

水資源開発公団 正会員 橋田一雄

正会員 青木美樹

中央開発(株)

吉田光二

1. はじめに

ロックフィルダムの安定にとり、最も重要な要素のひとつはロック材の強度であり、これを表す指標として一般には三軸圧縮試験による内部摩擦角 ϕ が用いられる。この ϕ に対しては供試体の形状寸法などの試験条件や応力条件とともにロック材自身の材料特性が影響する。ここでは材料特性のひとつであるロック材粒子の硬さに着目し、この硬さが ϕ にどのように影響するかを探ることを目的とした。硬さの評価には非整形の岩石片に点載荷することによりその引張り強度を得られる点載荷式圧裂引張り試験(ポイントロードPoint Load試験)を用いた。

2. ポイントロード試験

試験は図-1に示す装置を使い、岩石片を潰し、次式により引張り強度を算定する⁽¹⁾。

$$\sigma_p = 0.9 F_0 / d^2 \quad [1]$$

ここで、 σ_p : 引張り強度 (kgf/cm²)、 F_0 : 破壊荷重 (kgf)

d : 破壊時の載荷点間の距離 (cm)

試料は異なる岩種および岩級のもの3種を使い、同一種のものについては粒径範囲別に試験した。試料の比重は $G_b = 2.665 \sim 2.819$ 、吸水率は $0.77 \sim 1.24$ である。

図-2に各試料の引張り強度 σ_p の頻度分布を示す。分布は各試料ともRayleigh分布に近い。すなわち次式で表わされる確率密度関数 $p(\sigma_p)$ ($\bar{\sigma}_p$: 平均値)を持つ分布で近似できる。

$$p(\sigma_p) = \frac{\pi}{2} \frac{\sigma_p}{\bar{\sigma}_p^2} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{\sigma_p}{\bar{\sigma}_p} \right)^2 \right] \quad [2]$$

図にはこの近似曲線を合わせて記入した。分布形状(Rayleigh分布)についてはさらに多くの異なる岩種、岩級の試料による検証が必要であるが試験結果からみて大きな差はないものと考えられる。粒径範囲別(19.1~38.1、38.1~50.8、50.8~63.5mm)の強度分布では粒径が小さくなるほど平均値が大きく分布が広がる傾向が見られ、寸法効果が現れている。

以上のようにロック材の強度は岩種、岩級および粒径により変化するものであるがその分布形状をRayleigh分布により近似できるならば分布の差は平均強度 $\bar{\sigma}_p$ に依存することになり、岩種等による硬さの差はこの平均値に集約することができる。

3. 引張り強度 σ_p による強度定数の推定

ロック材の三軸圧縮試験において各拘束圧下で得られる、粘着力をゼロとしたときの内部摩擦角 ϕ 、あるいは剪断破壊時の主応力比(σ_1/σ_3)は試験時の粒子破砕と関係していることが知られている⁽²⁾。また、粒子破砕は材料個々の硬さに左右されるであろう。そこでポイントロード試験により得られた結果を基に破砕量および強度定数を推定してみる。

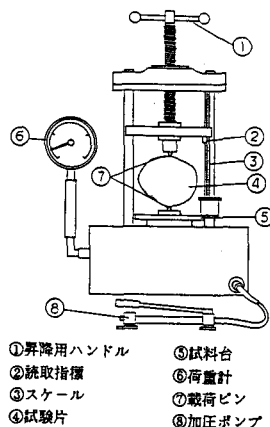
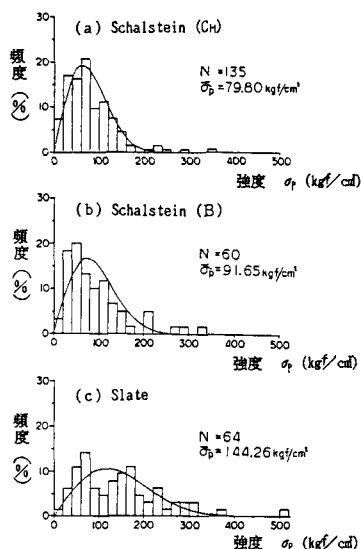
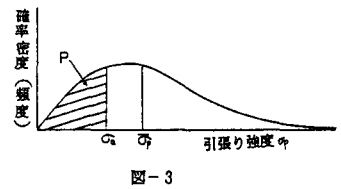


図-1 ポイントロード試験装置

図-2 ポイントロード試験による引張り強度分布
($d = 19.1 \sim 63.5 \text{ mm}$)

前述の結果よりロック材個々の引張り強度はRayleigh分布をとると仮定する(図-3)。このときある応力 σ が作用する場合にロック材試料が破壊する確率 P は[2]式より次のようになる。

$$P = \int_0^{\sigma} p(\sigma_p) d\sigma_p = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{\sigma}{\sigma_p}\right)^2\right] \quad [3]$$



この P を破壊確率と呼ぶことにする。前述の3試料について行った大型三軸圧縮試験のうち相対密度がほぼ等しい($D_r = 20 \sim 22\%$)試験ケースに対する破壊確率を計算した。作用応力 σ としては試験中粒子破壊に最も影響を与えと考えられる剪断時の軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)けをとった。算出した破壊確率 P と三軸圧縮試験前後の粒度分布比較によるMarsalの破壊率 B_M との関係を図-4に示す。軸差応力が小さい(低拘束圧)領域では P は B_M より小さく、応力の大きい領域では P のほうが大きく現れている。粒子に作用する応力の影響のみを考えるとすると低拘束圧下においては粒子には軸差応力以上の引張り応力が働かず、拘束圧が増加するにつれダイレイタンスなど粒子配列の変化による作用応力の低下が起きているとみることが出来る。しかしながら実際には粒子破壊に対しては粒度組成や粒子形状など粒子の硬さや詰まり具合以外の要因の影響も大きく、破壊率 B_M の測定誤差なども考慮しなければならない。

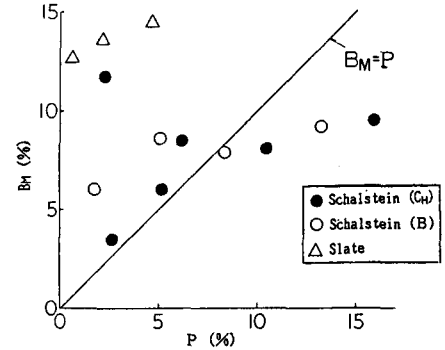


図-4 破壊確率 P と破壊率 B_M の関係

次に強度定数のひとつである ϕ と破壊確率 P との関係を見てみる。各試料の各拘束圧における P の計算値と ϕ の関係は図-5のようになる。 P の小さい(低拘束圧)領域でややばらつきが見られるが P の増加とともに ϕ はほぼ一率に減少しており、この傾向は岩種および岩級には依存していないように見える。 P のかわりに破壊率 B_M をとると非常にばらつきが大きく、本試験結果に関する限り ϕ と B_M の関係は得られなかった。 P はロック材個々の硬さのみから算定されるものであり、図-5はこの硬さと強度定数 ϕ との関係とみることが出来る。

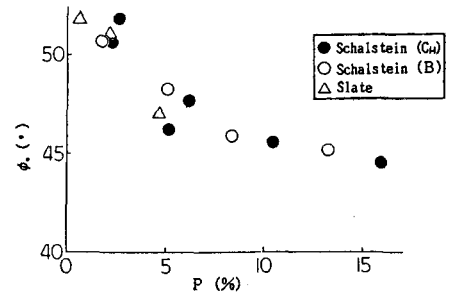


図-5 破壊確率 P と強度定数 ϕ の関係

したがって他の条件——たとえば相対密度や間隙比などが異なる場合には別々の関係が得られることが予想される。しかしながら本試験によると、このようなロック材の配列に起因する条件が一定であるならば岩種や岩級にかかわらずロック材個々の硬さとその分布は ϕ と密接に対応することがうかがえる。

4. おわりに

ロック材粒子の硬さに着目し、この硬さの分布および硬さと粒子破壊・強度定数との関係を試料、試験条件を限定して求めた。硬さ(引張り強度)の頻度分布はRayleigh分布を示し、岩種、岩級および粒径による差が見られた。また試料の詰まりかた(相対密度)がほぼ等しい場合には破壊確率という媒介を通じて粒子の硬さと ϕ との間に関係のあることがわかった。今後、異なる岩種・岩級について、さらに間隙比など粒子の詰まりかたの異なる場合について試験例をふやし、このような関係を求めることができれば簡便な現場試験で強度定数の概算値を推定することが可能となり非常に有効である。

参考文献

- (1) 平松他“非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験”, 日本鉱業会誌 Vol. 81 No 932
- (2) たとえば Marsal "Research on granular Materials", Institute of Engineering, National Autonomous Univ. of Mexico, 1977