

(42) 切り欠き発破の破壊力学的検討

大成建設(株)技術研究所 正会員 ○川上 純、飯星 茂
日本化薬(株)火薬事業部 西田 佑
山口大学 工学部 正会員 中川 浩二

Study of Notched Blast Hole Technique by Fracture Mechanics

Jun KAWAKAMI, Shigeru IIHOSHI, Taisei Corp.
Tasuku NISHIDA, Nihon Kayaku Corp.
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

When we excavate in hard rock, smooth blasting techniques are important to control the fracture plane and inhibit damage of surrounding rock. Making notches parallel or perpendicular to blast holes is one of these techniques.

Some experimental studies about notched blast hole technique were conducted using mortar block, and we apply fracture mechanics to the test results. The main results of this study are follows.

- (1) We confirm the notched blast hole technique can control the direction of fracture plane, and low explosives is superior to high explosives.
- (2) Estimated dynamic fracture toughness is larger than static fracture toughness obtained by three-point bend test.
- (3) Using high explosives, stress intensity factors at fracture grow and specimen break are greater than using low explosives.

1. はじめに

トンネルや地下空洞の掘削においては、発破による周辺岩盤の損傷を少なくし、また発破予定線に沿って平滑に破断面を形成するために、スムーズブラスティングが重要となってきた。

現在この工法の一つとして、爆破孔に平行な切り欠きや爆破孔の底面に円盤状のディスクを設けて、爆破破断面を制御する方法（以下、切り欠き発破と呼ぶ）がある。これらの切り欠きは、近年発達してきた超高压ウォータージェットを用いることにより、比較的容易に作成することが可能となり、実際の工事への適用も可能となりつつある。

このような切り欠き発破については、いくつかの検討が行われているが、その効果や理論的な裏付けはまだ充分とは言えない。そこで、本研究ではモルタル供試体を用いた切り欠き発破の実験を行い、その結果について破壊力学的な検討を行った。

2. 実験方法

モルタル供試体による切り欠き発破実験は、爆破孔に平行な切り欠き（以下ノッチと呼ぶ）を設けたものと、爆破孔に垂直な円盤状の切り欠き（以下ディスクと呼ぶ）を設けたものの2種類について行った。モルタルの配合は C:S:W=1:3:0.45とし、早強セメントと海砂を用いている。

ノッチ実験の供試体は図-1に示すように20×20×40cmで、その中央に直径15mmの爆破孔を設けた。ノッチの厚さは2mmに固定し、深さは2,4,8mmの3種類とした。またノッチを入れていない供試体についても実験を行った。

ディスク実験の供試体は図-2に示すように直径20cm長さ40cmで、その中央に直径32mmの爆破孔を設けた。ディスクは中央部の最大厚を5mmと固定し、直径は50,60,70mmの3種類とした。

火薬類としては、①6号雷管+導爆線（DF）と、②点火具+コンクリート破碎器（CB）の2種類を使用した。導爆線の爆速は7000m/sで、コンクリート破碎器の燃焼速度は約60m/sであり、火薬類としての猛度は両極端のものである。そしてそれぞれ薬量を変化させて供試体の破壊に必要な薬量を求めた。破壊に至らなかった供試体はコンクリートカッターで切断し、爆破孔から発生したクラックの観察を行った。

3. 応力拡大係数の計算

ノッチ先端の応力拡大係数 K_I は、Ouchterlony¹⁾により求められている開クラックを持つ半径Rの円孔内に一様圧力Pが加わる場合の式により求めた。ここで、bはノッチ長さである。

$$K_I = \alpha P \sqrt{\pi \mu R} \quad \text{———— (1)}$$

$$\mu = (R + b) / R \quad \text{———— (2)}$$

表-1 μ と α の関係

μ	1.1	1.2	1.4	1.6	2.0	3.0	5.0
α	0.58	0.74	0.87	0.92	0.95	0.98	1.0

ディスクの場合は、内面に軸対称圧力Pを受ける半径aの円盤状クラックの式

$$K_I = 2 P \sqrt{\pi a} / \pi \quad \text{———— (3)}$$

を用いた。²⁾

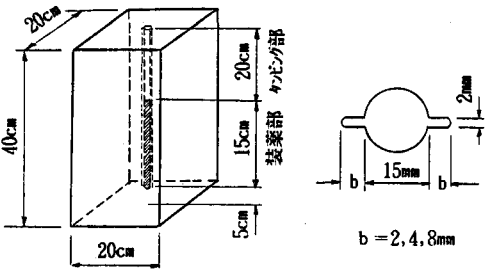


図-1 ノッチ用供試体とノッチ形状

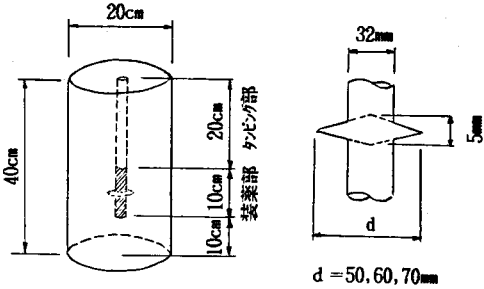


図-2 ディスク用供試体とディスク形状

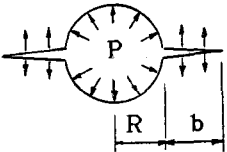


図-3 ノッチの K_I 計算モデル

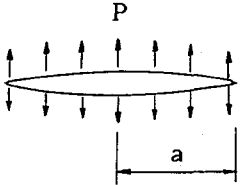


図-4 ディスクの K_I 計算モデル

4. 実験結果および考察

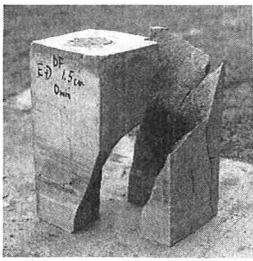
4. 1 ノッチでの実験結果

表-2,3にノッチ実験のDFとCBでの破壊状況と、ノッチ先端での応力拡大係数 K_1 の計算値を示す。装薬部の圧力は火薬類の静的効果の度合を示す比エネルギー f を用いて計算した。

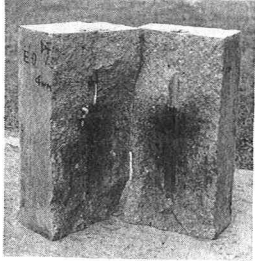
表から分かるように、供試体を破壊させる限界付近の応力拡大係数はややばらつきはあるものの、DFでは $130\text{Nmm}^{-1.5}$ でCBでは $60\text{Nmm}^{-1.5}$ であり、DFの方が大きな値となっている。

破壊状況は、写真-1, 2に見るように、ノッチのない供試体では破碎方向は不定なのに対して、ノッチを付けた供試体はノッチ方向から破碎されており、ノッチの破断方向制御効果が顕著に認められる。

また、破断面はDFよりもCBの方が平滑であり、薬量を増加させるとDFでは破断面は凹凸が激しくなるのに対して、CBでは平滑な破断面が保持されていた。これは、導爆線の場合は衝撃波が生じ、供試体の端面で反射を繰り返す、供試体内部に複雑な応力場を形成するため、クラックの発達方向は必ずしも一定しないため



ノッチなし

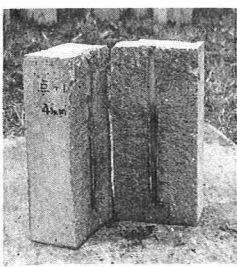


ノッチ4mm

写真-1 導爆線による破碎 (ED + DF1.5cm)



ノッチなし



ノッチ4mm

写真-2 コンクリート破砕器による破碎 (点 + CB1.0g)

表-2 ノッチの導爆線による実験結果

装薬の種類	ノッチの長さ(mm)	装薬部の爆圧(Kgf/cm ²)	K_1 ($\text{Nmm}^{3/2}$)	破砕片数	クラックの本数
EDのみ	0	197.9	—	×	(5)
	2	187.6	79.9	×	(5)
	4	178.3	94.4	×	(3)
	8	162.0	109.5	×	(4)
ED + DF0.5cm	0	227.2	—	×	鉄砲
	2	215.4	91.8	×	(4)
	4	204.7	108.4	×	3
	8	186.1	125.8	×	(4)
ED + DF1.0cm	0	256.2	—	×	(5)
	2	243.3	103.7	×	4
	4	231.3	122.5	×	(4)
	8	210.2	142.1	×	4
ED + DF1.5cm	0	287.2	—	4	破碎
	2	272.3	116.0	2	破碎
	4	258.8	137.7	2	破碎
	8	235.2	159.0	6	破碎
ED + DF2.0cm	0	317.7	—	4	破碎
	2	301.2	128.3	5	破碎
	4	286.3	151.7	3	破碎
	8	260.1	175.8	7	破碎
ED + DF2.5cm	0	348.6	—	2	破碎
	2	330.6	140.9	6	破碎
	4	314.2	166.4	2	破碎
	8	285.5	193.0	9	破碎

表-3 ノッチのコンクリート破砕器による実験結果

装薬の種類	ノッチの長さ(mm)	装薬部の爆圧(Kgf/cm ²)	K_1 ($\text{Nmm}^{3/2}$)	破砕片数	クラックの本数
点火具	0	72.3	—	×	(3)
	2	68.5	29.4	×	(2)
	4	65.1	34.5	×	(3)
	8	59.2	40.0	×	(2)
点火具 + CB0.4g	0	87.0	—	×	ナシ
	2	82.5	35.2	×	1
	4	78.4	41.5	×	(3)
	8	71.3	48.2	×	(4)
点火具 + CB0.6g	0	101.6	—	×	ナシ
	2	96.4	41.1	×	(4)
	4	92.2	48.8	2	破碎
	8	83.7	56.6	×	2
点火具 + CB0.8g	0	117.2	—	×	(2)
	2	111.1	47.3	×	1
	4	105.6	55.9	2	破碎
	8	96.0	64.9	2	破碎
点火具 + CB1.0g	0	133.1	—	2	破碎
	2	126.3	53.8	2	破碎
	4	120.0	63.6	2	破碎
	8	109.0	73.7	2	破碎
点火具 + CB2.0g	0	216.6	—	5, 6	破碎
	2	205.4	87.5	3, 3	破碎
	4	195.2	103.4	3, 4	破碎
	8	177.4	119.9	3, 5	破碎

と考えられる。

破壊しなかった供試体のクラックの発生状況を表-2, 3にあわせて示す。クラックはノッチ先端以外から発生しているものもあった。表中の()で示したものは、ノッチ先端から発生したクラックが他の孔壁から発生したクラックと比べて顕著でなかった場合である。

DF, CBのいずれの場合も、薬量が少ない場合はノッチ先端及びその他の孔壁からクラックが発生していたが、薬量が増すにつれノッチから発生するクラックが優勢となっていた。ノッチから発生するクラックの方が優勢となるときの応力拡大係数はDFで $110\text{Nmm}^{-1.5}$ 、CBで $50\text{Nmm}^{-1.5}$ 前後であった。またクラックの数および長さとも導爆線の方が大きい値となっていた。ノッチ以外からもクラックが発生していたのは、火薬類が正確に爆破孔の中心に装填されてない場合は、爆破孔の内圧の分布に偏りが生じ、爆破孔に微小な欠陥があれば、必ずしもノッチ先端で応力拡大係数が最大とならないためと考えられる。

4. 2 ディスクでの実験結果

表-4, 5にディスク実験での結果を示す。供試体を破壊させる限界付近の応力拡大係数はDFで約 $150\text{Nmm}^{-1.5}$ 、CBで約 $70\text{Nmm}^{-1.5}$ であった。写真-3, 4に示すようにノッチの場合と同様、破断面はDFよりもCBの方が平滑である。特に供試体を破壊させる限界付近の装薬量の時供試体は真二つに割れた。薬量が多くなると切り欠き以外の場所からも破壊が生じていた。

DFでのクラックは応力拡大係数が約 $70\text{Nmm}^{-1.5}$ の時に発生し、ディスク先端からやや下向きに発達していた。そして、途中で枝分かれを起こしていた。また薬量の増加にともなってディスク先端のみならず装薬室の下部の不連面からも発生していた。

CBでのクラックは応力拡大係数が約 $50\text{Nmm}^{-1.5}$ で

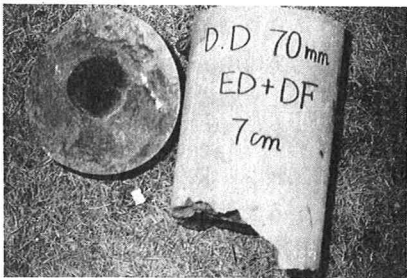


写真-3 導爆線による破碎 (ED+DF7cm)



写真-4 コンクリート破砕器による破碎 (点+CB3.5g)

表-4 ディスクの導爆線による実験結果

装薬の種類	ディスクの直径 (cm)	装薬部の爆圧 (Kgf/cm ²)	K ₁ (Nmm ^{3/2})	破砕片数	クラックの本数
ED	50	106.4	58.8	×	ナシ
+	60	105.7	64.0	×	ナシ
DF1.5cm	70	104.7	68.5	×	ナシ
ED	50	117.8	65.1	×	2
+	60	117.0	70.9	×	3
DF2.0cm	70	115.9	75.8	×	1
ED	50	141.5	78.0	×	2
+	60	140.2	84.9	×	2
DF3.0cm	70	138.8	90.8	×	2
ED	50	189.7	104.9	×	1
+	60	188.5	114.1	×	3
DF5.0cm	70	186.6	122.1	×	3
ED	50	240.5	133.0	×	3
+	60	238.9	144.7	×	欠陥
DF7.0cm	70	236.6	154.8	2	破砕
ED	50	293.1	162.1	多数	破砕
+	60	291.1	172.3	8	破砕
DF9.0cm	70	288.3	188.6	5	破砕

表-5 ディスクのコンクリート破砕器による実験結果

装薬の種類	ディスクの直径 (cm)	装薬部の爆圧 (Kgf/cm ²)	K ₁ (Nmm ^{3/2})	破砕片数	クラックの本数
点火具	50	49.4	27.3	×	ナシ
+	60	49.1	29.7	×	ナシ
CB1.0g	70	48.6	31.8	×	ナシ
点火具	50	64.6	35.7	×	ナシ
+	60	64.1	38.9	×	1
CB1.5g	70	63.5	41.6	×	ナシ
点火具	50	96.7	53.5	×	ナシ
+	60	96.1	58.2	×	2
CB2.5g	70	95.1	62.2	×	2
点火具	50	130.7	72.3	2	破砕
+	60	129.9	78.7	3	破砕
CB3.5g	70	128.6	84.1	2	破砕
点火具	50	148.4	82.0	×	2
+	60	147.4	89.3	×	2
CB4.0g	70	145.9	95.5	×	2
点火具	50	222.2	122.8	多数	破砕
+	60	220.7	133.7	3	破砕
CB6.0g	70	218.5	143.0	2	破砕

ディスク先端からほぼ水平に発生していた。また、装薬量を増加させてもディスク先端以外からのクラックの発生は見られなかった。

4. 3 応力拡大係数の比較

表-6 に各実験における供試体破砕時及びクラック発生時の限界応力拡大係数を示す。なお、ノッチ実験におけるクラック発生時の限界応力拡大係数としては、ノッチから発生するクラックが孔壁から発生するクラックよりも優勢となる時の値を示し、() 内にはクラックが孔壁から発生する時点の値を示した。また同一の配合のモルタルを用いて実施した、切り欠きを設けた梁の静的曲げ試験から求めた破壊靱性値も示した。

この表から分かるように、供試体破砕時及びクラック発生時の限界応力拡大係数は、ノッチとディスクでほぼ同程度の値となっており、切り欠き発破のノカニズムは破壊力学的な考え方が適用できることが分かる。

また、切り欠き発破での動的破壊靱性値をクラック発生時の限界応力拡大係数と考えると、その値は静的破壊靱性値の4～5倍になっていた。

DFとCBとを比較すると、クラックの発生時及び供試体破砕時の限界応力拡大係数は、DFの方が大きくなっていた。この理由としては単に載荷速度の違いの他に以下の事が考えられる。すなわち、高爆速爆薬では爆轟により衝撃波が生じるため、発破孔には切り欠き先端以外のところからも放射状のクラックを生じる。この放射状クラックは切り欠き先端での応力拡大係数を低下させる。この放射状クラックを考慮せずに算出した応力拡大係数は実際より大きめの値となる。

5. まとめ

本研究では、モルタル供試体を用いて、爆破孔に切り欠き(ノッチ、ディスク)を設けた発破実験を行い、破壊力学的検討を行った。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 爆破孔にノッチ・ディスクを設けることにより、爆破破断面を制御することができ、平滑な破断面を形成することができる。特に低爆速爆薬を用いるとその効果は顕著になる。
- 2) 発破実験により求められたクラック発生時の限界応力拡大係数は、ノッチとディスクではほぼ同じ値となっていた。また、その値は同種のモルタルの静的破壊靱性値の数倍大きくなっていた。
- 3) 高爆速爆薬は低爆速爆薬よりクラックの発生時及び供試体破砕時の限界応力拡大係数は大きくなっており、爆発による圧力が有効に働いていないと考えられる。

なお、発破実験での応力拡大係数の算出は静的な理論式によったが、正確な破壊靱性値の評価には、動的問題としての解析方法の研究が必要であろう。

最後に、本実験を実施するにあたり日本化薬(株)厚狭工場の方々には多大な御協力を頂いた。また本実験は当時山口大学の学生であった、今村・荒木両君によって行われたものである。ここに深甚な謝意を表する。

参考文献

- 1) Rock Fracture Mechanics ; C I S M Courses and Lecture No.275, P43 ,1983
- 2) 岡村 弘之 ; 線形破壊力学入門 P213 ,1983 ,培風館

表-6 各実験での限界応力拡大係数 ($N/mm^{1.5}$)

実験項目		ノッチ	ディスク
破砕	導爆線	130	150
	コンクリート破砕器	60	70
亀裂	導爆線	110 (80以下)	70
成長	コンクリート破砕器	50 (30以下)	50
梁の静的曲げ試験		10～15	