

.....
 研究論文

岩石のシャルピー試験 (第2報) —動的破壊靱性について—

古住 光正,* 杉本文男,** 今井忠男,**
 鴨志田 直人,* 阿部正良*

The Charpy Impact Test of Rock (2nd Report) —Dynamic Fracture Toughness—

Mitsumasa FURUZUMI†, Fumio SUGIMOTO††, Tadao IMAI††,
 Naoto KAMOSHIDA† and Masayoshi ABE†

In this study, we investigated dynamic fracture toughness and crack propagation velocity of rocks by using Charpy impact test.

The results of the experiments showed that crack propagation velocity of the rocks depends on impact energy applied to it, and Q (impact energy/crack propagation velocity) correlates with static strengths of the rocks. Also, the dynamic fracture toughness of the rocks, which is calculated from the dynamic fracture energy obtained by using Charpy impact test, was found to depend on the impact energy applied with it, and correlates with crack propagation velocity and static compression and tensile strengths of the rocks.

Key Words : Rock, Fracture toughness, Charpy impact test, Crack propagation velocity, Mechanical property

1. はじめに

前報¹⁾では、発破掘削における岩盤の動的指標を得ることを目的として、定格の鋼材用シャルピー衝撃試験機を用いた場合の岩石の動的破断エネルギーについて検討した。その結果、シャルピー試験の一般式から求まる岩石の動的破断エネルギーには、破断だけに要する動的正味破断エネルギーの他に、破断した試験片を飛散させるかなり大きな飛散エネルギーが含まれていることを指摘した。さらに、シャルピー試験から求まる岩石の動的破断エネルギーは、衝撃エネルギーに依存し、空隙率が小さい岩石ほど、また、一軸圧縮強度ならびに圧裂引張強度が大きい岩石ほど大きくなることなどを報告した。

本報では、さらに衝撃問題における岩石の破壊について詳細に検討するために、き裂先端の応力場におけるエネルギー解放率あるいは応力拡大係数を用いた動的破壊靱性の観点からの検討を試みた。

岩石力学の分野においては、3点曲げ試験、SBR試験あるいは引き裂き試験などによる静的破壊靱性はよく知られている^{2)~5)}。しかし、岩石の動的破壊靱性についてはほとんど知られていない。

そこで本研究では、岩石のシャルピー試験から求まるき裂進展速度ならびに動的破断エネルギーを精査し、破壊力学の観点より衝撃問題における岩石の動的破壊靱性について検討したので、これらについて報告する。

2. 岩石試料および供試体

本研究で用いた岩石試料は、伊豆凝灰岩 (静岡県産)、荻野凝灰岩 (福島県産)、十和田凝灰岩 (秋田県産)、来待砂岩 (島根県産)、稲田花崗岩 (茨城県産)、姫神花崗岩 (岩手県産)、釜山輝緑岩 (韓国産)、釜山閃緑岩 (韓国産)、小岩井安山岩 (岩手県産)、白川砂岩 ホーンフェルス (福島県産) の10種類である。

表1に供試岩石の力学的・物理的性質を示す。

試験片は、長さ70 mm、高さ40 mm、幅50 mmの直方体であり、幅2 mm、深さ10 mm、曲率半径1 mmの切り欠き部を有する。

写真1は、試験片の試験前および試験後の状態を示したものである。試験片には、き裂進展速度を測定するための測線が導電塗料で描かれている。

3. 試験方法

シャルピー衝撃試験装置については、前報¹⁾で詳述したのでここでは省略する。

実験は、ハンマの持ち上げ角度を30, 45, 60, 75, 90°とした場合について行い、各ハンマの持ち上げ角度に対するき裂進展速度ならびに動的破断エネルギーを測定した。

図1は、き裂進展速度の測定系統図を示したものである。図において、試験片にハンマが衝突すると、切り欠き部から発生

平成17年5月20日受付;平成17年12月7日受理

* 岩手大学工学部建設環境工学科

〒020-8551 盛岡市上田4-3-5

** 秋田大学工学部資源学部地球資源学科

〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

† Faculty of Engineering, Iwate University 4-3-5, Ueda, Morioka, 020-8551, Japan

†† Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

1-1, Tegata Gakuen-cho, Akita, 010-8502, Japan

Table 1 Mechanical and physical properties of used specimen.

Rocks	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Uniaxial compressive strength (MPa)	Brazilian tensile strength (MPa)	P-wave velocity (km/s)	S-wave velocity (km/s)	Dynamic Poisson's ratio (-)	Dynamic Young's modulus (GPa)
Izu tuff	1.99	23.70	36.3	5.01	2.41	1.43	0.23	10.1
Ogino tuff	1.59	25.69	51.9	5.83	2.65	1.67	0.17	11.0
Towada tuff	2.04	19.86	62.0	5.50	3.08	1.72	0.27	15.3
Kinachi sandstone	1.98	22.18	36.5	5.02	2.63	1.65	0.18	13.2
Inada granite	2.64	0.36	187.7	10.82	4.01	2.45	0.21	37.6
Himekami granite	2.67	0.46	210.3	11.41	4.73	2.81	0.23	52.0
Pusan diabase	2.80	2.05	202.4	11.39	4.02	2.46	0.20	41.4
Pusan diorite	2.83	0.47	287.9	15.98	4.72	2.84	0.22	55.2
Koiwai andesite	2.73	1.70	309.0	15.34	4.75	2.83	0.23	53.7
Shirakawa sandstone-hornfels	2.72	0.14	417.8	19.03	5.29	3.42	0.14	72.1

したき裂は、導電塗料の線を切断しながら進展し、断線毎にヴォルテージ・レギュレータから600 mVの電圧が発生する。これを掃引時間0.05~0.5 μsとしてデジタル・スコープに記録し、後程、X-Yレコーダに電圧-時間曲線として出力させた。

図2は、荻野凝灰岩のき裂進展測度の測定例である。き裂の進展に伴って測線は断線し、このとき所定の電圧が発生するのが分かる。

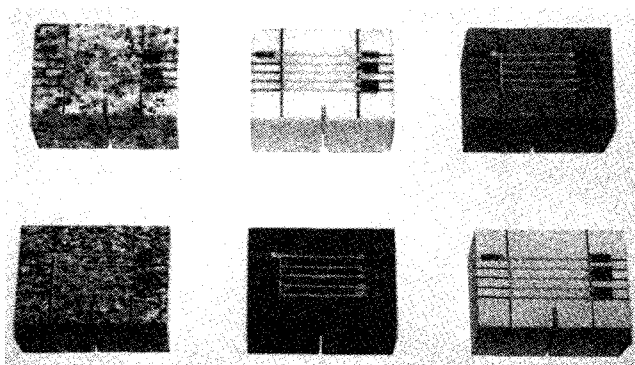
図3は、図2のチャートから求まるき裂の進展距離と時間を示したものである。図において傾きはき裂進展速度である。これを見ると、衝撃試験によるき裂進展速度は、始め線形をとるが次第に非線形となり、順次低下していく傾向を示す。解析では、直線範囲から求まるき裂進展速度を用いた。

4. 試験結果ならびに考察

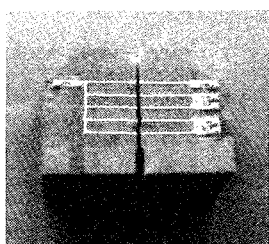
4.1 き裂進展速度

図4は、各岩石の衝撃エネルギーに対するき裂進展速度を示したものである。なお、ここに示す衝撃エネルギーとは、持ち上げたハンマの位置と試験片を設置した位置の差によって生ずる位置エネルギーを指す。図を見ると、各岩石のき裂進展速度は衝撃エネルギーの増加につれて増大し、その増加の割合は強度の大きい岩石ほど大きくなる傾向を示した。このことは、き裂進展速度は衝撃エネルギーに依存し、き裂進展速度の増加の割合には、強度に関わる各岩石固有の動的破壊抵抗性の関与が示唆された。そこで、図の衝撃エネルギーとき裂進展速度の関係に直線を当てはめ、その傾き Q から岩石の動的破壊抵抗性を検討してみた。

図5は、各岩石の Q と一軸圧縮強度および圧裂引張強度の



(a) Before experiment



(b) After experiment

Photo 1 Rock specimen.

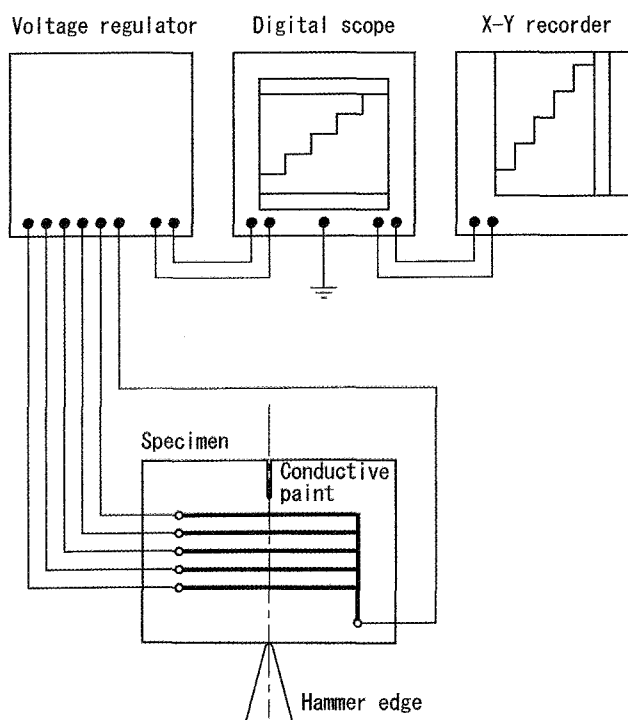


Figure 1 Schematic diagram of crack propagation velocity measurement

関係を示したものである。図を見ると、衝撃問題における岩石の Q と静的強度との間には極めて良い相関が認められる。 Q の物理的な意味は不明であるが、 Q の逆数が力積と同じ物理量であることを考えると、 Q は動的破壊抵抗性を表す一つの指標とも考えられ、これより破断面の形成に関わる動的破壊抵抗性には、き裂進展速度ならびに静的強度が密接に関わることが示唆された。

4.2 動的破壊靱性

破壊力学において、き裂先端の応力場を代表するエネルギー解放率は、き裂が単位長さ進展したときに物体が解放する力学的エネルギーであり、動的エネルギー解放率と動的応力拡大係

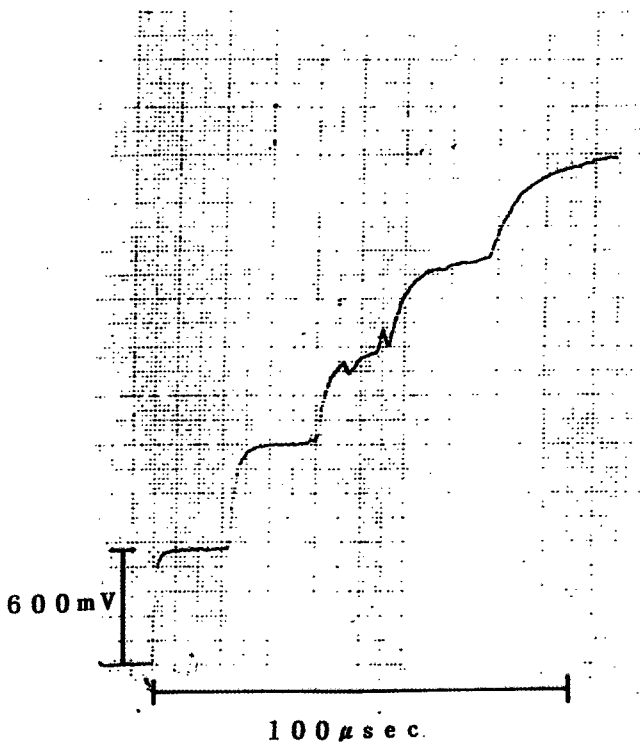


Figure 2 Voltage-time chart obtained in this experiment.

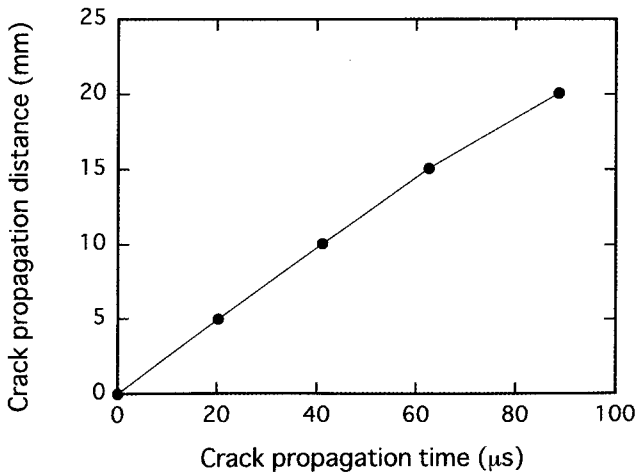


Figure 3 Relationship between crack propagation time and distance.

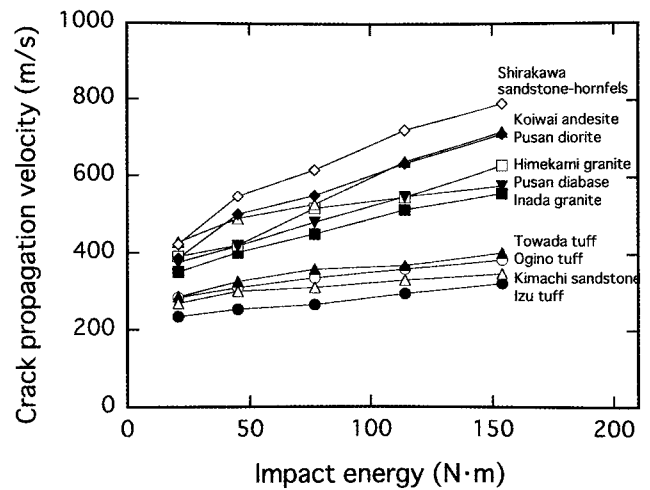


Figure 4 Relationship between impact energy and crack propagation velocity.

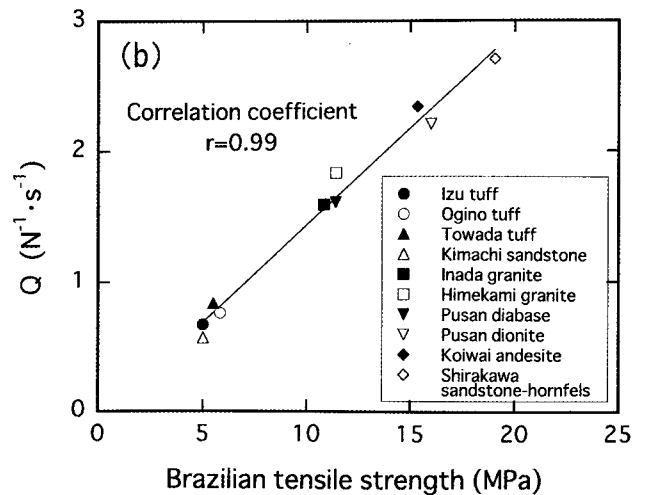
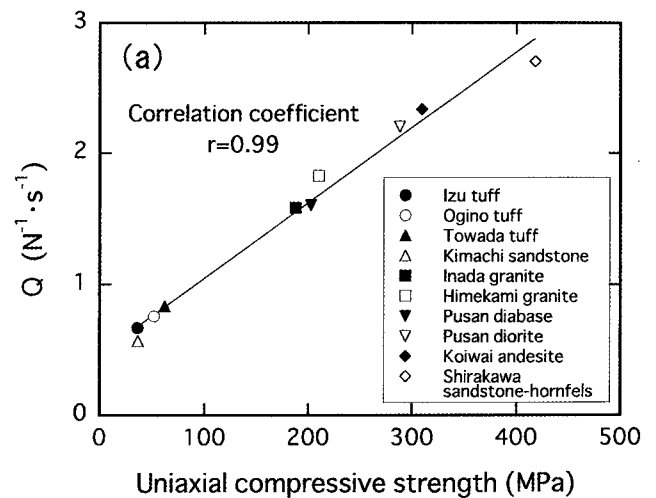


Figure 5 Relationship between Q and static strengths. ((a) Uniaxial compressive strength, (b) Brazilian tensile strength)

数の間には、次式のような静的な場合と同一の関係式が成立する⁷⁾。

$$G(t) = K_I(t)^2 / E_d \quad (1)$$

ここで、 $G(t)$ は動的エネルギー解放率、 $K_I(t)$ は動的応力拡大係数、 E_d は動的ヤング率であり、平面応力に対しては $E_d = E$ 、平面ひずみに対しては $E_d = E / (1 - \nu^2)$ が成立する。 E はヤング率、 ν はポアソン比である。

いま、シャルピーの衝撃試験における破壊をモードI変形に対応する平面応力問題とし、このときの破壊条件を

$$K_I(t) = K_{I_d}, \text{ あるいは } G(t) = G_{I_d} \quad (2)$$

とすると、(1)式は(3)式となる。

$$G_{I_d} = K_{I_d}^2 / E_d \quad (3)$$

ここで、 K_{I_d} ならびに G_{I_d} は、いずれも動的破壊靱性と呼ばれ、材料の衝撃破壊に対する抵抗性を表す。

また、岩石を弾性体と仮定し、シャルピー試験によって算定される動的破断エネルギー W が、破断面を形成する際に消費されるエネルギーとすると、衝撃問題における動的破壊靱性 G_{I_d} 、 K_{I_d} は、(4)式および(5)式ようになる。

$$W = G_{I_d} \cdot S \quad (4)$$

$$K_{I_d} = \sqrt{W \cdot E_d / S} \quad (5)$$

ここで、 S はシャルピー試験片の破断面積、 E_d は動的ヤング率である。

図6は、(5)式から求めた各岩石の衝撃エネルギーに対する動的破壊靱性を示したものである。図を見ると、各岩石の動的破壊靱性は衝撃エネルギーの増加につれて増大し、その値は強度の大きい岩石ほど大きくなる傾向を示した。このことは、動的破壊靱性は衝撃エネルギーに依存し、静的強度とも密接に関係していることを示すものである。しかし、衝撃エネルギーに対する動的破壊靱性の増加の割合は、図4に示した衝撃エネルギーに対するき裂進展速度と異なり、岩種による差異はほとん

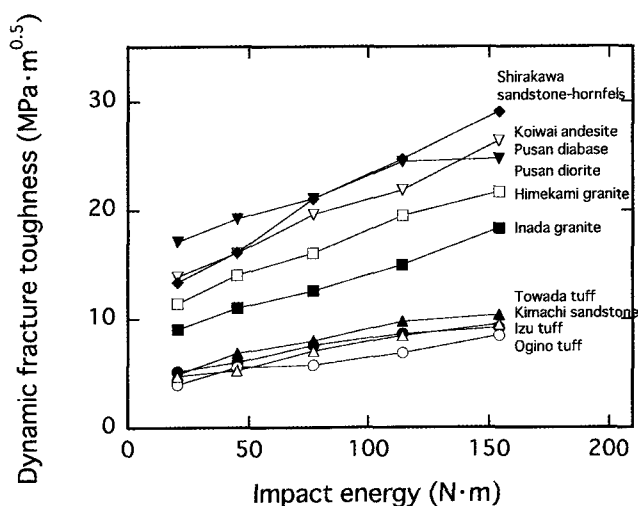


Figure 6 Relationship between impact energy and dynamic fracture toughness.

Table 2 Comparison between dynamic and static fracture toughness.

Rocks	Dynamic fracture toughness	Static fracture toughness	
	Present study ^{a)} (MPa·m ^{0.5})	Otsuka et al. ^{b)} ** (MPa·m ^{0.5})	Matsuki et al. ^{c)} *** (MPa·m ^{0.5})
Ogino tuff	4.0	0.695	0.6 ~ 1.2
Kimachi sandstone	4.7	0.484	-
Inada granite	9.1	1.87	0.9 ~ 2.9

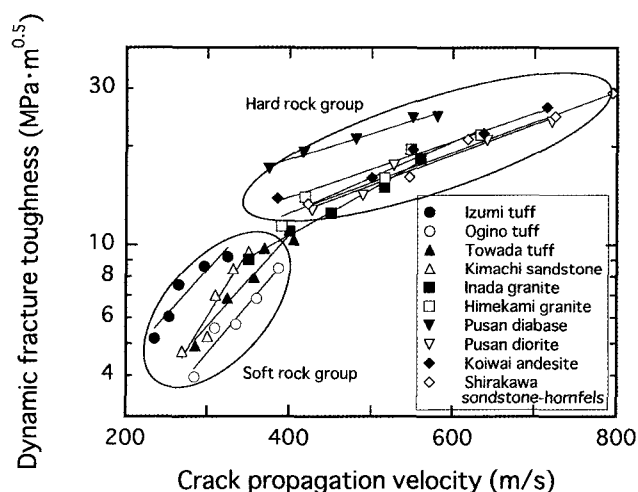
^{a)} Values for smallest impact energy by Charpy test

^{b)} Values by Splitting test.

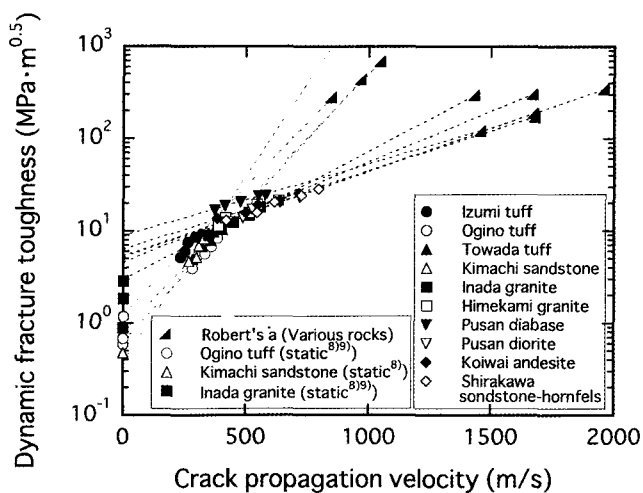
^{c)} Values by C-RCI test.

ど認められなかった。

表2は、静的破壊靱性との対比において、荻野凝灰岩、来待砂岩および稲田花崗岩の最小衝撃エネルギーから求めた動的破壊靱性と、大塚ら⁸⁾(1982)および松木ら⁹⁾(1993)による同じ岩石の静的破壊靱性を示したものである。両者を比較すると、筆者らが求めた動的破壊靱性は、静的破壊靱性に比べて荻野凝



(a) Experimental values



(b) Experimental values, static fracture toughness and Roberts' terminal crack velocity

Figure 7 Relationship between crack propagation velocity and dynamic fracture toughness.

Table 3 Measured largest crack velocity compared with terminal crack velocity (by Roberts¹⁰).

Rocks	Largest crack velocity by present study V _{max} (m/s)	Terminal crack velocity a (m/s)	V _{max} /a (%)	V _{max} /V _s (%)
Izu tuff	324.7	851.8	38.1	22.7
Ogino tuff	386.3	972.4	39.7	23.1
Towada tuff	405.2	1048.4	38.6	23.6
Kimachi sandstone	350.0	964.3	36.3	21.2
Inada granite	560.0	1436.8	39.0	22.9
Himekani granite	632.9	1673.9	37.8	22.5
Pusan diabase	580.0	1461.2	39.7	23.6
Pusan diorite	720.0	1678.3	42.9	25.4
Koiwai andesite	714.3	1682.3	42.5	25.2
Shirakawa sandstone-hornfels	793.7	1963.7	40.4	23.2

灰岩では約3~7倍、来待砂岩では約10倍、稲田花崗岩では約3~10倍となり、この両者の差異には、き裂進展速度の関与が示唆された。

図7(a)は、各岩石のき裂進展速度と動的破壊靱性の関係を示したものである。図を見ると、動的破壊靱性はき裂進展速度の増加とともに増大し、両者は片対数表示においてほぼ直線関係となった。また、図の傾きから動的破壊靱性の増加の割合を見ると、硬岩類よりも軟岩類の方が顕著となり、それらは2つのグループに分かれる傾向を示した。

図7(b)は、図7(a)に、Robertsら¹⁰(1954)のき裂最終速度から求める破壊靱性、および表2に示した大塚および松木らの静的破壊靱性をき裂進展速度が限りなく小さいとして示したものである。

なお、Robertsらによる材料の理論的き裂最終速度 \dot{a} は、次式で示される。

$$\dot{a} = 0.38 \sqrt{E_d / \rho} \quad (6)$$

ここで、 E_d は岩石の動的ヤング率、 ρ は岩石の密度である。

図を見ると、大塚および松木らの静的破壊靱性は、荻野凝灰岩、来待砂岩および稲田花崗岩とも本実験で得られた図7(a)の直線延長線上にはほぼ位置することが分かる。また、全岩種において、Robertsらのき裂最終速度を直線で外挿したときの動的破壊靱性は、最終き裂速度に近づくにつれて軟岩類と硬岩類の間で逆転が起こることが認められる。これには、岩石の脆性度が関与しているものと考えられる。

表3は、本実験で得られた最大き裂進展速度、Robertsらによるき裂最終速度、両者の速度比、ならびに最大き裂進展速度に対するS波伝播速度比を示したものである。表を見ると、シャルピー試験による最大き裂進展速度は、いずれの岩石ともほぼ同値を示し、この値はき裂最終速度の概ね40%となった。このことは、本研究で得られた岩石の動的破壊靱性は、比較的安定なき裂進展状態で得られたことを示すものである。

また、岩石の衝撃試験では、き裂進展速度がS波伝播速度の60%を越えると、き裂の斜め方向に最大接線応力が発生し、き裂の分岐が起こり、破壊靱性の評価が困難になるとの報告が見られる¹¹⁾。この点から本実験結果を照査して見ると、最大き裂進展速度に対するS波伝播速度比はいずれの岩石とも概ね20%となり、この点においても本研究で得られた岩石の動的破壊靱性は、比較的安定なき裂進展状態で得られことを示すものである。さらに、試験片の破断面の観察結果からは、き裂の分

Table 4 Comparison between dynamic fracture toughness including/not including kinetic energy.

Rocks	Dynamic fracture toughness	Dynamic fracture toughness which consider kinetic energy
	(MPa·m ^{0.5})	(MPa·m ^{0.5})
Ogino tuff	4.0	3.56
Kimachi sandstone	4.7	4.18
Inada granite	9.1	7.00

岐は認められなかった。

最後に、動的破断エネルギーと動的正味破断エネルギーから求まる動的破壊靱性について言及してみる。なお、ここで用いた動的正味破断エネルギーとは、前報¹²⁾で述べた方法によって飛散エネルギーを間接的に考慮したものである。

表4は、各岩石の動的破断エネルギーならびに動的正味破断エネルギーから得られた動的破壊靱性を示したものである。これを見ると、軟岩では両者に顕著な差異は認められない。このことは、シャルピー試験から求める厳密な動的破断エネルギーの算定においては、飛散エネルギーは無視し得ないが、(5)式における動的破壊靱性の評価においては、破断エネルギーは平方根で効くため、両者に強い差が生じなかったものと考えられる。他方、硬岩類では、動的破断エネルギーに占める飛散エネルギーの割合が大きくなるため、両者の差は軟岩類よりも大きくなった。従って、硬岩類の動的破壊靱性をより厳密に求めるには、飛散エネルギーを考慮した動的正味破断エネルギーを用いた方が良いことが示唆された。

以上のことから、本研究で得られた岩石の動的破壊靱性は、軟岩類では十分に信頼性を有するが、硬岩類では若干の誤差を含むものと思われる。

5. まとめ

本研究では、岩石のシャルピー試験において、各種岩石の衝撃エネルギーに対するき裂進展速度および動的破断エネルギーを測定し、き裂進展速度ならびに動的破壊靱性の観点から衝撃問題における岩石の動的破壊抵抗性を検討した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

衝撃破壊におけるき裂進展速度は、衝撃エネルギーに依存し、両者の関係の傾き Q は、静的強度と極めてよい相関を示した。また、荻野凝灰岩、来待砂岩および稲田花崗岩の動的破壊靱性は、既知の静的破壊靱性に比べてそれぞれ約7倍~10倍の値となった。

参考文献

- 古住光正, 杉本文男, 今井忠男, 鴨志田直人, 阿部正良: シャルピー試験による岩石の動的破断エネルギー, 素材物性学雑誌, 投稿中(2005)
- Schmidt, R.A.: Fracture-toughness Testing of Limestone, *Experimental Mechanics*, Vol.16 (1976) 161-167
- Henry, J.P., Paquet, J. and Tancrez, J.P.: Experimental Study of Crack propagation in Calcite Rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.14 (1977) 85-91
- 大塚尚寛, 小林良二: 各岩石の破壊靱性に関する研究, 日本鉱業会誌, 98巻, 1127号(1982) 1-6

- 5) 松木浩二, 金子高久: C-RCT 試験法の開発と岩石の破壊靱性の異方性評価, 資源と素材, 109巻, 8号 (1993) 625-630
- 6) 1) と同じ
- 7) 岸本喜久雄, 青木繁, 大里豊彦, 坂田勝: \dot{J} 積分を用いた動的応力拡大係数の有限要素解析, 日本機械学会論文集 A 編, 46巻, 406号 (1980) 584-589
- 8) 4) と同じ
- 9) 5) と同じ
- 10) Roberts, D. K. and Wells, A. A.: The Velocity of Brittle Fracture, Engineering, Vol.178 (1954) 820-821
- 11) 青木繁: 動破壊力学と動的破壊じん性, 材料, 33巻, 365号 (1984) 229-235
- 12) 1) と同じ