

(43) くさびによる岩盤破碎の機構に関する研究 (その2)

日本国土開発株 正会員 宮地明彦
〃 〃 〇 〃 高橋一博
岡山大学大学院 末次 剛
岡山大学 正会員 谷口健男

Study on the mechanism of rock breaking by The Wedge-Striking bench cut method (No.2)

Akihiko Miyaji, JDC corporation
Kazuhiro Takahashi, JDC corporation
Tsuyoshi Suetsugu, OKAYAMA University
Takeo Taniguchi, OKAYAMA University

Abstract

The authors make a study of a pursuit technique of crack caused by the Wedge-Striking bench cut method. We pointed out that the 2-D linear FEM combined with Fracture Mechanics interpret the practice process of crack under plane strain and stress conditions in the last paper.

In this paper we describe an experimental study of 3-D crack pursuit and compare these results with the 3-D FEM results.

1. はじめに

岩盤を破碎するには発破工法を用いるのが、作業効率およびコストの面からみると優れている。しかしながら最近では住宅地近くでの土地造成やトンネル掘削の機会が増加しつつあり、それにともない大きな振動・騒音を発生しない種々の無発破岩盤掘削工法が開発・実用化されてきている。その代表的なものの一つとしてくさびを用いて岩盤を破碎する方法がある。この方法は削岩機で穿たれた孔中にくさびを油圧あるいは打撃により押し込み、孔側方への強制変位を発生させることによって、き裂面を形成させようとするものである。

筆者らは破碎予定にない基礎岩盤への影響を検討するために、くさび貫入によるき裂の進展過程を把握することを目的とした研究に取り組んでいる。前回の報文¹⁾では有限要素法と破壊力学を用いた2次元数値シミュレーション手法を提案したが、今回は3次元場における基礎実験をもとに、3次元解析手法について検討を加えたものである。

2. 3次元有限要素

き裂先端部の変位場は図-1に示す3種類の変形モードの重ね合わせで表現される。そのそれぞれをモードⅠ（開口型）、モードⅡ（面内せん断型）および3次元場のみに現われるモードⅢ（面外せん断型）と呼ぶ。そしてそれら独立な変形モードによる応力拡大係数 K を、それぞれ K_I 、 K_{II} 、 K_{III} で表現する。

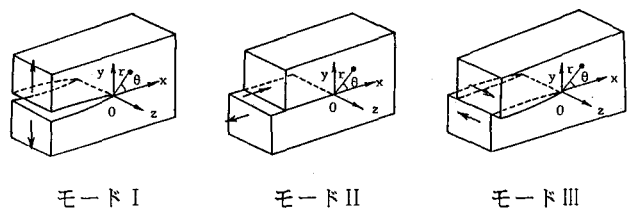


図-1 基本的き裂の変形モード

この応力拡大係数を用いることによって変位は²⁾、

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \frac{KI}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{Bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa-1}{2} + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ \sin \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa+1}{2} - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ 0 \end{Bmatrix} + \frac{KII}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{Bmatrix} \sin \frac{\theta}{2} \left(\frac{\kappa+1}{2} + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ \cos \frac{\theta}{2} \left(\frac{1-\kappa}{2} - \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ 0 \end{Bmatrix} + \frac{2KIII}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sin \frac{\theta}{2} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに G ; せん断弾性係数

と表われ、 KI 、 KII 、 $KIII$ を求めるのには、変位 u 、 v 、 w が既知であればよいことがわかる。

さて、有限要素法により応力拡大係数を算定するのには、

- ① 仮想き裂進展法 (エネルギー法)
- ② J 積分法 (エネルギー法)
- ③ 変位法

があるが、エネルギー法では評価できる応力拡大係数がモード I、II、あるいは III が単独に存在するときに限られることから、ここでは混合モード下においても各 K 値を限定できる変位法によることとする。

Ingraffea は Barsoum による^{3) 4)}アイソパラメトリック特異要素の特徴を応用した変位法を提案している。^{5) 6)}20 節点アイソパラメトリック要素の形状関数は、

$$\text{頂点: } N_1 = \frac{1}{8} (1 + \xi_0) (1 + \eta_0) (1 + \xi_0) (\xi_0 + \eta_0 + \xi_0 - 2)$$

$\xi_1 = 0$, $\eta_1 = \pm 1$, $\xi_1 = \pm 1$ における中間点:

$$N_1 = \frac{1}{4} (1 - \xi^2) (1 + \eta_0) (1 + \xi_0)$$

ここに $\xi_0 = \xi \xi_1$, $\eta_0 = \eta \eta_1$, $\xi_0 = \xi \xi_1$

で示される。これを 1 面つぶすことによって 15 節点アイソパラメトリック特異要素にすると、

$$\xi = -1 + \sqrt{\frac{4r}{L_1}} \quad (3)$$

Element No.1 のき裂面 $ACFG$ に着目すれば、モード III 単独状態では変位関数 w は

$$w = [2w_B - w_C + 2w_E - w_F + w_D]$$

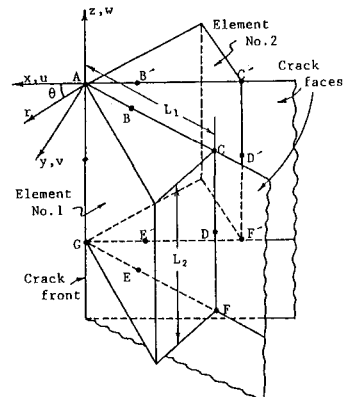


図-2 き裂先端部の要素

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} \eta (-4W_B + W_C + 4W_E - W_F) + \frac{1}{2} \eta^2 (W_F + W_C - 2W_D) \left] \sqrt{\frac{r}{L_1}} \right. \\
& \left. + [(\eta - 1)(2W_B - W_C) - (1 + \eta)(2W_E - W_F)] \sqrt{\frac{r}{L_1}} \right] \quad (4)
\end{aligned}$$

ここで $\eta = -1 \sim 1$ まで変化させることで、辺ACから辺GFまでの変位に対応させることができる。

一方、 w と K_{III} は式(1)より

$$w = \frac{K_{III}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \quad (5)$$

式(4)を式(5)に代入、整理すると

$$\begin{aligned}
K_{III} = \frac{G}{2} \sqrt{\frac{2\pi}{L_1}} [2W_B - W_C + 2W_E - W_F - W_D \\
+ \frac{1}{2} \eta (-4W_B + W_C + 4W_E - W_F) + \frac{1}{2} \eta^2 (W_F + W_C - 2W_D)] \quad (6)
\end{aligned}$$

Element No.2についても同様な操作を行えば、結局求める K_{III} は、

$$\begin{aligned}
K_{III} = \frac{G}{4} \sqrt{\frac{2\pi}{L_1}} [2W_B - W_C + 2W_E - W_F + W_D - 2W_B' + W_C' - 2W_E' \\
+ W_F' + W_D' + \frac{1}{2} \eta (-4W_B + W_C + 4W_E - W_F + 4W_B' - W_C' - 4W_E' + W_F') \\
+ \frac{1}{2} \eta^2 (W_F + W_C - 2W_D - W_F' - W_C' + 2W_D')] \quad (7)
\end{aligned}$$

K_I 、 K_{II} についても同様の操作によって、

$$\begin{aligned}
K_I = \frac{G}{4(\kappa + 1)} \sqrt{\frac{2\pi}{L_1}} [2V_B - V_C + 2V_E - V_F + V_D - 2V_B' + V_C' - 2V_E' + V_F' - V_D' \\
+ \frac{1}{2} \eta (-4V_B + V_C + 4V_E - V_F + 4V_B' - V_C' - 4V_E' + V_F') \\
+ \frac{1}{2} \eta^2 (V_F + V_C - 2V_D - V_F' - V_C' + 2V_D')] \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K_{II} = \frac{G}{4(\kappa + 1)} \sqrt{\frac{2\pi}{L_1}} [2u_B - u_C + 2u_E - u_F + u_D - 2u_B' + u_C' - 2u_E' + u_F' - u_D' \\
+ \frac{1}{2} \eta (-4u_B + u_C + 4u_E - u_F + 4u_B' - u_C' - 4u_E' + u_F') \\
+ \frac{1}{2} \eta^2 (u_F + u_C - 2u_D - u_F' - u_C' + 2u_D')] \quad (9)
\end{aligned}$$

となる。

3. 数値解析例

前回の報文では、くさびを用いたコンクリートの破碎実験を、2次元平面応力状態に近づけて行った。しかし実際の岩盤掘削は3次元状況下にあること、そしてモードⅢ型の変形に対しては未知の部分が多いことから、今回は面外方向変位を受ける場合について基本的な検討を加えた。

今回、計算に用いたモデルを図-3に示す。

また応力解析をベースとした計算手法であることから、要素分割には細心の注意を払わなければならないが⁷⁾、ここでは図-4に示す要素分割を計算に用いることとした。このときZ方向の要素分割は4としてある。

このときの、KⅢの理論解は2.415である。そして、計算結果から

- (1) KⅠはZ軸方向いずれも0。
- (2) KⅡは図-5に示すとおり表面近くで顕著になる。
- (3) KⅢは図-5に示すとおりそれほどばらつきも見られなかった。また平均KⅢは3.084であった。

平均値KⅢは理論値より大きな値となっている。これは理論値が $u=v=0$ を仮定しているのに対して、有限要素法による解析では図-6に示したように u 、 v ともに発生しており、明らかに混合モード状態となっているためである。またここでの理論解は板のものであり、他の寸法に比べて板厚が大きいことも原因と考えられる。

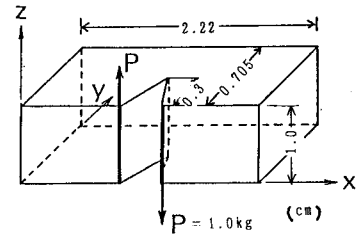


図-3 計算モデル

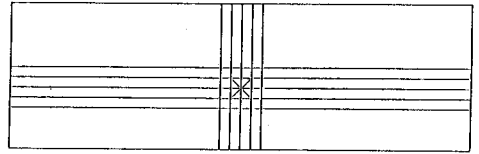


図-4 要素分割 (923 節点)

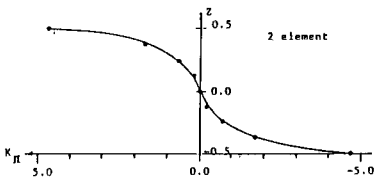


図-5 KⅡ, KⅢ $\text{kg/cm}^{3/2}$

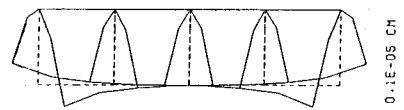
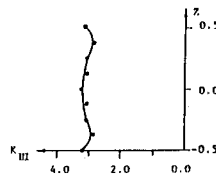


図-6 き裂先端の変形

次に上下両面部の三角柱要素を45度の面について1個分はずすことにより、き裂の進展を表現した計算結果を図-7に示す。ただし再要素分割を行っていないことから、公平な応力評価を得るために通常のアイソパラメトリック要素を使用した。その結果、KⅢ→減少、KⅡ・KⅠ→増加となっている。

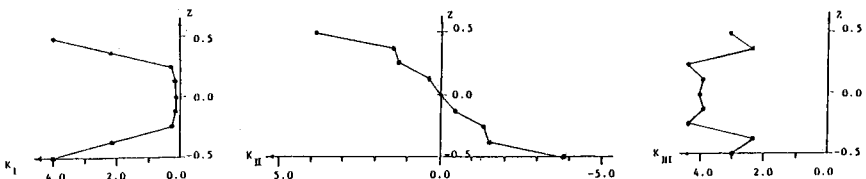


図-7 KⅠ, KⅡ, KⅢ $\text{kg/cm}^{3/2}$

以上の点から、たとえ荷重をモードⅢ的に作用させても、き裂はモードⅡ的な感じで進展し、次いでモードⅠに移行する、また今回用いた15節点アイソパラメトリック特異要素は、き裂先端部分の特性を表現できるものと考ええる。

4. アクリル板を用いた実験

アクリル板を用いて3.と同様に面外方向に荷重を加える室内試験を行った。その結果を図-8に示すが、変形モードはき裂の進展と共にⅢ→Ⅱ→Ⅰと移行しており、FEMと同じ結果となっている。

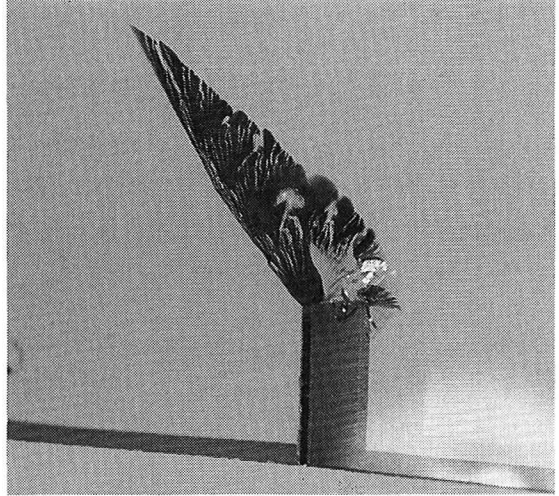


図-8 アクリル板のき裂

5. おわりに

くさびを用いた岩盤破碎工法により発生する、き裂先端部の挙動を表現できる3次元アイソパラメトリック特異要素について検討を加え、その使用が可能であることを明らかにした。また数値解析およびアクリル板での実験結果より、き裂先端部分がモードⅢであっても、その進展に伴いⅢ→Ⅱ→Ⅰと移行することが明らかになった。

くさびによる岩盤破碎においても同様の現象が発生するとの仮定により、主応力 $\sigma_{1, \max}$ に直交する面にき裂が進展するとした、3次元有限要素解析が今後可能と思われる。その際

- ① 3次元では自由度が大幅に増加し、計算機使用上の制約が大きくなる。そのための効率的な解析法。
- ② き裂進展経路および進展方向を含んだ、3次元メッシュジェネレータの開発。

が課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 宮地、高橋、谷口、中川, "くさびによる岩盤破碎の機構に関する研究", 第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1988
- 2) 白石、大西、谷口, "連続体の力学", 新体系土木工学5, 技報堂出版, 1988
- 3) R.S.Barsoum, "ON THE USE OF ISOPARAMETRIC FINITE ELEMENTS IN LINEAR FRACTURE MECHANICS", Int.J.num.Meth.Engng, Vol.10, 25-37, 1976
- 4) R.S.Barsoum, "TRIANGULAR QUARTER-POINT ELEMENTS AS ELASTIC AND PERFECTLY-PLASTIC CRACK TIP ELEMENTS", Int.J.num.Meth.Engng, Vol.11, 85-98, 1977
- 5) A.R.Ingraffea, "NUMERICAL MODELLING OF FRACTURE PROPAGATION", Rock Frac.Mech.(ed.H.P.Rossmait), SpringerVerlag, 151-208, 1983
- 6) A.R.Ingraffea, "STRESS-INTENSITY FACTOR COMPUTATION IN THREE DIMENSIONS WITH QUARTER-POINT ELEMENTS", Int.J.num.Meth.Engng, Vol.15, 1427-1445, 1980
- 7) 森脇清明, "き裂伝播解析の有限要素モデル構築に関する研究", 岡山大学工学研究科, 1989