

研究論文

岩石のシャルピー試験（第1報）
—動的破壊エネルギーについて—

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 (1st Report)
—Dynamic Fracture Energy—

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

In this paper, we investigated dynamic fracture energy of rocks as a dynamic index in rock blasting using Charpy impact test.

It was confirmed through the experiments that dynamic fracture energy of rocks obtained from the general equation used in Charpy impact test contains lots of kinetic energy which is consumed as scattering of rock fragment after it has failed. Also, it was found that the dynamic fracture energy of the rocks depend on the impact energy applied to the rock specimens, and its increasing rate is supposed to indicate an intrinsic dynamic fracture resistance of rocks.

Key Words : Rock, Dynamic fracture energy, Charpy impact test, Kinetic energy, Dynamic index

1. はじめに

岩盤の掘削作業において、適正な掘削法の選択は対象岩盤の性状に左右されることは言うまでもない。従来、発破掘削の対象となる岩盤の評価は、一軸圧縮試験、一軸引張試験、三軸圧縮試験などの静的な試験によって行われてきた。しかし、発破による掘削作業は、本来動的な力の作用による破壊問題であることから、落下破壊試験¹⁾、回転破壊試験²⁾、あるいは岩石の小塊に重錘を落下させる試験³⁾のような動的な実用試験が行われるようになってきた。しかし、これらの試験は、岩盤の掘削性を判断する一つの指標を得る試験としては有効であるが、物理量としての意味が乏しいため、よりの確に岩盤の性状を表示しうる試験法が望まれる。

掘削における岩盤の破碎性や難易度は、亀裂の発生・進展に伴うエネルギーに関連する。そのため、強度のような物理量よりも破壊に要するエネルギーにより整理する方が合理的である。また、発破掘削における岩盤の破碎は衝撃によって生ずるため、衝撃荷重を作用させた試験法が望ましく、その有力な方法として金属材料の分野で用いられているシャルピー衝撃試験法が注目される。

シャルピー試験は、鋼材の衝撃荷重に対する破壊抵抗値を求

める一つの試験法である。しかし、同試験法が岩石材料に適用された例は極めて少ない^{4),5)}。

本研究では、発破掘削における岩盤の動的指標を検討するために、定格の鋼材用シャルピー衝撃試験機を用いて、種々の岩石の動的破断エネルギー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、川原子凝灰岩（宮城県産）、荻野凝灰岩（福島県産）、江持溶結凝灰岩（福島県産）および荒川安山岩（福島県産）の4岩種である。

表1にこれらの岩石の力学的・物理的性質を示す。また、これら供試岩石を工費積算などで使われる岩区分⁶⁾で分類すると、川原子凝灰岩は軟岩、荻野凝灰岩は中硬岩、江持溶結凝灰岩および荒川安山岩は硬岩となる。

図1に本研究で用いた試験片の寸法・形状を示す。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。また、実験では、衝撃試験における試験片の破片の運動軌跡を撮影するため、試験片には図1に示すようなマークを付けた。

3. 試験装置ならびに方法

図2にシャルピー衝撃試験機の概要を示す。本研究で用いた試験機は、ハンマ質量が22.5 kg、ハンマ刃長が43 mm、ハンマ刃角度が30°およびハンマ回転軸中心からハンマ重心までの距離が0.698 mの鋼材用シャルピー試験機である。

シャルピー試験は、所定の角度に持ち上げたハンマを試験片に振り下ろし、瞬時に試験片を破断させて行われる。このとき、試験片の破断に要するエネルギー（以後、動的破断エネルギー

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 rocks.

Rocks	Ogino tuff	Emochi welded tuff	Kawarago tuff	Arakawa andesite
Density (g/cm ³)	1.69	2.26	1.17	2.68
Porosity (%)	29	15	47	4.5
P-wave velocity (km/s)	2.80	3.76	2.27	5.25
S-wave velocity (km/s)	1.63	2.02	1.39	3.31
Dynamic Young's Modulus (GPa)	11.2	23.9	6.2	68.7
Dynamic Poisson's ratio (-)	0.25	0.30	0.39	0.17
Uniaxial compressive strength (MPa)	63.05	101.66	23.78	210.57
Brazilian tensile strength (MPa)	3.51	3.95	1.74	11.03

(W) と呼ぶ) は、ハンマの持つ位置エネルギーの損失分として求められ、一般に次式で与えられる。

$$W = P \cdot d (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (1)$$

ここで、 P はハンマの質量、 d はハンマの重心と回転軸との距離、 α はハンマの持ち上げ角度、 β は試験片を破断させた後のハンマの振り上がり角度である。

ところで、岩石材料にシャルピー試験を適用した場合、岩石の衝撃破断エネルギーは鋼材のそれよりもはるかに小さいため、破断した破片はかなりの速度で飛散する。この現象を厳密に考えると、(1) 式から求まる動的破断エネルギーには、試験片の破断に要する純粋なエネルギー (以後、動的正味破断エネルギー (W'') と呼ぶ) の他に、破断した試験片を飛散させる運動エネルギー (以後、飛散エネルギー (W') と呼ぶ) も含まれるこ

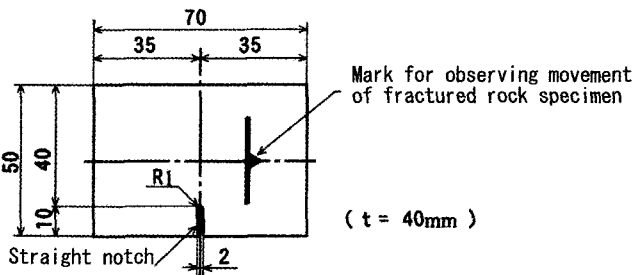
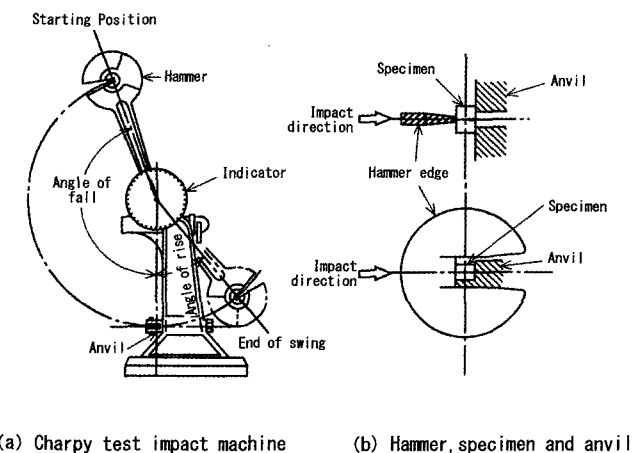


Figure 1 Size and shape of specimen.



(a) Charpy test impact machine (b) Hammer, specimen and anvil

Figure 2 Schematic diagram of Charpy impact test machine.

とになる。それゆえ、動的破断エネルギーから動的正味破断エネルギー W'' を求めるには、飛散エネルギー W' の測定方法を検討しておかなければならない。

いま、シャルピー試験における試験片の破断は2つに折断し、破片は並進および回転運動を伴って飛散すると仮定すると、このときの飛散エネルギー W' は次式のように表わされる。

$$W' = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2^2 + \frac{1}{2} I_1 \cdot \omega_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \cdot \omega_2^2 \quad (2)$$

ここで、 m_1 、 m_2 は破断した試験片のそれぞれの質量、 I_1 、 I_2 は破断した試験片の慣性モーメント、 v_1 、 v_2 は破断した試験片の移動速度、 ω_1 、 ω_2 は破断した試験片の回転角速度である。

また、2つに折断した破片はほぼ等分で、いずれも同じ運動で飛散すると仮定すると、飛散エネルギー W' は (3) 式のように表わすことができる。

$$W' = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} m \cdot v^2 + \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \right) \quad (3)$$

ここで、 m 、 v 、 I および ω は、それぞれ1つの破片の質量、移動速度、慣性モーメントおよび回転角速度である。

従って、定格の鋼材用シャルピー試験から求まる岩石の動的正味破断エネルギー W'' は、次式のようになる。

$$W'' = W - W' \quad (4)$$

なお、(1) 式によって求まる動的破断エネルギー W には、飛散エネルギー W' の他にハンマ系の摩擦損失も含まれるが、その値は秤量の1%程度であったため、本研究では無視することにした。

実験は、ハンマの持ち上げ角度を20、30、40、50、60、70、80、90° とした場合について行った。また、飛散エネルギーの算定は、ストロボ撮影した破片の運動軌跡を解析して行った。このときのストロボスコープの閃光周波数は15,000 rpm、閃光時間は0.8 μ s である。

4. 試験結果ならびに考察

図3は、岩石のシャルピー試験における衝撃エネルギーと単

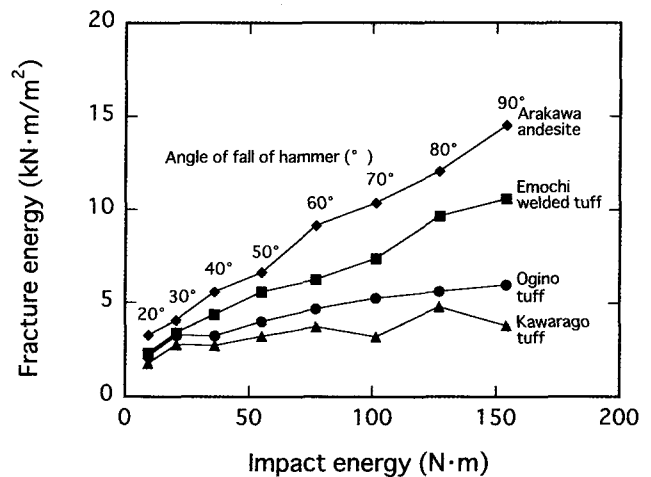


Figure 3 Relationship between impact energy and fracture energy per unit area.

位面積当たりの動的破断エネルギーの関係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、持ち上げたハンマーの位置と試験片を設置した位置の差から生じる位置エネルギーを指す。図より、飛散エネルギーを無視した場合の各岩石の動的破断エネルギーを見ると、動的破断エネルギーは衝撃エネルギー

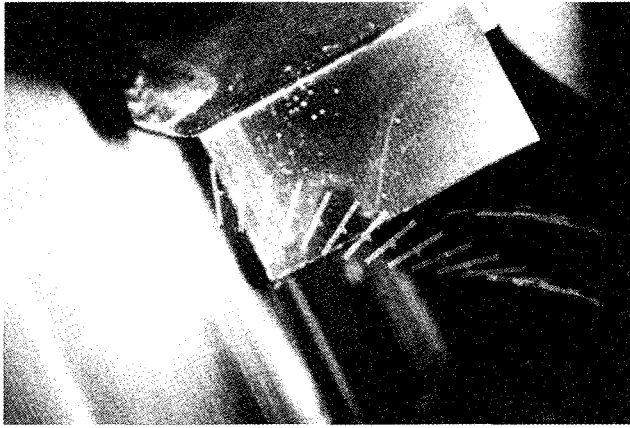


Photo 1 Movement of fractured rock specimen.
(flashlight frequency: 15,000 rpm, flashlight time: $0.8\mu\text{s}$)

の増加につれて上昇し、その増加の割合は強度の大きい岩石ほど、また、空隙率の小さい岩石ほど大きくなる傾向を示した。しかし、ここで示した動的破断エネルギーは、破断だけに要した動的正味破断エネルギーでないため、動的破断エネルギーに占める飛散エネルギーの割合を実測してみた。

写真1は、シャルピー試験における破片の飛散状況を示したものである。破断した試験片は、並進運動とともに回転運動を伴って飛散する様子が良く観察される。破片の並進ならびに回転運動エネルギーは、破片に付けたマークの軌跡を解析することにより求められた。

図4(a~d)は、各岩石の動的破断エネルギーに占める動的な正味破断エネルギー、並進エネルギーならびに回転運動エネルギーの割合を示したものである。図より、並進運動エネルギーを見ると、バラツキはあるが、動的破断エネルギーに占める並進運動エネルギーは比較的大きく、その値は衝撃エネルギーの増加につれて増大し、その後一定値に収束する傾向が認められた。これを岩種別に見ると、川原子凝灰岩では約17%、荻野凝灰岩では約29%、江持溶結凝灰岩では約34%、荒川安山岩では約33%となり、一般に強度の大きい岩石ほど動的破断エネルギーに占める並進運動エネルギーの割合が大きくなった。また、これを工費積算などで使われる岩区分⁷⁾で整理してみると、並進運動エネルギーは軟岩よりも中硬岩、中硬岩よりも硬岩と順次

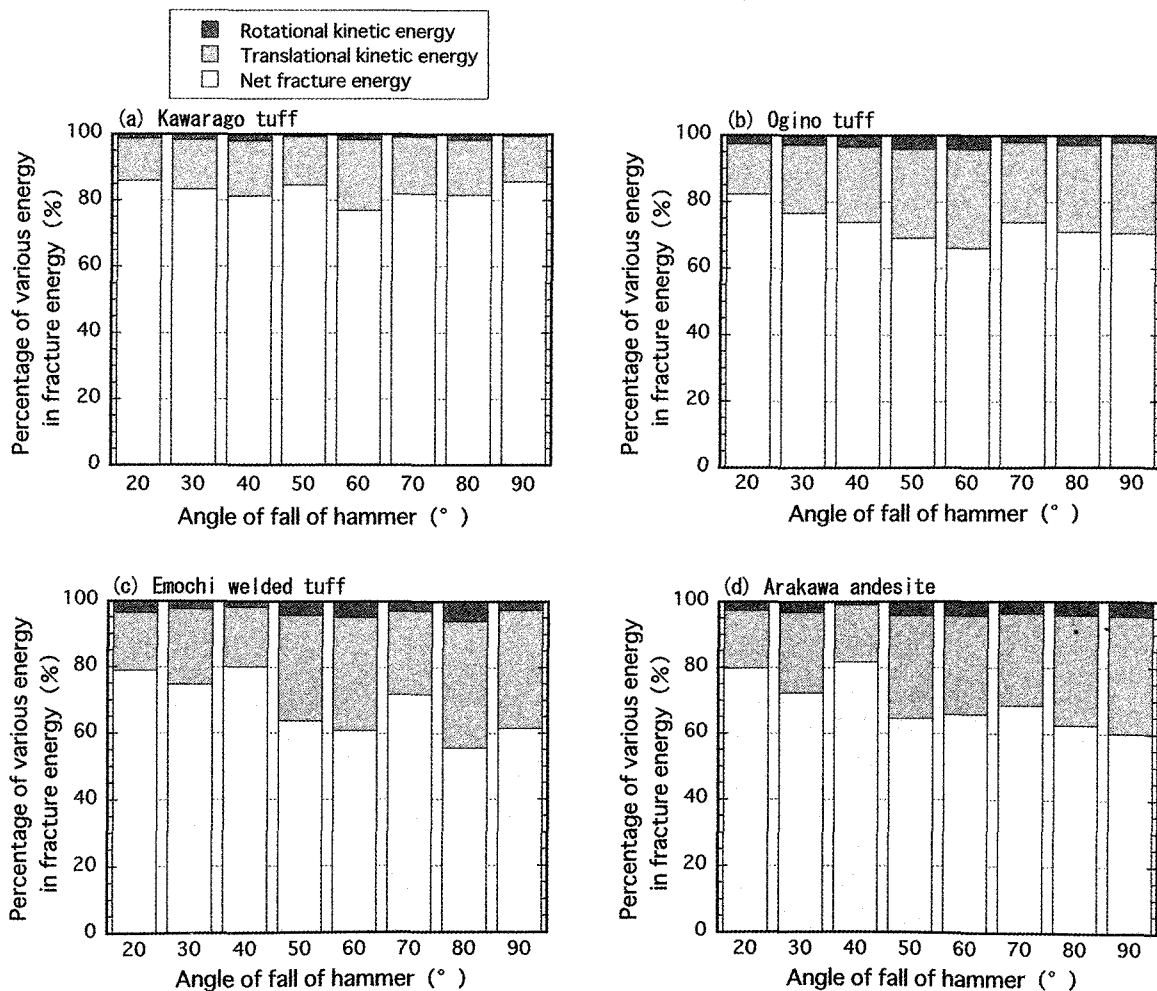


Figure 4 Percentage of net fracture energy, translational kinetic energy and rotational kinetic energy in fracture energy.

大きくなる傾向を示した。このことは、並進運動エネルギーを実測する煩雑さを考慮すると、鋼材用シャルピー試験機を用いたときの岩石の並進エネルギーは、軟岩類では10~20%、中硬岩類では20~30%、硬岩類では30~40%と見積もれば良いことが示唆された。

次に、動的破断エネルギーに占める回転運動エネルギーを見てみると、いずれの岩石も2~5%と小さく、写真上の読み取り誤差を勘案しても、岩石の動的正味破断エネルギーの算定においては、回転運動エネルギーは無視されるものと考えられる。なお、大久保らは⁹⁾(1982) 岩石のシャルピー試験において、飛散エネルギーに占める回転運動エネルギーと並進運動エネルギーはほぼ同等と述べている。この結果は筆者らの結果と異なるわけであるが、これには試験機のハンマ質量、試験片寸法、試験片支持台構造などが関係しているものと考えられる。すなわち、大久保らの結果は、岩石用に開発した比較的容量の小さいシャルピー試験機で行ったものであり、筆者らが用いた鋼材用シャルピー試験機と比べると、容量は約1/10、試験片断面は約1/7、さらに切り欠き部を持たない試験片を使っていることなどが大きく異なっている。

図5は、衝撃エネルギーと単位面積当たりの動的正味破断エネルギーの関係を示したものである。図より、各岩石の動的正味破断エネルギーを見ると、動的正味破断エネルギーは衝撃エネルギーの増加につれて上昇し、その増加の割合は荒川安山岩が最も大きく、以下、江持溶結凝灰岩、荻野凝灰岩、川原子凝灰岩の順となった。これらの岩種間に見られる差異は、図3で示した動的破断エネルギーの関係と同様であり、これには各岩石固有の衝撃荷重に対する破壊抵抗性が強く関与しているものと考えられる。なお、小林^{9),10)}(1969, 1970)は、ひずみ速度を変化させた岩石の高速荷重試験において、岩石の動的破壊エネルギーは、ひずみ速度に依存すると報告している。このことは、ひずみ速度の増加は衝撃問題への移行を意味するわけであるから、本研究で示された衝撃エネルギーの増加に対する動的正味破断エネルギーの上昇は、小林らの結果と同様なものと言える。

図6(a~c)は、各岩石の単位面積当たりの動的正味破断エネルギーと空隙率、一軸圧縮強度および圧裂引張強度の関係を示したものである。図を見ると、動的正味破断エネルギーは

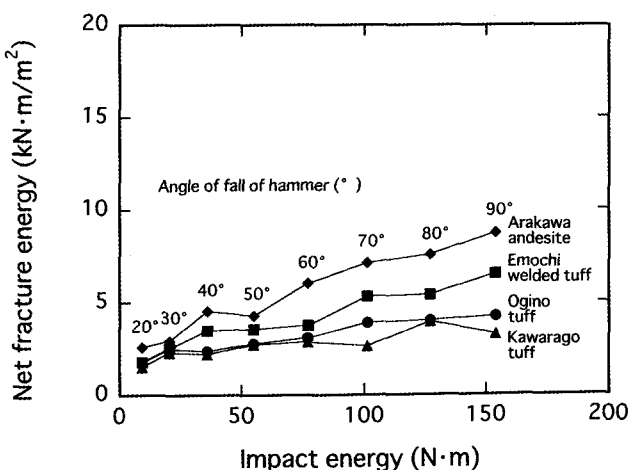


Figure 5 Relationship between impact energy and net fracture energy per unit area.

衝撃エネルギーに依存し、空隙率の小さい岩石ほど、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増加する傾向が認められた。このことは、空隙率の減少は有効破断面積を増加させ、加えて造岩粒子間の結合度を増大させるため、破断面を形成するエネルギーが大きくなったものと考えられる。

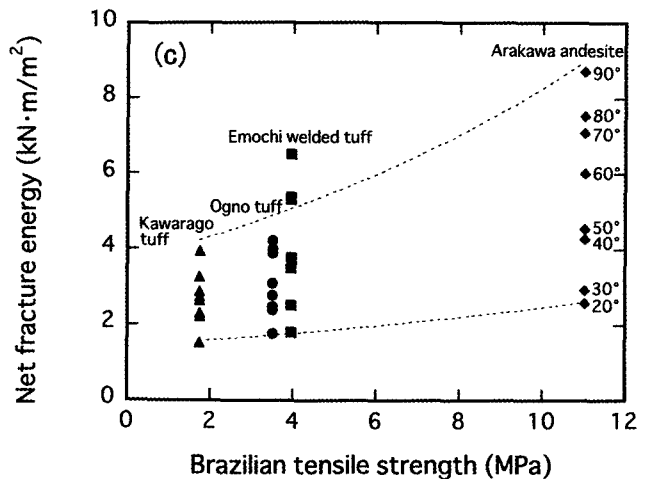
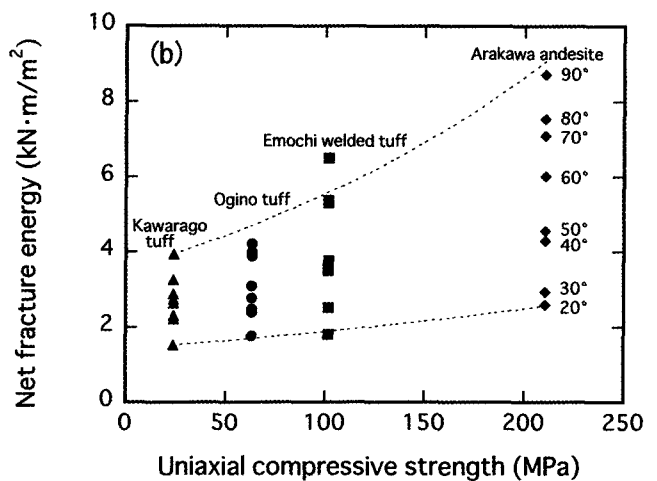
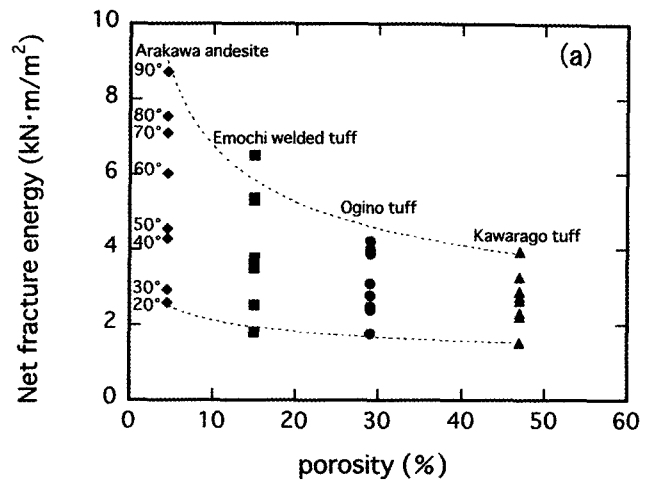


Figure 6 Relationship between net fracture energy per unit area and various properties. ((a)Porosity, (b)Uniaxial compressive strength and (c)Brazilian tensile strength)

5. まとめ

本研究では、発破掘削における岩盤の動的指標を検討するために、定格の鋼材用シャルピー試験機を用いて、岩石の動的破断エネルギーについて検討した。得られた結果を要約すると以下のようなになる。

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、無視し得ない並進運動エネルギーが含まれていた。それゆえ、岩石の動的正味破断エネルギーの算定においては、並進運動エネルギーを考慮することが必要であり、実験結果から並進運動エネルギーの値は、軟岩類では10~20%、中硬岩類では20~30%、硬岩類では30~40%となることが示唆された。また、岩石の破断に要する単位面積当たりの動的正味破断エネルギーは、空隙率が小さいほど、一軸圧縮強度および圧裂引張強度が大きいほど増加する傾向が認められた。

参考文献

- 1) ASTM Standard : D41-45, Drop shutter test for coal.
- 2) ASTM Standard : D409-15, Tumbler test for coal.
- 3) Protodyakonof, M.M.: Mechanical properties and drillability of rock, Rock Mechanics Pergan (1963) 103-118
- 4) 小林良二, 古住光正: 岩石のシャルピー試験, 日本鉱業会 昭和53年度春季大会講演要旨集 (1978) 299-300
- 5) 大久保誠介, 冲山亨, 西松裕一: 岩石のシャルピー試験, 日本鉱業会誌, 98巻, 1132号 (1982) 483-488
- 6) 日本応用地質学会: 応用地質特集号「岩盤分類」(1984) 127
- 7) 6) と同じ
- 8) 5) と同じ
- 9) 小林良二: 高速荷重下における岩石の力学的性質 (第1報), 日本鉱業会誌, 85巻, 979号 (1996) 911-916
- 10) 小林良二: 高速荷重下における岩石の力学的性質 (第2報), 日本鉱業会誌, 86巻, 989号 (1970) 525-528