

大成建設(株) ○里 優, 亀村 勝美

1. はじめに

地下構造物の力学的安定を検討する際に、有限要素法による数値シミュレーションが多く用いられている。有限要素法は、地山内の変位、応力分布を適切に評価できる等、多くの特長を備えているものの、岩盤等でみられる節理面や、巨視的なキ裂の進展により生ずる不連続面の性質を表現することが困難であり、この短所を補うべく、特殊な要素を用い不連続性を表現する工夫が、Ngo, Goodmanらにより成されている。筆者らも、新たに開発した結合要素を用い、不連続性を有する岩盤の数値シミュレーションを試みているが、今回は、岩盤内の応力変化により発生し進展するキ裂の様子を調べるため、有限要素の周囲に全て結合要素を配し行なった数値シミュレーション結果を報告する。

2. 結合要素について

ここで用いる結合要素は、図-1に示すように2組の節点バネから成る四角形要素である。本要素は、定むすみ平面要素と組み合わせて用いることにより、要素内の垂直、せん断応力を正確に求めることができ、また、剥離や滑動が生じた場合の修正計算が容易であるという特長を有している。要素剛性マトリックス等の詳細については、文献(1)を参照されたい。

3. キ裂進展のシミュレーション

結合要素は、多くの場合、既存の不連続面をモデル化するために用いられているが、ここでは、新たに不連続面が形成されていく様子を調べることを目的として用いた。このため、図-2に示すごとく、2個の定むすみ四角形要素から成る六角形要素の全周に結合要素を配したモデルを作成した。不連続面は、結合要素で表わされる面で剥離や滑動が生ずることにより形成され、進展に際しては、六角形要素の周面に沿って、常に2方向の選択がされる。従って、最も不連続面が形成され易い方向にキ裂が進展してゆく訳である。

なお、結合要素で囲まれた平面要素は破壊しないものと仮定する。

今回は、円孔より発生するキ裂を例にとり、数値シミュレーションを試みた。要素分割を図-3に示す。荷重は一軸圧縮とし、物性値は以下のものを用いた。

平面要素

$$E/\sigma_0 = 100$$

$$\nu = 0.3$$

結合要素

$$K_n/\sigma_0 = 10000$$

$$K_s/\sigma_0 = 10000$$

$$C/\sigma_0 = 0.5, \mu = 0.5$$

$$\sigma_t/\sigma_0 = 0.1$$

ここに、 K_n, K_s は結合要素の垂直、せん断剛性、 C, μ, σ_t は、それぞれ引張強度、粘着力、摩擦係数である。また σ_0 は加えた単位の圧縮応力を示す。

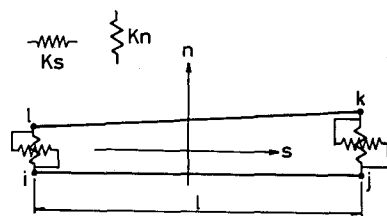


図-1 結合要素の概念

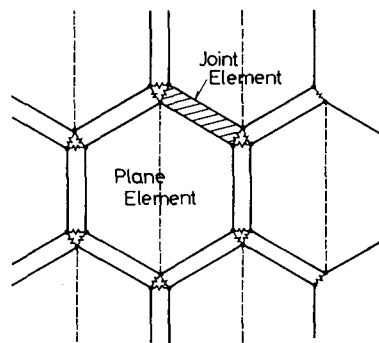


図-2 結合要素と平面要素

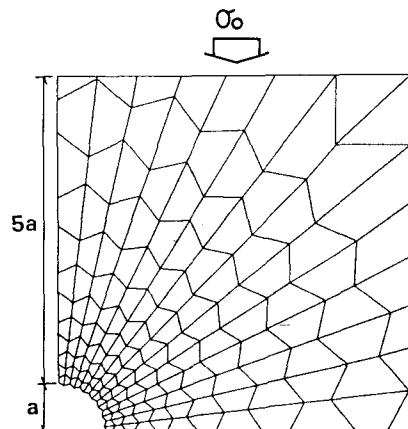


図-3 解析モデル

4. 解析結果

まず、一軸圧縮応力 $\sigma_0/2$ を加えた場合の弾性解を示す。結合要素に囲まれているにもかかわらず、平面要素の応力や変位分布が正しく求められていることがわかる。不連続面における力学特性の非線形性を表現するためには、弾性解が正確に得られることが必要であるが、本手法は、この条件を充分満たしている。

図-6は、 $\sigma_0/2$ を加え、結合要素の剥離を処理した後の非弾性変位を示している。円孔上部に引張キ裂が生じている様子がわかる。この引張キ裂により引張応力が解放され、円孔上部はほぼ一軸応力状態となっている(図-7)。さらに $\sigma_0/2$ を作用させたときの解が図-8、9である。この荷重下では、以前に生じていた引張キ裂は閉口し、右方より一部せん断破壊を伴った引張キ裂が2本発生している。報告されている実験結果では、この右方より成長するキ裂は1本であり、解析結果と異なっているものの、キ裂の発生位置や進展方向はほぼ一致している。

5. まとめ

数値シミュレーションより得られた結果は、報告されている実験結果と整合性を持つものであり、岩盤内に発生するキ裂の解析に対する手法の適用性が確認された。特に本手法では、キ裂が入った状態での応力、変位が、微小変位の仮定の範囲内ではあるが、充分な精度で評価でき、実用的である。今後は、斜面のすべり、岩石中のクラック進展の解析への応用を試みる予定である。

(参考文献)

- (1). 里, 亀村, 「有限要素法による層状岩盤の数値解析」第37回土木学会年次講演集
- (2). 石橋, 松本, 「ひずみ軟化特性を考慮した極限解析法によるトンネル掘削問題の解析」土木学会論文報告集 1983

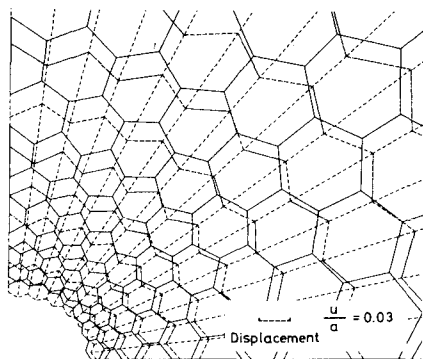


図-4 弾性変位

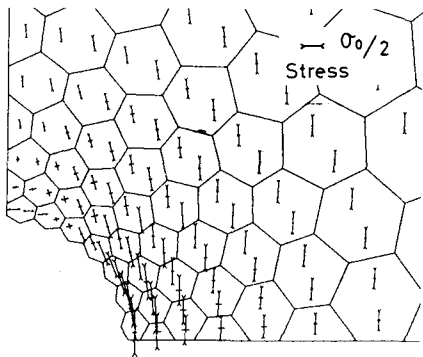


図-5 応力分布

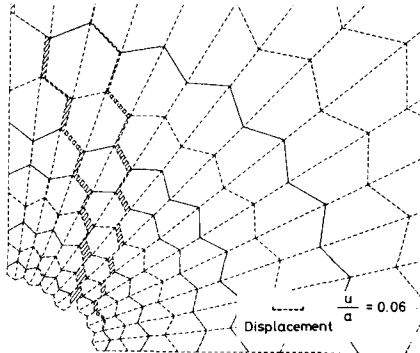


図-8 非弾性変位

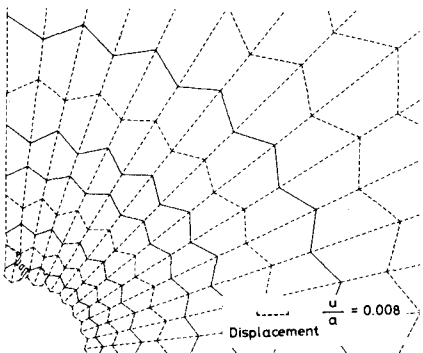


図-6 非弾性変位

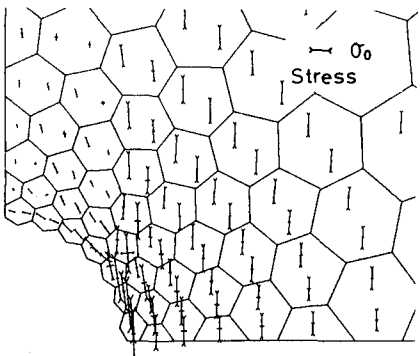


図-9 応力分布

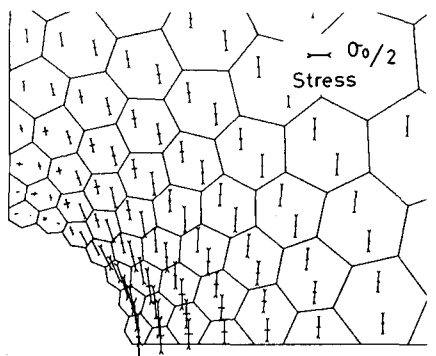


図-7 修正後の応力分布