(4.2-7)式による短周期レベル A [Nm/s ²]	アスペリティ面積 S_{asp} [km ²]	アスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ [MPa]	断層全体の平均動的応力降下量 $\Delta\sigma$ [MPa]	(4.3-1)式による地震モーメント M_0 [Nm]	応力形状係数 c
15	15	1.00	225	9.17E+18	1.23	0.37	8.42E+18	64.00	12.0	3.41	9.16E+18	1.26
20	15	1.33	300	1.48E+19	1.49	0.45	9.73E+18	86.49	11.9	3.43	1.47E+19	1.05
25	15	1.67	375	2.17E+19	1.75	0.52	1.09E+19	121.00	11.3	3.65	2.18E+19	0.94
30	15	2.00	450	2.97E+19	2.00	0.60	1.19E+19	169.00	10.4	3.91	2.97E+19	0.89
35	15	2.33	525	3.87E+19	2.23	0.67	1.29E+19	212.80	10.1	4.09	3.86E+19	0.84
50	15	3.33	750	6.76E+19	2.73	0.82	1.54E+19	308.00	10.1	4.15	6.77E+19	0.69
100	15	6.67	1500	1.55E+20	3.12	0.94	2.17E+19	551.60	10.6	3.90	1.55E+20	0.57
300	15	20.00	4500	4.67E+20	3.13	0.94	3.77E+19	1391.60	11.6	3.59	4.67E+20	0.52

(2) アスペリティ位置=断層左下端

断層長さ l [km]	断層幅 W_{max} [km]	アスペクト比 l/W	断層面積 S [km ²]	(4.2-6)式による地震モーメント M_0 [Nm]	(4.2-3)式の平均すべり量 D [m]	臨界すべり量 D_c [m]	(4.2-7)式による短周期レベル A [Nm/s ²]	アスペリティ面積 S_{asp} [km ²]	アスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ [MPa]	断層全体の平均動的応力降下量 $\Delta\sigma$ [MPa]	(4.3-1)式による地震モーメント M_0 [Nm]	応力形状係数 c
15	15	1.00	225	9.17E+18	1.23	0.37	8.42E+18	96.04	9.8	4.18	9.20E+18	1.53
20	15	1.33	300	1.48E+19	1.49	0.45	9.73E+18	125.44	9.9	4.14	1.48E+19	1.26
25	15	1.67	375	2.17E+19	1.75	0.52	1.09E+19	158.76	9.9	4.19	2.16E+19	1.09
30	15	2.00	450	2.97E+19	2.00	0.60	1.19E+19	197.40	9.7	4.26	2.98E+19	0.96
35	15	2.33	525	3.87E+19	2.23	0.67	1.29E+19	235.20	9.6	4.30	3.86E+19	0.88
50	15	3.33	750	6.76E+19	2.73	0.82	1.54E+19	345.80	9.5	4.38	6.76E+19	0.73
100	15	6.67	1500	1.55E+20	3.12	0.94	2.17E+19	621.60	10.0	4.14	1.55E+20	0.60
300	15	20.00	4500	4.67E+20	3.13	0.94	3.77E+19	1604.40	10.8	3.85	4.66E+20	0.56

表 4.3-1 動力学的断層モデルのパラメータ諸元一覧 (つづき)

(3) アスペリティ位置=断層中心

断層長さ L [km]	断層幅 W_{max} [km]	アスペクト比 L/W	断層面積 S [km ²]	(4.2-6)式による 地震モーメント M_0 [Nm]	(4.2-3)式の 平均 すべり量 D [m]	臨界 すべり量 D_c [m]	(4.2-7)式による 短周期レベル A [Nm/s ²]	アスペリティ面積 S_{asp} [km ²]	アスペリティの動的 応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ [MPa]	断層全体の 平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ [MPa]	(4.3-1)式による 地震モーメント M_0 [Nm]	応力 形状 係数 c
15	15	1.00	225	9.17E+18	1.23	0.37	8.42E+18	53.29	13.1	3.10	9.18E+18	1.14
20	15	1.33	300	1.48E+19	1.49	0.45	9.73E+18	67.24	13.5	3.03	1.48E+19	0.92
25	15	1.67	375	2.17E+19	1.75	0.52	1.09E+19	86.49	13.3	3.07	2.17E+19	0.79
30	15	2.00	450	2.97E+19	2.00	0.60	1.19E+19	110.25	12.9	3.16	2.97E+19	0.72
35	15	2.33	525	3.87E+19	2.23	0.67	1.29E+19	136.89	12.6	3.29	3.88E+19	0.67
50	15	3.33	750	6.76E+19	2.73	0.82	1.54E+19	217.10	11.9	3.44	6.75E+19	0.57
100	15	6.67	1500	1.55E+20	3.12	0.94	2.17E+19	369.20	13.0	3.20	1.55E+20	0.46
300	15	20.00	4500	4.67E+20	3.13	0.94	3.77E+19	1021.80	13.5	3.07	4.67E+20	0.44

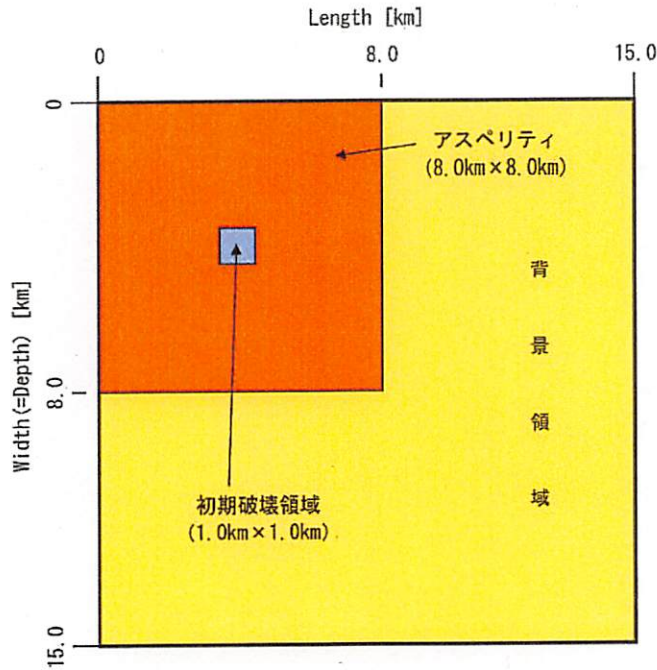
(4) アスペリティ位置=断層中央上端

断層長さ L [km]	断層幅 W_{max} [km]	アスペクト比 L/W	断層面積 S [km ²]	(4.2-6)式による 地震モーメント M_0 [Nm]	(4.2-3)式の 平均 すべり量 D [m]	臨界 すべり量 D_c [m]	(4.2-7)式による 短周期レベル A [Nm/s ²]	アスペリティ面積 S_{asp} [km ²]	アスペリティの動的 応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ [MPa]	断層全体の 平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ [MPa]	(4.3-1)式による 地震モーメント M_0 [Nm]	応力 形状 係数 c
15	15	1.00	225	9.17E+18	1.23	0.37	8.42E+18	40.96	15.0	2.73	9.16E+18	1.01
20	15	1.33	300	1.48E+19	1.49	0.45	9.73E+18	51.84	15.3	2.64	1.48E+19	0.81
25	15	1.67	375	2.17E+19	1.75	0.52	1.09E+19	67.24	15.1	2.71	2.18E+19	0.70
30	15	2.00	450	2.97E+19	2.00	0.60	1.19E+19	84.64	14.7	2.76	2.96E+19	0.63
35	15	2.33	525	3.87E+19	2.23	0.67	1.29E+19	108.16	14.1	2.90	3.86E+19	0.59
50	15	3.33	750	6.76E+19	2.73	0.82	1.54E+19	204.40	12.3	3.35	6.76E+19	0.56
100	15	6.67	1500	1.55E+20	3.12	0.94	2.17E+19	345.80	13.4	3.09	1.55E+20	0.45
300	15	20.00	4500	4.67E+20	3.13	0.94	3.77E+19	942.20	14.1	2.95	4.67E+20	0.43

表 4.3-1 動力学的断層モデルのパラメータ諸元一覧 (つづき)

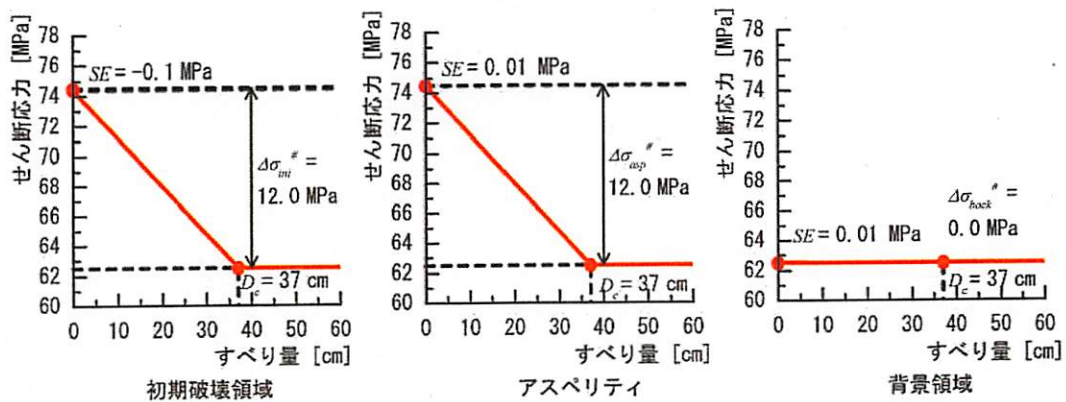
(5) アスペリティ位置=断層中央下端

断層長さ L [km]	断層幅 W_{max} [km]	アスペクト比 L/W	断層面積 S [km ²]	(4.2-6)式による 地震モーメント M_0 [Nm]	(4.2-3)式の 平均 すべり量 D [m]	臨界 すべり量 D_c [m]	(4.2-7)式によ る 短周期レベル A [Nm/s ²]	アスペリ ティ面積 S_{asp} [km ²]	アスペリ ティの動的 応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^d$ [MPa]	断層全体の 平均動的応 力降下量 $\Delta\sigma^d$ [MPa]	(4.3-1)式による 地震モーメント M_0 [Nm]	応力 形状 係数 c
15	15	1.00	225	9.17E+18	1.23	0.37	8.42E+18	79.21	10.7	3.77	9.15E+18	1.39
20	15	1.33	300	1.48E+19	1.49	0.45	9.73E+18	96.04	11.3	3.62	1.47E+19	1.10
25	15	1.67	375	2.17E+19	1.75	0.52	1.09E+19	118.81	11.4	3.61	2.16E+19	0.94
30	15	2.00	450	2.97E+19	2.00	0.60	1.19E+19	144.00	11.3	3.62	2.96E+19	0.82
35	15	2.33	525	3.87E+19	2.23	0.67	1.29E+19	169.00	11.3	3.64	3.88E+19	0.74
50	15	3.33	750	6.76E+19	2.73	0.82	1.54E+19	242.20	11.3	3.65	6.76E+19	0.61
100	15	6.67	1500	1.55E+20	3.12	0.94	2.17E+19	417.20	12.2	3.39	1.55E+20	0.49
300	15	20.00	4500	4.67E+20	3.13	0.94	3.77E+19	1142.40	12.8	3.25	4.67E+20	0.47



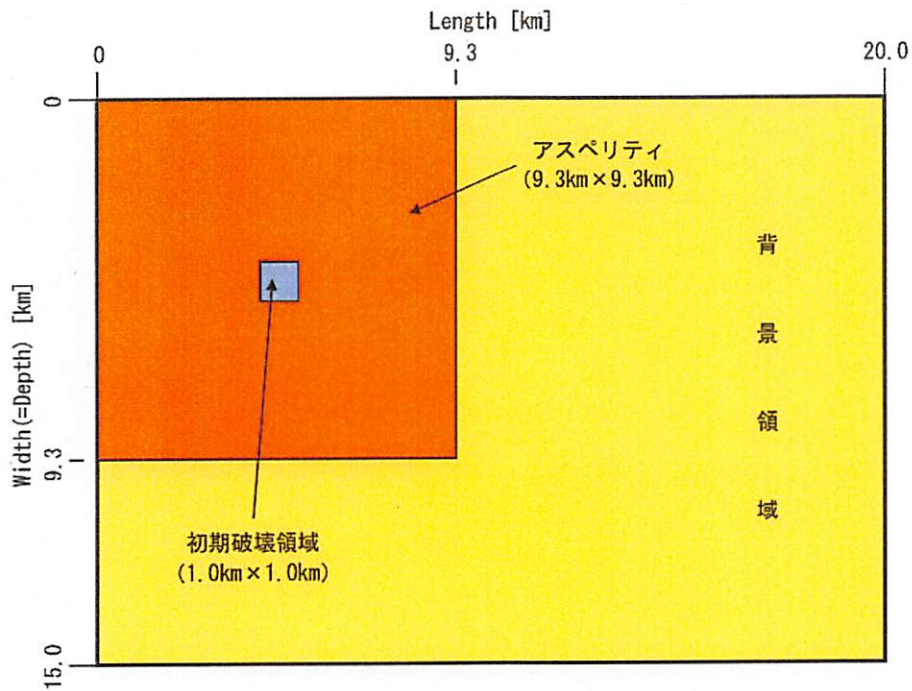
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	12.0	12.0	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	74.40	74.51	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.62000	0.62092	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	74.5	74.5	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	37	37	37



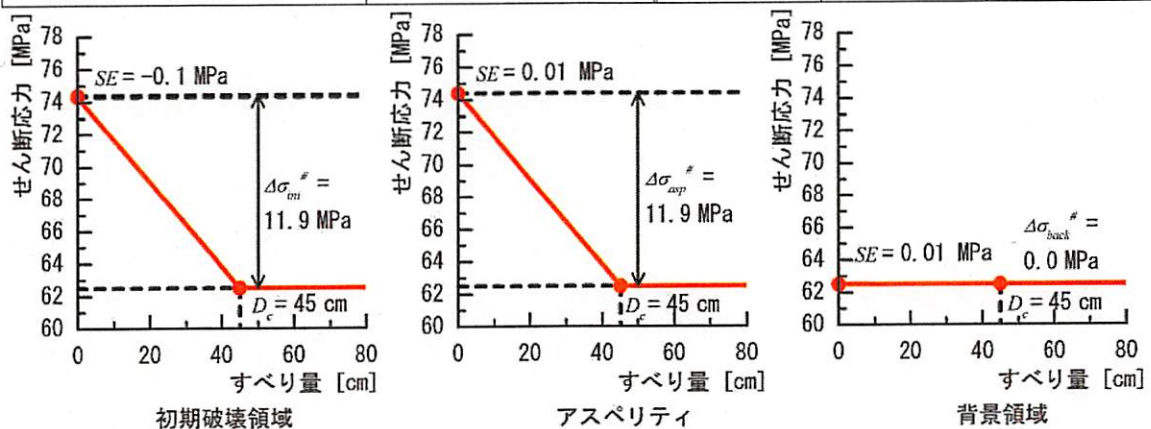
(b) すべり弱化則

図 4.3-4 動学的断層モデル (アスペリティ=断層左上端, 断層長さ 15 km)



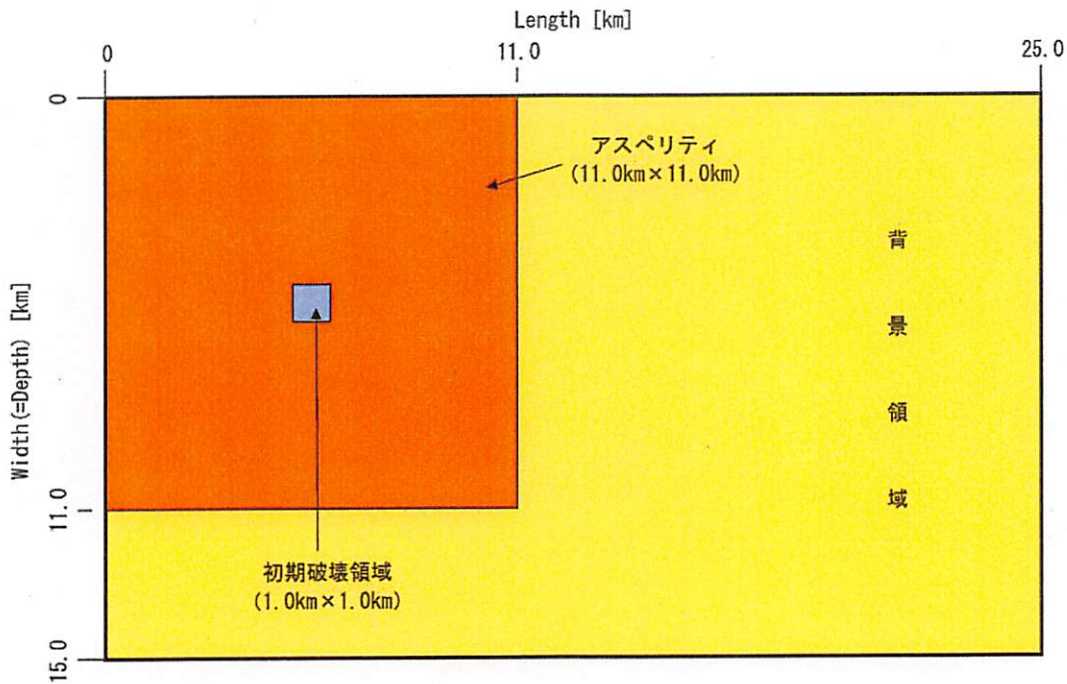
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\sigma}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	11.9	11.9	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	74.30	74.41	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.61917	0.62008	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	74.4	74.4	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	45	45	45



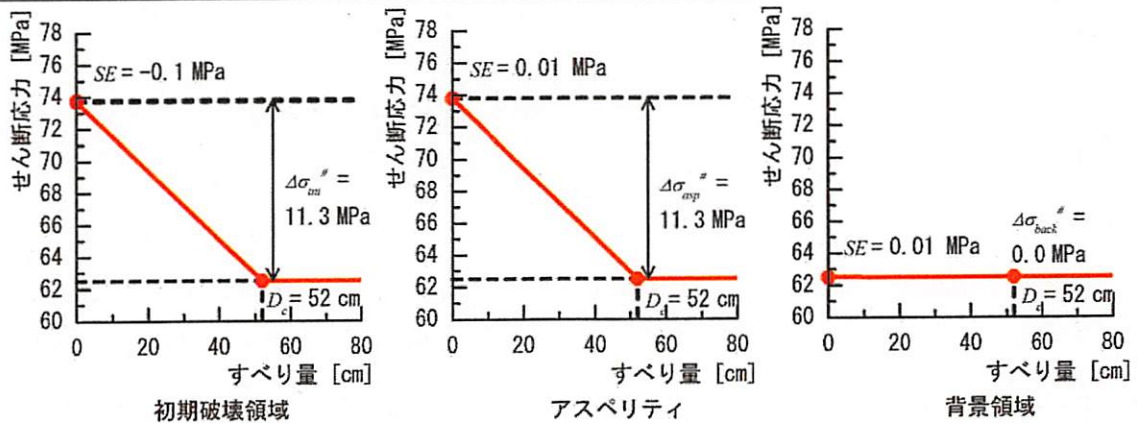
(b) すべり弱化則

図 4.3-5 動学的断層モデル (アスペリティ=断層左上端, 断層長さ 20 km)



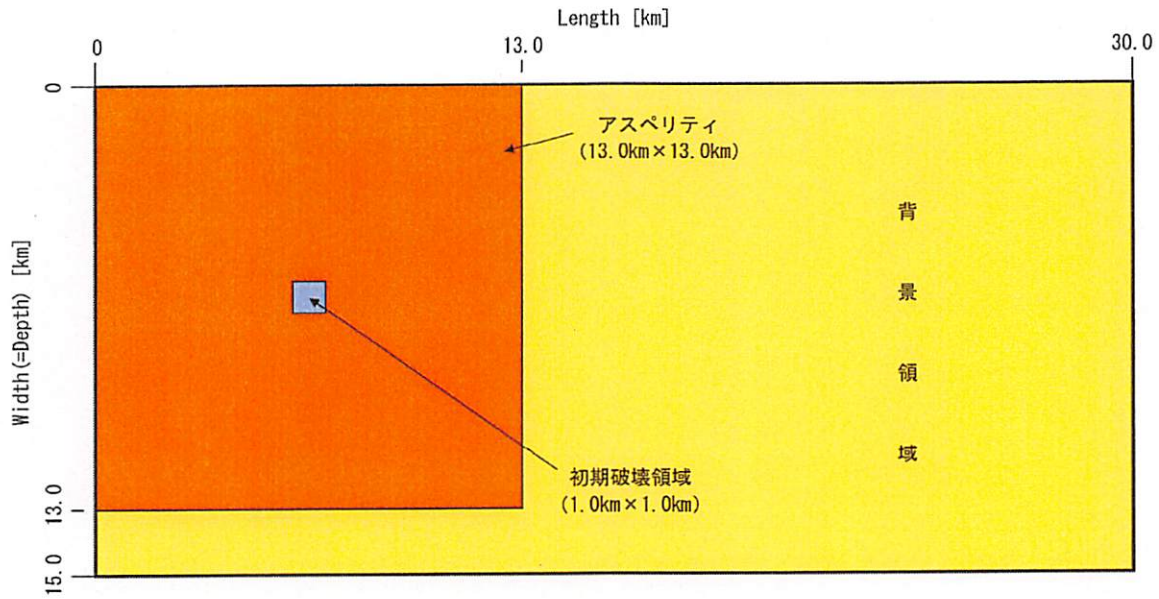
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	11.3	11.3	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	73.70	73.81	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.61917	0.62008	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	73.8	73.8	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	52	52	52



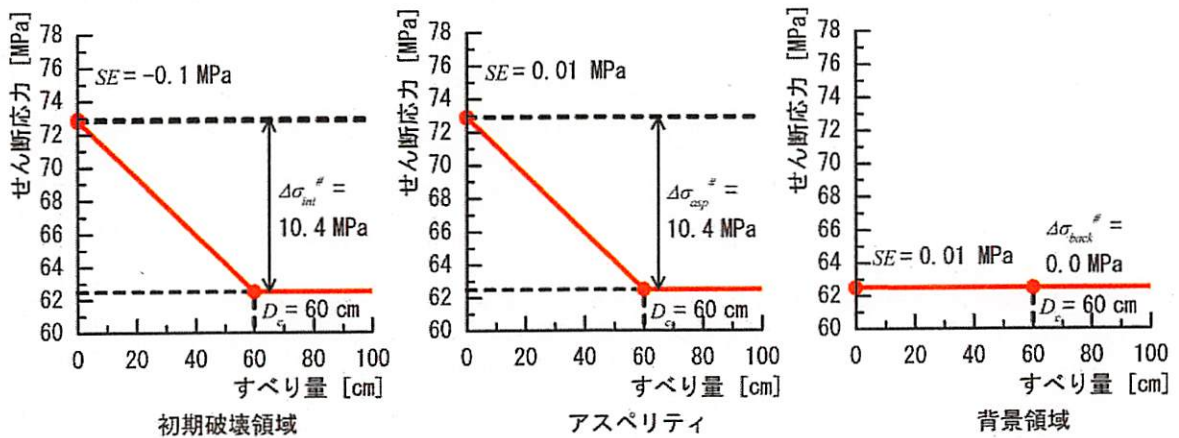
(b) すべり弱化解

図 4.3-6 動学的断層モデル (アスペリティ=断層左上端, 断層長さ 25 km)



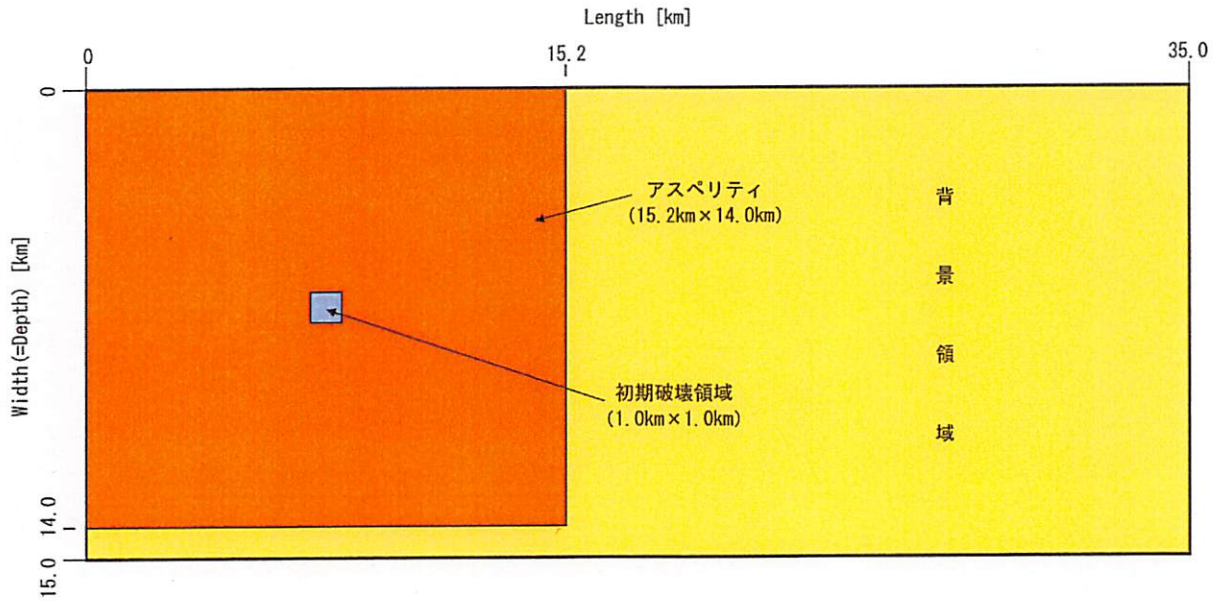
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\sigma}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	10.4	10.4	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦係数 μ_d	仮定	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60667	0.60758	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	72.9	72.9	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	60	60	60



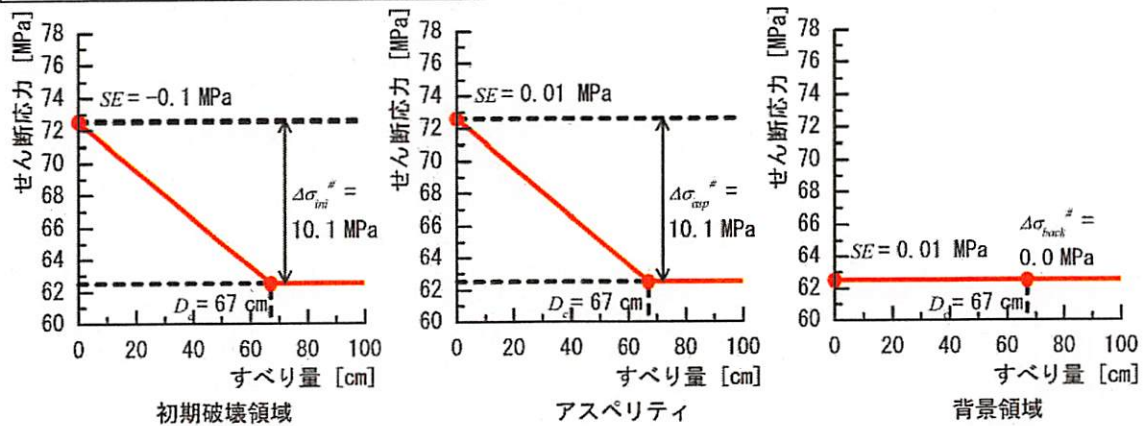
(b) すべり弱化則

図 4.3-7 動学的断層モデル (アスペリティ=断層左上端, 断層長さ 30 km)



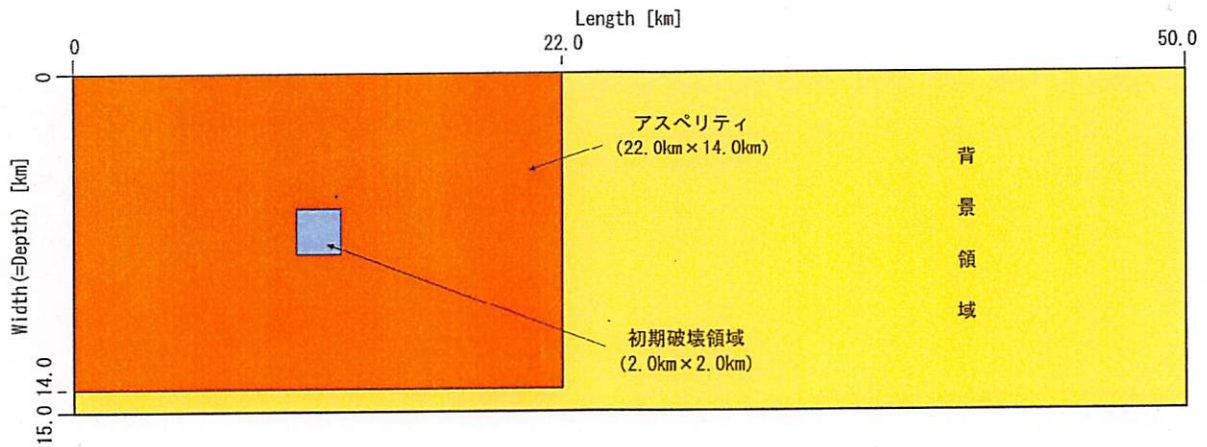
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{d}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	10.1	10.1	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	72.50	72.61	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60417	0.60508	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	72.6	72.6	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	67	67	67



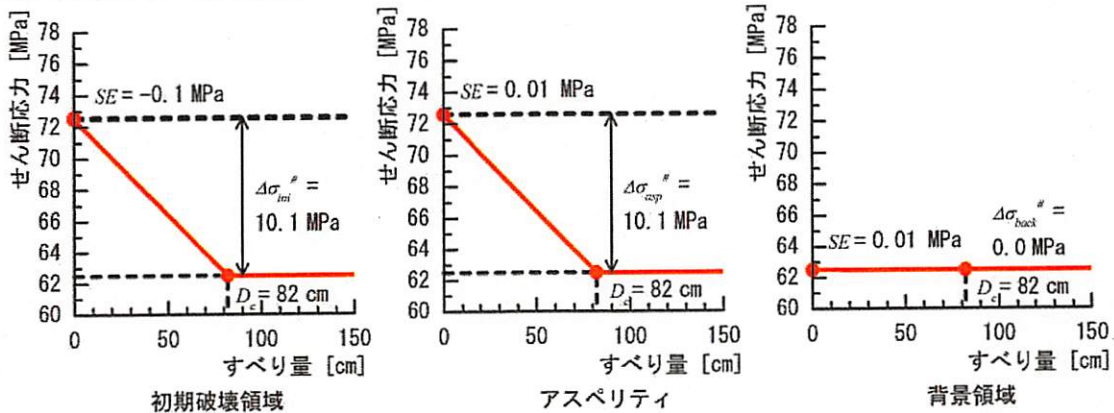
(b) すべり弱化則

図 4.3-8 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層左上端, 断層長さ 35 km)



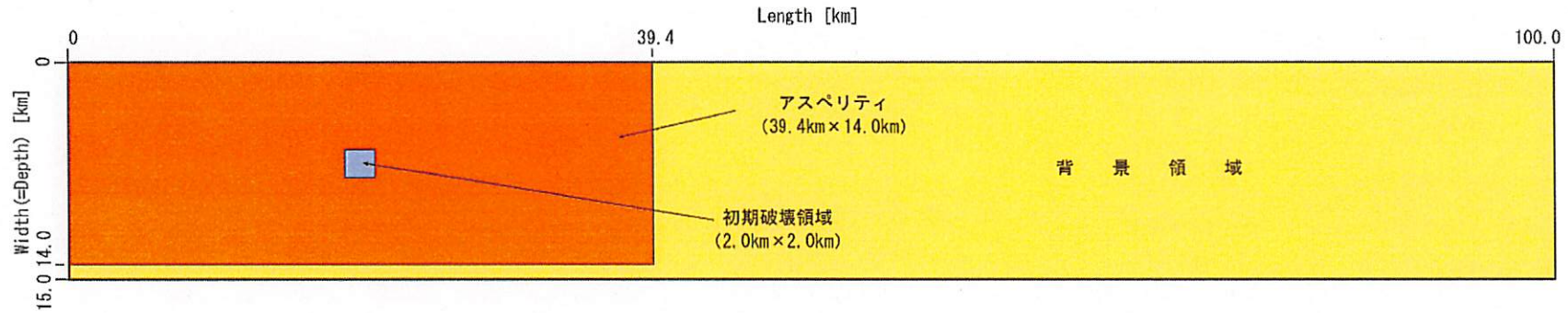
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	10.1	10.1	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	72.50	72.61	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60417	0.60508	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	72.6	72.6	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	82	82	82



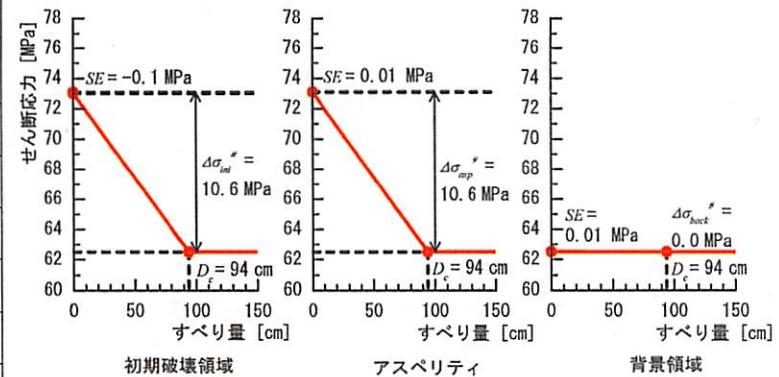
(b) すべり弱化解

図 4.3-9 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層左上端, 断層長さ 50 km)



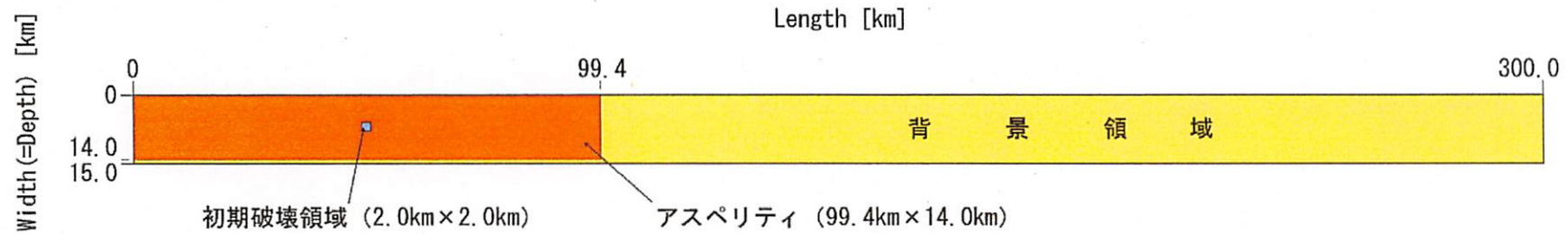
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	断層領域	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	10.6	10.6	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	73.00	73.11	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60833	0.60925	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	73.1	73.1	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	94	94	94



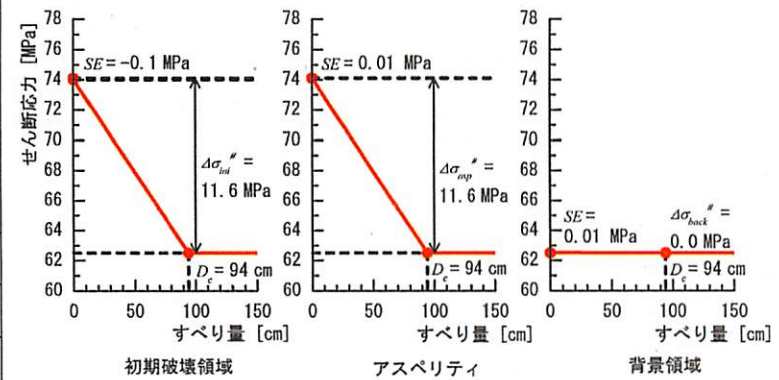
(b) すべり弱化則

図 4.3-10 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層左上端, 断層長さ 100 km)



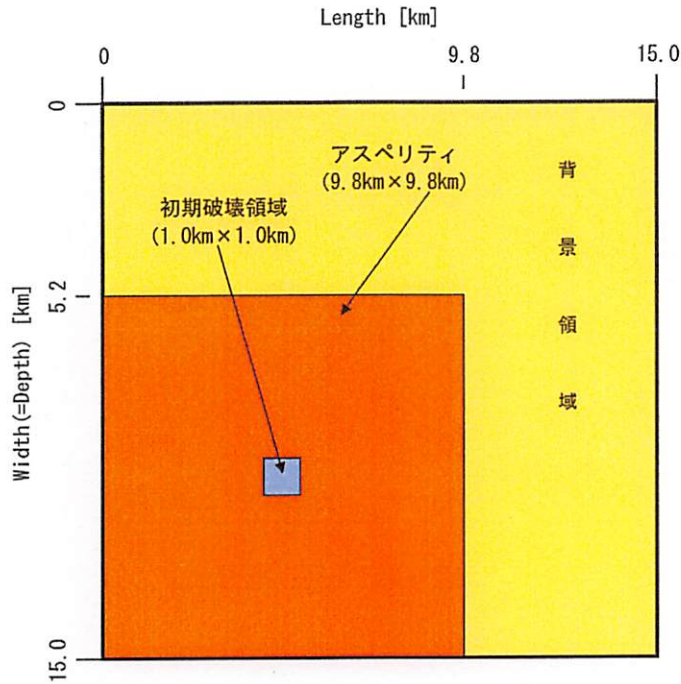
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	断層領域	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	11.6	11.6	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	74.00	74.11	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.61667	0.61758	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	74.1	74.1	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	94	94	94



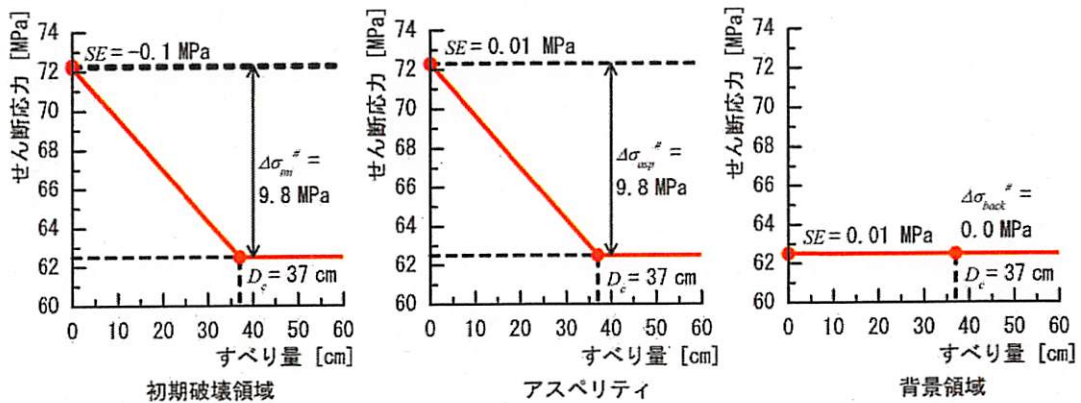
(b) すべり弱化則

図 4.3-11 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層左上端, 断層長さ 300 km)



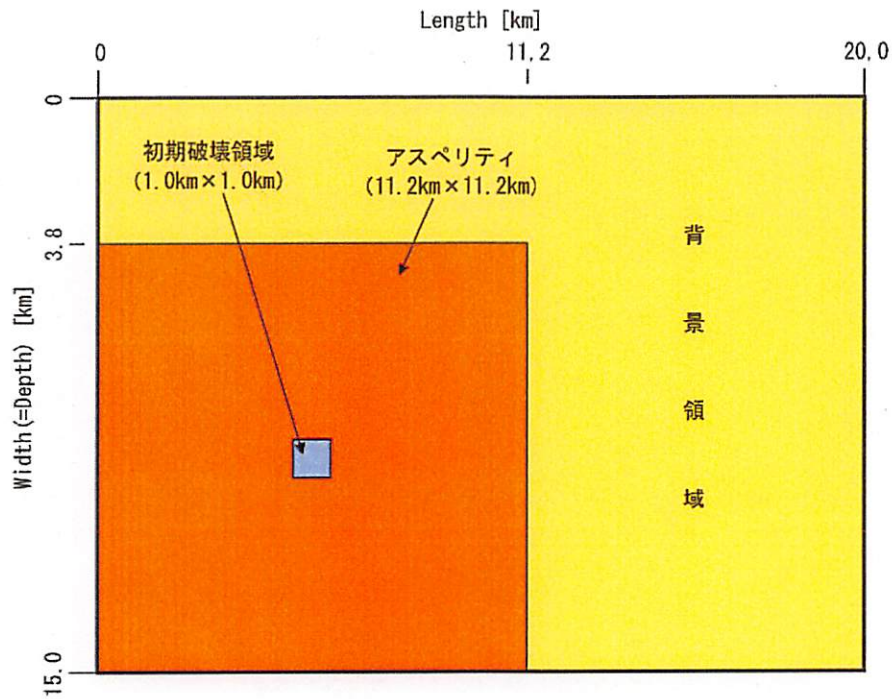
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	9.8	9.8	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	72.20	72.31	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60167	0.60258	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	72.3	72.3	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	37	37	37



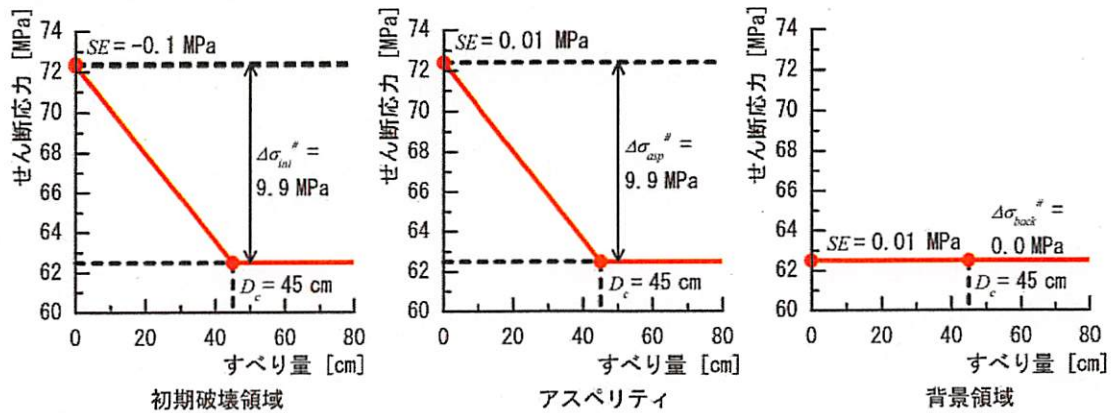
(b) すべり弱化則

図 4.3-12 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層左下端, 断層長さ 15 km)



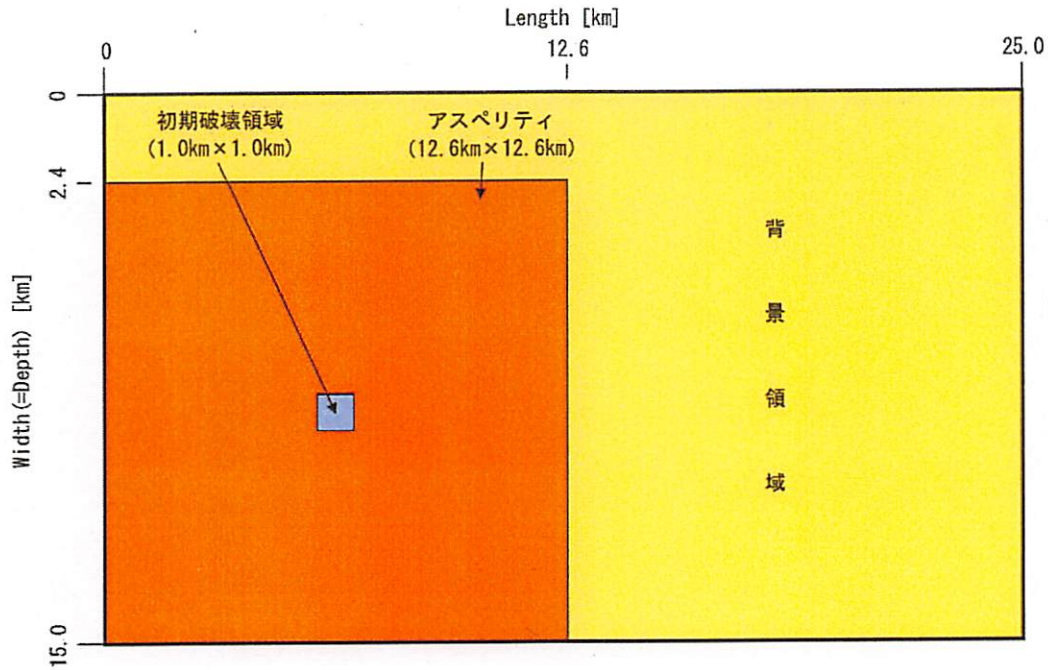
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	9.9	9.9	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	72.30	72.41	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60250	0.60342	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	72.4	72.4	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	45	45	45



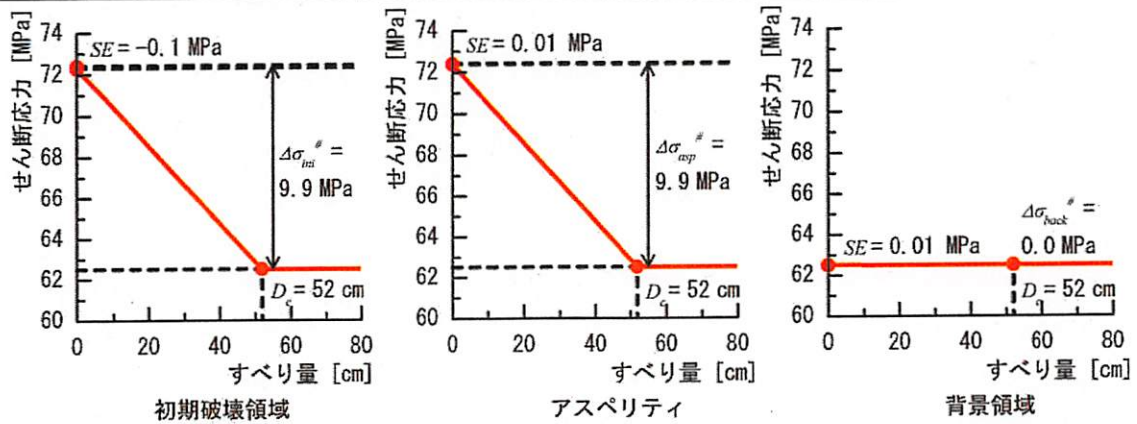
(b) すべり弱化則

図 4.3-13 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層左下端, 断層長さ 20 km)



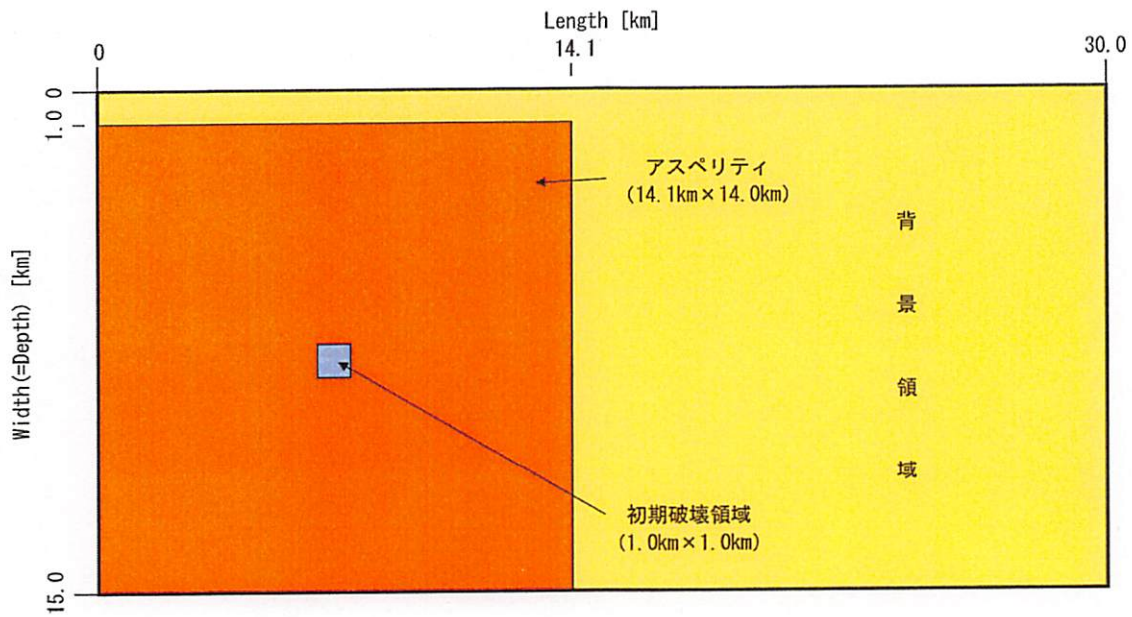
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	9.9	9.9	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	72.30	72.41	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60250	0.60342	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	72.4	72.4	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	52	52	52



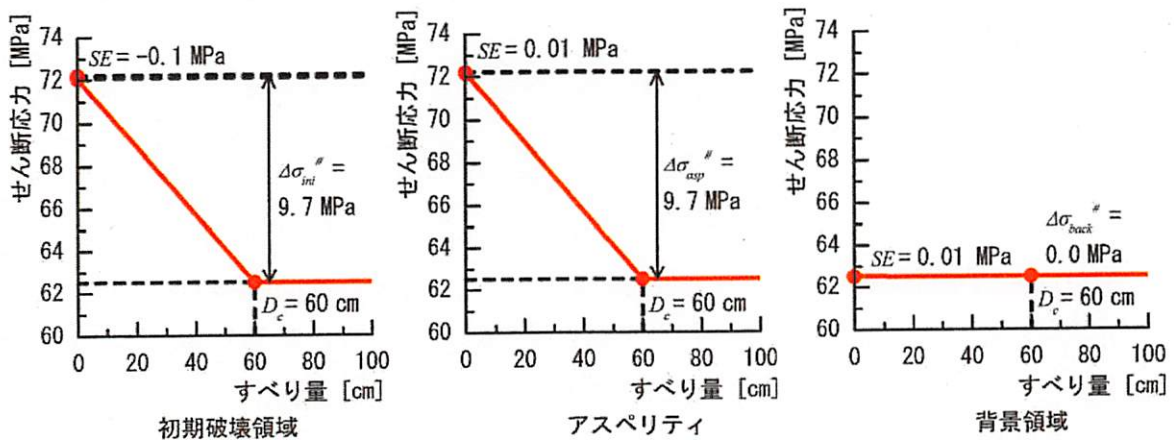
(b) すべり弱化則

図 4.3-14 動学的断層モデル (アスペリティ=断層左下端, 断層長さ 25 km)



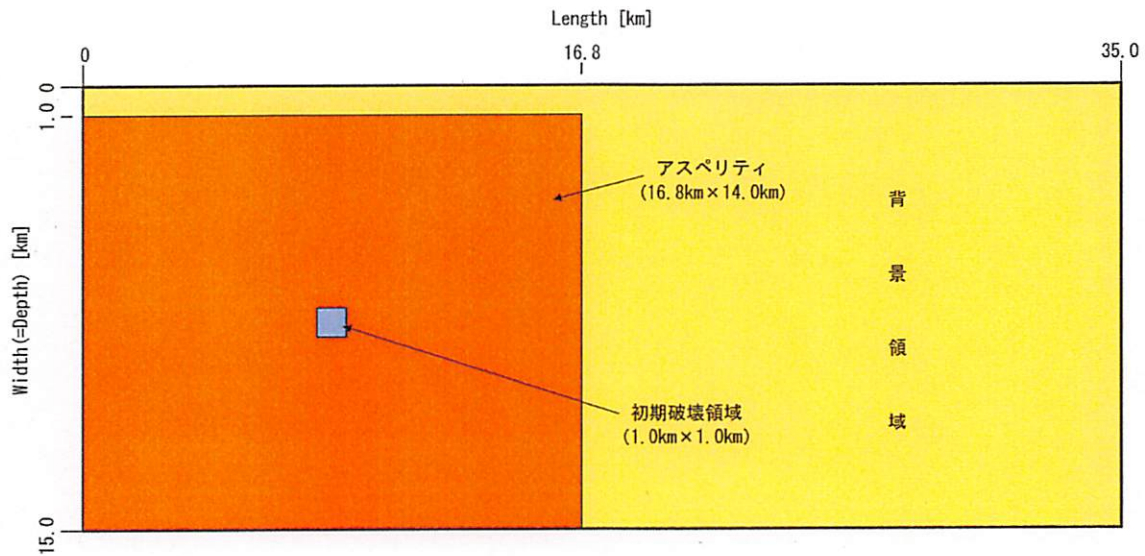
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	9.7	9.7	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	72.10	72.21	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60083	0.60175	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	72.2	72.2	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	60	60	60



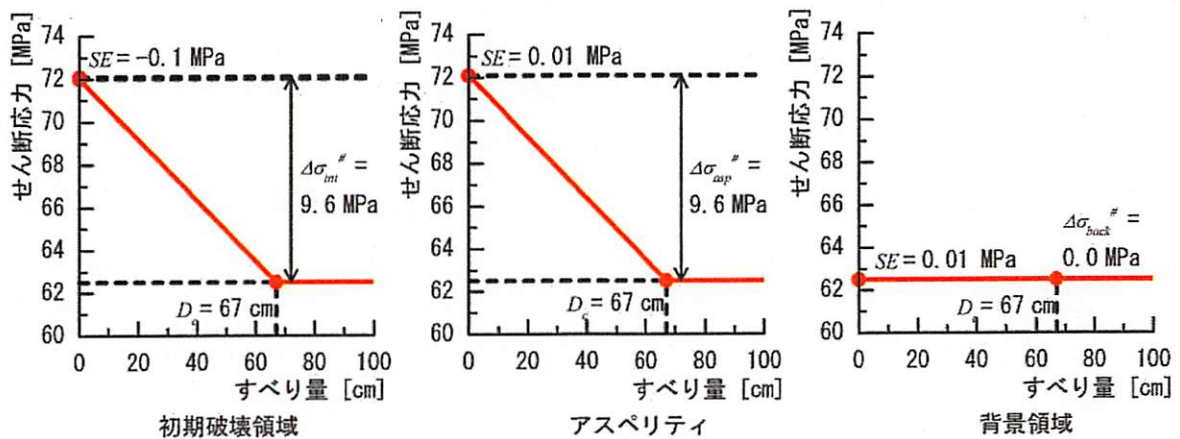
(b) すべり弱化則

図 4.3-15 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層左下端, 断層長さ 30 km)



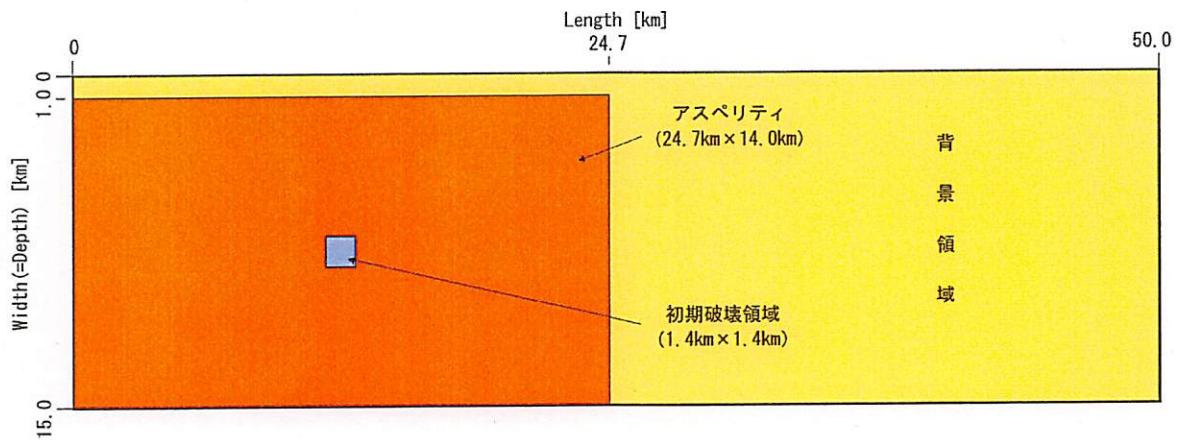
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\sigma}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	9.6	9.6	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60000	0.60092	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	72.1	72.1	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	67	67	67



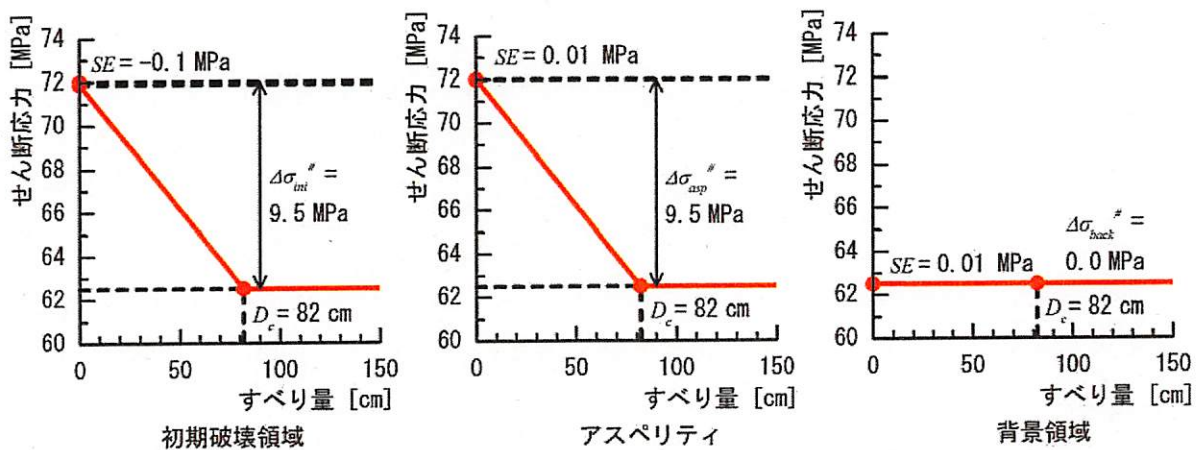
(b) すべり弱化解

図 4.3-16 動学的断層モデル (アスペリティ=断層左下端, 断層長さ 35 km)



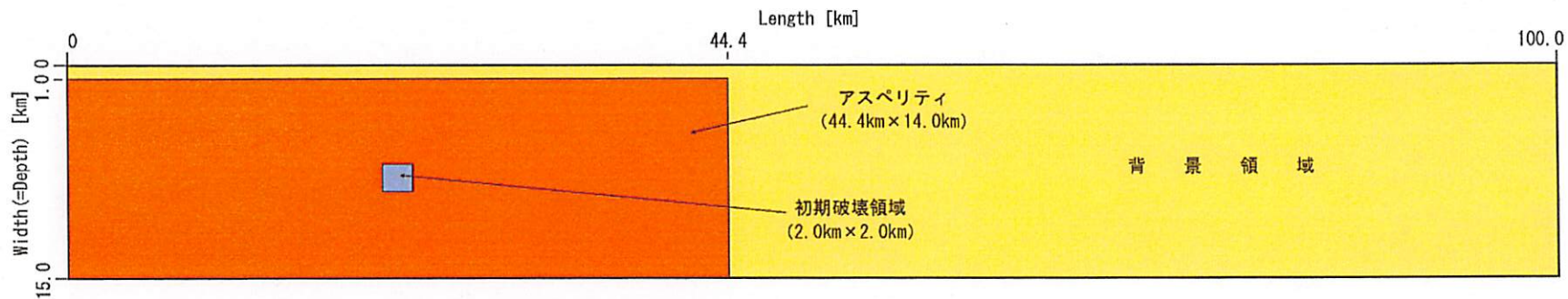
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力低下量 $\Delta\sigma_{\sigma}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	9.5	9.5	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	71.90	72.01	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.59917	0.60008	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	72.0	72.0	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	82	82	82



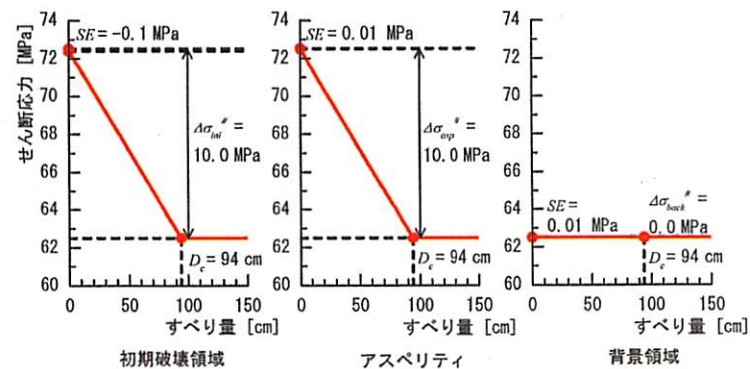
(b) すべり弱化則

図 4.3-17 動学的断層モデル (アスペリティ=断層左下端, 断層長さ 50 km)



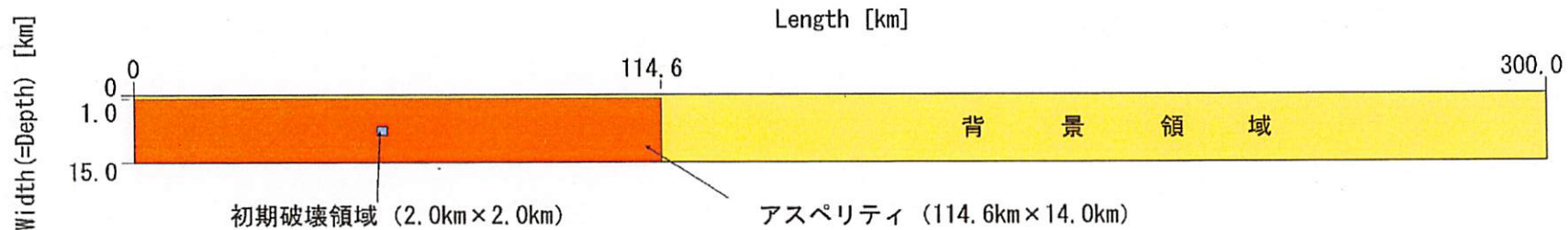
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	断層領域	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	10.0	10.0	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	72.40	72.51	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60333	0.60425	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	72.5	72.5	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	94	94	94



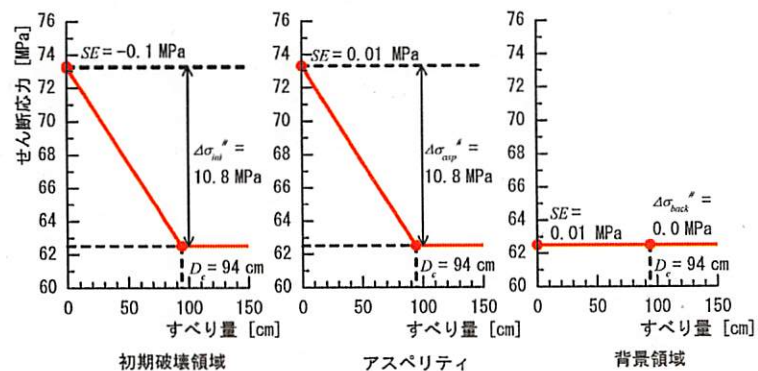
(b) すべり弱化則

図 4.3-18 動学的断層モデル (アスペリティ=断層左下端, 断層長さ 100 km)



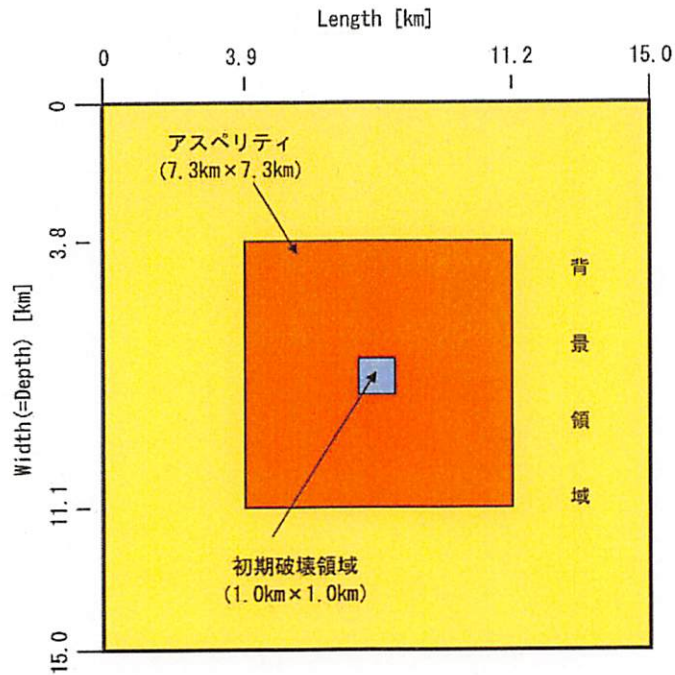
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	断層領域	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_a^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	10.8	10.8	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	73.20	73.31	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.61000	0.61092	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	73.3	73.3	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	94	94	94



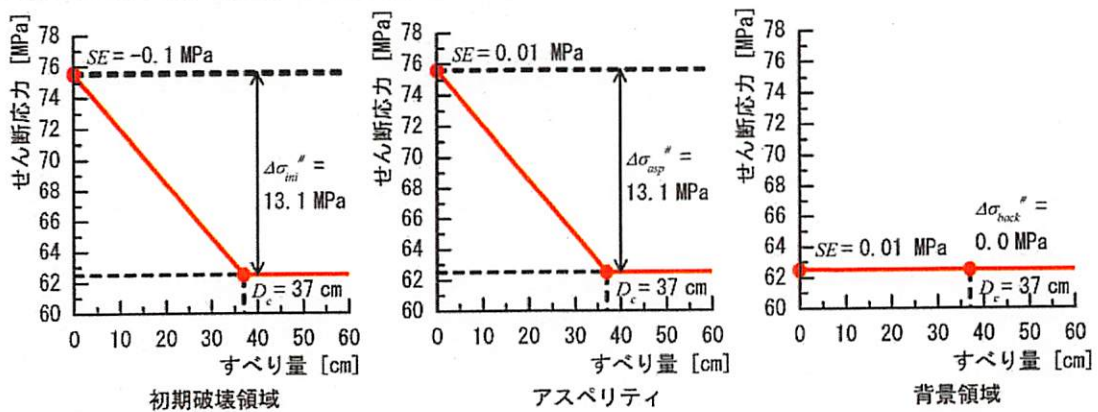
(b) すべり弱化則

図 4.3-19 動学的断層モデル (アスペリティ=断層左下端, 断層長さ 300 km)



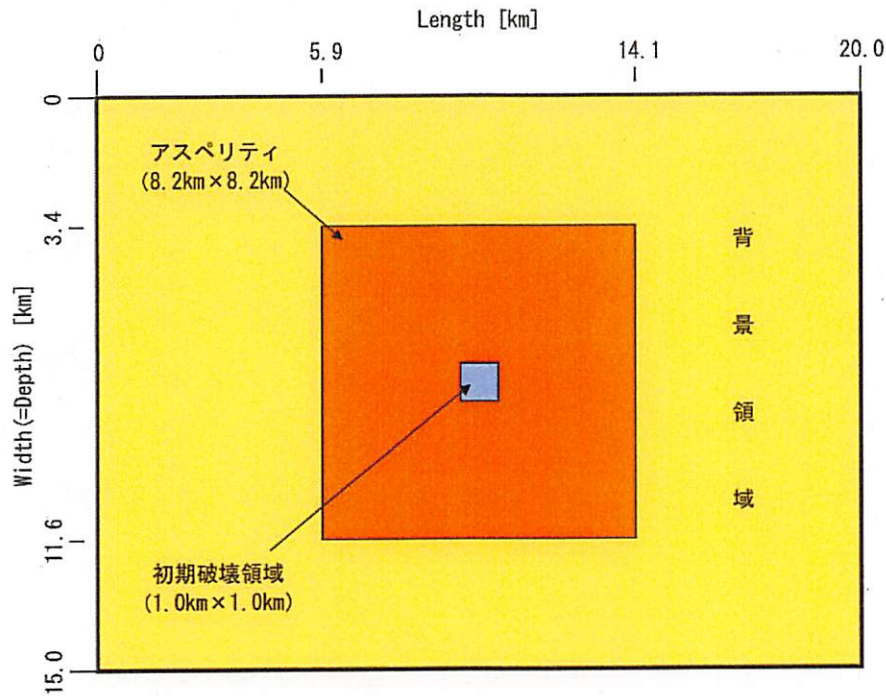
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	13.1	13.1	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	75.50	75.61	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.62917	0.63008	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	75.6	75.6	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	37	37	37



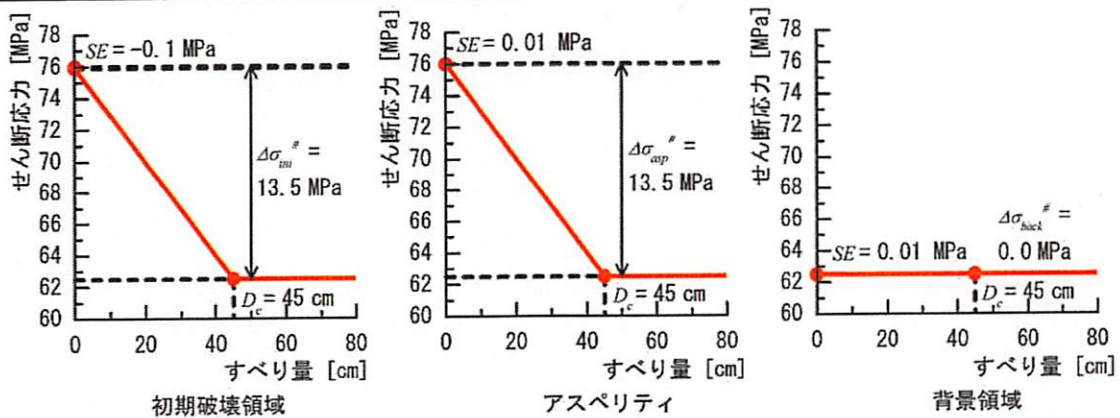
(b) すべり弱化則

図 4.3-20 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央, 断層長さ 15 km)



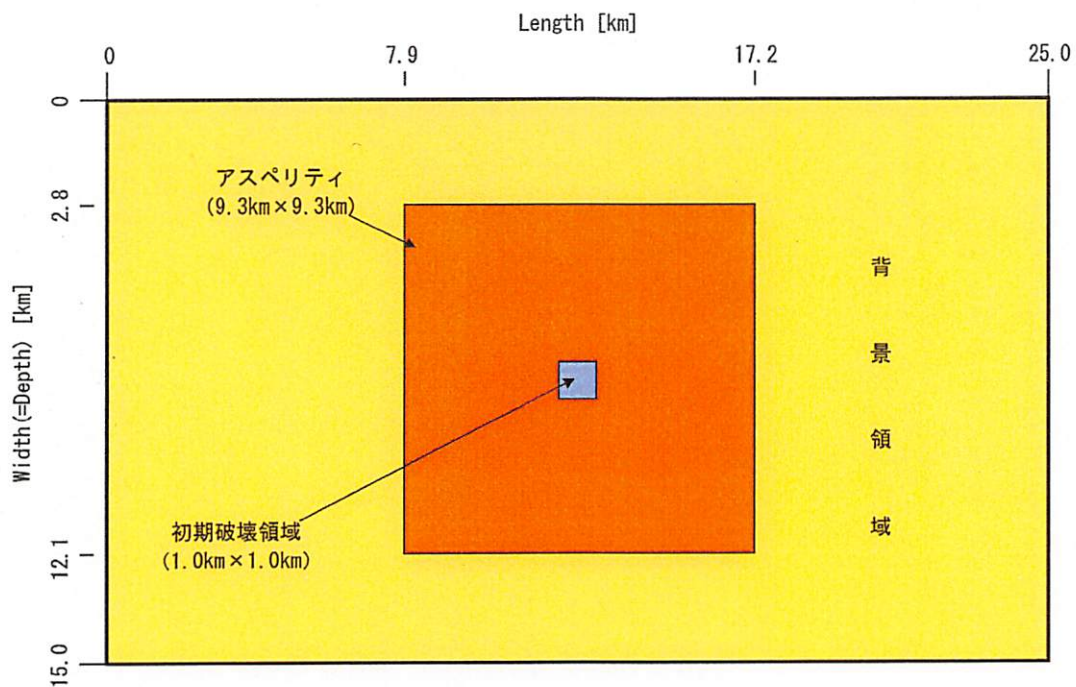
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_a^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	13.5	13.5	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	75.90	76.01	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.63250	0.63342	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	76.0	76.0	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	45	45	45



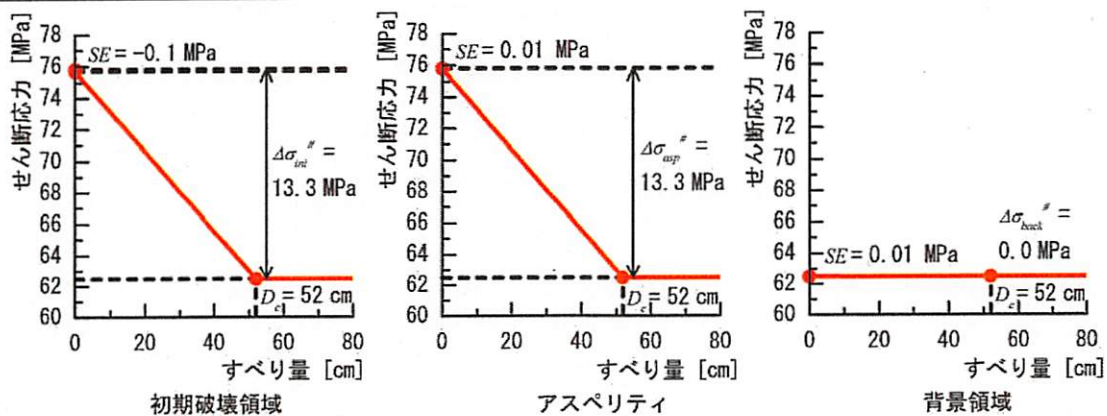
(b) すべり弱化則

図 4.3-21 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央, 断層長さ 20 km)



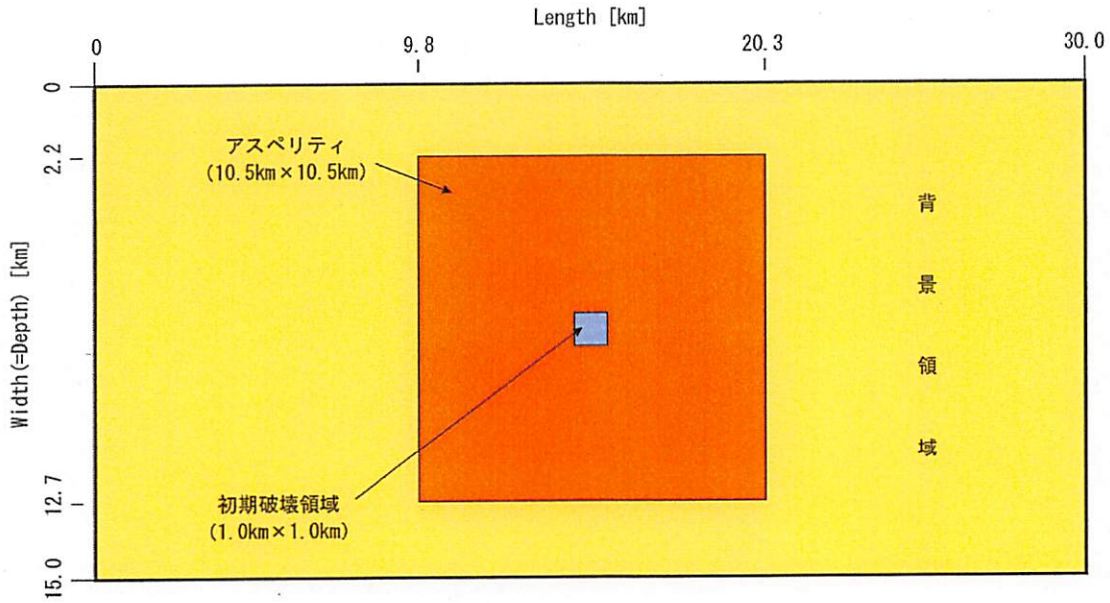
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_a^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	13.3	13.3	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.63083	0.63175	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	75.8	75.8	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	52	52	52



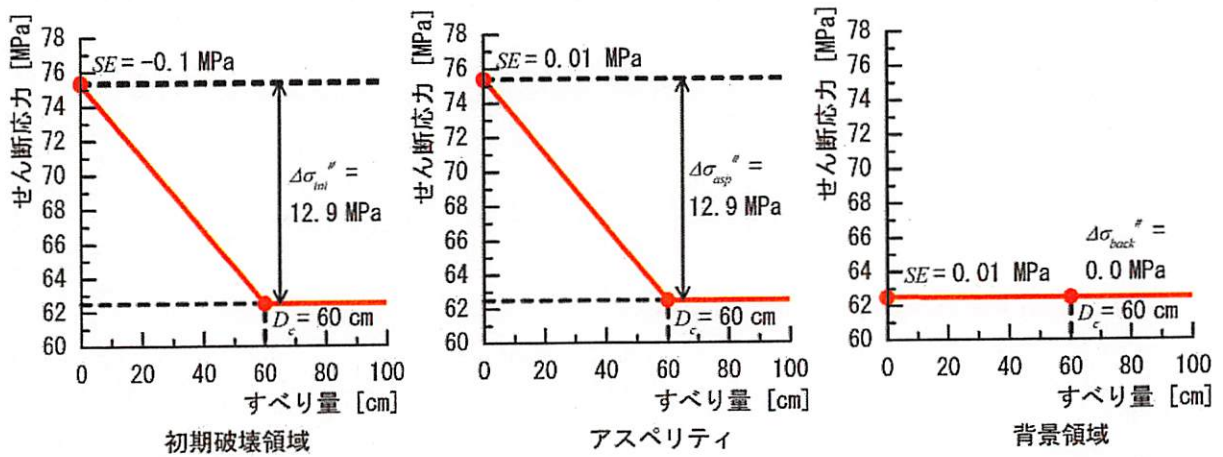
(b) すべり弱化則

図 4.3-22 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央, 断層長さ 25 km)



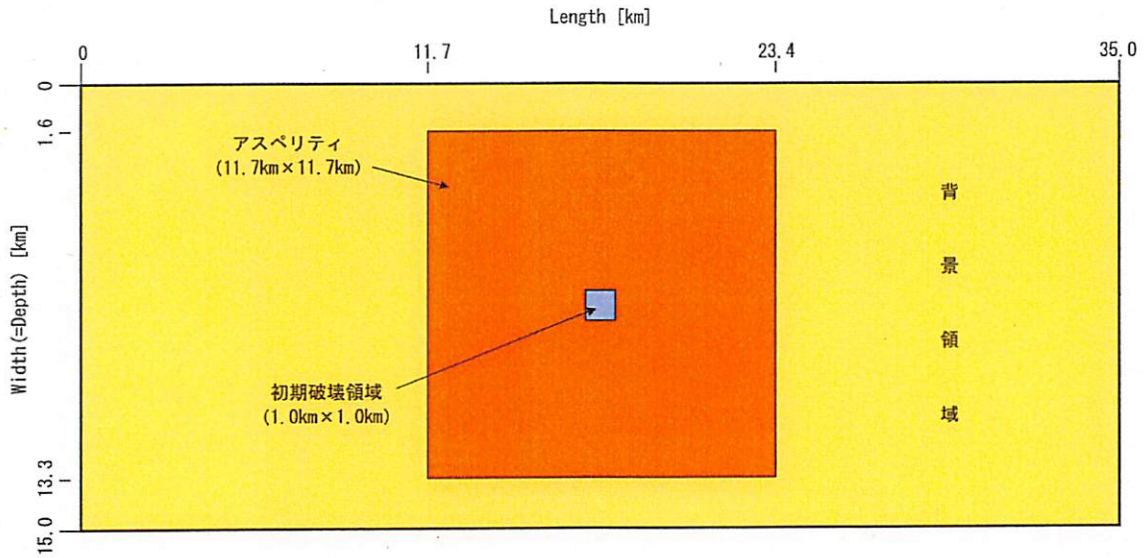
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\sigma}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	12.9	12.9	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	75.30	75.41	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.62750	0.62841	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	75.4	75.4	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	60	60	60



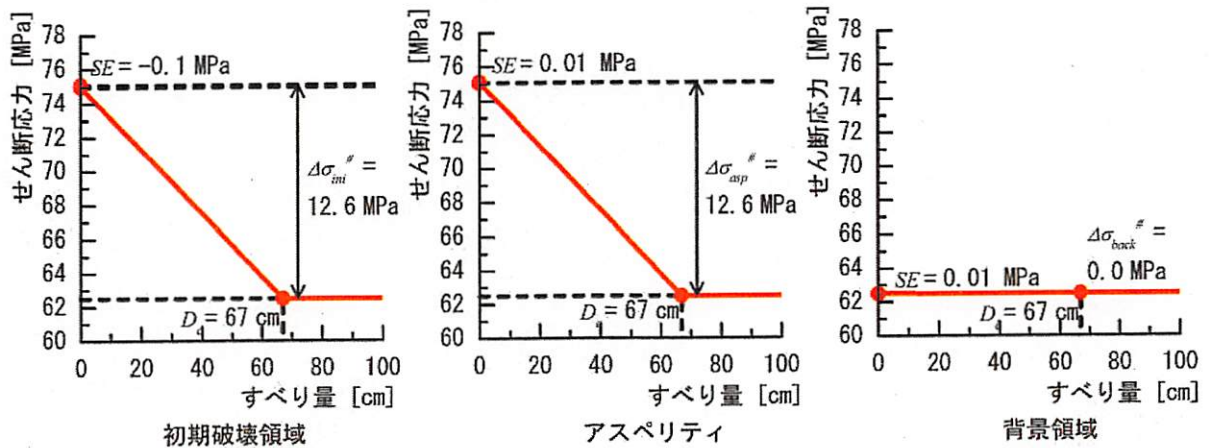
(b) すべり弱化則

図 4.3-23 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央, 断層長さ 30 km)



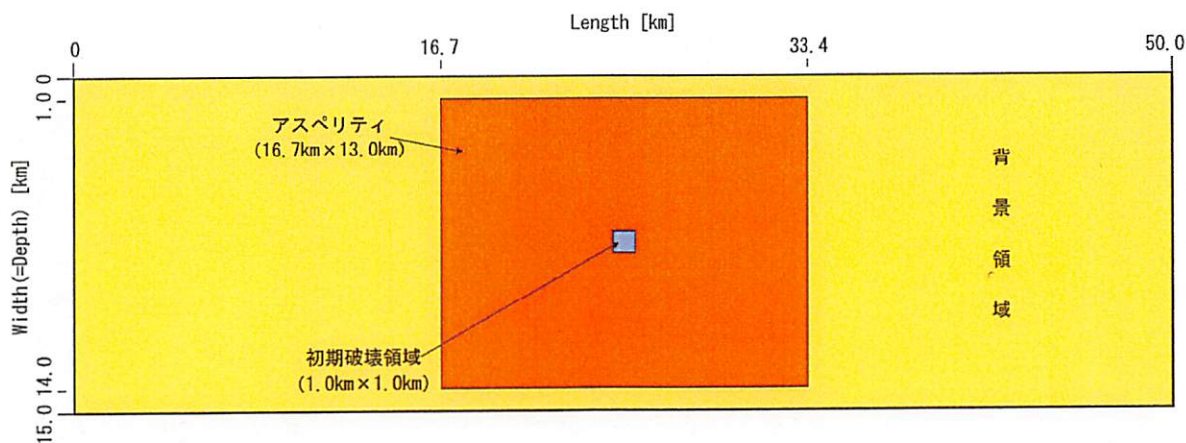
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	12.6	12.6	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦係数 μ_d	仮定	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.62500	0.62592	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	75.1	75.1	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	67	67	67



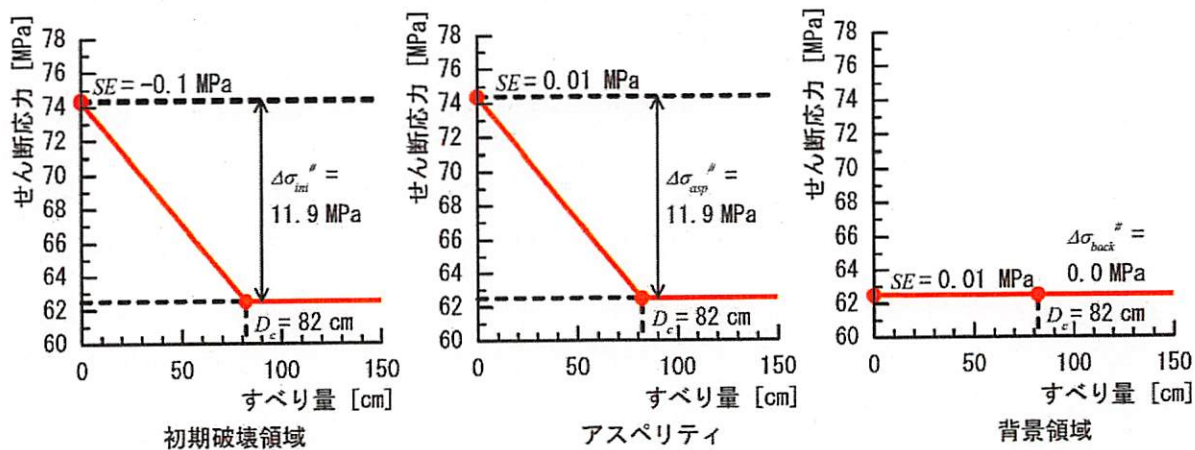
(b) すべり弱化則

図 4.3-24 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央, 断層長さ 35 km)



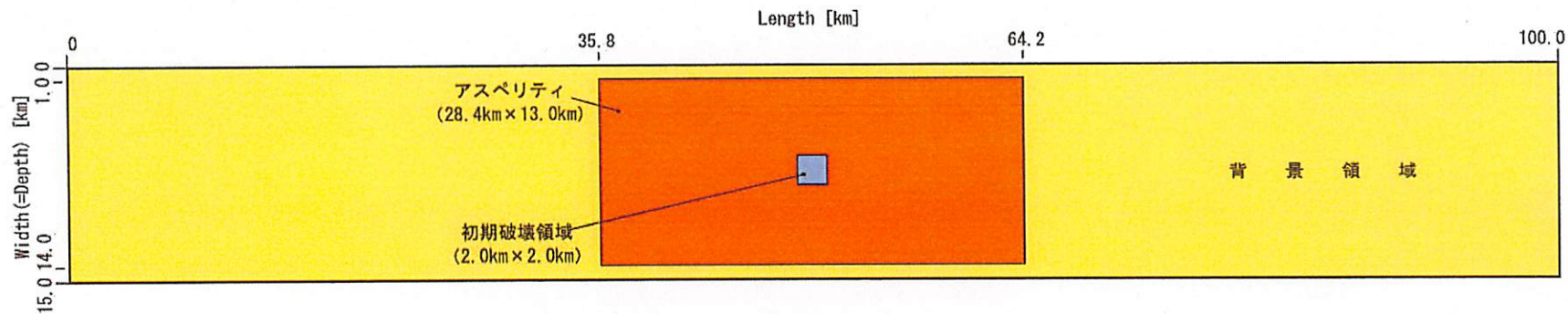
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_a^\#$ [MPa]	繰り返し計算で算定	11.9	11.9	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	74.30	74.41	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.61917	0.62008	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	74.4	74.4	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	82	82	82



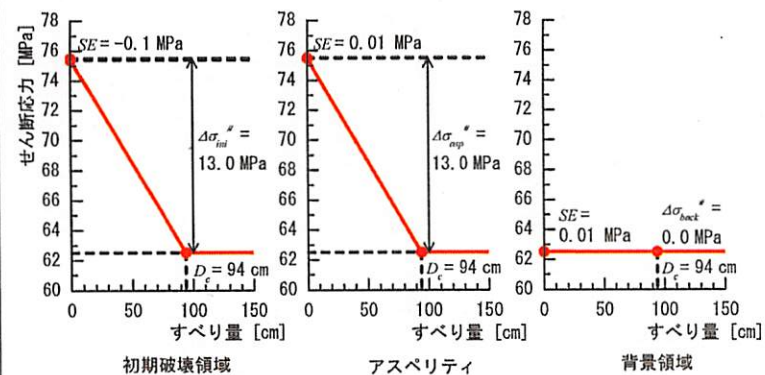
(b) すべり弱化則

図 4.3-25 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央, 断層長さ 50 km)



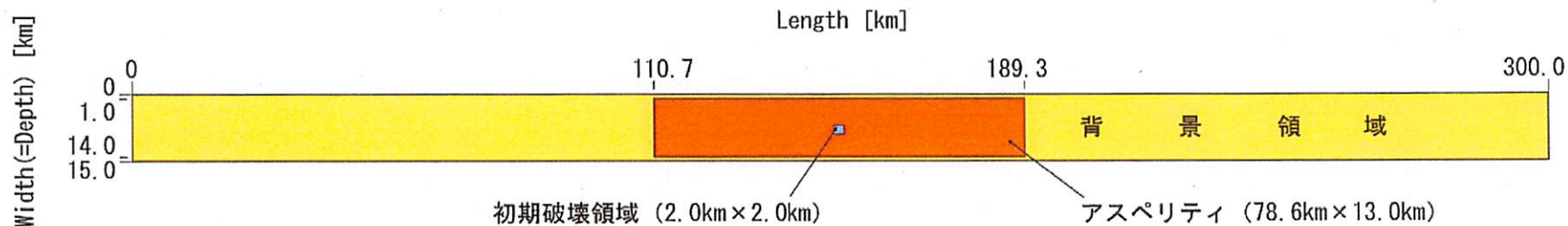
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	断層領域	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	13.0	13.0	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	75.40	75.51	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.62833	0.62925	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	75.5	75.5	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	94	94	94



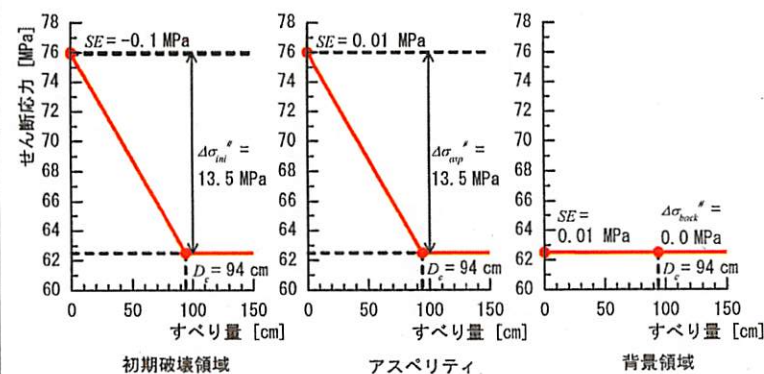
(b) すべり弱化解

図 4.3-26 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央, 断層長さ 100 km)



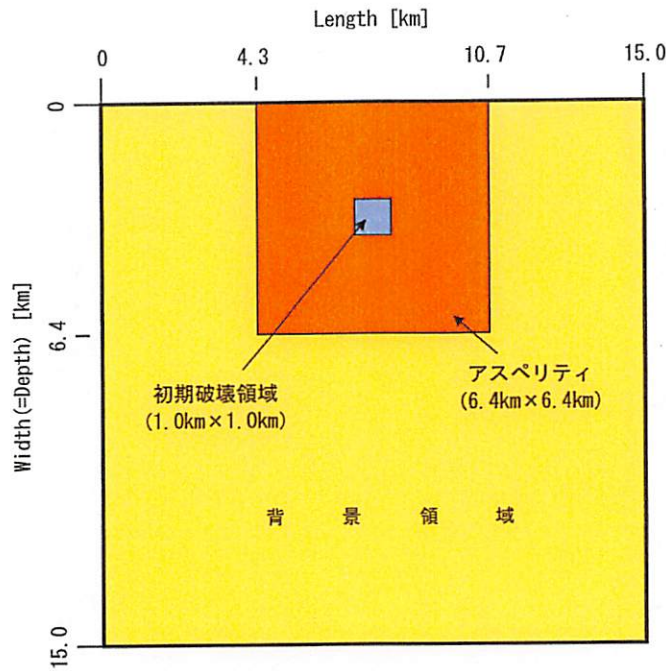
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	断層領域	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	13.5	13.5	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	75.90	76.01	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.63250	0.63342	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	76.0	76.0	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	94	94	94



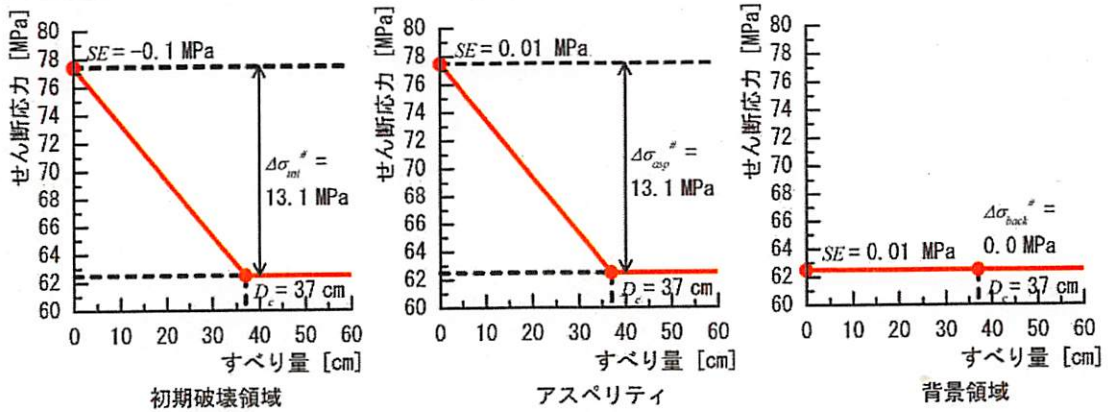
(b) すべり弱化則

図 4.3-27 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層中央, 断層長さ 300 km)



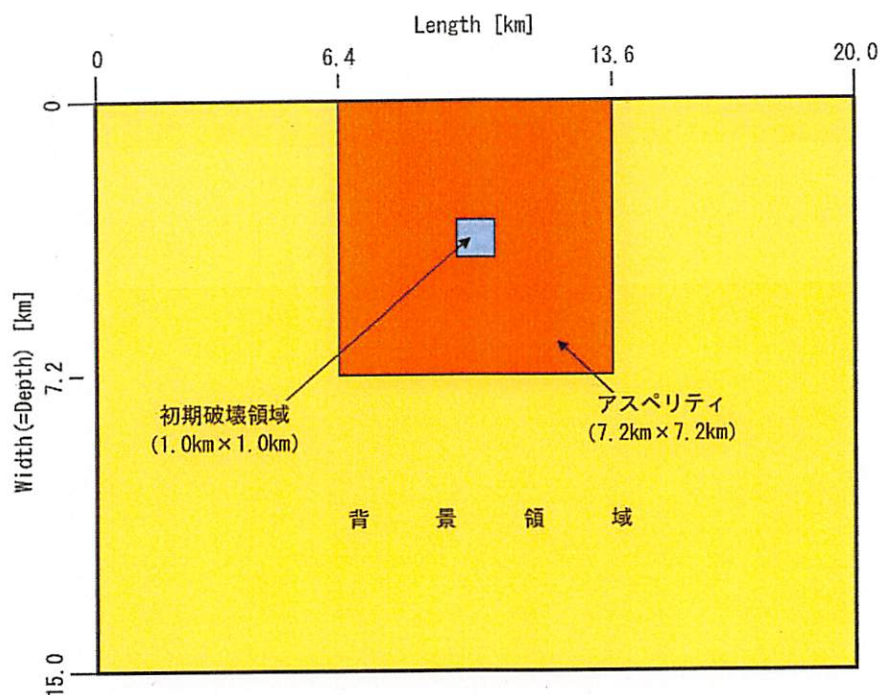
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\sigma}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	15.0	15.0	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.64500	0.64592	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	77.5	77.5	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	37	37	37



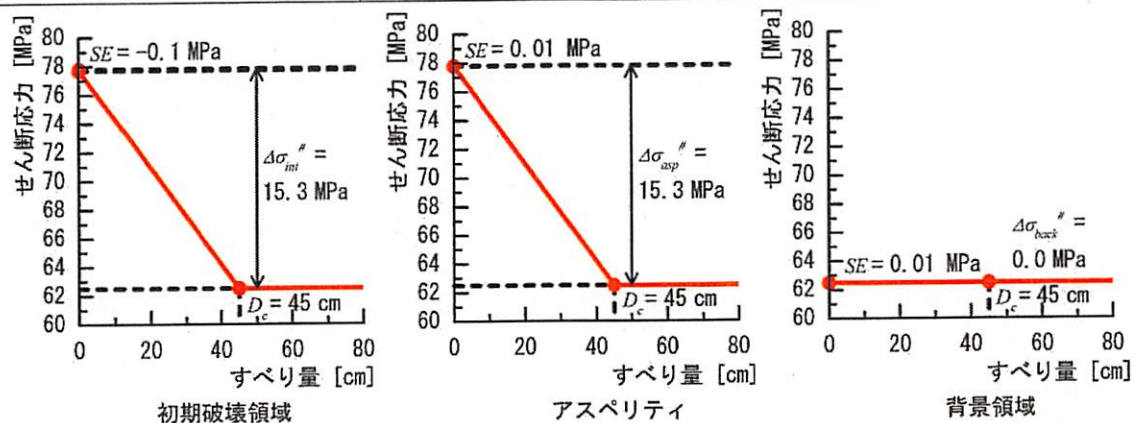
(b) すべり弱化則

図 4.3-28 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央上端, 断層長さ 15 km)



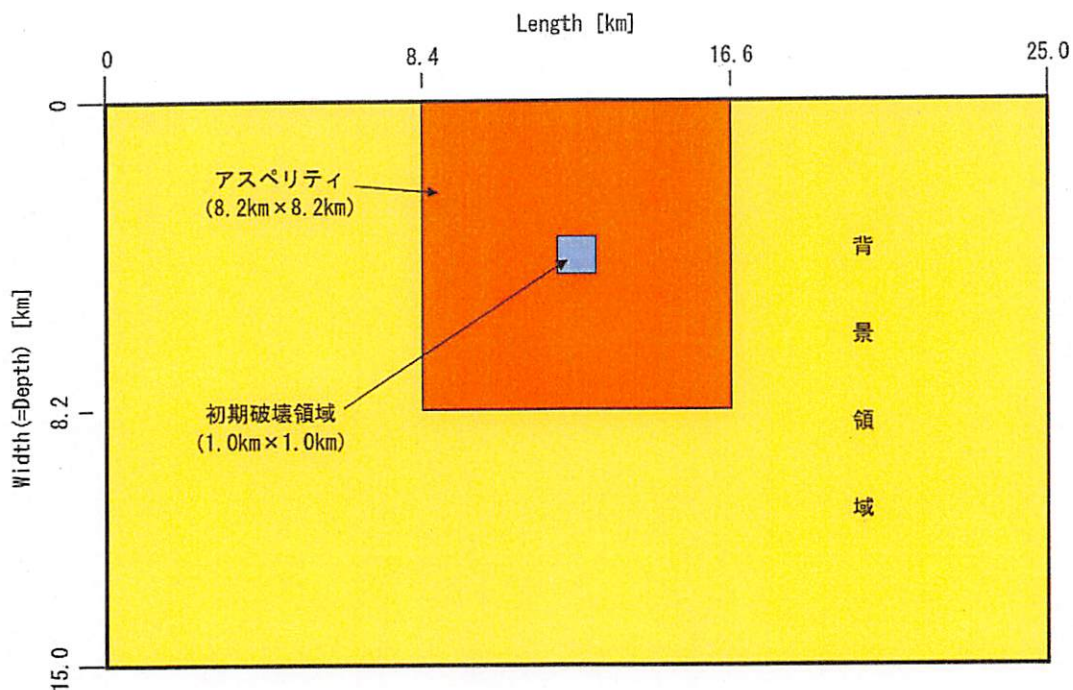
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	15.3	15.3	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	77.70	77.81	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.64750	0.64842	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	77.8	77.8	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	45	45	45



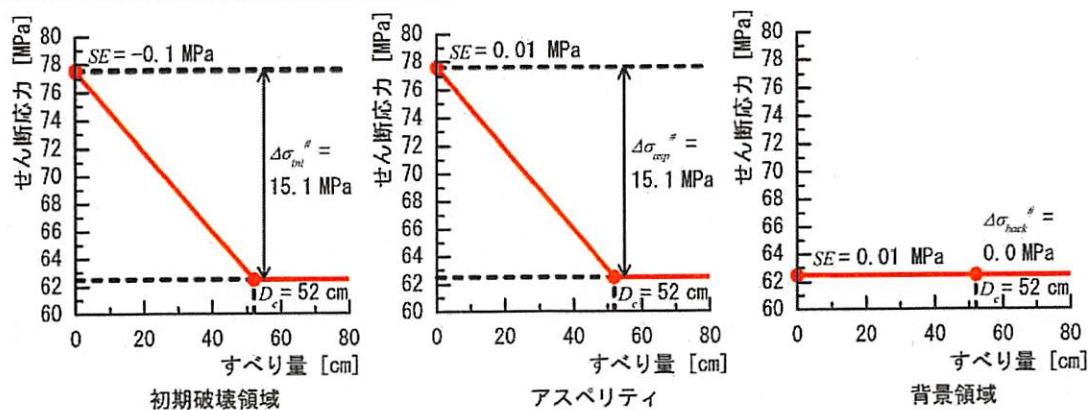
(b) すべり弱化則

図 4.3-29 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層中央上端, 断層長さ 20 km)



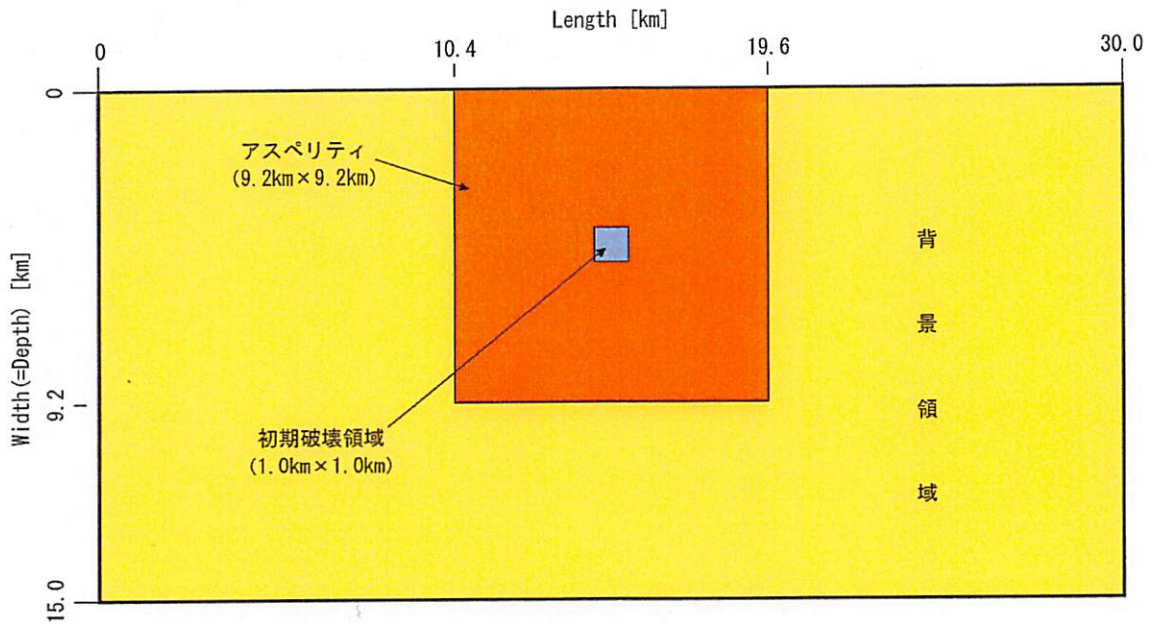
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\sigma}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	15.1	15.1	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	77.50	77.61	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.64583	0.64675	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	77.6	77.6	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	52	52	52



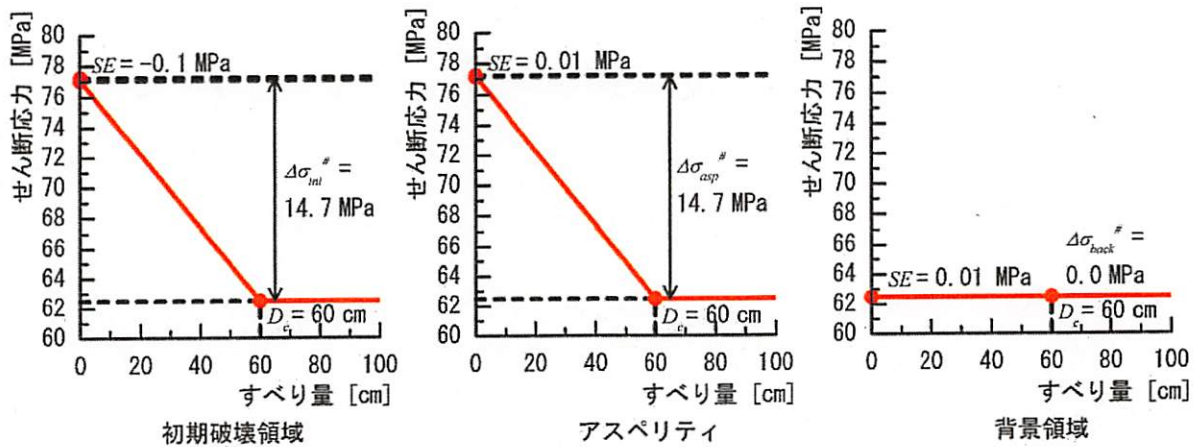
(b) すべり弱化則

図 4.3-30 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央上端, 断層長さ 25 km)



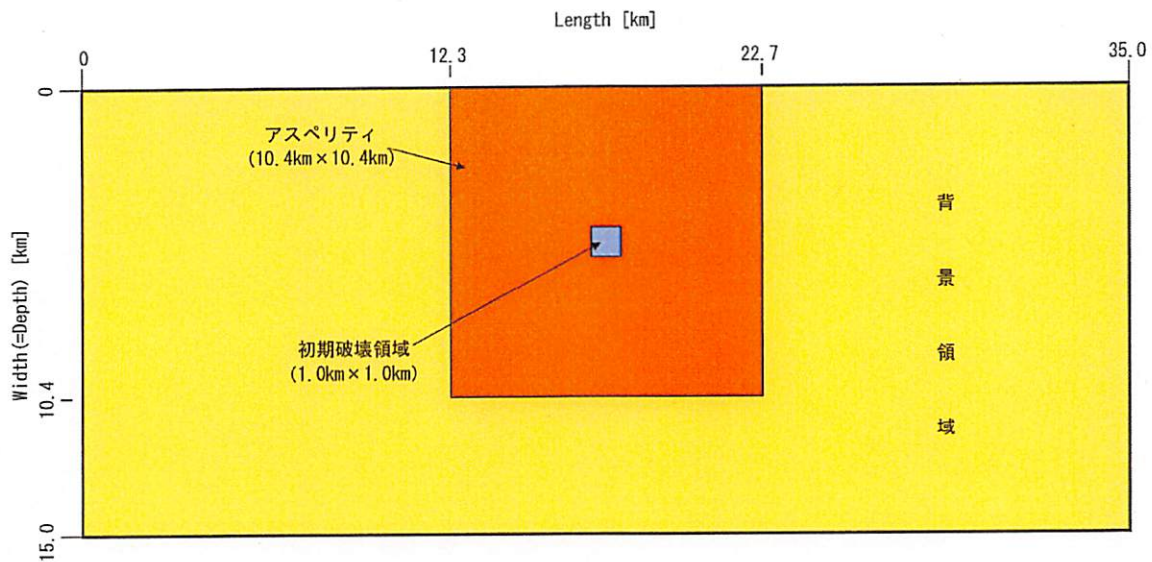
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	14.7	14.7	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	77.10	77.21	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.64250	0.64342	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	77.2	77.2	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	60	60	60



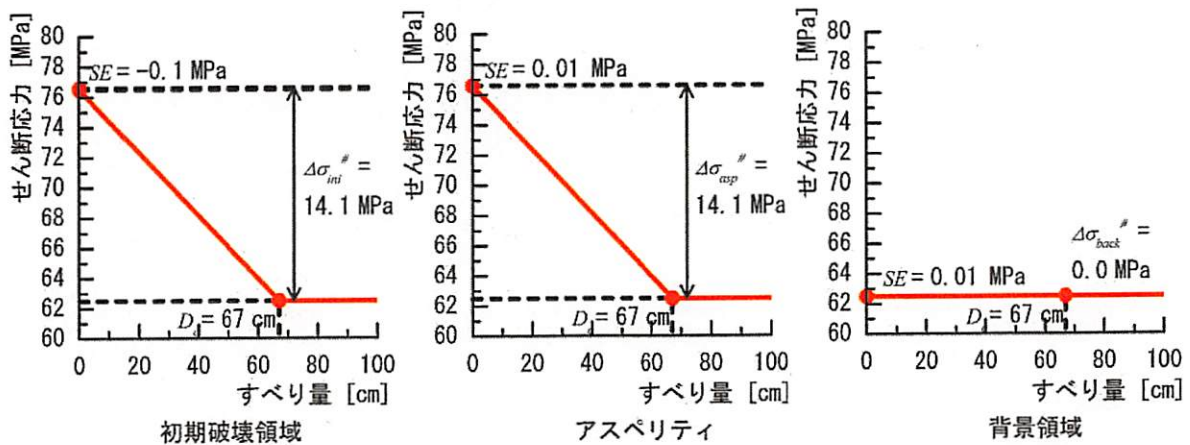
(b) すべり弱化則

図 4.3-31 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層中央上端, 断層長さ 30 km)



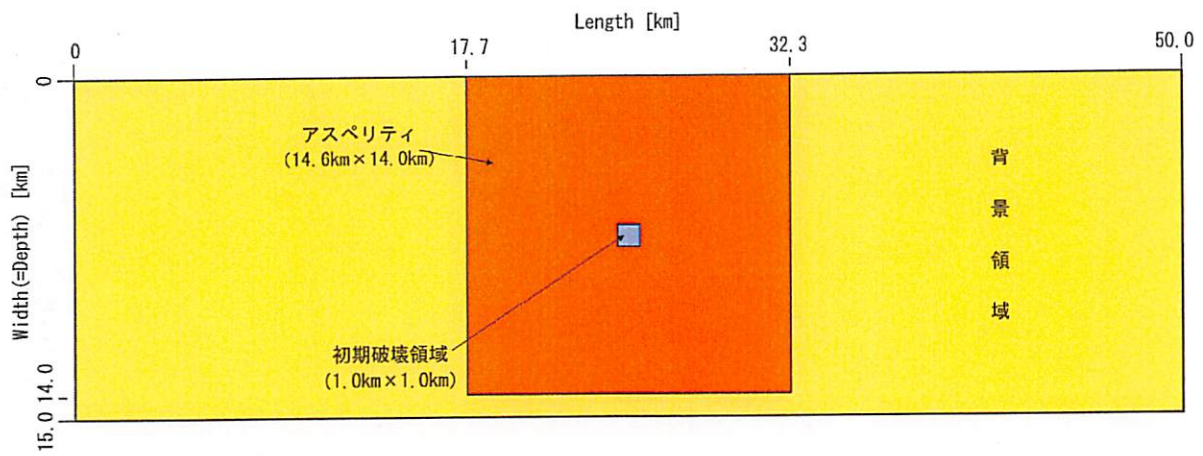
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	14.1	14.1	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	76.50	76.61	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.63750	0.63842	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	76.6	76.6	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	67	67	67



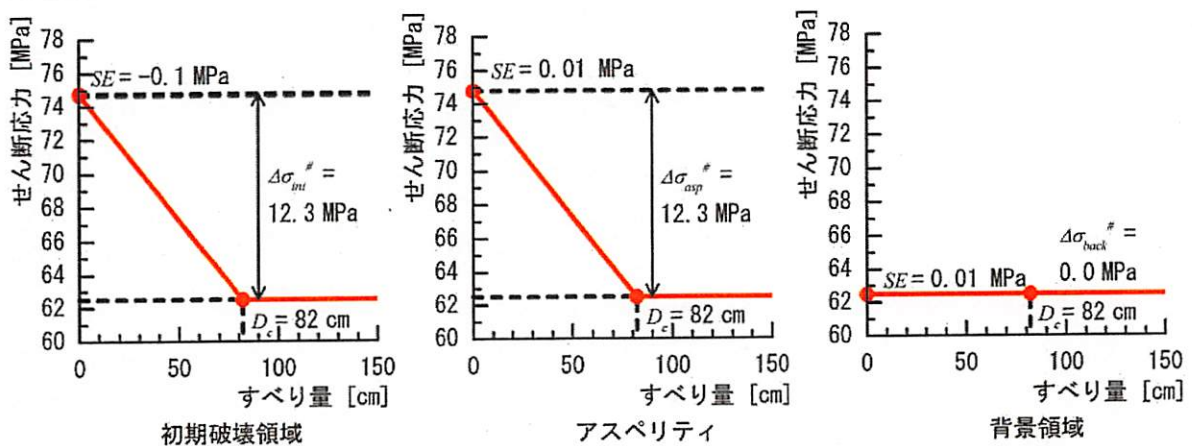
(b) すべり弱化則

図 4.3-32 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央上端, 断層長さ 35 km)



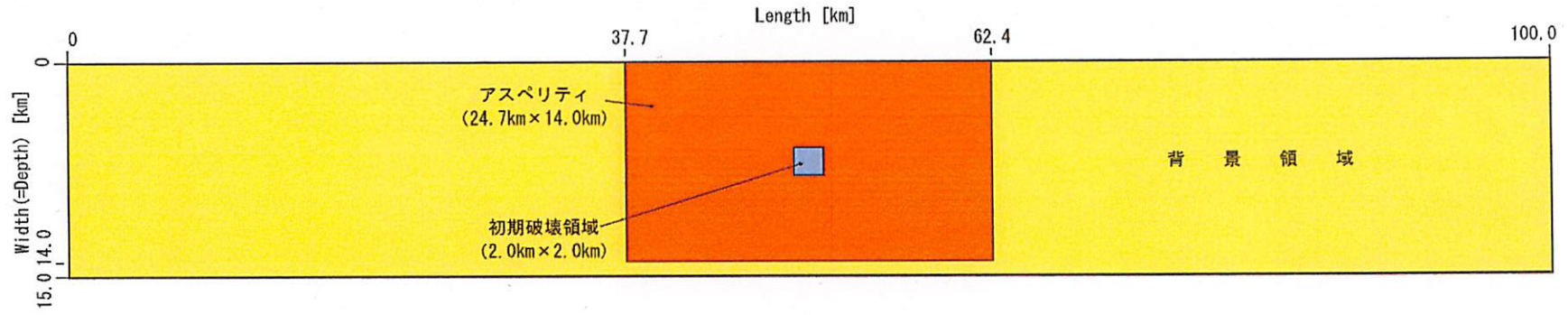
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	12.3	12.3	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	74.70	74.81	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.62250	0.62342	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	74.8	74.8	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	82	82	82



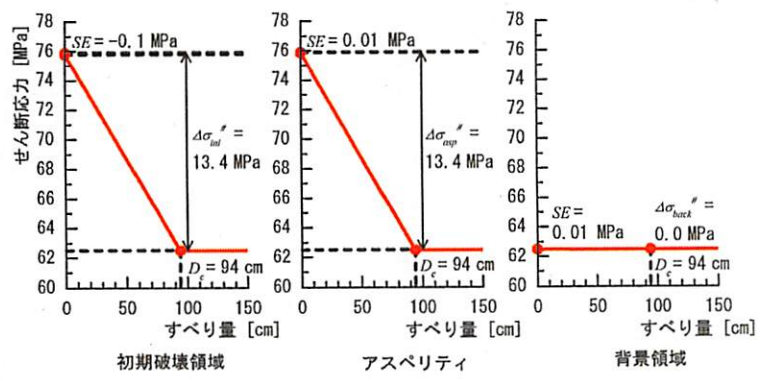
(b) すべり弱化則

図 4.3-33 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層中央上端, 断層長さ 50 km)



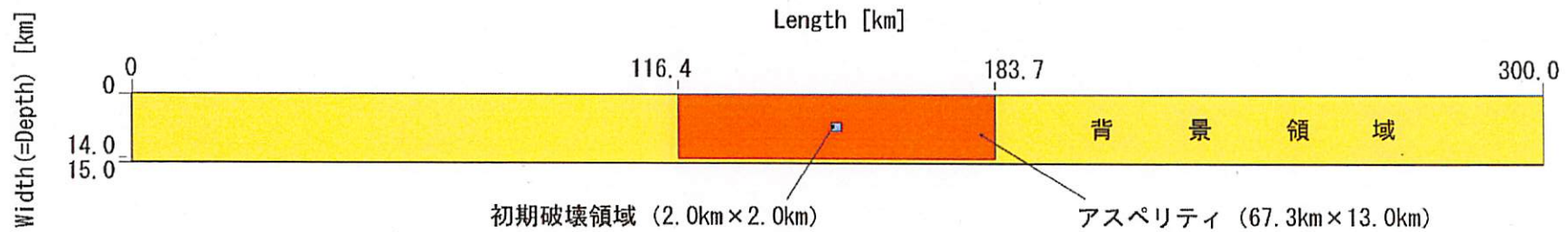
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	断層領域	背景領域
動的応力低下量 $\Delta\sigma_a^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	13.4	13.4	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	75.80	75.91	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.63167	0.63258	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	75.9	75.9	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	94	94	94



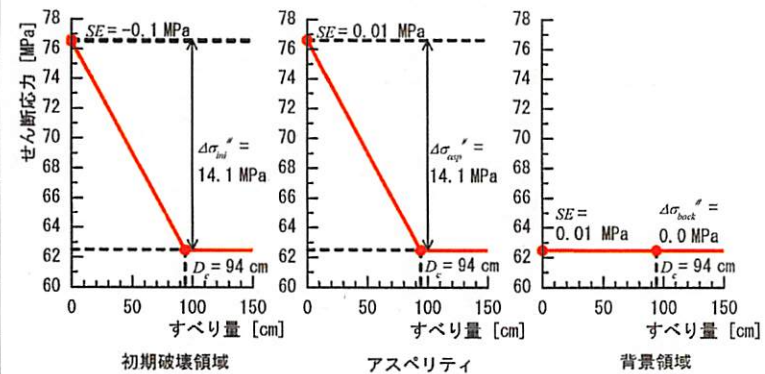
(b) すべり弱化則

図 4.3-34 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央上端, 断層長さ 100 km)



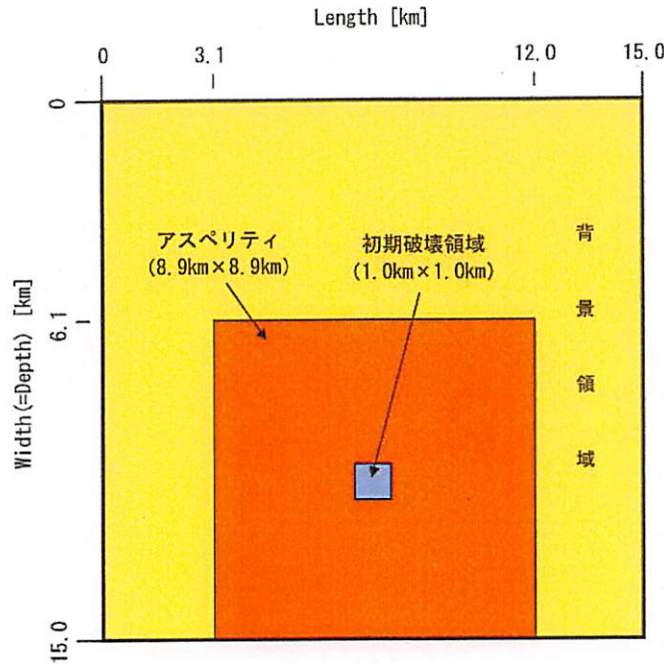
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	断層領域	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	14.1	14.1	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	76.50	76.61	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.63750	0.63842	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	76.6	76.6	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	94	94	94



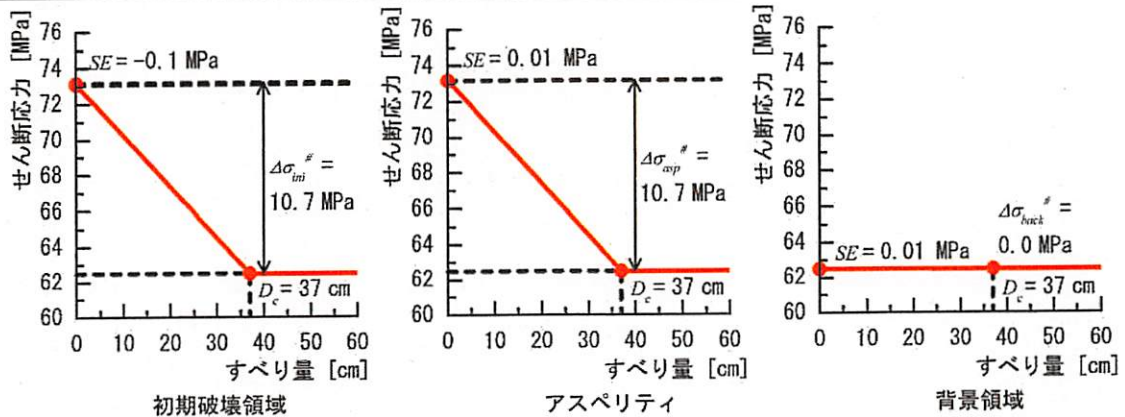
(b) すべり弱化則

図 4.3-35 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層中央上端, 断層長さ 300 km)



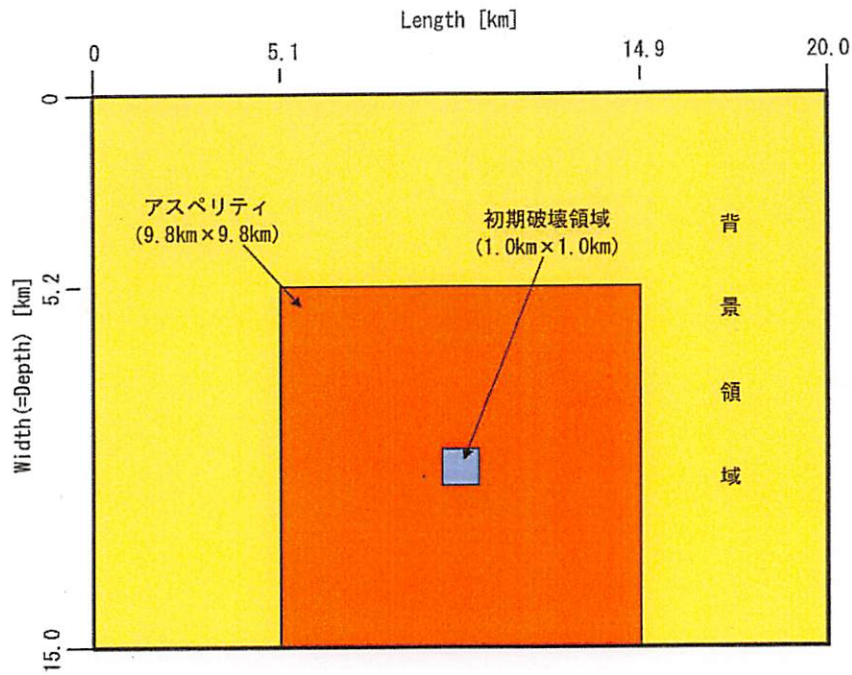
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	10.7	10.7	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	73.10	73.21	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.60917	0.61008	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	73.2	73.2	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	37	37	37



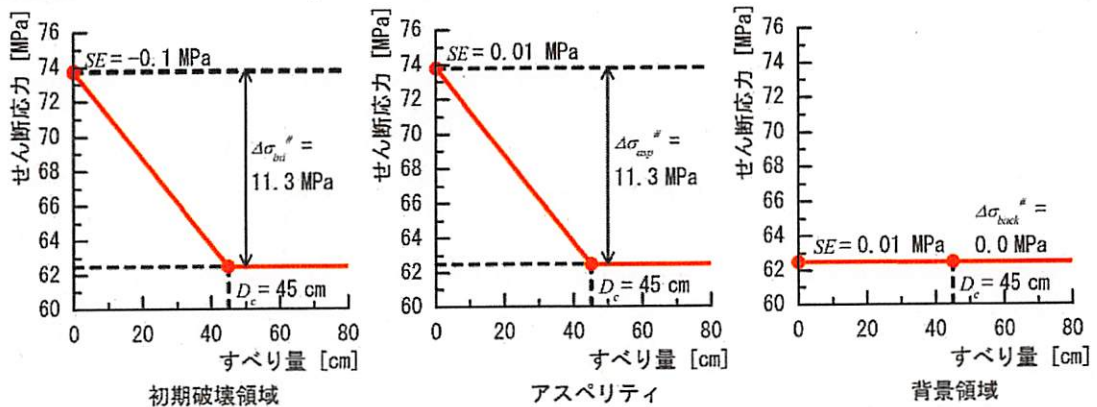
(b) すべり弱化則

図 4.3-36 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央下端, 断層長さ 15 km)



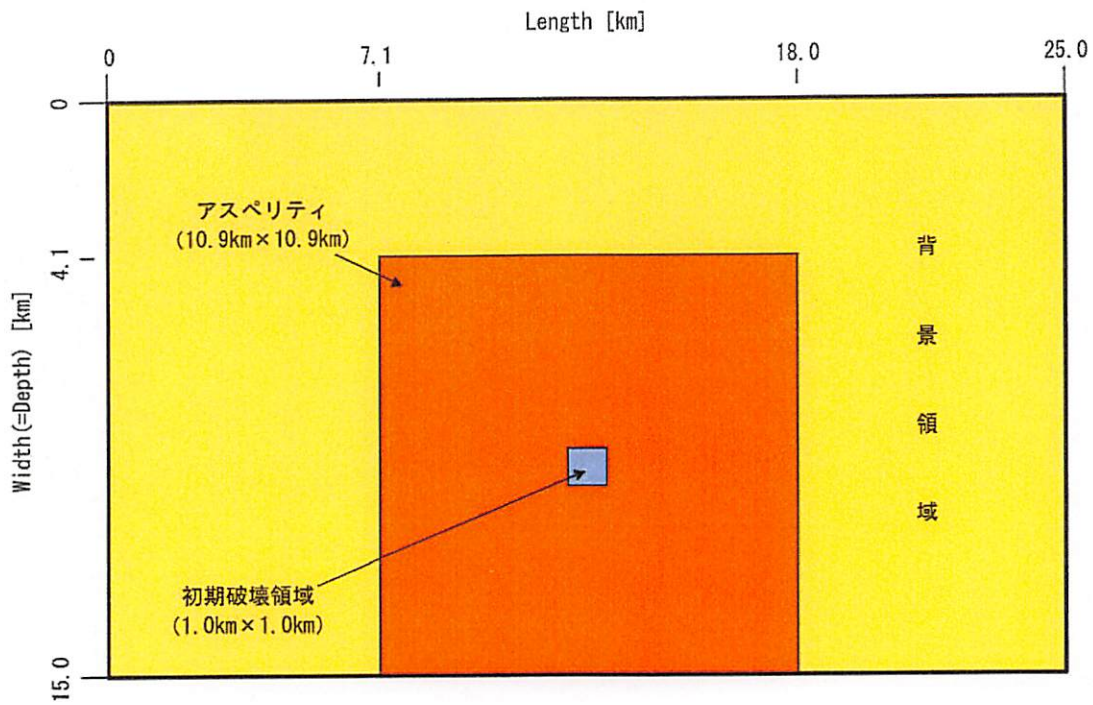
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_a^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	11.3	11.3	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	73.70	73.81	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.61417	0.61508	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	73.8	73.8	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	45	45	45



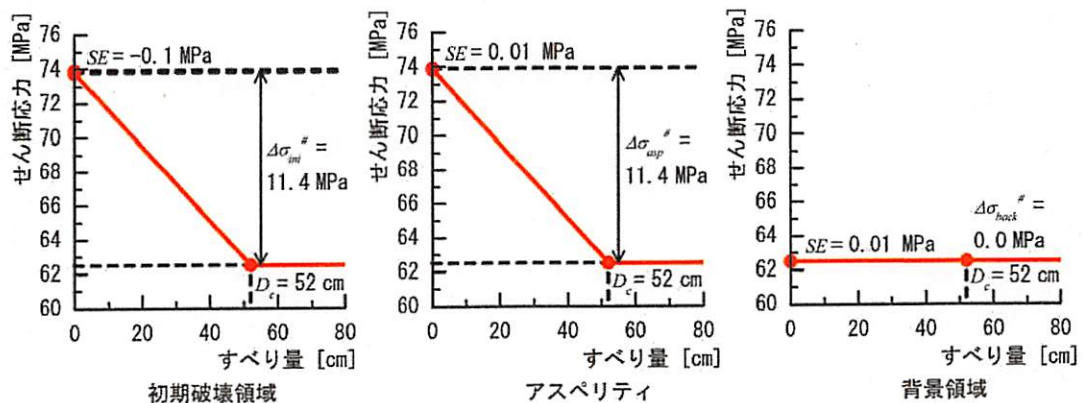
(b) すべり弱化則

図 4.3-37 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央下端, 断層長さ 20 km)



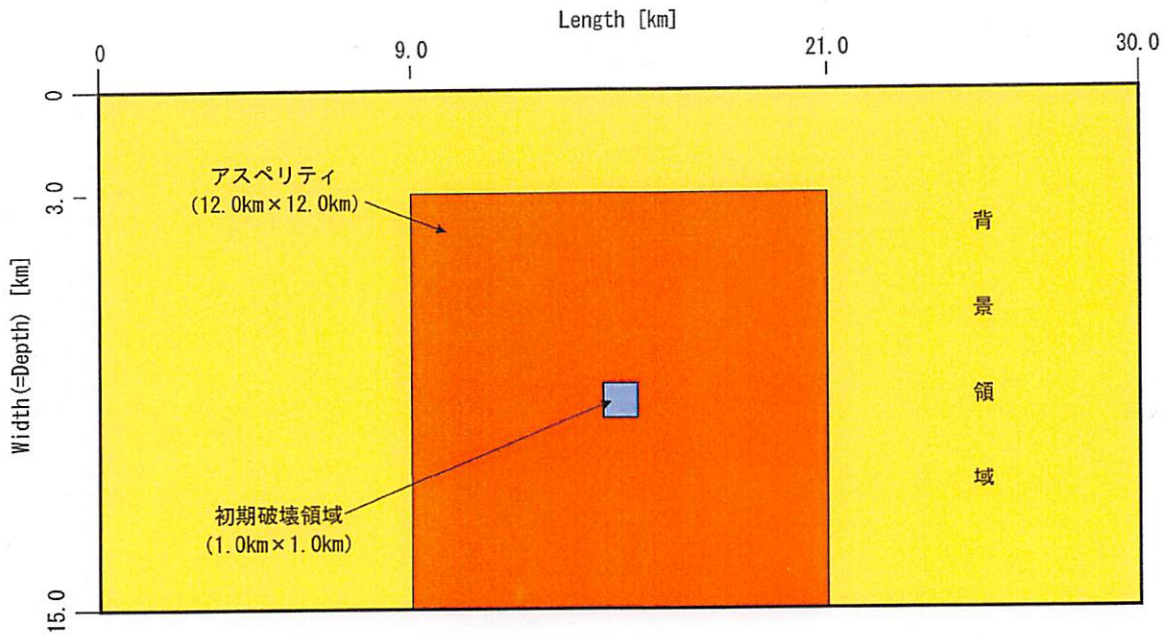
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\sigma}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	11.4	11.4	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦係数 μ_d	仮定	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.61500	0.61592	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	73.9	73.9	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	52	52	52



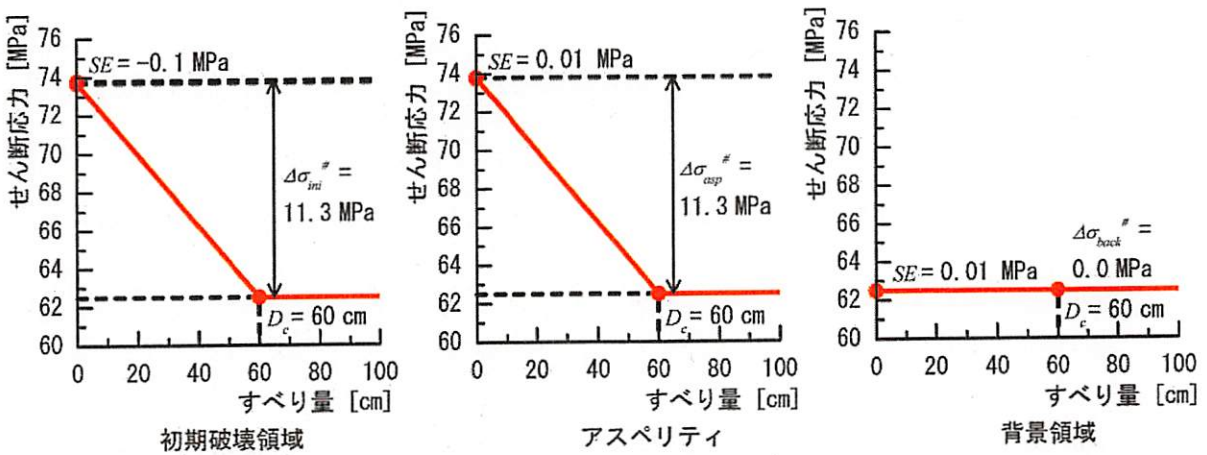
(b) すべり弱化則

図 4.3-38 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央下端, 断層長さ 25 km)



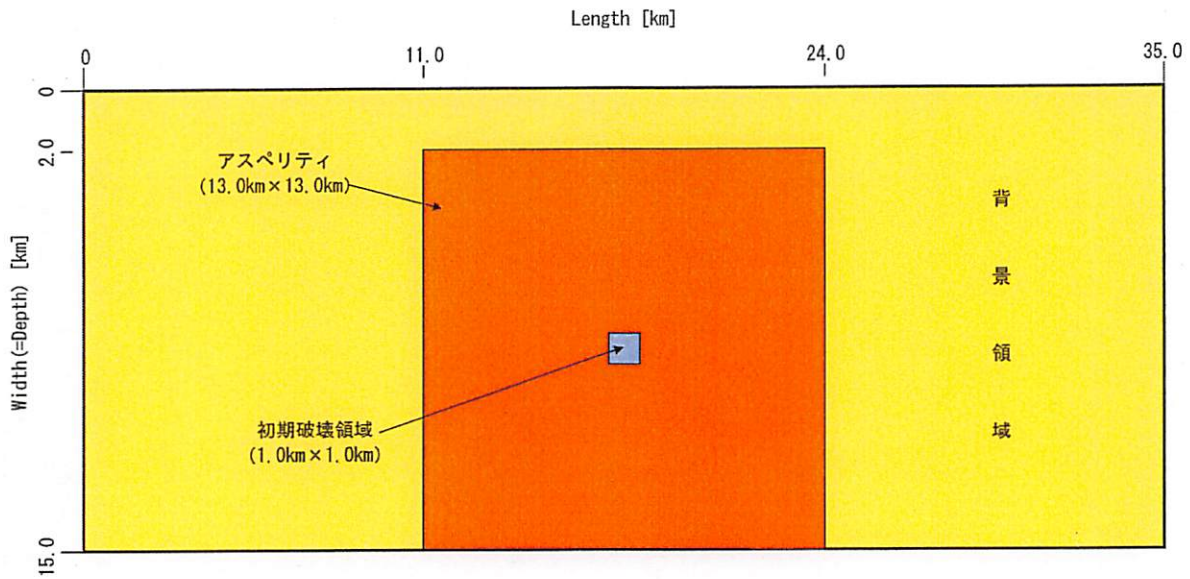
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_a^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	11.3	11.3	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	73.70	73.81	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.61417	0.61508	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	73.8	73.8	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	60	60	60



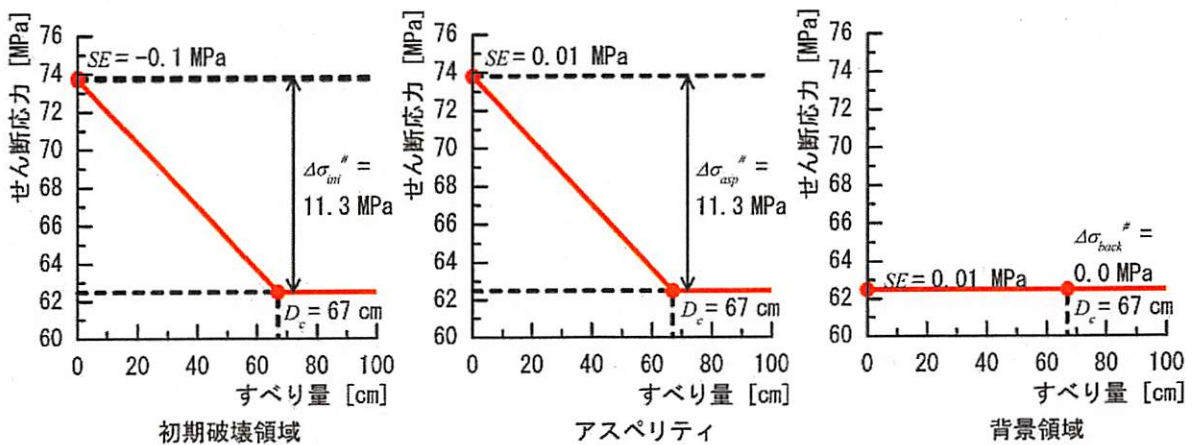
(b) すべり弱化則

図 4.3-39 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央下端, 断層長さ 30 km)



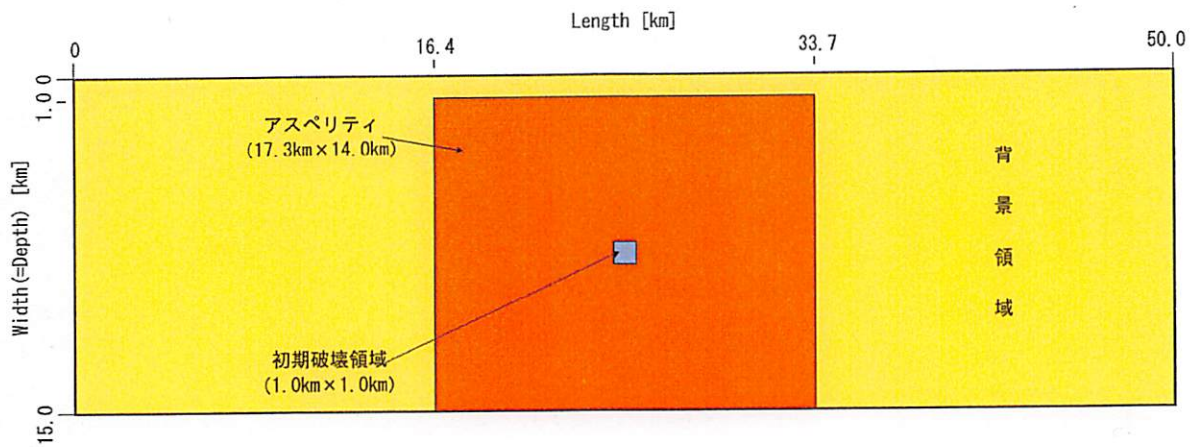
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_d^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	11.3	11.3	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	73.70	73.81	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.61417	0.61508	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	73.8	73.8	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	67	67	67



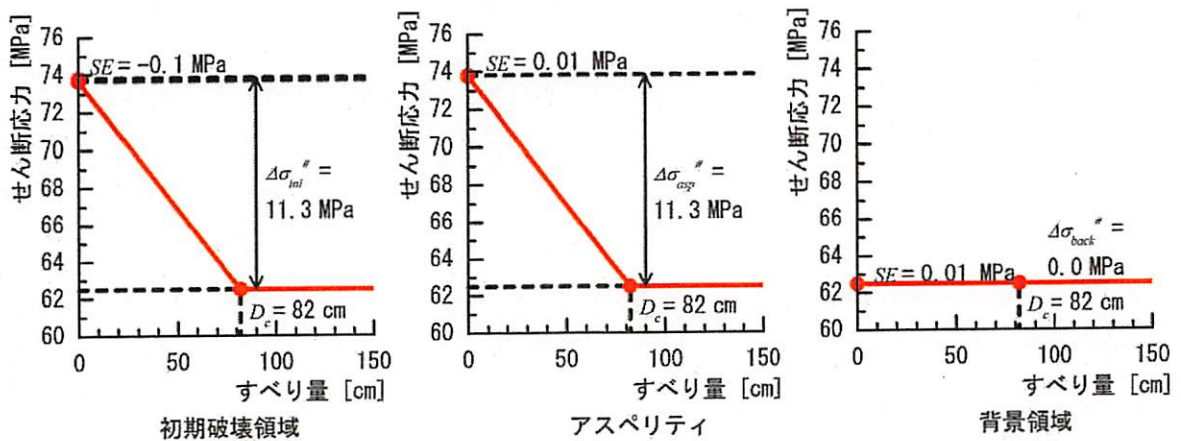
(b) すべり弱化則

図 4.3-40 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央下端, 断層長さ 35 km)



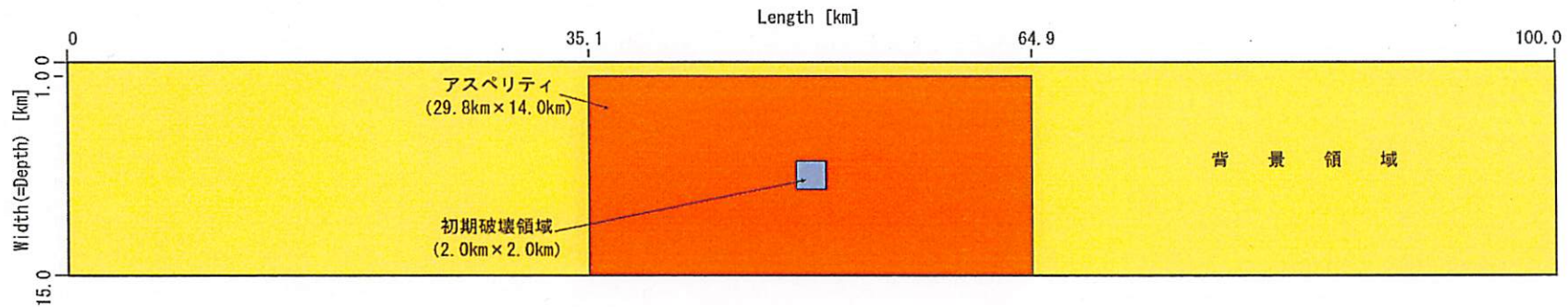
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	アスペリティ	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	11.3	11.3	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	73.70	73.81	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.61417	0.61508	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	73.8	73.8	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	82	82	82



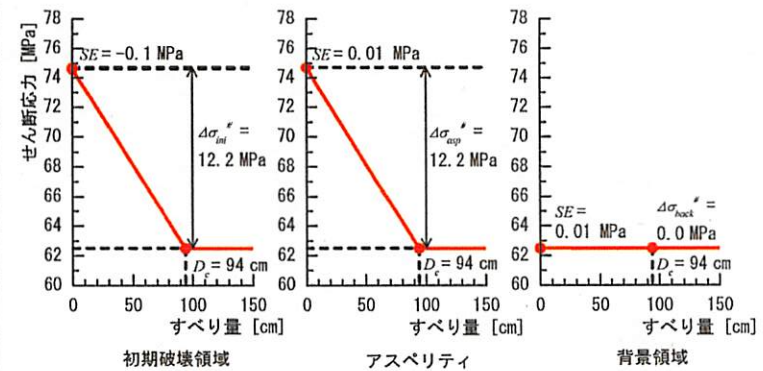
(b) すべり弱化則

図 4.3-41 動学的断層モデル (アスペリティ=断層中央下端, 断層長さ 50 km)



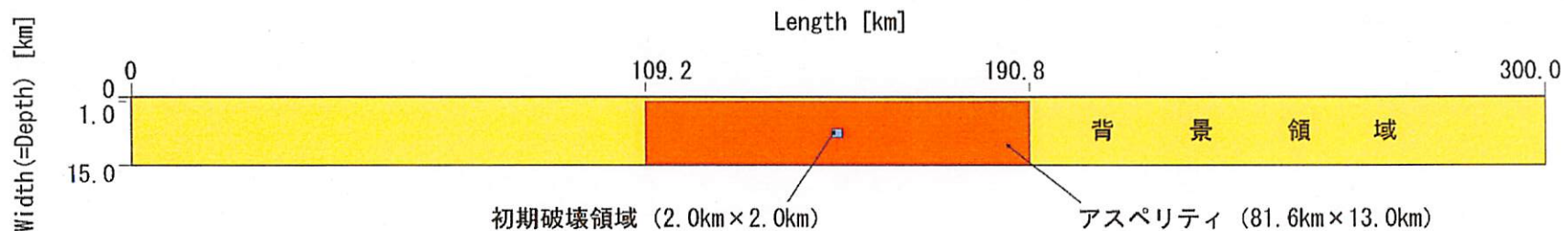
(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	断層領域	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	12.2	12.2	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	74.60	74.71	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.62167	0.62258	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	74.7	74.7	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	94	94	94



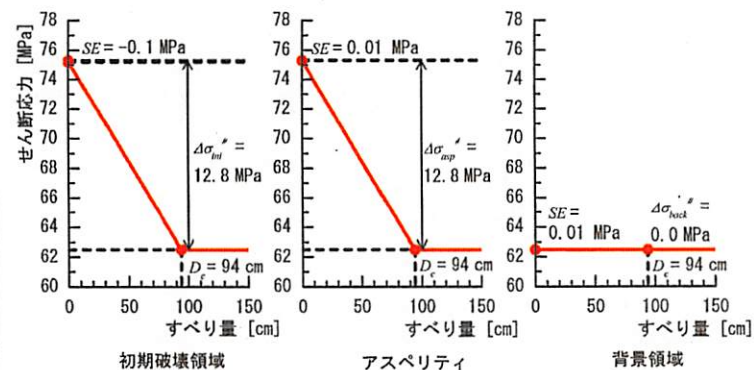
(b) すべり弱化則

図 4.3-42 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層中央下端, 断層長さ 100 km)



(a) 断層形状

パラメータ	設定方法	初期破壊領域	断層領域	背景領域
動的応力降下量 $\Delta\sigma_{\alpha}^{\#}$ [MPa]	繰り返し計算で算定	12.8	12.8	0.0
強度超過 SE [MPa]	設定値	-0.1	0.01	0.01
法線応力 σ_n [MPa]	仮定	120	120	120
動摩擦力 σ_d [MPa]	仮定	62.5	62.5	62.5
動摩擦係数 μ_d	$\mu_d = \sigma_d / \sigma_n$	0.52083	0.52083	0.52083
静摩擦力 σ_s [MPa]	$\sigma_s = \sigma_d + \Delta\sigma + SE$	75.20	75.31	62.51
静摩擦係数 μ_s	$\mu_s = \sigma_s / \sigma_n$	0.62667	0.62758	0.52092
初期せん断応力 σ_0 [MPa]	$\sigma_0 = \sigma_d + \Delta\sigma$	75.3	75.3	62.5
臨界すべり量 D_c [cm]	$D_c = D \times 0.3$	94	94	94



(b) すべり弱化則

図 4.3-43 動力学的断層モデル (アスペリティ=断層中央下端, 断層長さ 300 km)

4.3.2 動学的断層破壊シミュレーション結果

(1) 最終すべり量分布

各断層ケースにおいて、動学的断層破壊シミュレーションにより得られた断層面の最終すべり量分布を図4.3-44～図4.3-48に示す。最終すべり量は、短周期ノイズを除去するために、各要素断層で得られたすべり速度時間関数に4 Hzのローパスフィルタを施した後、これを積分して算出した。

次に、各断層ケースにおける計算結果の地震モーメント M_0 を、動学的断層破壊シミュレーション結果の最終すべり量から下式を用いて算出した。

$$M_0 = \int_S \mu(\xi) D(\xi) dS(\xi) = \sum_i \mu_i D_i \Delta S_i \quad (4.3-1)$$

ここに、 ξ は断層面上の点の位置、 i は震源断層の要素断層 (0.1 km 四方) の番号である。また、 μ_i 、 D_i は各要素断層におけるせん断剛性率と最終すべり量で、 ΔS_i は要素断層の面積 (0.01 km²) である。動学的断層破壊シミュレーションにより求められた地震モーメントの各値を表 4.3-1 に示す。また、地震モーメントと断層面積との関係を図 4.3-49 に示す。図より、当然ではあるが、動学的断層破壊シミュレーションにより得られた地震モーメントと断層面積との関係は、(4.2-6) 式に示す経験的關係式に一致している。

一方、各断層モデルの動学的断層破壊シミュレーションにより得られた地震モーメントと短周期レベルとの関係を図 4.3-50 に示す。短周期レベルは、下式を用いて算出した。

$$A = 4\pi\beta^2 \sqrt{\sum_k (\Delta S_{aspk} / \pi) \Delta \sigma_{asp}^2} \quad (4.3-2)$$

ここに、 k はアスペリティ (初期破壊領域を含む) の要素断層の番号である。同図には、壇・他 (2001) の経験的關係式とそれを求める際に使用されたデータを重ねて示す。図より、当然ではあるが、動学的断層破壊シミュレーションにより得られた地震モーメントと短周期レベルとの関係は、(4.2-7) 式に示す経験的關係式に一致している。

(2) 応力形状係数

次に、動学的断層破壊シミュレーションでの入力値である断層の平均動的応力降下量と (4.3-1) 式により求めた地震モーメントから、(4.2-5) 式の応力形状係数 c を各断層ケースごとに求めた。求めた応力形状係数 c の値を表 4.3-1 の右端列に示すとともに、各断層のアスペクト比 L/W と応力形状係数 c の関係を図 4.3-51 に示す。参考として、円形クラックモデルの式を(4.2-5) 式の形に換算した、

$$\Delta \sigma^\# = \frac{7}{16} \frac{M_0}{(S/\pi)^{3/2}} = \frac{7\pi^{3/2}}{16} (L/W)^{-1/2} \frac{M_0}{LW^2} = c \frac{M_0}{LW^2} \quad (4.3-3)$$

の応力形状係数 c 値 ($=7\pi^{3/2}/16 \times (L/W)^{-1/2}$) を赤色線で、無限長横ずれ断層の式 $\Delta \sigma = (2/\pi)[M_0/(LW^2)]$

を(4.2-5)式の形に換算した,

$$\Delta\sigma^{\#} = \frac{2}{\pi} \frac{M_0}{LW^2} \quad (4.3-4)$$

の応力形状係数 c 値 ($=2/\pi$) を青色線で, それぞれ図 4.3-51 に重ねて示す。また, 第3章において求められた, 断層面に一様な動的応力降下量を考慮した場合における動学的断層破壊シミュレーション結果の応力形状係数の近似式

$$c = \frac{2}{\pi} \times (1 + 4.2e^{-L/W}) \quad (4.3-5)$$

も緑色線で図 4.3-51 に重ねて示す。図より, 動学的断層破壊シミュレーションにより求められた応力形状係数 c の値は, 断層のアスペクト比が大きくなるにしたがって小さい値を示す傾向がみられ, 応力形状係数 c がばね定数に相当することから, 断層長さが長くなると, 応力降下量に対するすべり量が大きくなることを示している。この傾向は, 断層が地表面側ですべりが拘束されず, 断層が長くなるとその割合が増すためであると考えられる。また, 設定したアスペリティの位置の違いによる応力形状係数 c のバラツキがみられ, 全アスペクト比をとおして応力形状係数 c の大きい順に, 断層左下端, 断層中央下端, 断層左上端, 断層中心, 断層中央上端となっている。(4.2-5)式より, この順位は, 同じ地震モーメントを得るために必要な平均動的応力降下量の大きさの順を示しており, アスペリティが断層端部に接することによりすべりが拘束されて応力形状係数が大きくなり, アスペリティが地表面に接することによりすべりが解放されて応力形状係数が小さくなっているものと考えられる。また, アスペリティを考慮した場合の応力形状係数 c は, 一様な動的応力降下量を考慮した場合の(4.3-5)式と比較して, いずれのケースでも低い値を示している。これは, アスペリティおよびその周辺で大きなすべり量が集中することによって, 一様な動的応力降下量を考慮した場合に比べて, 断層全体の平均すべり量が大きくなることを示唆している。なお, 断層長さ 300 km の断層ケースでは, 無限長横ずれ断層の c 値 ($=2/\pi$) よりも小さい応力形状係数を示し, 非一様な動的応力降下量を考慮した動学的断層破壊シミュレーションでは理論値よりもすべり量が大きくなるいわゆるオーバーシューティングが生じているものと考えられる。

動学的断層破壊シミュレーションで得られた断層のアスペクト比と応力形状係数の関係を説明できる近似式を, 試行錯誤により求めた。求めた式は下のとおりであり, 同式の値を図 4.3-51 に桃色線で示す。

$$c = 0.5 + 2e^{-L/W} \quad (4.3-6)$$

図 4.3-51 より, (4.3-6) 式は, L/W が 1~20 の広い範囲で概ねシミュレーション結果の応力形状係数 c を説明できていることがわかる

なお, 本研究では, 断層の大きさに関わらず, 1枚の震源断層と1つのアスペリティで動学的断層モデルを設定した。これは, 断層の地震モーメントと平均動的応力降下量との関係をつなぐ応

力形状係数の特性を求めることがねらいであるため、検討パターンの少ない極めて単純な断層モデルとしたものである。しかし、経験上、断層長さが極めて長い場合には、活断層の形状に合わせて震源断層を複数のセグメントに分割したり、アスペリティの個数を複数に設定するのが現実的である。将来的には、実在の活断層を用いるなど、複数のセグメントやアスペリティを考慮した動学的断層モデルを用いて、得られる応力形状係数が図 4.3-51 にみられるバラツキの範囲内におさまっていることを確認する必要があると考える。

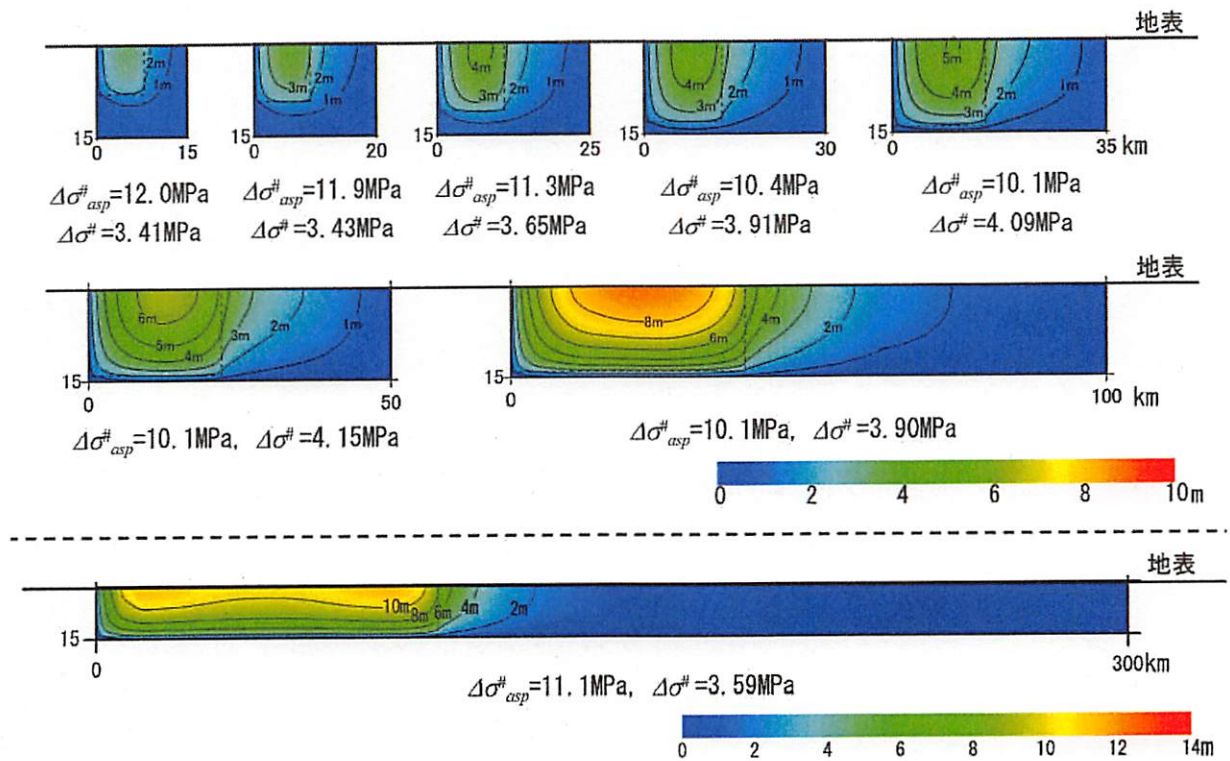


図 4.3-44 動学的断層破壊シミュレーション結果の最終すべり量分布 (アスペリティ=断層左上端)

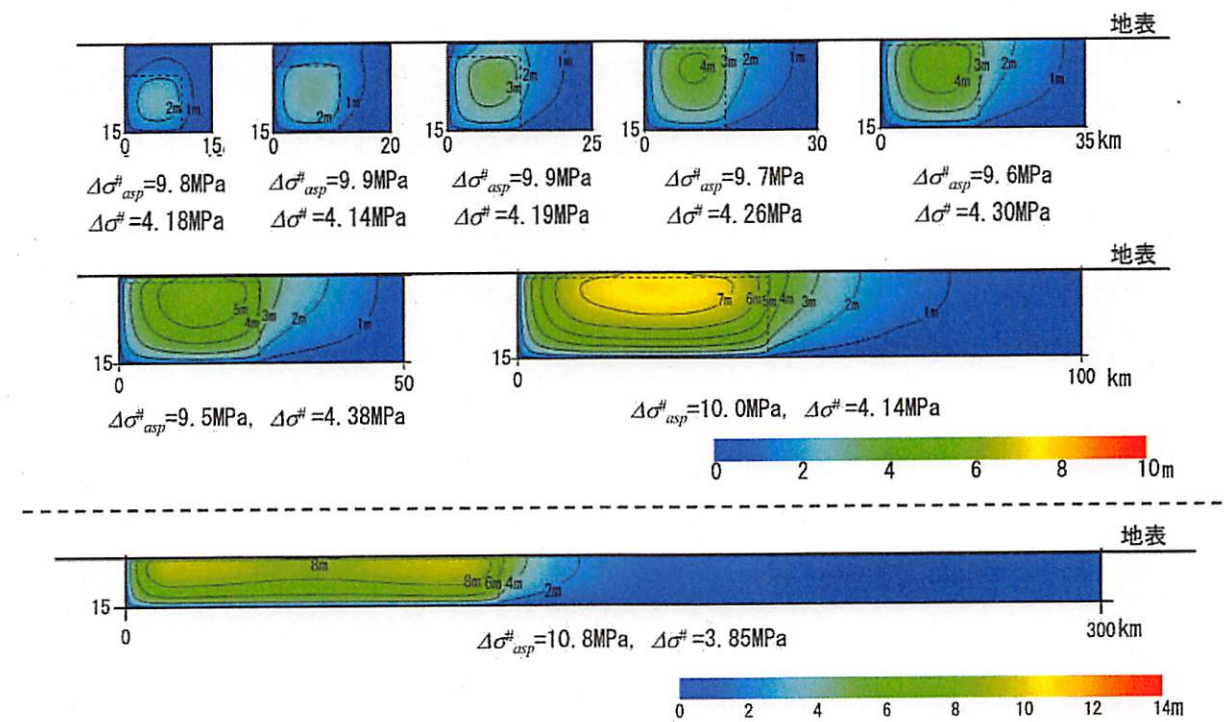


図 4.3-45 動学的断層破壊シミュレーション結果の最終すべり量分布 (アスペリティ=断層左下端)

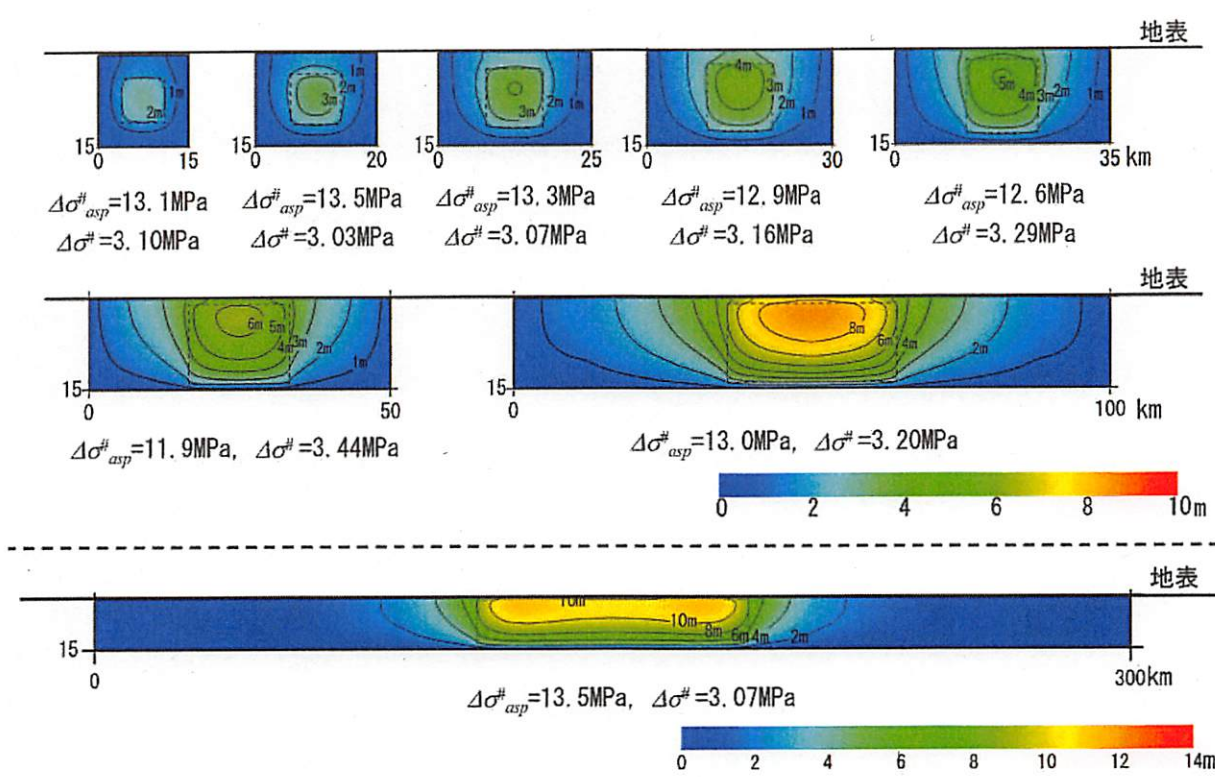


図 4.3-46 動学的断層破壊シミュレーション結果の最終すべり量分布 (アスペリティ=断層中央)

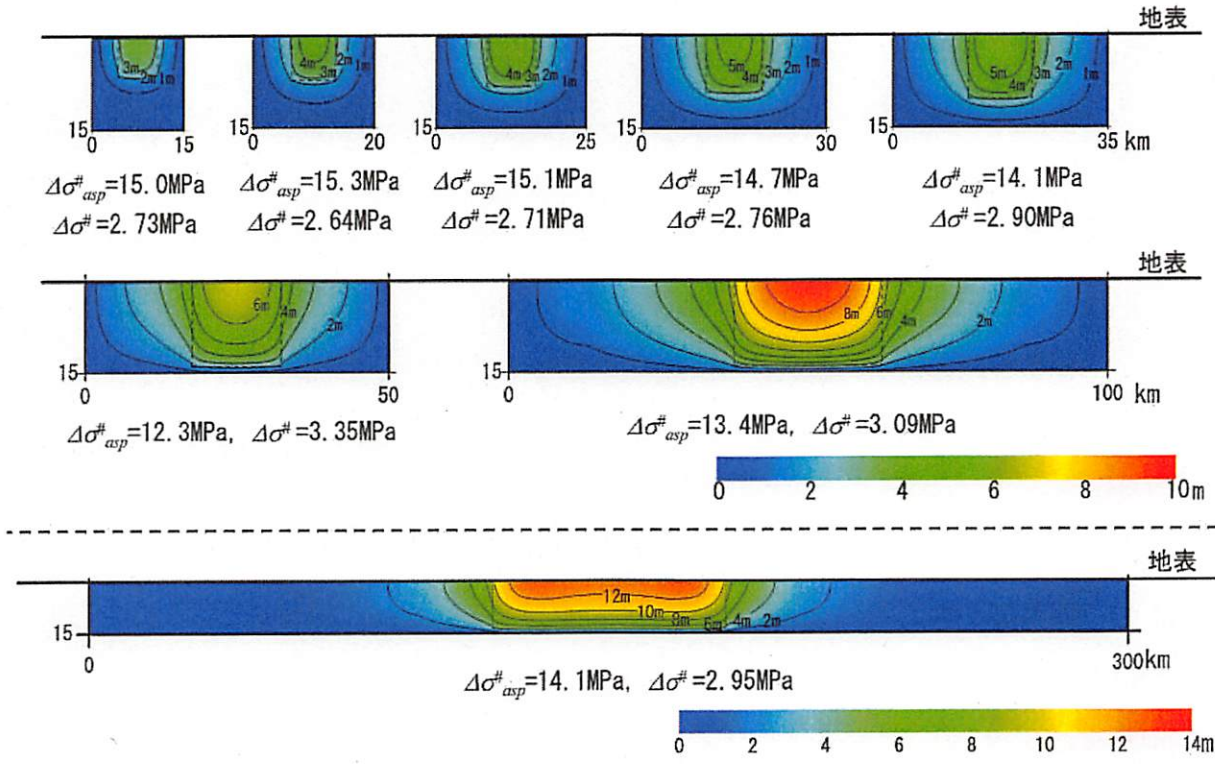


図 4.3-47 動学的断層破壊シミュレーション結果の最終すべり量分布 (アスペリティ=断層中央上端)

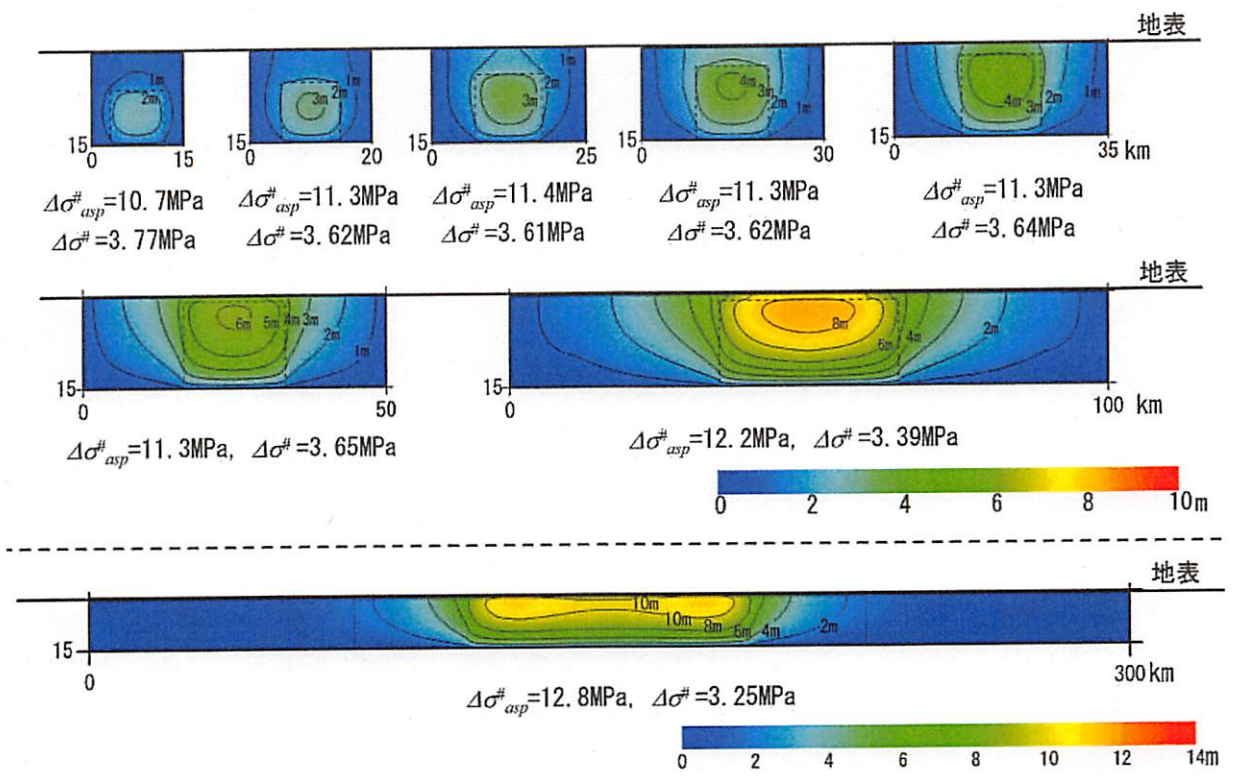
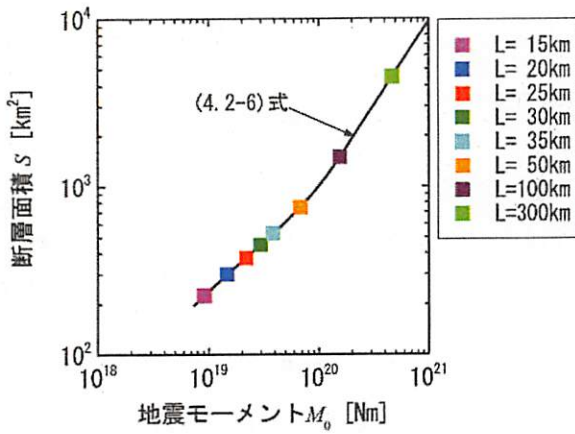
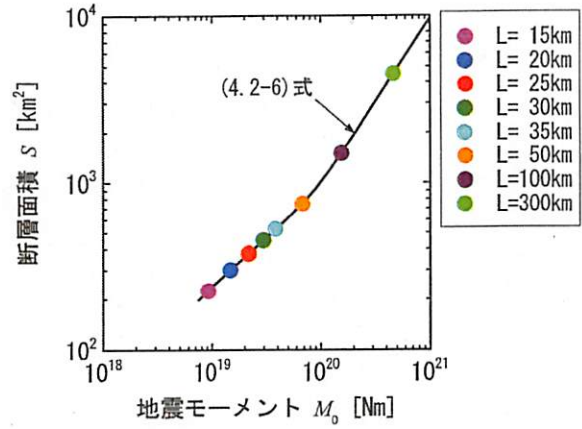


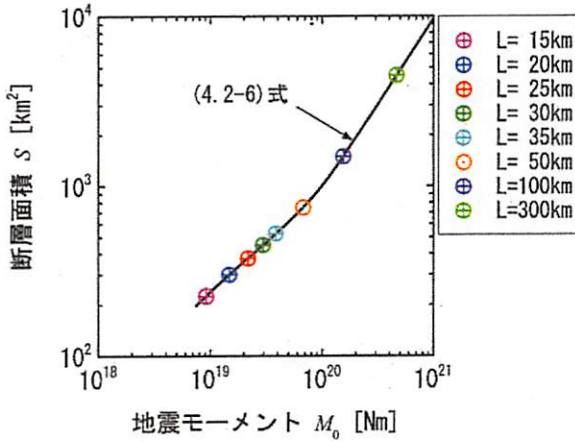
図 4.3-48 動学的断層破壊シミュレーション結果の最終すべり量分布 (アスペリティ=断層中央下端)



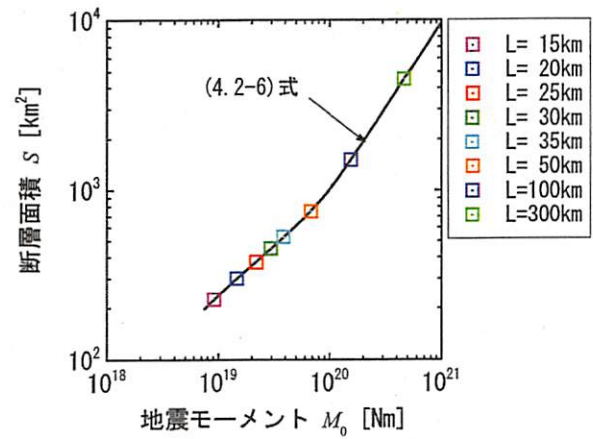
(1) アスペリティ=断層左上端



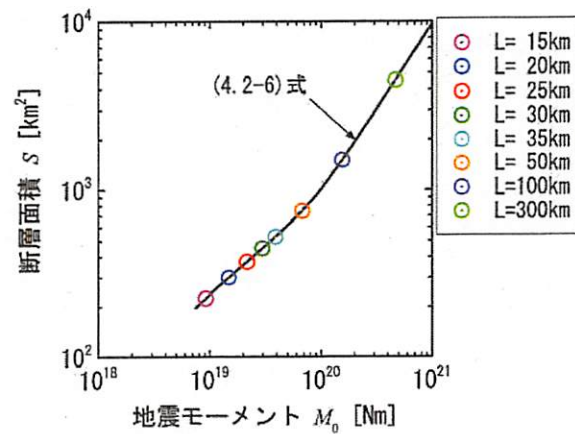
(2) アスペリティ=断層左下端



(3) アスペリティ=断層中央

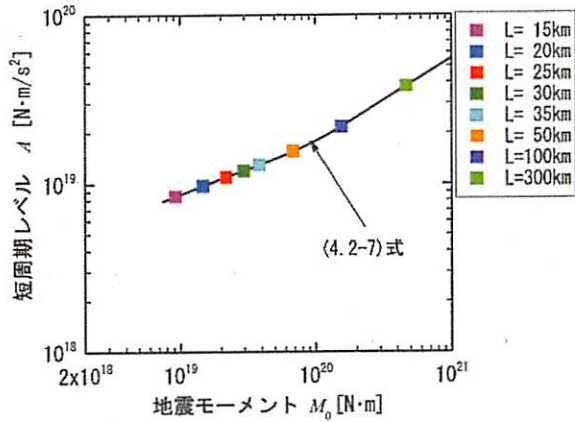


(4) アスペリティ=断層中央上端

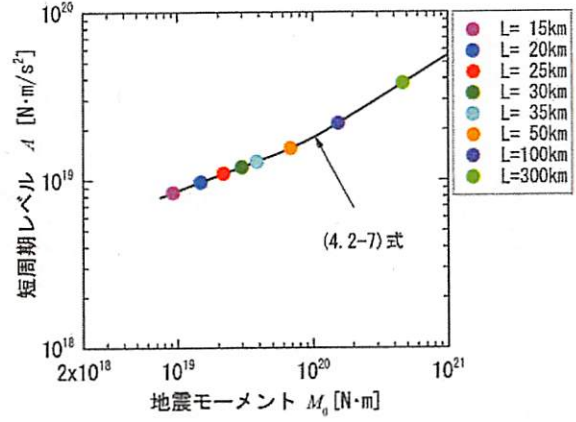


(5) アスペリティ=断層中央下端

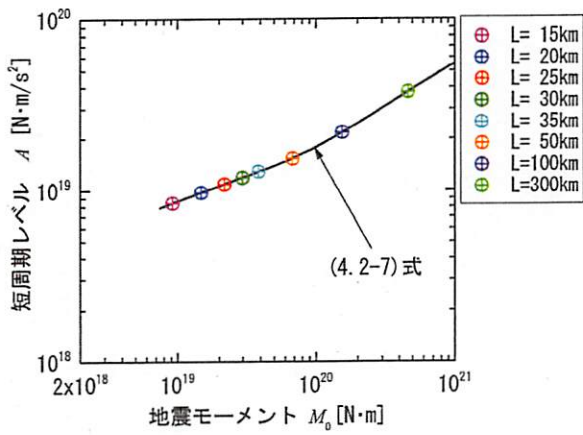
図 4.3-49 地震モーメントと断層面積の関係 ($W_{max}=15\text{km}$)



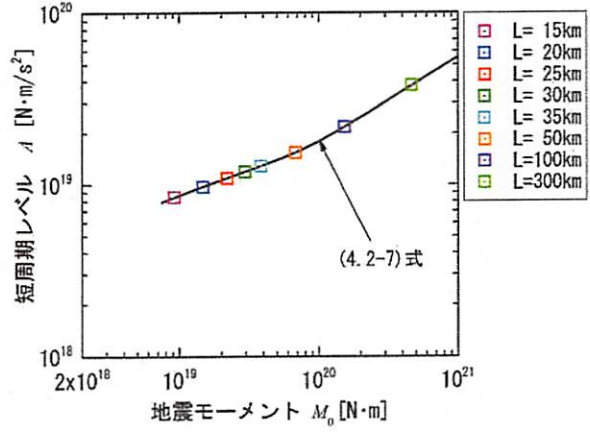
(1) アスペリティ=断層左上端



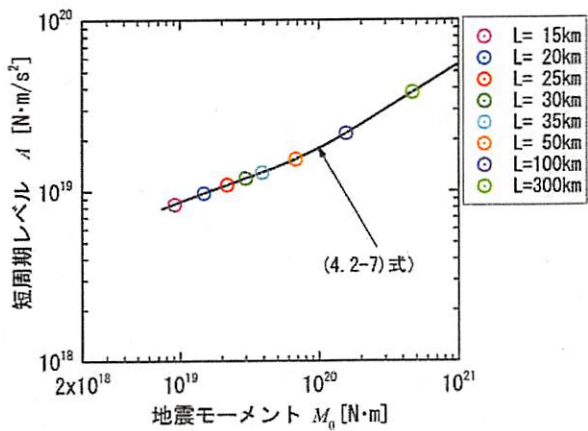
(2) アスペリティ=断層左下端



(3) アスペリティ=断層中央



(4) アスペリティ=断層中央上端



(5) アスペリティ=断層中央下端

図 4.3-50 地震モーメントと短周期レベルの関係 ($W_{max}=15\text{km}$, $\beta=3.5\text{km/s}$)

Wmax=15km 【非一様応力（アスペリティ）を考慮した動学的断層破壊シミュレーション結果】

(アスペリティ位置)					
■	●	⊕	□	○	L= 15km (断層左上端, 断層左下端, 断層中心, 断層上端, 断層下端)
■	●	⊕	□	○	L= 20km (断層左上端, 断層左下端, 断層中心, 断層上端, 断層下端)
■	●	⊕	□	○	L= 25km (断層左上端, 断層左下端, 断層中心, 断層上端, 断層下端)
■	●	⊕	□	○	L= 30km (断層左上端, 断層左下端, 断層中心, 断層上端, 断層下端)
■	●	⊕	□	○	L= 35km (断層左上端, 断層左下端, 断層中心, 断層上端, 断層下端)
■	●	⊕	□	○	L= 50km (断層左上端, 断層左下端, 断層中心, 断層上端, 断層下端)
■	●	⊕	□	○	L=100km (断層左上端, 断層左下端, 断層中心, 断層上端, 断層下端)
■	●	⊕	□	○	L=300km (断層左上端, 断層左下端, 断層中心, 断層上端, 断層下端)

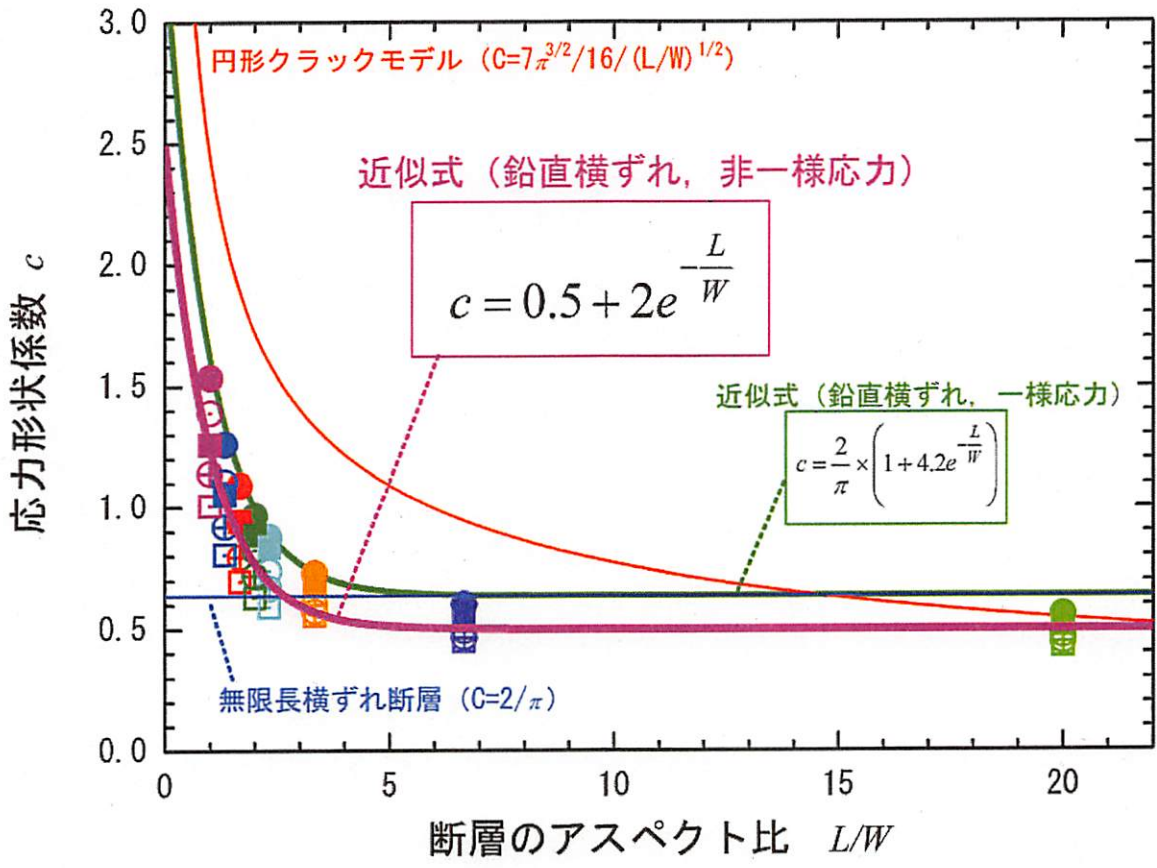


図 4.3-51 断層のアスペクト比と応力形状係数の関係

4.4 議論

4.4.1 不均質な動的応力降下量を考慮した長大横ずれ断層パラメータ算定式の構築

4.3節において、断層長さ15 kmから300 kmまでに対応する応力形状係数 c の算定式を動力的断層破壊シミュレーションにより求め、平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^\#$ と断層面積 S および地震モーメント M_0 との関係として、以下の関係式が得られた。

$$\begin{cases} \Delta\sigma^\# = c \frac{M_0}{LW_{max}^2} \\ c = 0.5 + 2e^{-L/W_{max}} \end{cases} \quad (4.4-1)$$

ここに、4.3節の動力的断層モデルでは地震発生層のみを仮定し、表層部分は考慮していないため、断層幅 W は震源断層幅 W_{max} としている。ここでは、本研究で得られた関係式を用いて、実地震の観測値に整合する断層パラメータの経験的關係式を構築する。対象とする断層パラメータ関係式は、地震モーメント M_0 と断層面積 S の経験的關係式および地震モーメント M_0 と短周期レベル A の経験的關係式である。

(1) 応力形状係数を考慮した断層パラメータ関係式

まず、地震モーメント M_0 と断層面積 S の関係式について整理する。(4.4-1)式から c を消去し、断層長さ L を断層面積 $S (=LW_{max})$ に置き換えると、

$$\Delta\sigma^\# = \left(0.5 + 2e^{-S/W_{max}^2}\right) \times \frac{M_0}{SW_{max}} \quad (4.4-2)$$

となる。

つぎに、地震モーメント M_0 と短周期レベル A の関係式について整理する。(4.2-4)式におけるアスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ を動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^\#$ とし、

$$A = 4\pi(S_{asp}/\pi)^{1/2} \Delta\sigma_{asp}^\# \beta^2 \quad (4.4-3)$$

ここに、 β は断層領域の S 波速度、 S_{asp} はアスペリティの面積である。また、平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^\#$ は、アスペリティの面積 S_{asp} およびアスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^\#$ を用いて、下式により定義されている。

$$\Delta\sigma^\# = \frac{S_{asp}}{S} \Delta\sigma_{asp}^\# \quad (4.4-4)$$

ここで、(4.4-3) 式において(4.4-2) 式と(4.4-4) 式から S と S_{asp} を消去すると、

$$\Delta\sigma_{asp}^{\#} = \frac{A^2 W_{max}}{16\pi\beta^4 (0.5 + 2e^{-S/W_{max}^2}) M_0} \quad (4.4-5)$$

ここに、震源断層面積 S は(4.4-2) 式より地震モーメント M_0 から得られる。

以上より、平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ と震源断層幅 W_{max} の値が既知数であれば、(4.4-2) 式から地震モーメント M_0 と断層面積 S の関係が求められる。また、アスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ と震源断層幅 W_{max} 、震源域のS波速度 β の値が既知数であれば、(4.4-5) 式から地震モーメント M_0 と短周期レベル A の関係が求められる。

(2) 実地震による断層パラメータ

横ずれ断層の内陸地震を対象とした実地震の断層パラメータを用いて、平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ およびアスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ の平均的な数値を求めた。用いた実地震の断層パラメータ一覧を表4.4-1に示す。なお、用いた地震データは第3章の表3.5-2と同じであり、データに関する詳細は第3章に記載しているので参照されたい。なお、第3章の検討と同様に、全地震の断層幅を破壊領域幅 W_{rup} とし、断層面積を破壊領域面積 S_{rup} として扱った。

(3) 平均動的応力降下量の平均値と断層面積—地震モーメントの関係式

まず、各実地震の平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ を算定した。平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ は、各地震の震源断層面積 S と地震モーメント M_0 を(4.4-2) 式に代入して求めた。ここに、震源断層面積 S は、地震発生層の深さを既往の強震動の予測事例(地震調査研究推進本部, 2008 など)を参考に3 km~18 kmであるとして、破壊幅 $W_{rup}=18$ km、震源断層幅 $W_{max}=15$ kmと仮定し、破壊面積 S_{rup} から、

$$S = \frac{W_{max}}{W_{rup}} S_{rup} = \frac{15}{18} S_{rup} \quad (4.4-6)$$

を用いて推定した。なお、表4.4-1の震源断層長さ L と仮定した $W_{max}=15$ kmから、震源断層 S は $S=LW_{max}$ でも推定できるが、ここでは S_{rup} の情報を重視し、(4.4-6) 式を用いた。以上により各地震で算定した平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ を表4.4-2に示す。全地震の平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ の相乗平均を求めたところ、 $\Delta\sigma^{\#}=3.4$ MPaが得られた。(4.4-2) 式に平均動的応力降下量の平均値を代入し、震源断層面積 S と地震モーメント M_0 の関係に書き直すと、以下の式が得られる。

$$M_0 [\text{Nm}] = \frac{3.4 [\text{MPa}] S [\text{km}^2] W_{max} [\text{km}]}{0.5 + 2e^{-S [\text{km}^2] / (W_{max} [\text{km}])^2}} \times 10^{15} \quad (4.4-7)$$

また、破壊面積 S_{rup} と地震モーメント M_0 の関係は、(4.4-7) 式に(4.4-6) 式を代入して、

$$M_0[\text{Nm}] = \frac{3.4[\text{MPa}] \frac{15}{18} S_{rup}[\text{km}^2] W_{max}[\text{km}]}{0.5 + 2e^{-\frac{15}{18} S_{rup}[\text{km}^2] / (W_{max}[\text{km}])^2}} \times 10^{15} \quad (4.4-8)$$

となる。図4.4-1に(4.4-8)式による破壊面積と地震モーメントの関係を赤色曲線で示す。また、表4.4-1の地震データにおける短周期レベルと地震モーメントの関係を、日本の地震のデータ(黒丸)と日本以外の地震データ(白抜き丸)でそれぞれ示す。なお、参考までに、入倉・三宅(2001)による経験的關係式、

$$S[\text{km}^2] = 4.24 \times 10^{-11} \times (M_0[\text{dyne} \cdot \text{cm}])^{1/2} \quad (4.4-9)$$

を点線で、室谷・他(2010)による長大断層用の経験的關係式、

$$S[\text{km}^2] = 1.0 \times 10^{-17} \times (M_0[\text{N} \cdot \text{m}]) \quad (4.4-10)$$

を破線で同図に重ねて示す。ここに、入倉・三宅(2001)および室谷・他(2010)における断層面積 S には地震発生層より浅い部分も含まれている可能性もあるため、断層面積 S を破壊面積 S_{rup} とみなしている。図より、本研究で求めた経験的關係は、地震モーメントが大きい領域ではデータの平均的な位置に比べてやや大きいところに位置しているものの、全体的にはほぼ地震データの平均的な位置にある。

また、第3章において一様の動的応力降下量を考慮した動学的断層モデルから求めた破壊面積と地震モーメントの経験的關係(図3.5-1, (3.5-8)式)を、図4.4-1に一点鎖線で重ねて示す。本章で求められた経験的關係(同図赤色線)と比べると、ほぼ同じ曲線を示している。これは、同じ実地震データを用いているため当然ではあるが、アスペリティを考慮するしないにかかわらず、破壊面積と地震モーメントの關係の傾向は不変であることを意味する。ただし、実地震データから求めた平均動的応力降下量の平均値は、一様応力断層では4.4 MPaであるのに対し、非一様応力断層では3.4 MPaである点が異なっており、アスペリティを考慮した非一様応力断層は一様応力断層に比べて平均動的応力降下量が小さい値を示している。このことは、ある地震モーメント値を得るために必要な平均動的応力降下量が、非一様応力断層では一様応力断層に比べて小さいことを意味し、これは、アスペリティの周辺の背景領域ではアスペリティの破壊によって、応力降下量がゼロでもすべりが発生することで説明できる。なお、図4.3-51において、全てのケースで応力形状係数 c が一様応力断層による近似式を下回っていることから、アスペリティ位置の違いによる応力降下量のばらつきを考慮しても平均動的応力降下量の平均値は4.4 MPaを超えることはないと考えられる。

(4) アスペリティの動的応力降下量の平均値と短周期レベル—地震モーメントの關係式

つぎに、各実地震のアスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ を算定した。アスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ は、各地震の地震モーメントと短周期レベルを(4.4-5)式に代入して求めた。ここに、震源断層面積 S は(4.4-7)式により地震モーメントから求めた値を用いた。また、震源域のS波速度 β

は、地震調査研究推進本部（2008）の事例にあわせて3.46 km/sとし、震源断層幅 W_{max} を15 kmとした。以上により、短周期レベルのデータを持つ5地震で算定したアスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ を表4.4-2に示す。 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ が得られた5地震の相乗平均を求めたところ、 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}=12.2$ MPaとなった。(4.4-5)式にアスペリティの動的応力降下量の平均値を代入し、短周期レベル A と地震モーメント M_0 の関係に書き直すと、以下の式となる。

$$M_0[\text{Nm}] = \frac{(A[\text{Nm/s}^2])^2 W_{max}[\text{km}]}{16\pi(\beta[\text{km/s}])^4 \left\{ 0.5 + 2e^{-S[\text{km}^2]/(W_{max}[\text{km}])^2} \right\} 12.2[\text{MPa}]} \times 10^{-15} \quad (4.4-11)$$

(4.4-11)式の短周期レベルと地震モーメントの関係を、図4.4-2に赤色曲線で示す。また、表4.4-1の地震データにおける短周期レベルと地震モーメントの関係を、日本の地震のデータ（黒丸）と日本以外の地震データ（白抜き丸）でそれぞれ示す。なお、参考として、壇・他（2001）による経験的関係式を同図に点線で重ねて示す。図より、壇・他（2001）による経験的關係は地震データに比べてやや大きい短周期レベルを示しているのに対して、本研究で求めた経験的關係は地震データの平均的な位置にある。壇・他（2001）の経験的關係は逆断層も含めた全断層タイプから求めていることより、本研究で対象としている横ずれ断層は比較的小さい短周期レベルであると考えられる。この傾向は、横ずれ断層による内陸地震の短周期レベルが逆断層による内陸地震の短周期レベルより系統的に小さいとする壇・他（2010b）や佐藤（2010）の解析結果と整合している。

第3章において一様の動的応力降下量を考慮した動学的断層モデルから求めた経験的關係（図3.5-2, (3.5-11)式）を図4.4-2に一点鎖線で重ねて示す。本章で求められた経験的關係（同図赤色線）と比べると、破壊面積と地震モーメントの關係式と同様、同じ実地震データを用いているため、ほぼ同じ曲線を示している。ここで、アスペリティの動的応力降下量の値は、一様応力断層では9.5 MPaであるのに対し、非一様応力断層では12.2 MPaと大きい値となっている。前述の平均動的応力降下量では、非一様応力断層による平均値が一様応力断層による平均値に比べて小さい値を示しており、一見矛盾しているように思われるが、(4.4-3)式と(4.4-4)式から、以下の式に展開すると平均動的応力降下量とアスペリティの応力降下量は反比例の關係となっていることから説明できる。

$$\Delta\sigma_{asp}^{\#} = A^2 / (16\pi\beta^4 S \Delta\sigma^{\#}) \quad (4.4-12)$$

(5) 日本の地震データのみを用いた場合における動的応力降下量の平均値

参考までに、表4.4-1(a)に示す日本で発生した内陸横ずれ地震のデータのみを用いて、平均動的応力降下量とアスペリティの動的応力降下量の各相乗平均を求めてみたところ、平均動的応力降下量3.8 MPa、アスペリティの動的応力降下量15.2 MPaとなった。それぞれの動的応力降下量の平均値より得られる、地震モーメントと破壊面積の關係および地震モーメントと短周期レベルの關係を図4.4-1と図4.4-2に青色曲線で重ねて示す。日本以外の地震データを含めた場合の経験的關係式（赤

色曲線) に比べて、地震モーメントと破壊面積の関係図ではやや下方、地震モーメントと短周期レベルの関係図ではやや上方に位置しており、図の黒丸で示す日本の地震データの平均的な位置に移動している。本来、日本で発生する地震の断層パラメータを想定するには、日本の地震データのみを用いるべきであるが、日本の地震データでは1891年濃尾地震(地震モーメント $1.5 \times 10^{20} \text{Nm}$)が最大であり、長大断層の規模のデータがやや不足しているため、本研究では、日本以外の地震も含めた動的応力降下量(平均動的応力降下量3.4 MPa, アスペリティの動的応力降下量12.2 MPa)を、後述で提案する断層パラメータの算定に用いる。

表 4.4-1 横ずれ断層による内陸地震の断層パラメータ

(a) 日本

地震名	気象庁マグニチュード	断層長さ <i>L</i> [km]	破壊領域幅 <i>W_{rup}</i> [km]	破壊領域面積 <i>S_{rup}</i> (= <i>L</i> × <i>W_{rup}</i>) [km ²]	地震モーメント <i>M₀</i> [Nm]	短周期レベル <i>A</i> [Nm/s ²]	参考文献
	<i>M_J</i> ※1						
1891年 濃尾	8.0	80, 34	15, 13	1642	1.5E+20	—	Mikumo and Ando (1976)
1927年 北丹後	7.3	35	13	455	4.6E+19	—	Kanamori (1973)
1930年 北伊豆	7.3	22	12	264	2.70E+19	—	Abe (1978)
1943年 鳥取	7.2	33	13	429	3.6E+19	—	Kanamori (1972)
1948年 福井	7.1	30	13	390	3.3E+19	—	Kanamori (1973)
1978年 伊豆大島近海	7.0	17	10	170	1.1E+19	—	Shizasaki and Somerville (1979)
1995年 兵庫県南部	7.3	60	20	1200	1.80E+19	1.62E+19	Somerville et al. (1999) 瑛・他 (2010b)
2000年 鳥取県西部	7.3	26	14	364	8.62E+18	5.93E+18	武藤・他 (2009) 瑛・他 (2010a)
2005年 福岡県西方沖	7.0	24	20	480	1.15E+19	1.09E+19	瑛・他 (2010a)

※1 気象庁 (2009)

(b) 日本以外

地震名	モーメントマグニチュード	断層長さ <i>L</i> [km]	破壊領域幅 <i>W_{rup}</i> [km]	破壊領域面積 <i>S_{rup}</i> (= <i>L</i> × <i>W_{rup}</i>) [km ²]	地震モーメント <i>M₀</i> [Nm]	短周期レベル <i>A</i> [Nm/s ²]	参考文献
	<i>M_W</i>						
1906年 San Francisco	7.9	432	12	5184	8.32E+20	—	Stirling et al. (2002) Ozcar and Beck (2004)
1976年 Motagua	7.5	257	13	3341	2.04E+20	—	Stirling et al. (2002) Global CMT Web
1976年 Tangshan	7.6	70	24	1680	2.77E+20	—	Stirling et al. (2002) Global CMT Web
1988年 Lancang-Gengma	7.0	80	20	1600	3.66E+19	—	Stirling et al. (2002) Global CMT Web
1990年 Luzon Island	7.7	120	20	2400	4.07E+20	—	阿部 (1990) Global CMT Web
1992年 Landers	7.3	69	15	1035	1.06E+20	1.15E+19	Somerville et al. (1999) Global CMT Web 瑛・他 (2001)
1997年 Ardakul	7.2	100	15	1500	7.35E+19	—	菊地 (2003) Global CMT Web
1997年 Manyi	7.5	175	15	2625	2.23E+20	—	Hanks and Bakun (2008) Global CMT Web
1999年 Kocaeli	7.6	141	23.3	3285.3	2.88E+20	3.05E+19	Sekiguchi and Iwata (2002) Global CMT Web
1999年 Hector Mine	7.1	74.27	20	1485.4	5.98E+19	—	Simons et al. (2002) Global CMT Web
1999年 Duzce	7.1	49	24.5	1200.5	6.65E+19	—	Burgmann et al. (2002) Global CMT Web
2001年 Kunlun	7.8	400	30	12000	5.9E+20	—	Lin et al. (2003) Global CMT Web
2002年 Denali	7.8	292.5	18	5265	7.48E+20	—	Asano et al. (2005) Global CMT Web

表 4.4-2 横ずれ断層による内陸地震の断層パラメータから算定した動的応力降下量

地震名	破壊領域面積	(4.4-6)式による 断層面積	地震モーメント	短周期レベル	(4.4-2)式による ^{注)} 平均動的応力降下量	(4.4-7)式による ^{注)} 断層面積	(4.4-5)式による ^{注)} アスベリテリの 動的応力降下量
	S_{np} [km ²]	S [km ²]	M_0 [Nm]	A [Nm/s ²]	$\Delta\sigma^d$ [MPa]	S_1 [km ²]	$\Delta\sigma_{asp}^d$ [MPa]
1891年 濃尾	1642	1368	1.5E+20	—	3.7	—	—
1927年 北丹後	455	379	4.6E+19	—	7.0	—	—
1930年 北伊豆	264	220	2.70E+19	—	10.2	—	—
日 1943年 鳥取	429	358	3.6E+19	—	6.1	—	—
1948年 福井	390	325	3.3E+19	—	6.6	—	—
本 1978年 伊豆大島近海	170	142	1.1E+19	—	8.1	—	—
1995年 兵庫県南部	1200	1000	1.80E+19	1.62E+19	0.6	335	31.9
2000年 鳥取県西部	364	303	8.62E+18	5.93E+18	1.9	215	6.7
2005年 福岡県西方沖	480	400	1.15E+19	1.09E+19	1.6	257	18.9
1905年 San Francisco	5184	4320	8.32E+20	—	6.4	—	—
1976年 Motagua	3341	2784	2.04E+20	—	2.4	—	—
1976年 Tangshan	1680	1400	2.77E+20	—	6.6	—	—
1988年 Lancang-Gengma	1600	1333	3.66E+19	—	0.9	—	—
日 1990年 Luzon Island	2400	2000	4.07E+20	—	6.8	—	—
1992年 Landers	1035	863	1.06E+20	1.15E+19	4.5	1074	5.0
1997年 Ardaku	1500	1250	7.35E+19	—	2.0	—	—
以 1997年 Manyi	2625	2188	2.23E+20	—	3.4	—	—
外 1999年 Kocaeli	3285.3	2738	2.88E+20	3.05E+19	3.5	2824	13.5
1999年 Hector Mine	1485.4	1238	5.98E+19	—	1.6	—	—
1999年 Duzce	1200.5	1000	6.65E+19	—	2.3	—	—
2001年 Kunlun	12000	10000	5.9E+20	—	2.0	—	—
2002年 Denali	5265	4388	7.48E+20	—	5.7	—	—

注) $V_{max}=15\text{km}$, $\beta=3.46\text{km/s}$ で算定

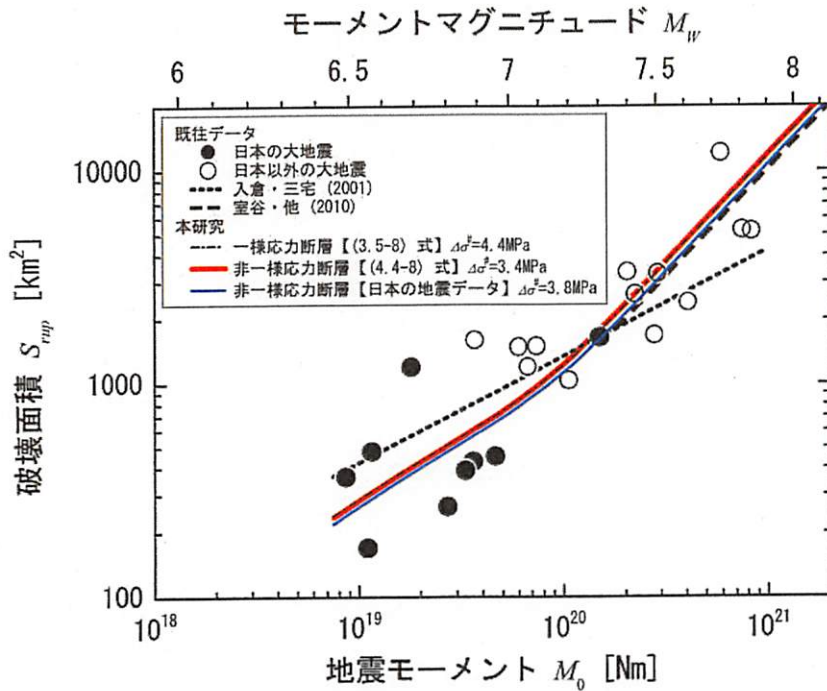


図 4.4-1 横ずれ型内陸地殻内地震における地震モーメントと破壊面積の関係 ($W_{max}=15\text{km}$)
 【非一様応力断層：断層面に不均質な応力降下量を考慮した動学的断層モデルの検討結果】

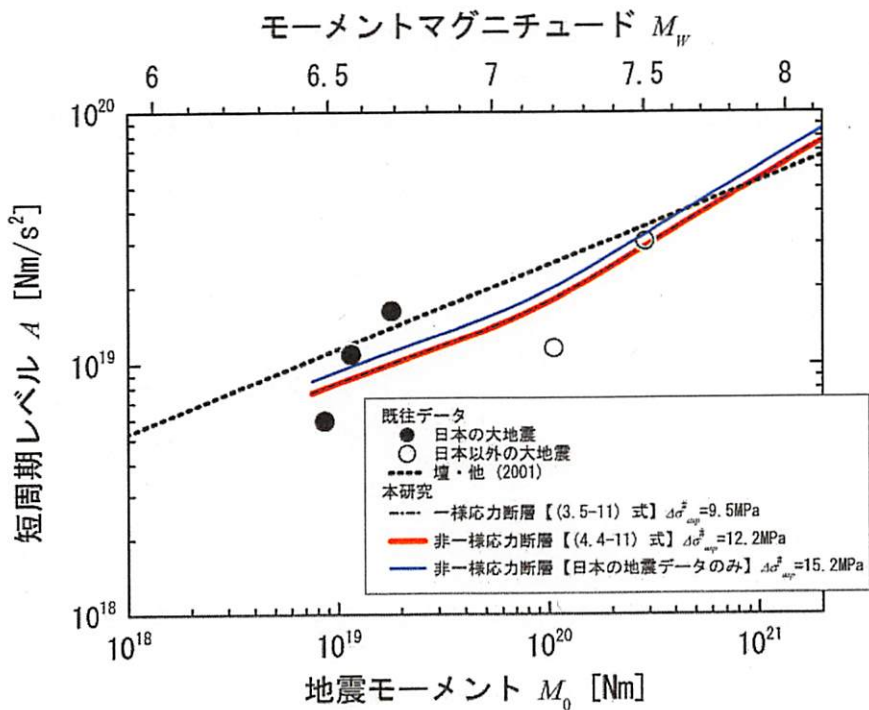


図 4.4-2 横ずれ型内陸地殻内地震における地震モーメントと短周期レベルの関係
 ($W_{max}=15\text{km}$, $\beta=3.46\text{km/s}$)

【非一様応力断層：断層面に不均質な応力降下量を考慮した動学的断層モデルの検討結果】

4.4.2 断層パラメータ関係式による平均すべり量および背景領域のすべり量のスケーリング

4.4.1項により、鉛直横ずれ断層における平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}=3.4$ MPaと、アスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}=12.2$ MPaおよび、それらの動的応力降下量値を基にした断層パラメータの関係式が得られた。ここでは、構築した断層パラメータ算定式により、震源断層の平均すべり量および背景領域のすべり量への影響を検討した。まず、断層の平均すべり量 D と震源断層長さ L がどのような関係になるかを調べた。平均すべり量 D と地震モーメント M_0 の関係は、地震モーメント M_0 の定義式 $M_0=\mu DS$ と(4.4-1)式から地震モーメント M_0 を消去し、

$$D = \frac{\Delta\sigma^{\#} W_{max}}{\mu (0.5 + 2e^{-L/W_{max}})} \quad (4.4-13)$$

となる。図4.4-3に、上式による震源断層長さ L と平均すべり量 D との関係を実線で示す。同図には、入倉・三宅(2001)による地震モーメントと断層面積の関係式を、強震動予測の実務(例えば、地震調査研究推進本部, 2005など)に合わせて震源断層面積 S と地震モーメント M_0 の関係であるとして求めた震源断層長さ L と平均すべり量 D との関係も鎖線で示す。また、表4.4-1の地震データによる断層長さ L と(地震モーメントと断層面積から算定した)平均すべり量の関係も併せて示す。ここに、震源断層の幅は $W_{max}=15$ kmとし、せん断剛性率 μ は既往の強震動の予測事例(地震調査研究推進本部, 2005など)を参考に 3.23×10^{10} N/m²とした。図より、入倉・三宅(2001)による値が、震源断層長さ L が短いところで地震データの平均に比べてやや下側にきて、逆に震源断層長さ L が長いところで地震データの平均に比べてやや上側にきているのに対して、本研究による値は全域で地震データの平均的な位置にきていることがわかる。また、本研究の方法によれば、平均すべり量 D は、震源断層長さ L が約80 kmを超えるとほぼ300 cmで一定となることがわかる。したがって、本研究でいう長大断層とは、長さ約80 kmよりも長い断層であるといえよう。この結果は、従来から指摘されているように、平均すべり量 D は、小地震では震源断層の長さ L に比例し、大地震になるにつれて震源断層長さ L に関わらず一定になると考えられていること(例えば、大中・松浦, 2002)と整合する結果である。

つぎに、背景領域のすべり量 D_{back} について検討した。背景領域のすべり量 D_{back} は、3.2節で示した式、

$$D_{back} = \frac{M_0}{\mu S} \frac{1 - 2S_{asp}/S}{1 - S_{asp}/S} \quad (4.4-14)$$

から算定する。ここで、アスペリティと震源断層の面積比 S_{asp}/S は、(4.4-4)式に動的応力降下量の平均値を代入して、

$$\frac{S_{asp}}{S} = \frac{\Delta\sigma^{\#}}{\Delta\sigma_{asp}^{\#}} = \frac{3.4}{12.2} = 0.28 \quad (4.4-15)$$

となり、(4.4-14) 式に (4.4-15) 式を代入して、

$$D_{back} = \frac{M_0}{\mu S} \frac{1-0.56}{1-0.28} = 0.61D \quad (4.4-16)$$

となる。図4.4-4に、上式による背景領域のすべり量 D_{back} と地震モーメント M_0 との関係を示す。図より、円形クラックの式を用いる従来の断層モデル設定手法では、地震モーメント M_0 が大きくなると背景領域のすべり量 D_{back} が負になるのに対し、本研究の方法によれば、地震モーメント M_0 が大きくなっても、背景領域のすべり量 D_{back} は負になることはないことがわかる。また、本研究の方法では、地震モーメント M_0 が約 2×10^{20} Nmを超えると、背景領域のすべり量 D_{back} は約200 cmで一定となることがわかる。

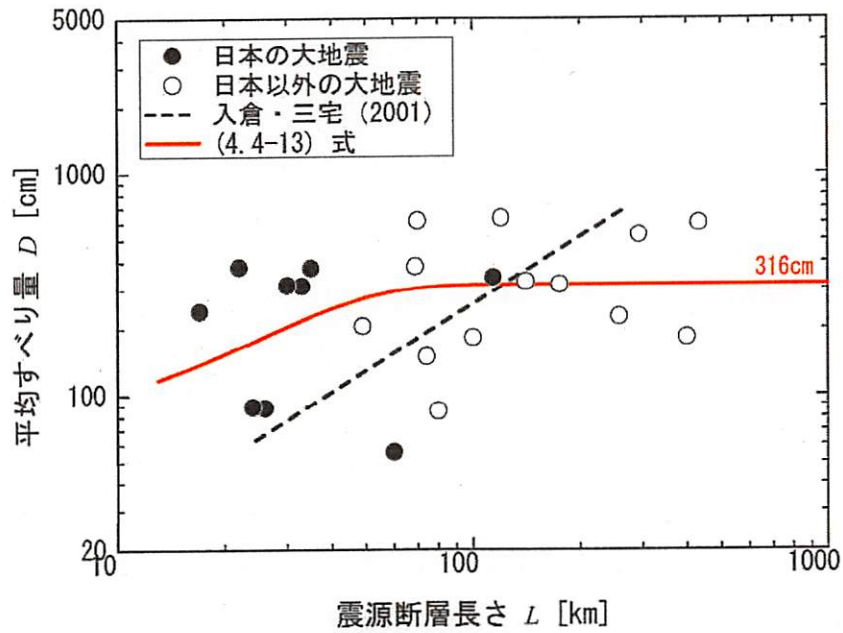


図 4.4-3 横ずれ型内陸地殻内地震における断層長さと平均すべり量の関係
 ($W_{max}=15\text{km}$, $\beta=3.46\text{km/s}$)

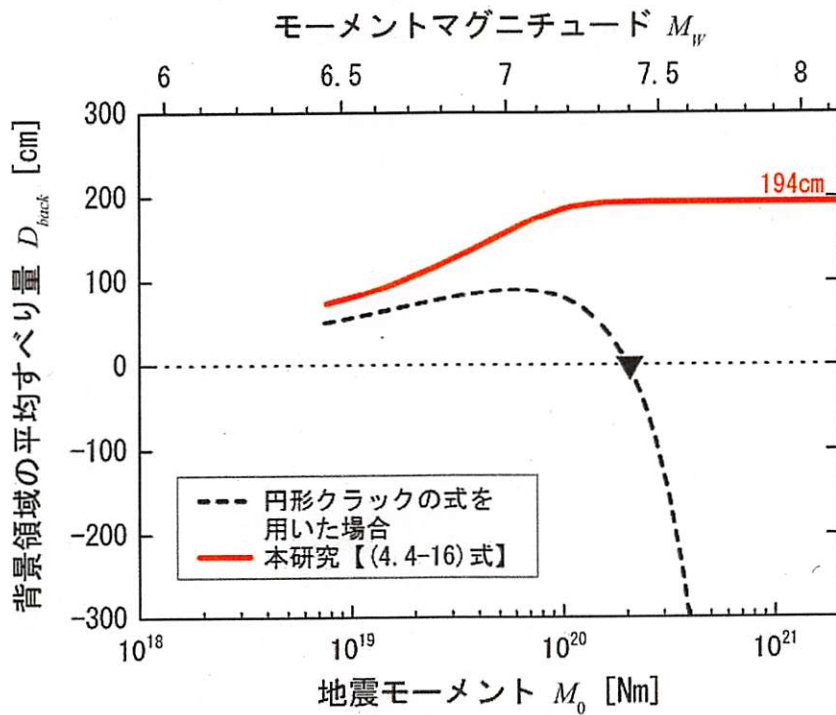


図 4.4-4 横ずれ型内陸地殻内地震における地震モーメントと背景領域のすべり量の関係
 ($W_{max}=15\text{km}$, $\beta=3.46\text{km/s}$)

4.4.3 長大横ずれ断層に適応する断層パラメータ算定手法の提案とアスペリティモデルの設定例

わが国の強震動予測で最も多く用いられている断層モデルはアスペリティモデルで、このモデルは断層面積 S 、平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、アスペリティの面積 S_{asp} 、アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ 、地震モーメント M_0 、短周期レベル A の6つの主要パラメータで構成されている(地震調査研究推進本部, 2008など)。4.4.1項において、平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}=3.4$ MPaとアスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}=12.2$ MPaが決まったので、ここでは、平均応力降下量 $\Delta\sigma$ の代わりに平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ を、アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}$ の代わりにアスペリティの動的応力降下量 $\Delta\sigma_{asp}^{\#}$ を用いたアスペリティモデルのパラメータ算定手法を提案する。

本研究が提案するアスペリティモデルのパラメータ算定手順を図4.4-5に示す。図4.4-5では、はじめに、地震調査研究推進本部(2008)と同様に、震源断層長さ L が活断層長さ L_{act} と等しいとしたうえで、破壊領域の幅 W_{rup} を $W_{rup}=dep_2$ で、震源断層の幅 W_{max} を $W_{max}=dep_2-dep_1$ で求めている。そのあとで、破壊面積 S_{rup} を $S_{rup}=LW_{rup}$ で、震源断層面積 S を $S=LW_{max}$ で算定している。なお、活断層は何回もの地震の活動により地表に残された痕跡で、地表地震断層は1回の地震の活動により地表に現れた地盤変動であるため、通常は地表地震断層よりも活断層の方が長い。したがって、ここでは、活断層に起因する地震のうち最大規模の地震を想定していることになる。アスペリティモデルの主な6つのパラメータの算定式は下に示す6つの式となる。

$$S = LW_{max} \quad (4.4-17)$$

$$\Delta\sigma^{\#} = 3.4 \text{ MPa} \quad (4.4-18)$$

$$\Delta\sigma_{asp}^{\#} = 12.2 \text{ MPa} \quad (4.4-19)$$

$$\begin{cases} M_0 = SW_{max}\Delta\sigma^{\#} / c \\ c = 0.5 + 2 \exp[-L / W_{max}] \end{cases} \quad (4.4-20)$$

$$S_{asp} = \frac{\Delta\sigma^{\#}}{\Delta\sigma_{asp}^{\#}} S \quad (4.4-21)$$

$$A = 4\pi\beta^2 (S_{asp} / \pi)^{1/2} \Delta\sigma_{asp}^{\#} \quad (4.4-22)$$

ここに、震源断層の幅は、破壊領域の幅のうち、図4.2-1に示すように地震発生層の中の部分であり、同様に、震源断層の面積は破壊面積のうち、地震発生層の中の部分である。また、(4.4-20)式は、本研究で提案する地震モーメントの算定式であり、(4.4-20)式の下段は、本章の不均質な動的応力降下量を考慮した動学的断層破壊シミュレーションで求められた、応力形状係数 c と断層のアスペクト比の関係式である。なお、(4.4-21)式はMadariaga(1979)によるアスペリティモデルの一般式である。また、(4.4-22)式は円形クラックモデルを念頭においたBrune(1970)による経験式であるが、のちに、Boatwright(1988)が断層の動学的破壊シミュレーションによるアスペリ

ティモデルにも適用できることを示した式である。(4.4-22)式に示す β は震源におけるS波速度である。

アスペリティモデルのその他のパラメータは、アスペリティのすべり量 D_{asp} 、背景領域の面積 S_{back} 、背景領域のすべり量 D_{back} 、背景領域の実効応力 σ_{back} であり、それぞれ、下の4つの式で算定される。

$$D_{asp} = 2D \quad (4.4-23)$$

$$S_{back} = S - S_{asp} \quad (4.4-24)$$

$$D_{back} = (SD - S_{asp}D_{asp}) / S_{back} \quad (4.4-25)$$

$$\sigma_{back} = \sigma_{asp}^{\#} (D_{back} / W_{back}) / (D_{asp} / W_{asp}) \quad (4.4-26)$$

ここに、(4.4-23)式はSomerville *et al.* (1999)による経験的な関係式で、平均すべり量 D は地震モーメントの定義 $M_0 = \mu SD$ より、 $D = M_0 / (\mu S)$ で求められる。 μ は震源のせん断剛性率である。また、(4.4-24)式はアスペリティの面積と背景領域の面積の和が震源断層全体の面積となること、(4.4-25)式はアスペリティの地震モーメントと背景領域の地震モーメントの和が震源断層全体の地震モーメントとなることから導かれる。一方、(4.4-26)式は実効応力はすべり量に比例し断層幅に反比例すると仮定したときの式で、アスペリティでは実効応力と動的応力降下量は等しいとしている(壇・他, 2002)。

以上の手順に従って、活断層の長さが25 km, 50 km, 100 km, 200 km, 400 kmの5つの場合のアスペリティモデルのパラメータを算定した結果を表4.4-3に示す。また、比較として、3.2節で示した、従来の円形クラックの式を用いた地震調査研究推進本部(2008)の方法(図4.4-6参照)によって設定したアスペリティモデルのパラメータ算定結果を表4.4-3に併せて示す。なお、パラメータの算定にあたって、地震発生層は深さ3 km~18 kmとし、震源のS波速度 β とせん断剛性率 μ は、それぞれ $\beta = 3.46$ km/s, $\mu = 3.23 \times 10^{10}$ N/m²とした。

表4.4-3より、円形クラック式を用いた従来の方法では、活断層の長さが長くなって200 kmになると、背景領域のすべり量が負となり、さらに長くなって400 kmになると、アスペリティの面積が震源断層の面積よりも大きくなり、合理的なアスペリティモデルが設定できなくなることがわかる。対して、本研究が提案する方法では、全モデルを通して応力降下量が一定であるため、アスペリティの面積は震源断層の面積より大きくなることは無く、また、活断層の長さが100 kmを超えると、活断層の長さに対する背景領域のすべり量の変化率は小さくなり、活断層の長さが200 km以上では194 cmの一定値となることがわかる。

また、活断層長さが25 kmのときは、本研究が提案する方法による短周期レベルと従来の円形クラック式を用いた方法による短周期レベルはほぼ等しくなっている。これは、図4.4-1と図4.4-2に示したように、本研究が提案する方法は円形クラックの式を用いた従来の方法に比べて、破壊面積が小さいときは地震モーメントは大きめに、短周期レベルは小さめになるので、破壊面積が同程度に小さいときの短周期レベルは同程度になると考えられる。一方、破壊面積が大きいときは、本研

究が提案する方法は円形クラック式を用いた従来の方法に比べて、地震モーメントは小さめに、短周期レベルはほぼ同程度になるので、活断層長さが200 kmや400 kmのときは、本研究が提案する方法による短周期レベルは円形クラック式を用いた従来の方法による短周期レベルよりやや小さくなっていることがわかる。

さらに、アスペリティのすべり量について見てみると、円形クラック式を用いた従来の方法では活断層の長さに対するアスペリティのすべり量の変化率は一定で、活断層の長さに比例して大きくなっている。対して、本研究が提案する方法では、図4.4-3の平均すべり量と震源断層長さの関係からもわかることではあるが、活断層の長さが長くなると、活断層の長さに対するアスペリティのすべり量の変化率は小さくなり、活断層の長さが200 kmを超えると、アスペリティのすべり量の変化率はゼロとなり、アスペリティのすべり量は631 cmと一定になっていることが特徴である。

以上より、断層長さが100 kmを超えない場合には、本研究が提案する方法で算定したアスペリティモデルのパラメータと、円形クラック式を用いた従来の方法で算定したアスペリティモデルのパラメータに大きな差はなく、本研究で提案する方法で設定した断層モデルで生成される地震波は、地震調査研究推進本部（2008）などによる既往の方法で設定した断層モデルで生成される地震波と整合したものとなると推察される。一方、断層長さが100 kmを超える場合については、本研究が提案する方法を用いて、活断層長さが50 km, 100 km, 400 kmの場合の強震動を統計的グリーン関数法により試算し、既往の地震記録や司・翠川（1999）の距離減衰式との比較により、生成される地震波が妥当であることを壇・他（2012）が確認している。

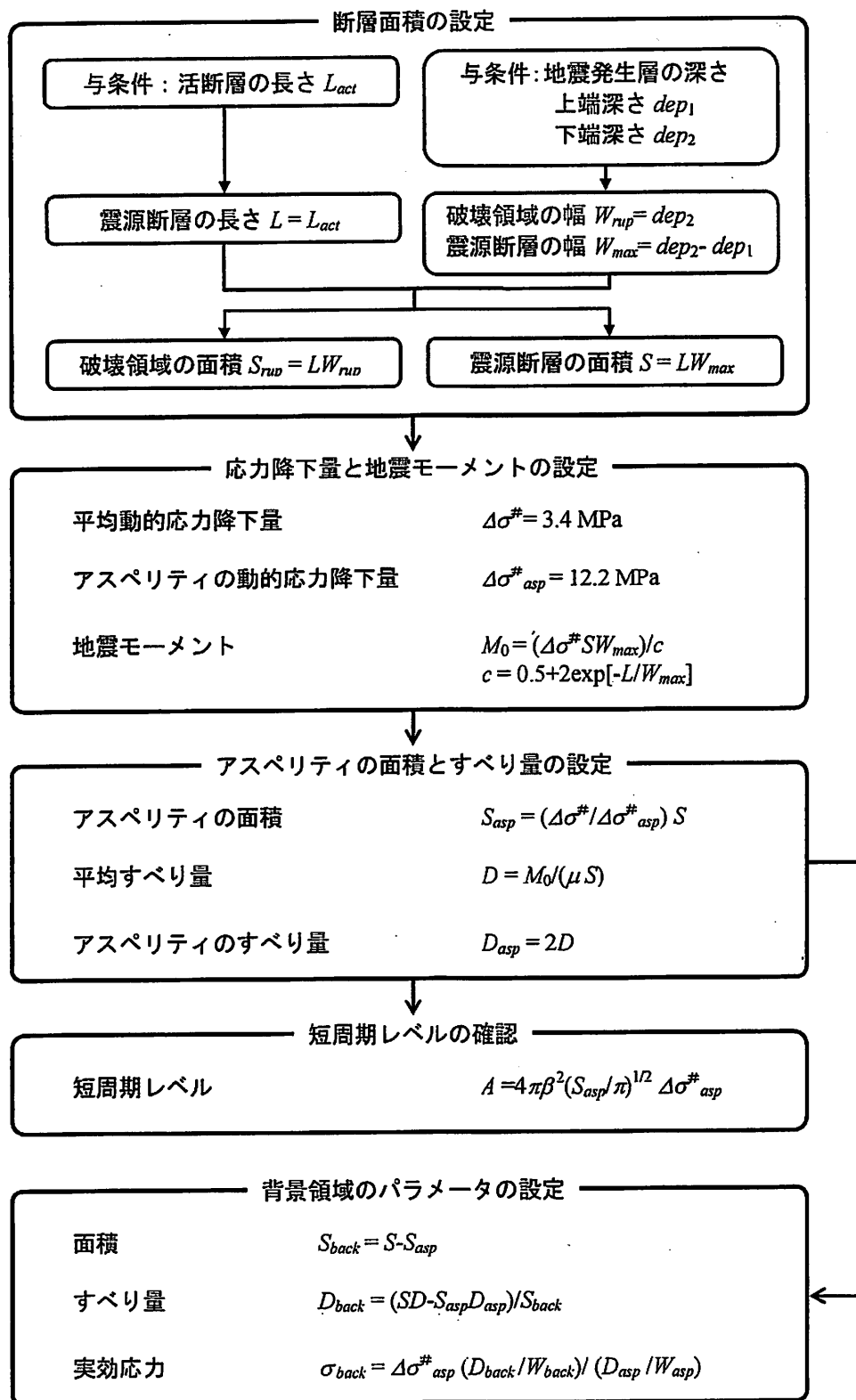


図 4.4-5 本研究で提案する長大な横ずれ断層による内陸地震の強震動予測用の断層パラメータ算定手順

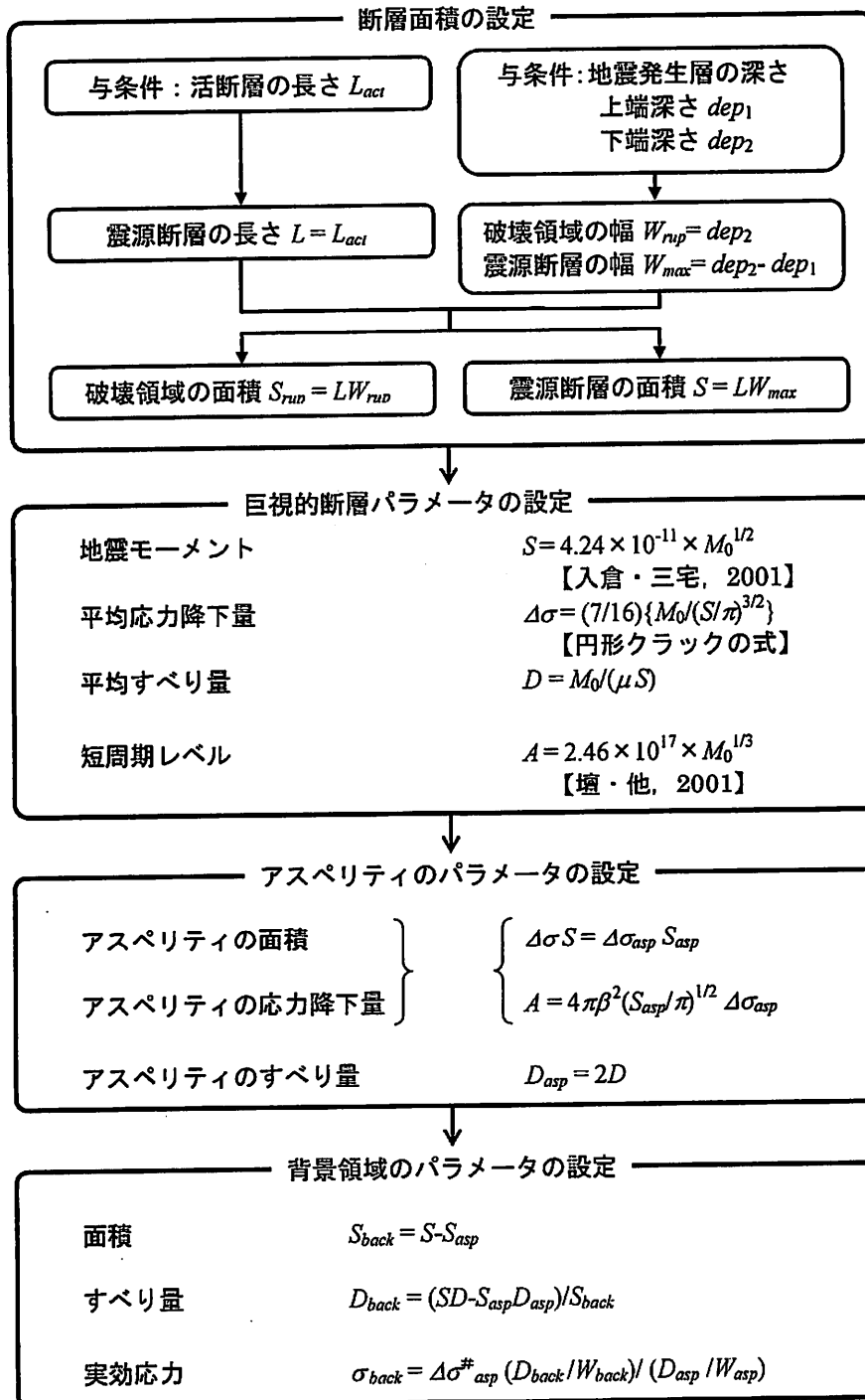


図 4.4-6 円形クラックを用いた既往の強震動予測用の断層パラメータ算定手順 (大地震)

表 4.4-3 断層パラメータの算定例

活断層 の長さ L_{act} [km]	破壊領域 の厚さ W_{rup} [km]	破壊 面積 S_{rup} [km ²]	震源断層 の幅(注1) W_{max} [km]	震源断層 面積 S [km ²]	地震 モーメント M_0 [Nm]	モーメント マグニチュード M_H	短周期 レベル A [Nm/s ²]	平均応力 降下量(注2) $\Delta\sigma$ [MPa]	アスペリティ の面積 S_{asp} [km ²]	アスペリティの 応力降下量(注3) $\Delta\sigma_{asp}$ [MPa]	アスペリティ のすべり量 D_{asp} [cm]	背景領域の すべり量 D_{back} [cm]
円形クラックの式を用いた従来の方法												
25	18	450	15	375	7.82×10^{18}	6.5	1.05×10^{19}	2.6	63	15.6	129	51
50	18	900	15	750	3.13×10^{19}	6.9	1.67×10^{19}	3.7	200	13.9	258	82
100	18	1800	15	1500	1.25×10^{20}	7.3	2.65×10^{19}	5.2	635	12.4	516	69
200	18	3600	15	3000	5.01×10^{20}	7.7	4.21×10^{19}	7.4	2017	11.0	1033	-543
400	18	7200	15	6000	2.00×10^{21}	8.1	6.68×10^{19}	10.5	6403(注4)	-	-	-
本研究が提案する方法												
25	18	450	15	375	2.18×10^{19}	6.8	1.06×10^{19}	3.4	105	12.2	360	110
50	18	900	15	750	6.69×10^{19}	7.2	1.50×10^{19}	3.4	209	12.2	552	169
100	18	1800	15	1500	1.52×10^{20}	7.4	2.12×10^{19}	3.4	418	12.2	628	193
200	18	3600	15	3000	3.06×10^{20}	7.6	2.99×10^{19}	3.4	836	12.2	631	194
400	18	7200	15	6000	6.12×10^{20}	7.8	4.23×10^{19}	3.4	1672	12.2	631	194

(注1) 地震発生層は深さ3km~18kmとした。

(注2) 本研究が提案する方法における平均応力降下量は平均動的応力降下量である。

(注3) 本研究が提案する方法におけるアスペリティの応力降下量はアスペリティの動的応力降下量である。

(注4) アスペリティの面積のほうが震源断層面積より大きくなっているため、断層パラメータが設定できない。

4.5 4章のまとめ

従来の強震動評価における断層モデルパラメータ算定法では、長大断層を想定した地震動を評価する際に、背景領域のすべり量が負の値となり、合理的な断層モデルが設定できなくなる問題があり、長大断層に適用できる断層モデルのパラメータ算定手法の確立が早急な課題となっている。

本章では、不均質な動的応力降下量を考慮した長大断層を想定し、動的応力降下量を有するアスペリティ 1 つと動的応力降下量がゼロの背景領域を断層面に設けた動学的断層モデルを用いて、長大断層にも適用できる、円形クラック式に代わる平均動的応力降下量の算定式を求めた。解析を行った断層は幅 15 km、長さ 15~300 km の地表に達する矩形形状とし、アスペリティの位置は断層左上端、断層左下端、断層中心、断層中央上端、断層中央下端の 5 ケースとした。ここで、動学的断層モデルを設定する際に、前章（第 3 章）の一般的な動的応力降下量を考慮した動学的断層モデルから求められた地震モーメントと震源断層面積の経験的關係式と地震モーメントと短周期レベルの経験的關係式を拘束条件とした。各断層ケースで得られた平均動的応力降下量 $\Delta\sigma^{\#}$ と地震モーメント M_0 を用いて、 $\Delta\sigma^{\#}=c\times M_0/(LW^2)$ から応力形状係数 c をそれぞれ求めたところ、以下のことがわかった。

- (1) 断層のアスペクト比 L/W が大きくなるにつれて応力形状係数 c は小さくなり、無限長横ずれ断層の値 $(2/\pi)$ よりもやや小さめの $c=0.5$ に収束する。
- (2) アスペリティの位置により応力形状係数 c の傾向は異なり、すべりが拘束されるほど応力形状係数 c の値は大きくなる。
- (3) 不均質な動的応力降下量を考慮した場合、断層のアスペクト比 L/W と応力形状係数 c の関係は、 $c=0.5+2\exp(-L/W)$ で近似される。

さらに、求めた平均動的応力降下量算定式をもとに、実地震の震源データの動的応力降下量の平均値を求めたところ、平均動的応力降下量 3.4 MPa、アスペリティの動的応力降下量 12.2 MPa が求められた。また、得られた動的応力降下量の平均値より、断層面積と地震モーメントの経験的關係式と、短周期レベルと地震モーメントの経験的關係式をみなおし、長大断層に適用できる断層モデルのパラメータ算定手法を提案したところ、断層パラメータに以下の傾向がみられた。

- (4) 提案した設定法では、断層の規模に依らず平均動的応力降下量 3.4 MPa、アスペリティの動的応力降下量 12.2 MPa としているため、震源断層面積に対するアスペリティ面積の割合は 0.28 で一定である。
- (5) 従来の断層モデル設定法では断層規模が大きくなるにつれて平均すべり量が無限に大きくなるが、提案した設定法では、震源断層長さが約 80 km を超えると平均すべり量はほぼ 300 cm で一定となる。
- (6) 従来の断層パラメータ算定法では断層規模が大きくなると背景領域のすべり量が負となるが、提案した設定法では、断層規模が大きくなっても背景領域のすべり量が負になることはない。

以上により、動学的断層破壊シミュレーションから求められた平均動的応力降下量の算定式を用いることで、強震動評価を目的とした従来の断層パラメータ算定手法では設定できなかった長大

断層にまで適応可能な断層パラメータの設定を提案することができた。なお、本研究では、鉛直横ずれ断層の内陸地殻内地震のみを対象としているが、今後、本研究と同様の手法を、傾斜角を考慮した逆断層や正断層を対象とした内陸地殻内地震や、低角逆断層を対象としたプレート境界地震などにも応用し、鉛直横ずれ断層以外の長大断層や巨大地震にも対応できる断層パラメータの算定手法を確立していく必要がある。

参考文献

- Abe, K., 1978, Dislocations source dimensions and stresses associated with earthquakes in the Izu Peninsula, Japan, *Journal of Physics of the Earth*, 26, 253-274.
- 阿部勝征, 1990, フィリピン・ルソン島地震(1990年7月16日)の地震学的調査, 地震研究所彙報, 65, 851-873.
- Asano, K., T. Iwata, and K. Irikura, 2005, Estimation of source rupture process and strong ground motion simulation of the 2002 Denali, Alaska, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 1701-1715.
- Boatwright, J., 1988, The seismic radiation from composite models of faulting, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78, 489-508.
- Brune, J. N., 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 75, 4997-5009.
- Burgmann, R., M. E. Ayhan, E. J. Fielding, T. J. Wright, S. McClusky, B. Aktug, C. Demir, O. Lenk, and A. Turkezer, 2002, Deformation during the 12 November 1999 Duzce, Turkey, earthquake, from GPS and InSAR data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 161-171.
- 壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透, 2001, 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 545, 51-62.
- 壇一男・佐藤俊明・入倉孝次郎, 2002, アスペリティモデルに基づく強震動予測のための震源モデルの特性化手法, 第11回日本地震工学シンポジウム, 555-560.
- 壇一男・島津奈緒未・武藤真菜美, 2010a, 多重クラックモデルからアスペリティモデルへの置換方法と想定地震による強震動予測への適用, 日本建築学会構造系論文集, 647, 57-66.
- 壇一男・武藤真菜美・石井やよい・阿比留哲生, 2010b, 内陸地震の断層タイプ別にみた各種マグニチュードの関係とそれに基づく断層モデルの設定と強震動の試算, 日本建築学会構造系論文集, 650, 741-750.
- 壇一男・具典淑・島津奈緒未・入江紀嘉, 2012, 平均動的応力降下量を用いた長大な横ずれ断層のアスペリティモデルによる強震動の試算と考察, 日本建築学会構造系論文集, 77, 678, 1257-1264.
- Global Centroid Moment Tensor (CMT) Project catalog search, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (last accessed June 2013)
- Hanks, T. C., and W. H. Bakun, 2008, M-log A observations for recent large earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98, 490-494.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵, 2001, シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110, 849-875.
- 入倉孝次郎, 2004, 強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法一, 京都大学防災研究所年報, 47, A, 25-46.

- Kanamori, H., 1972, Determination of effective tectonic stress associated with earthquake faulting. The Tottori earthquake of 1943, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 5, 426-434.
- Kanamori, H., 1973, Mode of strain release associated with major earthquakes in Japan, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1, 213-239.
- 菊地正幸, 2003, リアルタイム地震学, 東京大学出版会, P.171.
- 気象庁, 2009, パンフレット「地震を知る 地震・津波と大規模地震の予知」, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/jishin0903/jishin-all.pdf> (2013年6月参照)
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2008, 山崎断層帯の地震を想定した強震動評価について, 付録3, 46-85.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2005, 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 「全国を概観した地震動予測地図」2008年度版, 付録3, 46-85.
- Lin, A., M. Kikuchi, and B. Fu, 2003, Rupture segmentation and process of the 2001 Mw 7.8 Central Kunlun, China, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 2477-2492.
- Madariaga, R., 1979, On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity, *Journal of Geophysical Research*, 84, B5, 2243-2250.
- Mikumo, T., and M. Ando, 1976, A search into the faulting mechanism of the 1891 great Nobi earthquake, *Journal of Physics of the Earth*, 24, 63-87.
- 室谷智子・松島信一・吾妻崇・入倉孝次郎・北川貞之, 2010, 内陸の長大断層に関するスケーリング則の検討, 日本地震学会秋季大会学術講演予稿集, B12-02, 47.
- 武藤真菜美・島津奈緒未・壇一男・阿比留哲生, 2009, スペクトルインバージョン結果に基づく中国地方の地殻内地震のアスペリティモデルの構築(その2) 2000年鳥取県西部地震, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 151-152.
- 大中康譽・松浦充宏, 2002, 地震発生の物理学, 東京大学出版会, 257-263.
- Ozacar, A. A., and S. L. Beck, 2004, The 2002 Denali fault and 2001 Kunlun fault earthquakes: Complex rupture process of two large strike-slip events, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6B), S278-S292.
- Pitarka, A., and L. A. Dalguer, 2003, Estimation of dynamic stress parameters of the 1992 Landers earthquake, *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 84, (46), Fall Meeting Supplement, Abstract, S52A-0109.
- Pitarka, A., 2005, Rupture dynamics of the 1989 Loma Prieta earthquake, *Seismological Research Letters*, 76, 252.
- Pitarka, A., S. Day, and L. A. Dalguer, 2005, Investigation of the cause of difference in ground motion between surface and subsurface faulting based on dynamic rupture modeling,

- AGU Chapman Conference on Radiated Energy and the Physics of Earthquake Faulting, Portland, Maine, Abstract.
- 佐藤智美, 2010, 逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケールリング則, 日本建築学会構造系論文集, 651, 923-932.
- Sekiguchi, H., and T. Iwata, 2002, Rupture process of the 1999 Kocaeli, Turkey, earthquake estimated from strong-motion waveforms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 300-311.
- Shimazaki, K., and P. Somerville, 1979, Static and dynamic parameters of the Izu-Oshima, Japan earthquake of January 14, 1978, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69, 1343-1378.
- 司宏俊・翠川三郎, 2001, 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 523, 63-70.
- Simons, M., Y. Fialko, and L. Rivera, 2002, Coseismic deformation from the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, earthquake as inferred from InSAR and GPS observations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 1390-1402.
- Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada, 1999, Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70, 59-80.
- Stirling, M., D. Rhoades, and K. Berryman, 2002, Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the instrumental and preinstrumental era, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 812-830.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、弘前大学工学部地球環境学科准教授 小菅正裕先生には、多大なご指導、ご助言を賜りました。また、筆者が弘前大学理学部地震学講座および弘前大学大学院理学研究科修士課程に在籍していた当時においても、指導教官としてご指導、ご鞭撻を賜りました。当時ご教授頂いたことは、筆者の地震学に関する知識の礎となっております。ここに深く感謝する次第であります。

弘前大学工学部地球環境学科佐藤魂夫教授、氏家良博教授、津村浩三准教授、片岡俊一准教授には、論文審査をとおして本論文をまとめるにあたり、貴重なご意見、ご指導を賜りました。深く感謝の意を表します。

愛知工業大学入倉孝次郎教授には、本論文に関する一連の研究をとおして、動力的解析から震源断層モデルの考え方で、多くのご指導、ご助言を頂きました。東京大学地震研究所三宅恵子博士には、動力的断層破壊シミュレーションの結果を解釈する上で、貴重なご意見を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究の一部は、日本原子力発電との共同研究により進めて参りました。日本原子力発電の川里健博士、生玉真也氏には、本研究を進めるにあたり貴重なご意見を頂き、研究成果を本論文へ用いることにご快諾下さいました。また、元日本原子力発電の三明雅幸氏（現関西電力株式会社）には、長大断層の研究のきっかけとなるアイデアなど、貴重なご意見を多く頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

佐藤俊明博士をはじめ清水建設株式会社の方々には、本研究を遂行するにあたり、多くのご意見やご協力を賜りました。特に、壇一男博士には、動力的研究を始めるきっかけを頂き、研究の方向性、意義から研究成果の社会貢献度まで、多大なるご指導、ご鞭撻を頂戴いたしました。また、本研究成果を本論文へまとめる様、勧めて頂いた上、本論文をまとめるにあたり、多くのご助言を頂きました。松島信一博士（現京都大学准教授）には、松田式の地震データ地点における地形情報収集にご協力頂きました。石井やよい氏には、一様応力長大断層のパラメータ関係式推定にご協力頂きました。記して感謝の意を表します。

大崎総合研究所元所長稲田泰夫博士、同所長横田治彦博士、同副所長渡辺孝英博士には、弘前大学大学院への入学をご了承頂き、本論文をまとめる機会を頂戴いたしました。記して感謝致します。また、具典淑博士、島津奈緒未博士、アルズペイマ・サマン氏には、長大断層の地震データ収集や動的応力降下量の平均化にご協力頂きました。ドルジャパラム・サロル博士には、動力的断層破壊シミュレーションの計算にご協力頂きました。藤堂正喜博士には、応力形状係数を命名頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

URS Corporation の Arben Pitarka 博士には、三次元有限差分法による動力的断層破壊シミュレーションのプログラムコードを使用させて頂き、シミュレーションに際する貴重なご助言を頂きました。また、同 Paul G. Somerville 博士には、動力的断層モデルの解釈について有用なご助

言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

その他、書ききれないほど多くの方々に、ご指導、ご協力を頂きました。ここに深く感謝致す所存であります。ひとえに皆様のご協力のおかげにより、本論文を作成することができました。

最後に、忙しい中、癒し、支えてくれた妻佳子に感謝致します。