

## (44) 断層運動を想定した岩石固着滑り破壊実験のFEM解析

山口大学工学部 正 員 ○ 三浦房紀  
山口大学大学院 学生員 坪井利弘

### 1. まえがき

ノースリッジ地震、兵庫県南部地震はともに大都市直下型地震であり、その被害は想像を絶するものであった。これらの甚大な被害は、断層上あるいはその極近傍における地震動の予測が耐震工学上極めて重要であることを改めて認識させるものであった。筆者らは、断層をジョイント要素でモデル化した有限要素法による断層直上あるいは極近傍の地震動を推定する手法を提案している。しかしそこでは、ジョイント要素の構成関係は後述のように単純な形を仮定している<sup>1)</sup>。そこで、本研究は室内実験で得られた岩石の固着滑りの構成則をできるだけ忠実にジョイント要素の構成関係に導入し、有限要素法によって岩石固着すべり実験のシミュレーションを試みたものである。

### 2. すべり面のモデル化

(1) 実験によるすべり面の構成関係 岩石実験によるせん断応力～すべり量関係の典型的な例を図-1に示す<sup>2)</sup>。実験はあらかじめ切断面を入れた花崗岩試料28cmx28cmx5cmに2軸応力を加え、固着滑りを発生させたものである。初期応力 $\tau_i$ から破壊応力 $\tau_p$ に達するとき、極めて僅かではあるが相対変位が存在し、 $\tau_p$ に達した直後はすべりの進行とともに急激に応力は低下し、やがてほぼ一定値 $\tau_d$ となる。

この $\tau_p$ から $\tau_d$ まで降下する際のすべり量を臨界変位量 $D_c$ 、 $\tau_i$ から $\tau_d$ までを応力降下量 $\Delta\tau$ 、 $\tau_p$ から $\tau_d$ までを破損応力降下量あるいは実効応力 $\Delta\tau_b$ と称す。これらの $\tau_p$ 、 $\tau_d$ 、 $D_c$ が構成関係の特徴づけるパラメータである。

(2) 修正ジョイント要素による断層面のモデル化 以前筆者らが仮定した構成関係は、せん断応力が $\tau_p$ に達すると瞬時に $\tau_d$ まで降下する単純なものであった。また、ジョイント要素のばね定数 $k_s$ は、数値解析上問題にならない範囲でできるだけ大きくとってあり、物理的な根拠を持つものではなかった。しかし、本研究では以下に述べるように実験結果から得られた構成関係に基づいてせん断ばね定数を決定する。

上述のように、 $\tau_i$ から $\tau_p$ にかけて、極めて僅かではあるがすべり量 $\varepsilon$ が存在する。この領域の応力増加を線形と仮定し、ジョイント要素のせん断ばね定数 $k_s$ を次式で与える。

$$k_s = \frac{\tau_p - \tau_i}{\varepsilon} \quad (1)$$

最大せん断強度に達した後の構成関係は岩石実験結果を参考に次式で与える。

$$\tau_y = A \exp(-\eta D) + B \quad (2)$$

ここに、A、B、 $\eta$ は定数、Dはすべり量であり、定数A、Bは

$$\tau_y = \tau_p \text{ at } D = \varepsilon, \quad \tau_y = \tau_d \text{ at } D = D_c \quad (3)$$

を満足するものである。 $\eta$ は実験結果より $\eta D_c = 5$ の一定値と

する。なお、ジョイント要素の鉛直ばね定数 $k_n$ は、これまでと同様、数値解析上問題のない範囲でできるだけ大きな値を用いている。

### 3. 解析手法と解析モデル

(1) 解析手法 岩石実験に使用された供試体の厚さが比較的薄いことを考えると三次元解析が適していると

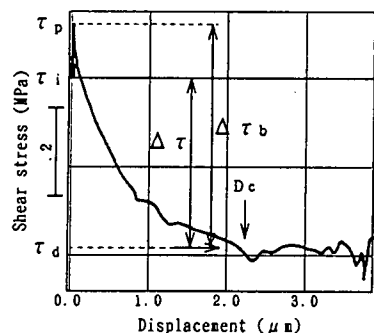


図-1 実験による固着すべりの構成関係

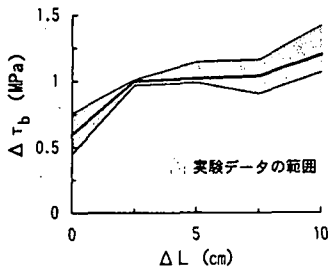


図-2 実験におけるクラック進展距離と破損応力降下量の関係

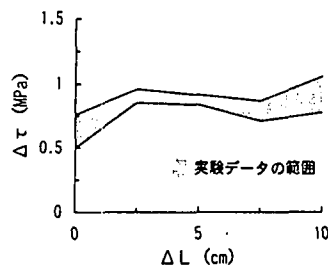


図-3 実験におけるクラック進展距離と応力降下量の関係

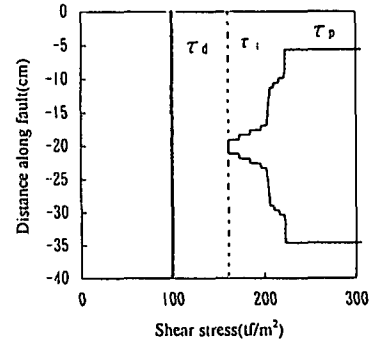


図-4 初期せん断応力、最大せん断強度、残留応力の関係

と思われるが、本研究では計算機容量などの制約から二次元平面歪み問題として扱う。運動方程式はNewmarkの $\beta$ 法( $\beta = 1/4$ )を用いて解き、非線形の処理は荷重伝達法を用いる。

**(2)解析モデル** 有限要素モデルは大中ら<sup>2)</sup>が使用した岩石供試体を5mmメッシュ3192要素の有限要素網に分割し、切断面には56個のジョイント要素を配してすべり面を表現した。自由度は6612である。有限要素モデルのS波速度 $V_s$ 、P波速度 $V_p$ 、ポアソン比 $\nu$ 、単位体積重量 $\gamma$ は、供試体の材料定数をもとにそれぞれ $V_s=2900\text{m/s}$ 、 $V_p=4400\text{m/s}$ 、 $\nu=0.12$ 、 $\gamma=2.378\text{tf/m}^3$ とした。解析時間ステップ幅 $\Delta t$ は計算機の能力、メッシュによる波長そして解の安定性を配慮かつ実験結果との比較に基づき、 $\Delta t=5 \times 10^{-7}\text{s}$ とした。

**(3)構成関係を規定するパラメータ** 解析に際してすべり面の構成関係を規定する $\tau_i$ 、 $\tau_p$ 、 $\tau_d$ 、 $\varepsilon$ そして $D_c$ の各パラメータを決定しなければならない。以下、これらの設定について述べる。

①初期せん断応力 $\tau_i$ 、最大せん断強度 $\tau_p$ 、残留強度 $\tau_d$ ；図-2、図-3は岩石実験から求めたクラック進展距離 $\Delta L$ に伴う破損応力降下量 $\Delta \tau_b$ と応力降下量 $\Delta \tau$ の分布を示したものである。破損応力降下量は、クラックの進展にともない大きくなる傾向にある。一方、応力降下量はクラック進展距離が2.5cmまでは増大するが、それより大きくなるとほぼ一定とみなすことができる。実験結果から得られた $\tau_i$ 、 $\tau_p$ 、 $\tau_d$ の絶対値は明らかではない。したがって、これらのうちの1つを何らかの方法で仮定しなければ他の2つのパラメータを決めることができない。

本解析においては、破損応力降下量は図-2に示す太実線のような折れ線で近似し、 $\tau_p$ 分布を算出する。このときすべり面の $\tau_d$ の値は一樣であると仮定する。 $\tau_d=100\text{tf/m}^2$ としたときの $\tau_p$ の分布は図-4のとおりである。図の縦軸は断層面に沿った距離で、破壊進展距離に対応する。極太実線が $\tau_d$ を、細実線が $\tau_p$ を示している。

図-3に示したように、実験による応力降下量の分布はクラック進展距離が2.5cm以降でほぼ一定値を示すことから、本研究では $\tau_i$ はクラック進展距離に関わらず一定と仮定した。したがって、残留強度 $\tau_d$ を一定としているので $\tau_i$ もすべり面全域で一様な分布となる。破壊の開始はある要素の初期せん断応力 $\tau_i$ が予め最大せん断強度 $\tau_p$ に達していることを初期条件として解析する。図-4はそうように選んだ場合の初期せん断応力分布(破線)が併せて示されている。

②臨界変位量 $D_c$ について；岩石実験より得られたクラックの進展距離 $\Delta L$ と $D_c$ の関係を図-5に示す。本解析では、 $D_c$ を図中の太線のような折れ線で近似する。また、破壊伝播の進展距離が10cm以上となる領域では、 $D_c=3\mu\text{m}$ を保持すると仮定する。

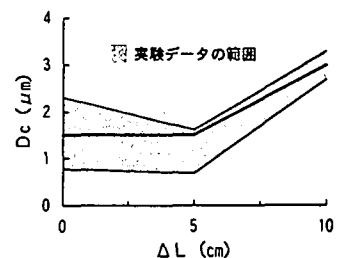


図-5 実験におけるクラック進展距離と臨界変位量の関係

③最大せん断強度に達するすべり量 $\varepsilon$ ；すべり量 $\varepsilon$ は実験結果から

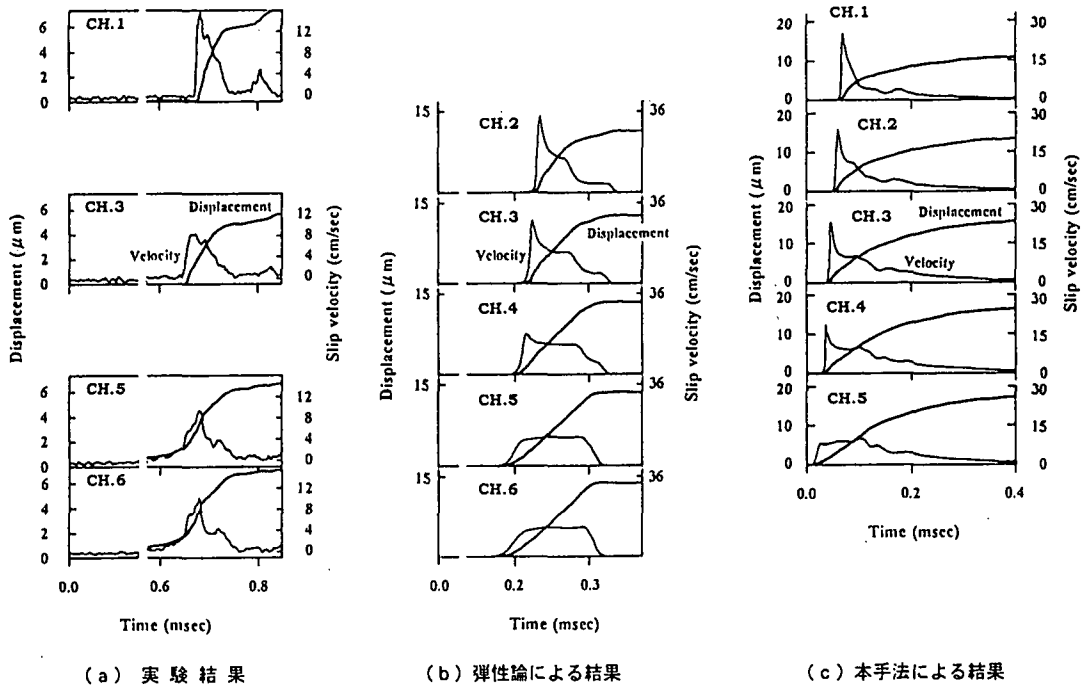


図-8 すべり量とすべり速度の時刻歴の比較

図-8はすべり量とすべり速度の時刻歴である。図(a)は実験結果、図(b)が弾性論に基づく結果、図(c)が本解析手法による結果である。図中に記されているすべり速度はすべり変位を数値微分したものである。本手法の結果である図(c)を見ると実験結果を比較的良好に再現していることが分かる。すなわち、破壊開始点(ch5)ではゆっくりとしたすべり量を示すため、すべり速度は顕著なピークを示さず、その大きさも相対的に小さい。破壊が高速で伝播するに従い、すべり量の立ち上がりは急激となり、すべり速度は破壊開始直後に顕著なピークをもつようになり、その大きさも増大する。最終的なすべり量は、11~18 $\mu\text{m}$ 程度、すべり速度は10cm/s~25cm/s程度で実験によって得られる値よりも多少大きな傾向にある。一方、図(b)の弾性論に基づく方法は本解析手法と非常によく似た傾向を示しているが、すべり量は15 $\mu\text{m}$ 程度とやや小さく、すべり速度は36cm/sec程度とやや大きめの値となっている。以上より、本手法は実験結果を定性的にはうまく再現しているが、定量的には実験結果よりもやや大きくなっている。しかしながら、実験と数値解析という手法の大きな違いを勘案すれば妥当な結果といえよう。

#### 謝辞

東京大学地震研究所大中庸教授ならびに山下輝夫助教授には岩石実験についてご教示いただきました。また防災科学技術研究所芝崎文一郎博士には弾性論による解析手法についてご教示いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) K. TOKI and F. MIURA: Simulation of a fault rupture mechanism by a two-dimensional finite element method, J. Phys. Earth., Vol. 33, pp. 485-511, 1985.
- 2) M. OHNAKA, Y. KUWAHARA and K. YAMAMOTO: Constitutive relations between dynamic physical parameters near a tip of the propagating slip zone during stick-slip shear failure, Tectonophysics, 144, pp. 109-125, 1987.
- 3) B. SHIBAZAKI: Transition process from nucleation to high-speed dynamic rupture—scaling of laboratory experiments to natural earthquakes—, 東京大学学位論文, 1992.

臨界変位量 $D_c$ の0.01~0.04倍の範囲にあることが分かっている。  
ここでは、 $0.01 \times D_c$ とする。なお、減衰定数は2%を仮定した。

#### 4. 解析結果と考察

まず解析から得られた破壊すべり過程のせん断応力~すべり量関係が本研究で構築した構成則に従っていることを確認する。図-6は破壊開始点と、開始点から5cmおよび10cmの各点におけるせん断応力~すべり量の関係を示したものである。この図によれば、破壊開始点は破壊直後からすべり量の増大とともに応力は $D_c=1.5\mu m$ で残留強度 $\tau_0=100\text{tf/m}^2$ となるように指数関数的に減少している。他の2点はすべり量の増大とともに応力は初

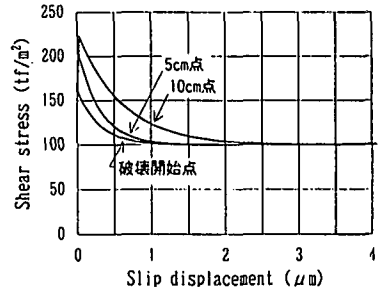
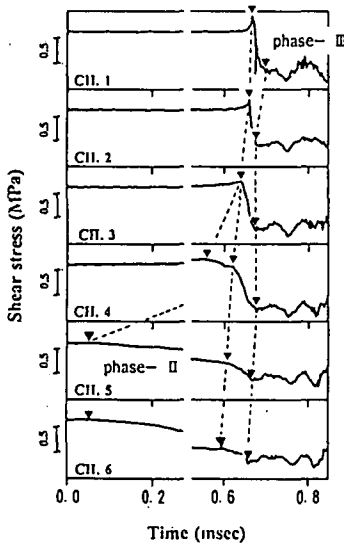
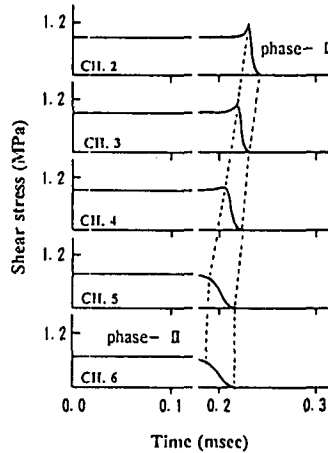


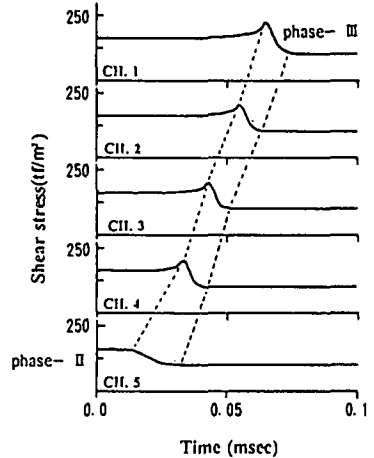
図-6 解析で得られたせん断応力  
~すべり量の関係



(a) 実験結果



(b) 弾性論による結果



(c) 本手法による結果

図-7 せん断応力の時刻歴の比較

期応力から増大し、 $\varepsilon=0.01 \times D_c$ なるすべり量でピークに達する。その後、それぞれ与えられた値である $D_c=1.5\mu m$ (5cm地点)、 $3\mu m$ (10cm地点)で $\tau_0=100\text{tf/m}^2$ となるように指数関数的に低下している。これらのことから解析で得られる破壊過程は規定したせん断応力~すべり量の構成関係を満足していることが確認できる。

次に、実験と本解析によるすべり破壊の比較を行った。図-7は岩石実験および解析によって得られたせん断応力の時刻歴の変化を比較したものである。図(a)は実験結果<sup>2)</sup>、図(b)はくい違い弾性論に基づく結果<sup>3)</sup>、そして、図(c)が本解析で得られたものである。

本手法で得られた時刻歴(c)はch5の位置で破壊が始まり、最初ゆっくりとした応力低下が生じ、約0.01m秒でやや高速の破壊へと移行し、急速な応力低下を伴って残留強度に達する。破壊開始点の隣のch4の位置では、解放されたエネルギーの伝播により応力が増加し、約0.03m秒で最大せん断強度に達して破壊を生じている。その後破壊は順次伝播し、ch2, 1ではそれぞれ約0.05m秒および0.06m秒に最大せん断強度に達し、破壊が始まっている。実験結果(a)と比較すると破壊開始点や破壊の高速伝播領域の応力の低下の傾向はよく再現されている。同図(b)のくい違いの弾性論に基づく手法の結果も本手法の結果と傾向は同じである。