

進化する階層的自己相似な断層形態と地震

Evolution of self-similar hierarchical geometry of fault zones: Implications for seismic nucleation and earthquake size

大槻 憲四郎[1]

Kenshiro Otsuki[1]

[1] 東北大・理・地学

[1] Earth Sci., Tohoku Univ.

1. 実験条件

封圧 100MPa・常温下で、非常に均質な石灰質のシルト岩ノジュール試料(2cm×4cm)に破壊直前までの繰り返し荷重(約 320MPa)を加え、一回の載荷・除荷サイクル毎に試料側面に現れた微小割目をビニールジャケット越しに接写し、その成長過程を追跡した。写真の解像度は0.1-0.2mmで、1ショットがカバーする面積は6.6mm×3.5mmで、6×18ショットで全側面を撮影した。同一条件下での2回の実験のうち、ひとつは6回目のサイクルで、もうひとつでは3回目のサイクルで破断した。2つの実験とも、ピーク応力は300MPa余りで、応力降下は40MPa以下であった。応力降下速度は遅く、かなり延性的な破壊であった。

2. 階層的に自己相似な断層形態の進化過程

これらの微小割れ目には以下のような特徴がある。

まず、剪断面角が約80°の羽毛状極微小剪断割目が均一に発生する。

羽毛状極微小剪断割目のいくつかが選択的に成長する。これらの割れ目の剪断面角はやや小さい(約70°)。長さが1mm程度に成長すると、その前後にも微小割れ目が成長し、雁行状に配列しはじめる。

雁行状割れ目を構成する個々のセグメント先端は、主圧力軸の方向からより遠ざかるようにカーブして隣接する別のセグメントと連結し、セグメント+ジョグの構造を形成する。これらのジョグは例外なく constriction type である。すなわち、個々のセグメントが主圧力軸となす角度は、割れ目全体のそれよりやや小さい。

剪断割れ目が次々と連結し、セグメント総数が3-5個ほどになると、これら全体がひとつの大きなセグメントとして挙動し、同様の大きなセグメントと連結する。すなわち、小さなセグメント+ジョグ構造が、1ランク大きなセグメント+ジョグ構造に入れ子になっている。

このような入れ子構造が、さらに上のランクのセグメント+ジョグ構造を形成する。このようにして『hierarchical self-similar fault geometry』は進化し、進化初期に出来た小さなセグメント+ジョグ構造は、リーデル剪断面として上位ランクの断層破碎帯の内部構造にやがて組み込まれていく。

3. 断層幾何要素の進化

剪断割れ目全体の長さを L_0 、セグメントの長さを L_S 、ジョグの長さを L_J 、ジョグの幅を W_J とすると、以下のような関係が見出される。

$$L_S = 0.343L_0^{0.999} \quad (R^2 = 0.956) \quad \text{---- (1)}$$

$$L_J = 0.0935L_0^{1.00} \quad (R^2 = 0.861) \quad \text{----- (2)}$$

$$W_J = 0.0456L_0^{0.691} \quad (R^2 = 0.691) \quad \text{----- (3)}$$

L_S - L_0 と L_J - L_0 の関係は、まさに自己相似である。他方 W_J - L_0 の関係は、断層が成長するにつれて断層面は平滑になるということを表している。

4. $M_0 = C \cdot L_c^3$ 則の導出

階層的構造の“ランク”を“ i ”で表し、“低いランク”とは“ i が大きい”ことと表現しよう。そうした上で、式(1)を $L_S = C_{s1} \cdot L_0$ 、式(2)を $L_J = C_{j1} \cdot L_0$ 、式(3)を $W_J = C_{jw} \cdot L_0^a$ と書きなおそう直そう。そうすると、例えば、「ランク i の全てのセグメントはランク $i+1$ のセグメント $1/C_{s1}$ 個とジョグ $1/C_{s1}-1$ 個から成る」と表現できる。このようにして、

$L_S(i) = (C_{s1}^i) \cdot L_0$ 、 $NS(i) = C_{s1}^{i-1}$ および $L_J(i) = C_{j1} \cdot [C_{s1}^{i-1}] \cdot L_0$ の関係が得られる。ここで $NS(i)$ はランク i のセグメントの総数。と から下の関係を導ける。

$$L_S(i-1) = (1/C_{j1}) L_J(i) \quad \text{----- (4)}$$

$L_S(i-1)$ を地震断層の長さ (L_{seis})、 $L_J(i)$ を震源核の長さ (L_{nucle}) とみなし、式(2)から $C_{j1} = 0.0935$ とし、かつマグニチュード、断層の長さ、面積の関係、および地震モーメント M_0 の定義式を使えば、

$$M_0 = (10^{8.84}) \cdot L_{nucle}^3 \quad \text{----- (5)}$$

を得る。この結果が観測と調和的であることは、『地震はあるランクのジョグで核生成し、ひとつ上のランクのジョグで停止する』ことを示唆する。

5. グーテンベルグ・リヒター則の導出

長さ・幅比が $L0xr \cdot L0$ の断層がこれが同じ比をもつセグメントとジョグの階層構造で構成されているとする。そして、ランク i の $NS(i)$ 個のセグメントが総計 $k \cdot (NS(i))^2$ 回活動してはじめてランク i のジョグのいずれかが破壊し、その後に長さ $LS(i-1)$ のセグメント $NS(i-1)$ 個が個々に活動するものと仮定しよう。活動する地震断層の長さを L 、その個数を N と表せば、式と式から $L=(CsI^i) \cdot L0$ 、 $N=k \cdot CsI^{(-2i)}$ と書き直される。この2つの式から $\log N = \log(k \cdot L0^2) - 2 \log L$ となる。これをよく知られた $\log L(m) = 0.5M + 1.12$ で書き換えれば、

$$\log N = (\log(kL0^2) - 2.24) - M \quad \text{----- (6)}$$

となり、グーテンベルグ・リヒター則を得る。

以上のこのことから、『地震は階層的に自己相似な既存断層の形態をなぞるように起こる』と言える。