

大型円筒供試体によるハイドロリック・フラクチャリング試験

独立行政法人土木研究所 正会員 ○佐藤弘行、山口嘉一、林直良、吉永寿幸

1. まえがき

フィルダムや堤防など、土などの地盤材料を用いて構造物を設計する際には、局所的な水みちの発生に起因する構造物の破壊に対する安全性を確保する必要がある。いわゆるハイドロリック・フラクチャリング（水圧破碎、以下、HF と呼ぶ）は、1976 年の Teton ダムの決壊事故以降注目を集め、HF に関する実験的・解析的な検討が様々に行われてきたが、HF のメカニズムや発生条件については未解明な部分が多い。また、HF に対する安全性を確保すべき構造物の中でも比較的大規模な構造物であるフィルダムの築堤材料を用いた実験による HF の検討は少ないのが現状である。近年、ロックフィルダムの建設においてコアゾーン幅の縮小が検討されることもあり、HF に関する研究を進める必要がある。

そこで本研究では、実際のロックフィルダムのコア材料を用いて、外径 30cm の大型円筒供試体を作製し、最大粒径 D_{max} と拘束圧 σ_3 が HF 試験結果に及ぼす影響の検討を行った。

2. 試験方法

試験に用いた材料は、ロックフィルダムのコア材料を、 $D_{max}=19\text{mm}$ でせん頭粒度に調整し、さらにその試料を $D_{max}=2\text{mm}$ にせん頭粒度調整したものである。それぞれの粒度分布を図 1 に示す。試験の手順は以下のとおりである。①内径 30cm、高さ 30cm のモールドの中心に、直径 1.5cm のロッドを設置する（写真 1）。②①のモールドに、締固め度 95%（1Ec）、最適含水比で締固めて供試体を作製する。締固め層厚は 3cm とした。③ロッドを引き抜いた後、中空部に透水性のよい豊浦砂を充填する。④HF 試験用に改良した大型三軸圧縮試験装置に供試体を設置する。この時、試験中に供試体端部からの漏水を防ぐために、トップキャップおよびペDESTAL に高さ約 1.5cm のウナギ止めを設置するとともに、トップキャップおよびペDESTAL と供試体の境界にはベントナイトを塗布した。⑤供試体を飽和させ、所定の σ_3 （98kN/m²、196kN/m²、392kN/m²）で 3t 法により圧密を行う。⑥豊浦砂を充填した注水孔より 9.8kN/m²/min の速度で注水圧を増加させる。⑦注水量が急増した時点で試験を終える。試験状況を写真 2 に示す。

3. 試験結果

写真 3、写真 4 に、 $D_{max}=2\text{mm}$ と 19mm の時に発生したクラックの状況の例をそれぞれ示す。外径 15cm の中型円筒供試体の試験¹⁾においては、試験後にクラックが確認できないケースもあったが、本研究ではいずれの試験条件においても、試験後の供試体の外側と内側には数本のクラックを確認することができた。 $D_{max}=2\text{mm}$ の時も 19mm の時も、供試体の外側、内側ともに鉛直方向に直線的なクラックが発生したが、 $D_{max}=19\text{mm}$ の時は供試体外側に発生したクラックの形状が複雑になるケースが多かった。

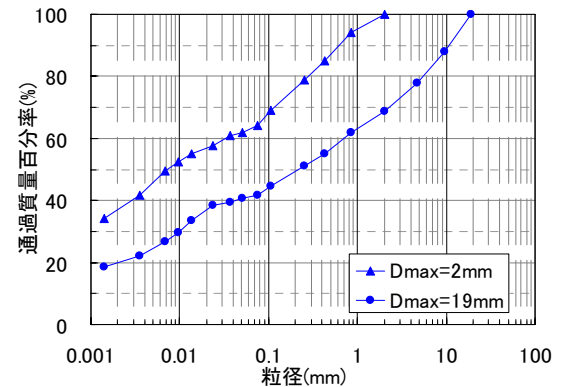


図 1 試料の粒度分布

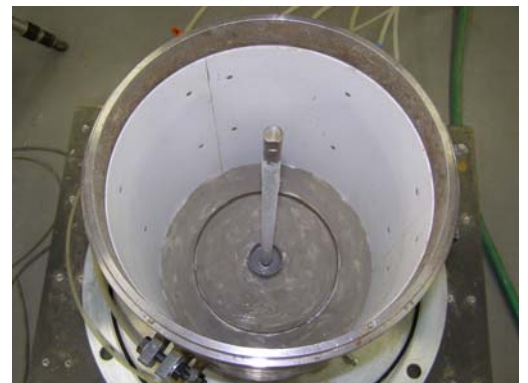


写真 1 供試体作製モールドとロッド



写真 2 試験状況

【キーワード】 フィルダム、コア材料、ハイドロリック・フラクチャリング

【連絡先】 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 Tel.0298-79-6781 Fax.0298-79-6737

図2に σ_3 と破砕圧 p_f の関係を示す。 p_f の定義は文献1)と同様、注水量の急増時の注水圧と定義した。図2を見ると、 p_f は σ_3 と弾性理論解の間に存在し、かつ σ_3 に比例的に増加し、中型円筒供試体の結果と同じ傾向である。一方、中型円筒供試体の結果とは異なり、大型円筒供試体による試験結果では、 D_{max} が小さい方が p_f は大きくなっている。また、大型供試体による p_f の方が、中型供試体による p_f よりも大きくなっている。

一般的に破砕圧 p_f は拘束圧 σ_3 と $p_f = m \times \sigma_3 + n$ という線形関係があると言われている²⁾。図2には、大型円筒供試体のHF試験結果の p_f から最小二乗法により求めた m と n の値を示し、あわせて中型円筒供試体における結果も示した。中型円筒供試体のHF試験では、 D_{max} に係わらず $m=1.17$ 程度となるが、大型円筒供試体のHF試験では、 $m(D_{max}=2mm)=1.72$ 、 $m(D_{max}=19mm)=1.29$ となっており、 m の D_{max} 依存性があることがわかる。一方、 $n(D_{max}=2mm)=-14$ 、 $n(D_{max}=19mm)=34$ と、 D_{max} により n の符号が異なっているが、これは試験数が少ないことによるばらつきが原因と考えられる。

本研究で用いたコア材料においては、礫分を含むように D_{max} を設定した時、外径15cmの中型円筒供試体HF試験において、HFによるクラックが明瞭でなかったケースもあり、本研究で用いた試料や試験条件でHFを発生させるためには、最低でも外径15cmの供試体サイズが必要と考えられる。

図2を見ると、供試体のサイズが小さいほど m が小さくなる傾向があるものの、 $D_{max}=2mm$ の試料でHFを発生させるための必要最小限の供試体サイズと考えられる外径15cmの中型円筒供試体によるHF試験では m は D_{max} に依存せず1.17程度となっている。このことから、今回試験に用いたコア材料では、HF発生時の m は最低でも1.17程度の値を有するものと考えられる。

4. まとめ

HF試験の p_f に及ぼす D_{max} と σ_3 の影響を検討するため、実際のロックフィルダムのコア材料を用いて大型円筒供試体によるHF試験を行った。いずれの試験ケースにおいてもHFが発生し、試験後の供試体に明瞭なクラックを確認することができた。 p_f は σ_3 と弾性理論解の間で発生した。大型円筒供試体による p_f の方が中型円筒供試体の p_f よりも大きくなり、大型円筒供試体による結果では $D_{max}=2mm$ の破砕圧の方が $D_{max}=19mm$ の破砕圧よりも大きくなる傾向があった。

参考文献 1) 山口嘉一、佐藤弘行、林直良、吉永寿幸：中型円筒供試体によるハイドロリック・フラクチャリング試験、土木学会第63回年次学術講演会、提出中。 2) 田頭秀和：既往研究例による水圧破砕圧と最小拘束圧との関係を表す線形近似式の比例定数および定数項の値について、地盤の浸透破壊のメカニズムと評価手法に関するシンポジウム、pp. 141～148、2002年11月。

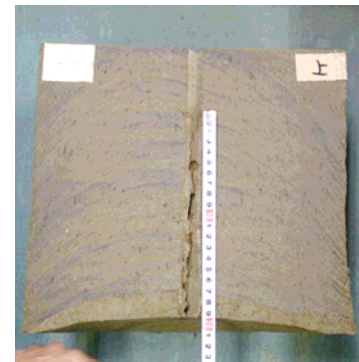
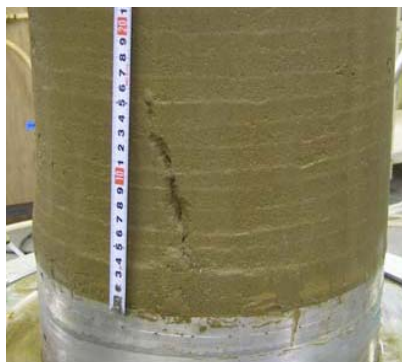


写真3 クラックの発生状況例 (左:外側、右:内側)
($D_{max}=2mm$ 、 $\sigma_3=196kN/m^2$)

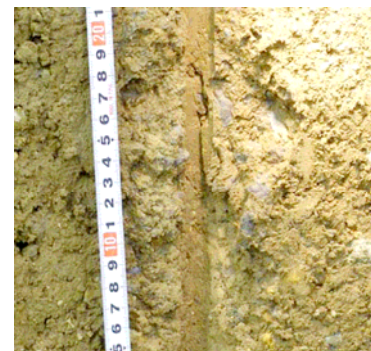


写真4 クラックの発生状況例 ($D_{max}=19mm$ 、左:外側、右:内側)
($D_{max}=19mm$ 、 $\sigma_3=392kN/m^2$)

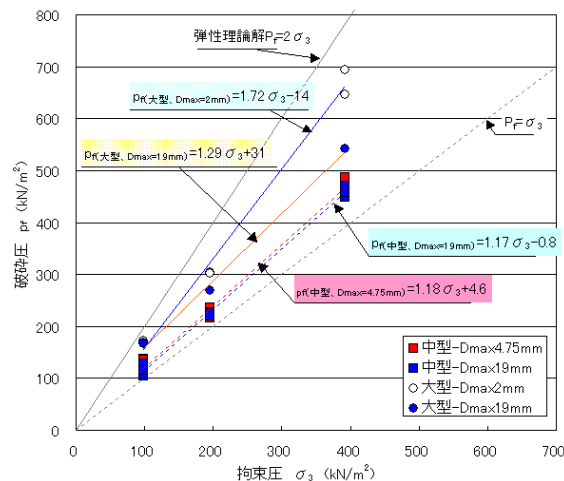


図2 σ_3 と p_f の関係
(中型円筒供試体の結果¹⁾も含む)