

(Ⅲ - 45) 内圧を受けた岩盤内の円孔の破壊特性

(株)青木建設 技術本部研究所 正会員 永井哲夫

孫 建生

〇池尻 健

1. はじめに

岩盤内に設けた円孔に高い内圧を載荷して孔壁に引張亀裂を発生・進展させる技術は、石油や天然ガスの採取、初期地圧の測定、さらには岩盤の静的破壊などに用いられ、その応用範囲は多岐にわたっている。この技術においては、孔壁が破壊するときの内圧（以下破壊圧と略す）を適切に評価することが必要となる。これまでの研究から、岩石試料の円孔に内圧を載荷すると、一般に破壊圧は岩石の一軸引張強度よりも大きくなり、その差異は岩種によって異なることが経験的に知られている¹⁾。しかし、このような現象を定量的に十分説明する方法が現状ではない。そこで本研究では、岩石の引張領域における応力-ひずみ関係の非線形性を考慮した有限要素解析により、その定量的評価が可能であることを示す。なお、ここでは孔壁に亀裂が生じた状態を破壊と呼ぶことにする。

2. 内圧を受けた岩盤内の円孔の破壊特性

いま、岩盤内の応力状態に関して、三主応力の一つの向きが孔軸と一致すると考え、岩盤を等方等質の弾性体としてモデル化すると、破壊圧 P_b と周辺岩盤内の主応力成分 (σ_1, σ_2) の間には次式が成り立つ。

$$P_b = 3\sigma_2 - \sigma_1 + T \quad (\sigma_1 > \sigma_2 \text{ と仮定}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここでは、圧縮応力を正とし、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ はすべて圧縮と仮定している。また、 T は P_b によって岩盤内に生じる接線方向の引張応力に対する孔壁の引張強度である。

式 (1) がもし岩石に対して成立するならば、 T は岩石の一軸引張強度 σ_T に等しくなるはずである。それに対して、水圧破壊に関する過去の室内実験の結果²⁾（その一部を図-1 および図-2 に示す）を整理して、両者の比較を行うと表-1 のようになる。この表より、 T は σ_T に比べてかなり大きい値をとることが分かる。このことは、岩盤内に設けた円孔に高い内圧を作用させた場合、その破壊時の特性を表現するのに線形弾性理論では十分でないことを示唆するものと思われる。

このような円孔の破壊特性について、佐藤ら³⁾ は、大理石、黒鉛および鋳鉄円筒を用いた実験的研究を行い、平均応力説とその適用限界における破壊条件により統一的な解釈を試みている。しかし、これは厚肉円筒を対象として導かれたものであり、岩盤内の円孔の問題に適用するには無理がある。一方、Lajitai⁴⁾ は、岩盤内の円孔を対象として、孔壁からある距離 (d) における接線方向応力が σ_T と等しくなると破壊が発生すると考え、応力勾配のあるぜい性体の破壊条件を求めている。ただし、 d を評価する十分な方法はないのが現状である。

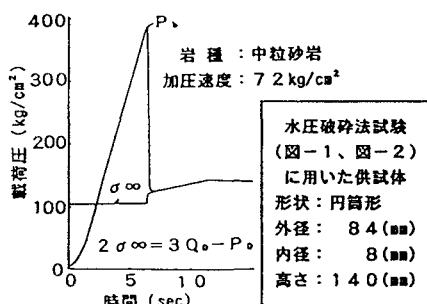


図-1 水圧破壊室内試験結果（その1）

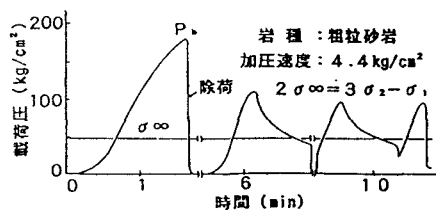


図-2 水圧破壊室内試験結果（その2）

表-1 岩種ごとの T と σ_T の比較

岩 種	T	σ_T	T/σ_T
粗粒砂岩	85	2.0	4.3
中粒砂岩 A	165	4.2	3.9
中粒砂岩 B	170	6.6	2.6
モルタル	106	3.6	2.9
焼き石膏	91	7.3	1.2

(単位: kg/cm^2)

3. 岩石の引張領域の破壊特性を考慮した有限要素解析

そこで本研究では、岩石の引張領域における応力-ひずみ関係の非線形性に着目してみた。いま、荻野凝灰岩、来待砂岩および江持安山岩を用いた一軸引張試験⁵⁾から得られた応力-ひずみ関係をまとめると図-3のようになる。この図より、各岩石試料の引張領域における応力-ひずみ曲線は非線形に単調増加すること、ひずみが単調に増加していく過程で破壊が突然生じていることなどが分かる。ただし、この試験は通常の岩石試験における常用速度の約100倍の速度で引張荷重を載荷しているため、非線形の度合いが静的な荷重状態におけるものより小さくなっていると考えられる。ここでは、このような岩石の引張領域の破壊特性を考慮した有限要素解析により、前章で示したような高い内圧を受けた岩盤内の円孔の破壊特性の解釈を試みる。解析においては、汎用FEMプログラム“SIGNAS”を改良し、引張領域の応力-ひずみ関係の非線形性を考慮できるようにした。そして、初期応力がゼロの状態の岩盤内円孔に内圧を載荷した問題に対して、二次元平面ひずみ状態の非線形弾性解析を実施した。なお、岩盤の力学特性に関するデータとしては図-3に示した3種類の岩石試料のものを用いている。

孔壁の引張強度 T は、孔壁に生じる接線方向のひずみが岩盤材料の破壊ひずみと等しくなった時点の壁面接線方向応力と等価であると考えて、解析結果をまとめると表-2のようになる。この表より、本研究で用いた方法によれば、前章で示したように T が σ_r より大きくなるという現象がある程度説明できることが分かる。また、応力-ひずみ関係の非線形の度合いが T/σ_r の大きさと関連していることも分かる。ここで、 T/σ_r が表-1のものに比べて小さいのは、解析に用いたデータが通常より大きい載荷速度条件下で得られたものであることと関係していると思われる。

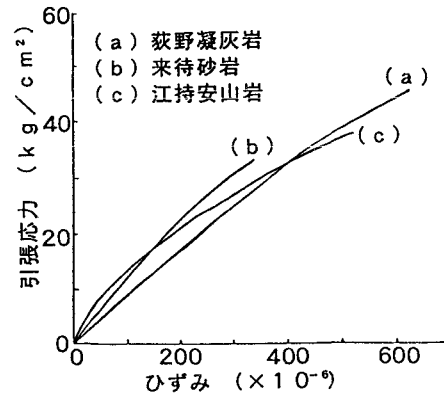


図-3 引張応力-ひずみ曲線

4. おわりに

本研究では、高い内圧を受けた岩盤内の円孔の破壊特性に関して、通常の線形弾性理論では十分に説明できない現象が、引張領域における応力-ひずみ関係の非線形性を考慮した有限要素解析によりある程度解釈できることを明らかにした。

今後の課題としては、円孔の内圧載荷実験および岩石の静的引張試験を実施し、その結果をもとにここで示したような解析を行い、本研究で示した考え方の妥当性を検証することが挙げられる。

表-2 有限要素解析結果

	T	σ_r	T/σ_r
荻野凝灰岩	56	44	1.3
来待砂岩	44	34	1.3
江持安山岩	66	38	1.7

(単位: kg/cm^2)

【参考文献】

- 1) 鈴木 光: 岩盤の計測と解析, 土木工学社, pp.214-216, 1982.
- 2) 石島洋二・木下重教・伊藤芳則・町田和美: 水圧破碎による地圧測定に関する実験的研究-250 kg/cm^2 までの静水圧条件下の水圧破碎-, 日本鉱業会誌, 96(1114), pp.871-877, 1980.
- 3) 佐藤和郎・茂村達也・永井文雄: ぜい性材料からなる円筒の内圧破壊に及ぼす延性の影響, 日本機械学会論文集(A編), Vol.45, No.391, pp.220-226, 1979.
- 4) E.Z.Lajitai: Int. J. Rock Mech. Sci., Vol.9, 1972.
- 5) 大竹照光・及川拓郎・杉本文男: 岩石の引張疲労特性に関する研究, 応用地質, Vol.32, No.2, pp.10-16, 1991.