

III-617

波動領域までの岩石の引張強度のひずみ速度依存性

資源環境技術総合研究所 瀬戸政宏、勝山邦久
和田有司
(株) カコー 昔 哲基

1. はじめに

岩石の破壊強度に荷重速度またはひずみ速度が影響を与えることはよく知られている。例えば、Brace(1968)等は $10^{-1}/s$ 以下のひずみ速度での三軸圧縮試験によって、ひずみ速度が1000倍速くなると強度が約10%増加することを見いだしている。また、Grady等(1977)は、衝撃荷重では速度の影響が著しく増大することを見だし、Schock等(1974)は花崗岩を用いて一軸圧縮試験と衝撃载荷との関係について研究を行っている。さらに、衝撃载荷との関連では、Brace等は衝撃速度の影響について考察を加えている。

このように、ひずみ速度の破壊強度に対する影響については、一軸または三軸圧縮試験によって検討が加えられてきている。しかし、非常に速いひずみ速度（荷重速度）までの研究は、まだ系統的には行われていない。さらに、発破、掘削等によって岩盤を開発する際に問題となる引張強度に関しては、ひずみ速度（荷重速度）の影響についてはほとんど研究されていない。

そこで、本研究においては、破壊までに要する時間が30時間程度のひずみ速度から数 μ 秒で破壊が発生する非常に速いひずみ速度の範囲における岩石の引張強度の変化、すなわち静的から波動領域、いわゆる動的な領域までの引張強度の変化について検討した。その結果、引張強度は静的な領域から波動領域まで一つの関係で結ばれていることが明らかになった。

2. 実験の概要

(1) 波動領域での引張強度試験

波動領域での動的な引張強度の測定は、ホプキンソン効果を利用した方法によって行った。この方法は、通常、ホプキンソン棒法と呼ばれている方法で、打撃棒の衝撃によって応力波を発生させる。本研究では、図1の装置図に示すように、精密雷管を衝撃荷重源として用いている点である。本試験で用いた岩石試料（来待砂岩）の形状は円柱形で、その寸法は、直径が20～30mm、長さが50～300mmのものである。

図1の実験装置図に示すように、雷管と岩石試料の間には厚さ3mmのステンレス製板を設置した。これは、雷管起爆の際に発生するガスによる力が岩石試料に作用しないようにし、衝撃波のみが岩石試料に作用するようにするためのものである。透過応力波によって発生する岩石の変位の計測は、レーザー振動計（ボリチック社製トッパラーレーザー振動計）を用いて行い、試料自由端から2mの距離からレーザー光を照射して自由端面の変位速度を計測した。

この振動計の計測可能周波数は0.5～500kHzで、最大計測変位速度は14m/sである。また、高速度ビデオカメラ（NAC社製HSV1000、撮影速度：最高100017/s）を用いて、破片の飛翔状態についての観測も併せて行った。この観測では、自由端から1cm間隔で試料に目印を付け、破片の飛散速度を検討した。

(2) 静的引張強度試験

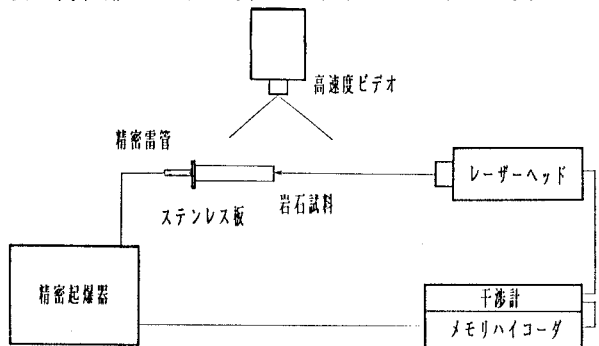


図1 動的破壊実験装置の概略図

静的な引張強度試験において使用した岩石は来待砂岩で、実験に際しては直径50mm、長さ約30mmの円柱形に整形した。引張強度は、整形した円柱形試料を用いて圧裂引張試験を行って求めた。本試験で用いた材料試験機は、MTS製810型材料試験機(最大容量:100t)で、試料への載荷は変位制御によって行った。

3. 実験結果と考察

(1) 波動領域での引張強度試験

雷管起爆の衝撃力によって試験片内には引張の応力波が発生し、試験片は衝撃的に破壊する。その時の自由端の最大変位速度 d_{max} 、破断した試験片長 δ 、弾性波速度 c 、波長 L 、試験片の密度 ρ 等を用いて、次式から波動領域での動的引張強度 S_d を求めることができる。なお、衝撃波形を三角波と仮定したときの波頭応力値を P とする。

$$\delta = L \cdot S_d / 2 \cdot P \quad (1)$$

$$P = \rho \cdot c \cdot V \quad (2)$$

ただし、

$$V = d_{max} / 2 \quad (3)$$

レーザー振動計によって計測された雷管起爆後における試験片自由端の変位速度の時間変化から必要とする値、最大変位速度、破断までの時間等を読み取って、上述した式から引張強度を計算した。

本方式によって求められた引張強度は、ひずみ速度条件でいえば 5.7×10^2 (/s)のときの値である。求められた引張強度の平均値は 56.4 kg/cm^2 (標準偏差: 9.16 kg/cm^2)である。

(2) 圧裂引張試験による引張強度

変位速度制御によって試験を行ったが、試験を実施した変位速度の範囲は $3.2 \times 10^{-1} \text{ (m/s)} \sim 4.0 \times 10^{-9} \text{ (m/s)}$ である。この変位速度の範囲で求めた引張強度を圧裂方向のひずみ速度との関係に整理し直し、波動領域において求められた動的な引張強度との関係と併せて示したのが図2である。ひずみ速度の増加に伴って、引張強度が増加していることが認められる。また、片対数グラフ上でみて、引張強度 S_t とひずみ速度 ϵv との関係が、静的な領域から波動領域まで(4)式で結ばれる。

$$S_t = 2.27 \log(\epsilon v) + 49.8 \quad (4)$$

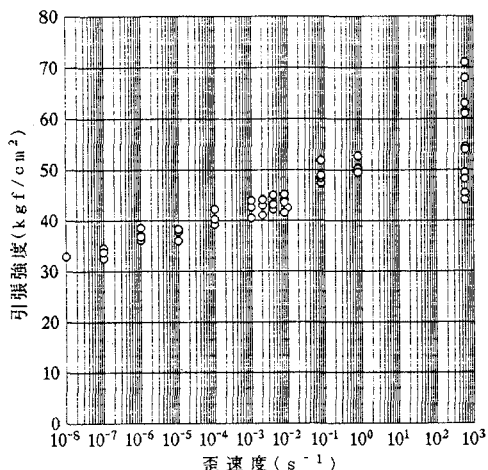


図2 動的引張強度と荷重速度との関係

4. まとめ

引張強度のひずみ速度依存性について、静的な領域から波動領域までの広い範囲で実験的に検討を加えた。その結果、引張強度とひずみ速度の関係は、静的な領域から波動領域までの範囲で一定の関係で結ばれており、動的な引張強度は、静的な引張強度とひずみ速度との関係の延長上にあることを明らかにした。また、波動領域での引張強度は、静的引張強度の代表値、例えば破壊時間約10分の条件(JISでの指定値)での引張強度の約1.6倍である。

参考文献

- 1) Brace et.al: Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 5, 415-426 (1968) 2) Grady et.al: J. Geophys. Res., 82, 1325-1333 (1977) 3) Schock et.al: J. Geophys. Res., 79, 1662-1666 (1974)