

(25) くさびによる岩盤破碎の機構に関する研究

日本国土開発㈱ 正会員 宮地明彦 正会員 ○高橋一博
岡山大学 正会員 谷口健男
山口大学 正会員 中川浩二

1. 研究の目的

住宅地近くでの土地造成やトンネル掘削が多くなり、発破を用いない硬岩の掘削の機会が増加している。それにともない種々の無発破岩盤掘削工法が開発され、実用化されてきているが、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むことにより孔側方への強制変位を生じさせるものである。

岩盤掘削の場合この工法は一般に掘削能力は大きいことが必要とされ、そのために有効なくさび形状や、載荷方法が検討の対象とされる。これに対してダム等の部分的な解体や基礎岩盤掘削等の場合には、くさび貫入により発生したクラックがどのように発達し、結果として解体予定にないコンクリート部分あるいは基礎岩盤に影響を及ぼすか否かを検討することが必要となる。

本研究はこのような目的からくさびによるコンクリート、岩盤の破碎において発生・発達するクラックの状況を実物大のコンクリート供試体の破碎試験を参考に、有限要素法と破壊力学を用いた数値シミュレーションにより検討したものである。

2. くさびによる岩盤、コンクリートの破碎

前述のようにくさびによる岩盤掘削工法は穿たれた円孔にくさび(PW:パワーウエッジ)と2本のカウンターウエッジ(CW:外周が円弧状でくさび面と逆勾配を有する)とをセットしくさびを油圧あるいは打撃により貫入させ、カウンターウエッジに強制変位を生じさせて岩盤を破碎するものである。

この工法を用いてベンチカット状の掘削を行う場合を考える。このときベンチ面高さを一定に保つためには、図-1に示すようにカウンターウエッジの先端位置をベンチ面高さと一致させることが必要となる。そこで本研究では載荷方法が種々考えられる中で基本的な載荷方法として図-1に示す載荷の状態を例にとりこの状況でのクラックの発生・発達を検討することにする。

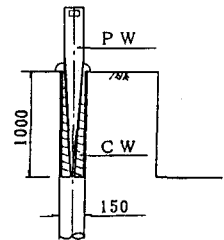


図-1 クサビによる載荷方法

3. 実験結果

実岩盤の破碎を直接数値シミュレートすることは必ずしも容易ではない。そこで本研究と併行して行ったコンクリートの破碎実験を対象に数値解析することとした。

コンクリート構造物の部分解体を対象として行った実物大コンクリートモデルは写真-1に示す横幅3.0m×高さ4.0m(地上部3.0m)×長さ6.6~7.8m(片面階段状)とし、自由面として高さ1.0m、長さ0.6mのベンチを2段設けたものである。コンクリートの配合は $\sigma_{28}=270\text{kgf/cm}^2$ 、最大骨材寸法15mm、スランプ12cmであり、材令は8~23日としている。この供試体の片側に設けられた1m高さのベンチを展開していく形で長さ1mのカウンターウエッジを直径15cmの孔中に設置し、パワーウエッジを落錘により打撃し、生じるクラックの状況を観察した。

この実験により得られた、数値シミュレーションを行ううえで有用と思われる結果を列挙すると次のようである。

- a) クラックの発達状況から判断して、問題の近似的な2次元の取扱が可能である。
- b) クラックの発達と共に被破碎体によるくさびの拘束はくさび上部で小さく、そしてくさび下部で大きくなる。
- c) 抵抗線距離が大きく、かつ供試体下部が拘束されない場合にはクラックは直下方向へ発達する。

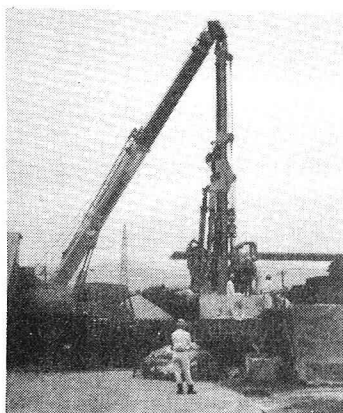


写真-1 実験風景

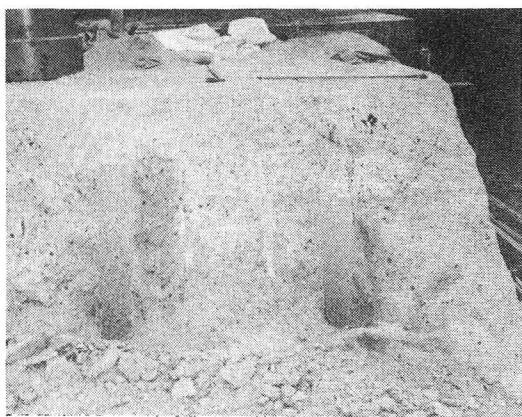


写真-2 破碎状況

4. き裂進展解析

4.1 計算方法

ここで提案するき裂進展解析法は、FEMと弾性破壊理論を結合したものである。構造物中のき裂の進展を追跡するには、

- ① き裂が進展するかどうかの判定
- ② どの方向に進展するか
- ③ どれだけ進展するか

が必要である。これらのうち、前2者では、応力拡大係数（2次元問題では、K I（開口型）とK II（面内せん断型））の算出が要求される。応力拡大係数の算出法としては、応力法、J積分法、変位法が挙げられるが、K I、K IIを分離して算出でき、精度的に信頼性が高い変位法をここでは採用することとする。混合モード下でのき裂進展においては、き裂はその方向を変化させることより、進展量の設定は進展方向の変化の割合によりその都度判断することとした。

変位法を用いる際、き裂先端部の要素の変形が結果の精度を大きく支配する。この対策として十分細かいメッシュの利用、高精度の要素の採用が要求される。ここでは数多くの数値実験より、図-2に示す最小メッシュサイズ 5mmのき裂先端要素を有するFEMメッシュを採用し、この要素群をき裂先端部に固定し、き裂進展に伴い移動させることとした。これにより、メッシュ変化による離散化誤差の変化・乱れを防ぐ。特に、き裂先端点を含む要素には Ingraffeaが用いた、変位 $\sqrt{r}$ の特異性を考慮した6節点3辺形アイソパラメトリック特異要素を利用し、混合モード下での応力拡大係数を次式により求めた。

$$K I = \frac{2\pi}{L} \frac{G}{\kappa+1} \left[4(v_B^* - v_D^*) + (v_E^* - v_C^*) \right] \quad (1)$$

$$K II = \quad \quad \quad \left[4(u_B^* - u_D^*) + (u_E^* - u_C^*) \right] \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu} \quad (\text{平面応力状態}) \quad (3)$$

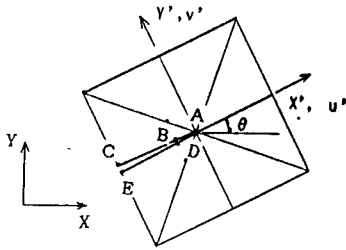


図-2 き裂先端要素

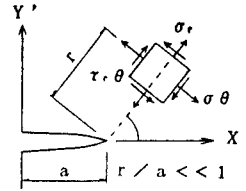


図-3 応力成分

き裂の進展方向の予測法としては次の4つが挙げられる。

- ① き裂先端の周方向直応力最大方向 (以下 $\sigma_{\theta_{\max}}$ 方向とする)
- ② ひずみエネルギー密度最小方向
- ③ 面内せん断型応力拡大係数 $K_{II} = 0$ の方向
- ④ 弾性エネルギー解放率最大方向

ここではき裂先端の周方向直応力最大方向とした。混合モード下でき裂が与えられるとその先端近くの応力状態は

$$\sigma_r = -\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \right) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2 K_{III} \tan \frac{\theta}{2} \right] + \dots \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] + \dots \quad (5)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) \right] + \dots \quad (6)$$

となる。ここで、き裂の進展条件を

- a) き裂進展はき裂先端で始まり放射状に進む。
- b) " は最大主応力方向に対して垂直に進む。すなわち $\theta = \theta_0$ では $\tau_{r\theta} = 0$
- c) " は $\sigma_{\theta_{\max}}$ が破壊靱性値 K_{Ic} に達した時に始まる。

とする。高次の項を無視した上で、b)より式(6)は

$$\theta_0 = \pm \cos^{-1} \frac{3K_{II}^2 + K_I \sqrt{8K_{II}^2 + 8K_I^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \quad (7)$$

となり新しい進展角度 θ_0 を得る。またc)より式(5)は

$$1 = \cos \frac{\theta_0}{2} \left[\frac{K_I}{K_{Ic}} \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} \frac{K_{II}}{K_{Ic}} \sin \theta_0 \right] \quad (8)$$

となり、 θ_0 がb)の条件を満足するかどうかを判定する。ただし今回の実験ではき裂進展の開始条件を求めていることから、式(8)による照査は行わなかった。

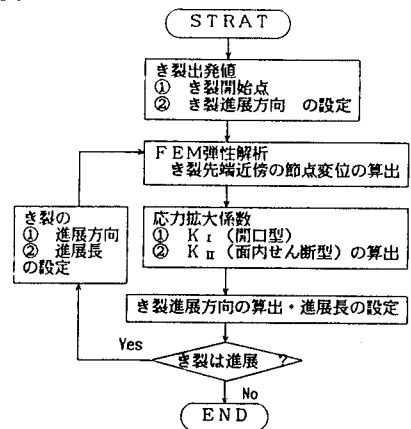


図-4 計算の流れ

4.2 計算結果のまとめ

抵抗線距離が30,80,130cmの場合についての計算結果を表-1、図-5に示す。図-5は抵抗線距離が長くなるのに従い、き裂が下方側に進展したコンクリート破碎実験とよく一致している。そして抵抗線長比（抵抗線距離／パンチ高さ）がき裂進展方向に大きな影響を与えており、それは抵抗線長比の減少とともにモードⅡ型のき裂が卓越してくることを示している。

表-1 計算結果

CASE	STEP	設定 進展長	応力拡大係数		き裂進展方向 θ	
			K	K	σ_{max} 度	S_{min} 度
1	1	0.0	1.23	-1.13	51.8	44.4
	1'	0.0	0.96	-1.27	56.9	51.2
	2	2.0	1.58	-1.06	60.5	52.8
	3	5.0	2.44	-0.72	82.0	81.5
	4	10.0	2.93	-0.52	101.2	99.6
2	1	0.0	1.61	-0.86	41.6	34.4
	2	2.0	1.98	-0.59	50.7	49.3
	3	5.0	2.16	-0.39	63.6	68.4
3	1	0.0	1.28	-0.52	35.7	29.8
	2	2.0	1.47	-0.36	38.6	35.6
	3	5.0	1.64	-0.07	43.3	43.3
	4	10.0	1.78	-0.05	46.4	46.4

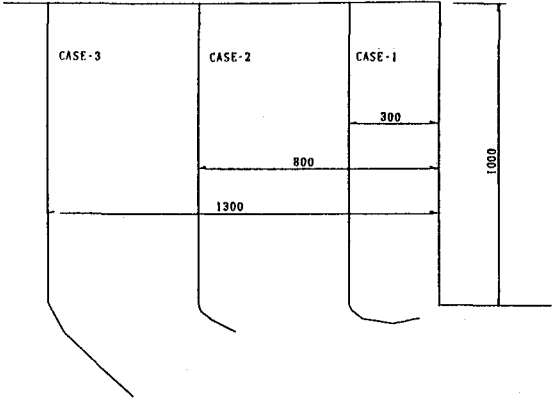


図-5 き裂進展経路

図-6にはき裂先端付近の要素の最大引張応力値 σ_1 を示す。 σ_1 はき裂先端点を含む要素において突出した値を示し、その他の要素では極端に低い値となっている。このことからコンクリートが脆弱化するのはいき裂進展経路面に沿った近傍であり、基礎部分に対しては応力的な悪影響が及ばないことが推察される。

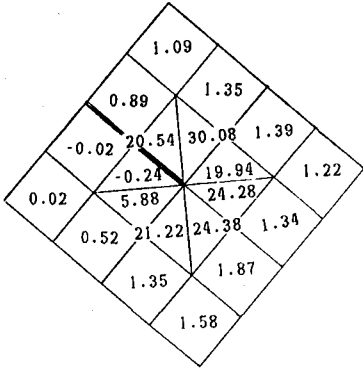


図-6 き裂周辺部の σ_1 (CASE-1,STEP-3)

5. まとめ

くさびを用いた岩盤破碎工法により発生するき裂の発達過程を、有限要素法と破壊力学を組み合わせるシミュレートする方法を提案し、コンクリート破碎実験と比較した。その結果、両者のき裂進展経路は良く一致することから、本手法の適用性が高いことが示された。なお、ここに示した手法は、応力解析をベースとするものであることより、用いるメッシュには十分な注意を払う必要がある。今後メッシュ作成の自動化、特にき裂進展に従って自動的に新たなメッシュが作成される技法の提案が望まれる。

末筆ながら計算を手伝っていただいた岡山大学土木工学科の森脇、山崎、染次の三君に感謝します。

参考文献 1) A.R.Ingraffea, "Numerical modeling of fracture propagation" Rock Fracture Mechanics
2) T.Tnaiguchi, K.Sanada, H.Matsumoto, K.Moriwaki, "SOME REMARKS ON FINITE ELEMENT MESH MODELING OF CRACK-TIP AREA", Memoirs of the school of Engineering OKAYAMA University, Vol 21-2

(25) Study on the mechanism of rock breaking by the Wedge-Striking bench cut method

Akihiko Miyaji *
Kazuhiro Takahashi *
Takeo Taniguchi **
Kouji Nakagawa ***

Abstract

Breaking test of actual sized concrete specimen executed by the Wedge-Striking bench cut method was analysed and numerical simulation by FEM and Fracture Mechanics was also carried out.

In the above said analysis, the stress intensity factor was calculated by the displacement method and Ingraffia's isoparametric element was used for crack-tip. The direction of a crack propagation was determined by $\sigma \theta_{max}$ theory.

The results of the experimental test and that of the theoretical analysis were found to be in a very close agreement.

* JDC corporation
** OKAYAMA University
*** YAMAGUCHI University