

断層周辺の応力分布と安定性に関する 解析的検討

—アダプティブ法によるJogモデルの解析—

森川誠司¹⁾・田部井和人¹⁾・原田芳金²⁾・小出 仁³⁾

1. はじめに

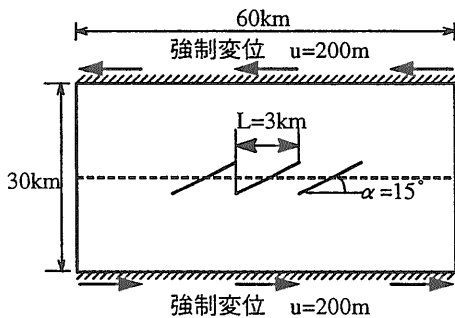
兵庫県南部地震以来、活断層の挙動とその予測に多くの人々の関心が集まっている。断層の挙動特性に関する検討は古くから行われているが、未だ説明されていない面も多い。ここでは、断層の進展性に関する基本的な検討の一つとして、雁行状に断層が配置された二次元水平断面モデル（以下、Jogモデルと呼ぶ）の断層群周辺の応力分布を有限要素法（FEM）を用いた線形弾性解析によって求めた。解析用のメッシュはアダプティブ法を用いて作成し、メッシュ分割の粗密の違いが結果にどのように影響を与えるか検討した。さらに、便宜的にこのメッシュを用いた岩盤の非線形解析結果との比較や理論解による亀裂近傍の応力分布との比較を行った。

2. 解析モデルおよび手法

断層の多くは、地殻深部から上層に向かって途中

で何本かに分岐して地表面へ現れるものと考えられている。第1図に示す解析モデル図はこのような断層を考慮した地表面付近の水平断面図であり、これをJogモデルと呼ぶ。本解析モデルでは3本の雁行状断層が均一なせん断応力場の中に存在するものと仮定した。岩盤の物性は第1表のように仮定した。ただし、断層のせん断および鉛直ばね定数は0としている。

通常、解析メッシュは、応力が急変する領域をより細かく分割することによって解析精度の向上が望めるが、メッシュ作成作業の労力や計算時間が增大するというデメリットがある。また従来は、人間の経験に基づいてメッシュ分割を行っていたが、この場合担当者の力量が解析精度を左右することになる。そこで、本検討では応力の空間変動が激しい領域をより細かく自動的にメッシュ分割できるアダプティブ法（Peraire, 1987；大谷, 1992）という手法を採用した。ただし、アダプティブ法による自動メッシュ分割の際の岩盤は線形弾性体と仮定している。岩盤の



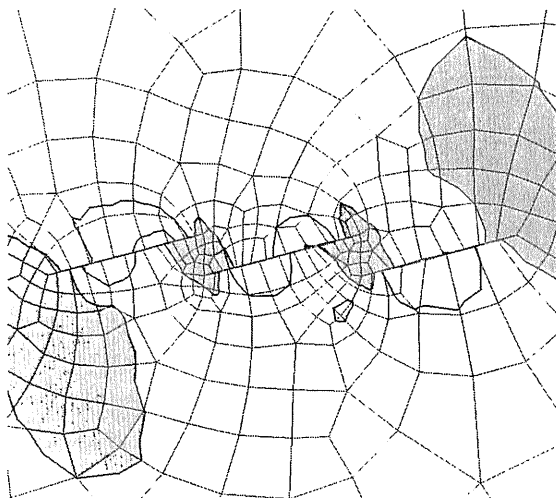
第1図 解析モデル図

第1表 解析用物性値

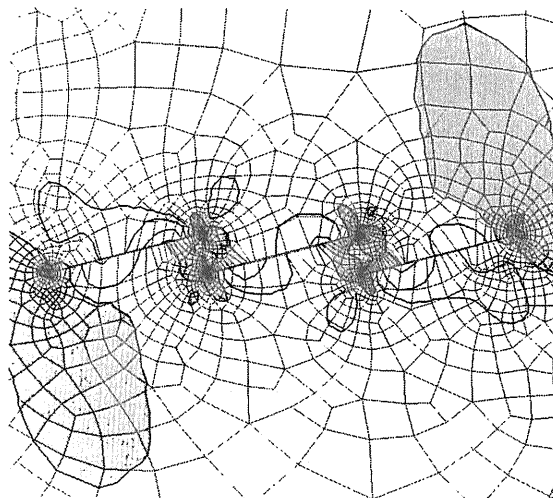
深度 (H)	2 km
密度 (γ)	2,700 kg/m ³
弾性係数 (E)	3,000 MPa
ポアソン比 (ν)	0.25
粘着力 (C)	3.0 MPa
内部摩擦角 (ϕ)	40 度

1) 鹿島建設(株)情報システム部
〒107 港区元赤坂1-2-7
2) (財)原子力環境整備センター
3) 地質調査所 環境地質部

キーワード：断層, Jogモデル, アダプティブ法, 有限要素法



第2図 安全率分布図(粗メッシュ, 線形弾性解析). 網掛け部分は安全率が2.0以下の低安全率領域を示す.



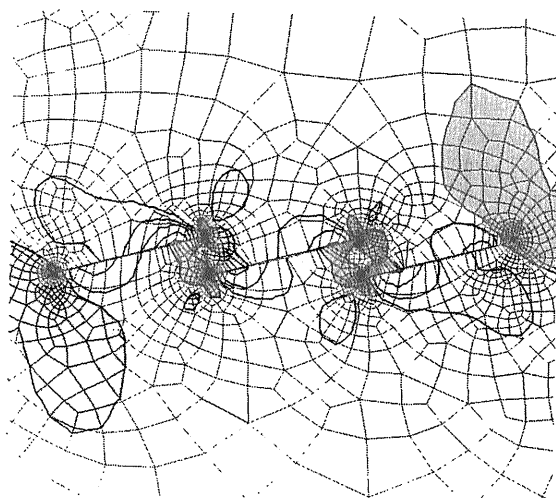
第3図 安全率分布図(細メッシュ, 線形弾性解析). 網掛け部分は安全率が2.0以下の低安全率領域を示す.

非線形性を考慮した解析では, 全作用荷重を10ステップに分割して与え, 各ステップの応力状態に応じて岩盤の変形係数を逐次更新する荷重増分法を用いた. また, せん断応力場における断層近傍の応力値の理論解 (Vallejo, 1987) からせん断応力分布を求め, 解析結果との比較も行った.

3. 解析結果

第2, 3図はそれぞれ粗い解析メッシュ分割の場合 (以下, 粗メッシュと呼ぶ. 節点数607, 要素数548) と細かい解析メッシュ分割の場合 (以下, 細メッシュと呼ぶ. 節点数2982, 要素数2824) の解析結果のうちの要素ごとの安全率 (f_s : 各要素の強度と応力の比) 分布図である. 全体的な安全率の分布傾向は, 粗メッシュと細メッシュで大きな違いは見られないが, 細部を見ると細メッシュの方が隣り合う断層間の安全率の低い領域が2つに枝分かれしながら互いにつながる様子が明瞭に現れていることが分かる. これは実験などでも観察される現象である.

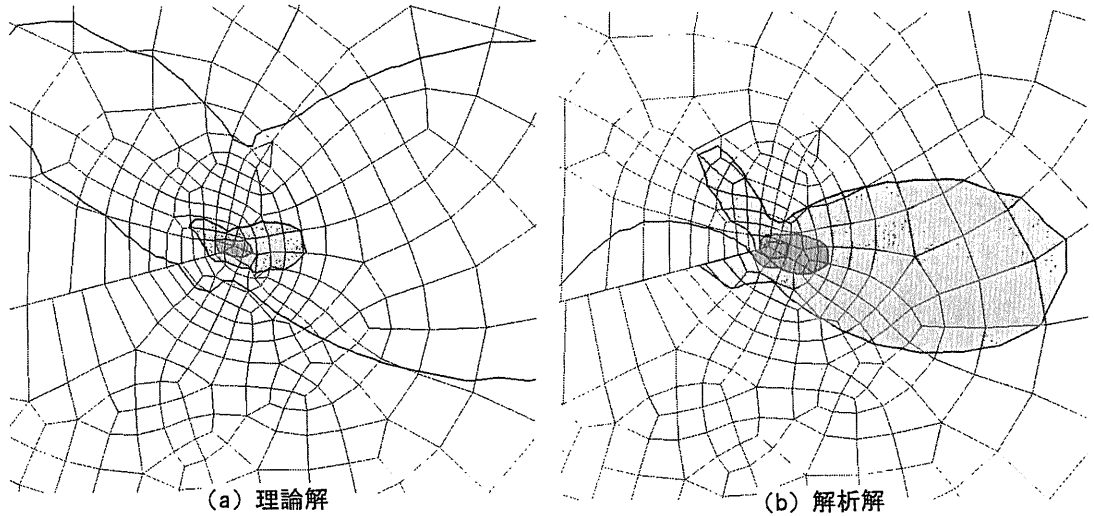
第4図は, 岩盤の非線形性を考慮した場合の安全率分布図である. 境界条件を強制変位で規定しているため非線形解析結果の方が低安全率の領域が全体的に狭くなるが, 定性的傾向は線形弾性解析結果とほとんど変化はなかった. しかし, 境界条件や岩盤の強度などの条件によっては大きな差異が生じる



第4図 安全率分布図(細メッシュ, 非線形解析). 網掛け部分は安全率が2.0以下の低安全率領域を示す.

ことも考えられるため, 解析条件の再検討が必要であろう.

第5図 (a) は理論解より求めた断層端部のせん断応力分布図であり, 第5図 (b) は解析による分布図である. 理論解は亀裂先端からの距離と角度をパラメータとして算出するが, 本検討ではその評価位置を解析解と同じメッシュの節点上とした. 理論解と解析解を比較すると, 定性的傾向は一致するものの, 断層からやや離れるにつれて両者のせん断応力の



第5図 せん断応力分布図の比較. 薄い網掛け部分はせん断応力が20MPa以上, 濃い網掛け部分はせん断応力が35MPa以上の領域を示す.

差異が大きくなる事が分かる. これは, 本検討で採用した理論解が単一亀裂の先端近傍でのみ正解値を与えるためである. 勿論, 断層のごく近傍のせん断応力の値はほぼ一致しており, 本解析結果の妥当性は確認されたとと言える.

以上の結果から, アダプティブ法を用いた有限要素解析により, より合理的にメッシュ分割が行われ, 今回の解析モデルのような断層間の微妙な応力集中域をより明瞭に表せることが分かった. 特に, リーデルせん断実験などで観察される, 雁行状の亀裂と亀裂の間をつなぐような割れ目の発生に対応する局所安全率分布が本解析によっても得られたことは興味深い.

4. おわりに

本検討によって断層周辺の応力分布と安定性に関する解析におけるアダプティブ法の有用性を示すことができた. アダプティブ法を適用することにより, 解析の精度を確実に向上させることができるが, 計算時間や作業労力が増加することは否めない. また, 当然そのための特別なソフトウェアを準備する必要がある. 費用や労力の観点からアダプティブ法を用いることができない場合でも, 今回の解析結果は, ど

の程度のメッシュ分割が類似のモデルの有限要素解析に必要なかという問いには大いに参考になると思われる.

今回は便宜的に弾性解析でのアダプティブ法によるメッシュをそのまま非線形解析でも用いたが, より厳密な解析を行うためには, 荷重ステップごとに変化する応力状態に応じてメッシュ分割を更新することが必要となる. また, FEM以外の亀裂の進展をよりの確に表現できる不連続体解析手法についても検討する価値がある. 今後, それらのことを検討しつつ断層の離隔や角度をパラメータとしたJogモデルの検討を続ける予定である.

引用文献

- J.Peraire, M.Vahdati, K.Morgan and O.C. Zienkiewicz (1987) : Adaptive remeshing for compressible flow computations, *J. Comp. Phys.*, Vol.72, pp.449-466.
 大谷芳輝・沖見芳秀・右近八郎 (1992) : トンネル掘削解析へのアダプティブ法適用に関する一考察, 土木学会第47回年次学術講演会, III-272, pp.584-585.
 L.E.Vallejo (1987) : The influence of fissures in a stiff clay subjected to direct shear, *Geotechnique* 37, Vol.1, pp.69-82.

MORIKAWA Seiji, Tabei Kazuto, HARADA Yoshikane and KOIDE Hitoshi (1996) : Study on Stress Distribution and Stability near Faults — Analysis of Jog Faults Model by Adaptive Finite Element Method —.

< 受付 : 1996年8月1日 >