

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

独立行政法人土木研究所 正会員 ○山口嘉一、佐藤弘行、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(水压破碎、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 15cm の中型円筒供試体を作製し、供試体の拘束圧 σ_3 や最大粒径 D_{max} などの試験条件が 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たものと、さらにそれを 4.75mm にせん頭粒度に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 15cm、高さ 15cm のモールドの中心に円柱形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 w_{opt} 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 試験用に改良した中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(写真 2)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 (98、196、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所定の注水压増加速度 $\Delta p/\Delta t$ で注水压を増加させる。⑦注水量が急増した時点で試験を終える。 D_{max} 、注水口径 ϕ 、 Δp 、 σ_3 の影響を検討するため、試験ケースを表 1 のように設定した。いずれの試験ケースにおいても 3 供試体の試験を実施した。

3. 試験結果

写真 3 に HF 試験により供試体に発生したクラックの例を示す。 D_{max} が小さいほど、また ϕ が小さい(つまり浸透路長が長い)ほど、かつ σ_3 が大きいほどクラックは明瞭となる傾向にあったが、 $D_{max}=19\text{mm}$ かつ $\sigma_3=98\text{kN/m}^2$ のケースではクラックは確認できなかった。

図 2 に注水压と注水量の関係の例を示す。注水压の増加とともに注水量は増加するが、ある注水压で注水量が急増する注水压が存在する。本論文ではこの時の注水压を破碎圧 p_f と定義した。

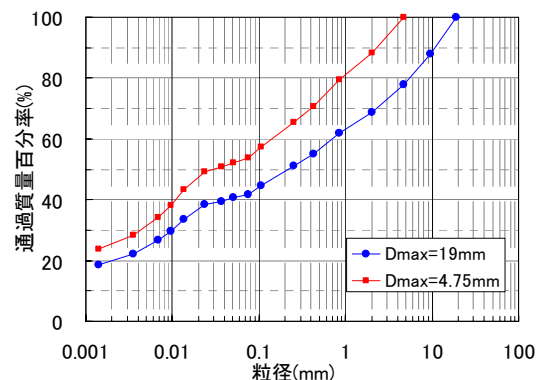


図 1 試料の粒度分布



写真 1 供試体作製モールドとロッドの例
(ロッドの直径が 5cm の場合)

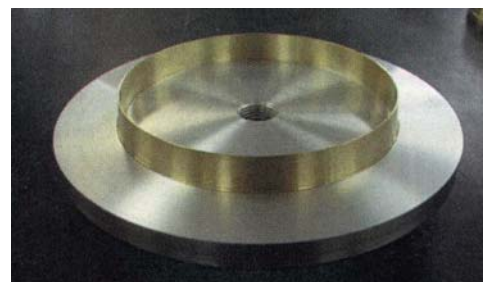


写真 2 ウナギ止め

表 1 試験ケース

最大粒径 D_{max} (mm)	注水口径 ϕ (cm)	含水比	注水压増加 速度 $\Delta p/\Delta t$ (kN/m ² /min)	拘束圧 σ_3 (kN/m ²)		
				98	196	392
4.75	1.5	w_{opt}	9.8	③	③	③
	3		9.8	③	③	③
	5		9.8	③	③	③
	1.5		196	③	③	③
	3		49	—	③	—
	3		98	—	③	—
	3		196	—	③	—
	5		196	③	③	③
19	1.5	w_{opt}	9.8	③	③	③
	5		9.8	③	③	③
	1.5		196	③	③	③
	5		196	③	③	③

※③は 3 供試体を意味する

【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

4. 試験パラメータが破碎圧に及ぼす影響

$D_{\max}$ の影響を検討するため、図 3 に $\Delta p/\Delta t=9.8\text{kN/m}^2/\text{min}$ 、 $\sigma_3=196\text{kN/m}^2$ の時の $D_{\max}$ と p_f の関係を示す。いずれの試験においても、 P_f は σ_3 を上回っているが、これは既往の研究事例と同様の傾向である¹⁾。図 3 を見ると、 $D_{\max}$ が大きいほど P_f は若干小さくなる傾向にはあるものの、本研究における $D_{\max}$ と供試体サイズにおいては、 $D_{\max}$ の影響は小さいと判断できる。

ϕ の影響を検討するため、図 4 に $\Delta p/\Delta t=9.8\text{kN/m}^2/\text{min}$ の時の ϕ と p_f の関係を示す。 ϕ が大きい (つまり浸透路長が短い) ほど、 p_f は小さくなる傾向にあり、また σ_3 が大きいほどその傾向は強くなっている。いずれの試験においても、 p_f は σ_3 を上回っている。

$\Delta p/\Delta t$ の影響を検討するため、図 5 に $D_{\max}=4.75\text{mm}$ 、 $\phi=3\text{cm}$ 、 $\sigma_3=196\text{kN/m}^2$ の時の $\Delta p/\Delta t$ と p_f の関係を示す。 $\Delta p/\Delta t$ が大きいほど、 p_f は大きくなる傾向にあり、 $\Delta p/\Delta t=196\text{kN/m}^2/\text{min}$ の時の p_f は $\Delta p/\Delta t=9.8\text{kN/m}^2/\text{min}$ の時の p_f よりも 50kN/m^2 程度大きくなっている。

σ_3 の影響を検討するため、図 6 に $\phi=1.5\text{cm}$ 、 $\Delta p/\Delta t=9.8\text{kN/m}^2/\text{min}$ の時の $\Delta \sigma_3$ と p_f の関係を示す。HF 試験においては、一般的に $p_f=m \times \sigma_3+n$ という線形関係があるとされている¹⁾。また、中空円筒形供試体 HF 試験においては、 $p_f=2\sigma_3$ という弾性理論解が存在する (引張強度をゼロとした場合)。図 6 を見ると、 p_f は σ_3 と弾性理論解の間に存在し、かつ拘束圧に比例的に増加している。図 6 には試験結果より最小二乗法より求めた m と n の値も示しているが、 $D_{\max}=4.75\text{mm}$ の時は $(m,n)=(1.18,4.6)$ 、 $D_{\max}=19\text{mm}$ の時は $(m,n)=(1.17,-0.8)$ となっており、本研究においては、 $D_{\max}$ による m と n の差は小さくなっている。

5. まとめ

HF の p_f に及ぼす $D_{\max}$ や σ_3 など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中型円筒供試体による HF 試験を行った。本研究の試験条件においては、 p_f は $D_{\max}$ の影響は小さいが、 ϕ 、 $\Delta p/\Delta t$ 、 σ_3 の影響が存在していた。 p_f は σ_3 と弾性理論解の間に存在し、 $p_f=m \times \sigma_3+n$ で表される拘束圧依存性を確認することができた。

参考文献

1) 田頭秀和：既往研究例による水圧破碎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。

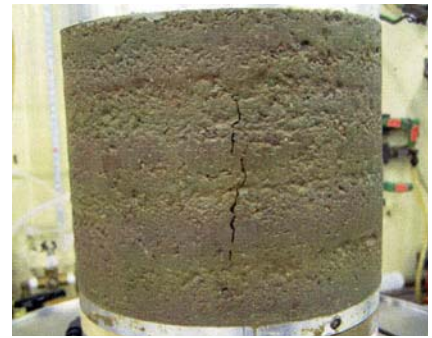


写真 3 発生したクラックの例

($D_{\max}=4.75\text{mm}$ 、 $\phi=1.5\text{cm}$ 、 $\sigma_3=392\text{kN/m}^2$ 、 $\Delta p=98\text{kN/m}^2/\text{min}$)

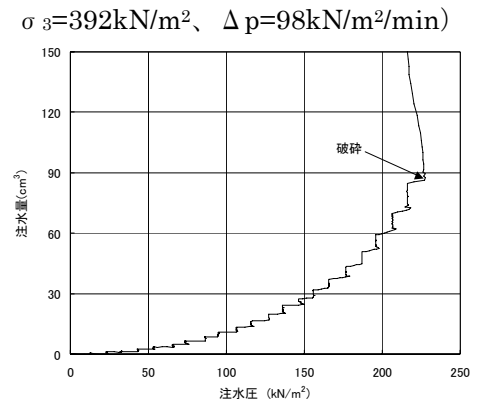


図 2 注水圧と注水量の関係の例

($D_{\max}=19.0\text{mm}$ 、 $\phi=1.5\text{cm}$ 、 $\sigma_3=196\text{kN/m}^2$ 、 $\Delta p=9.8\text{kN/m}^2/\text{min}$)

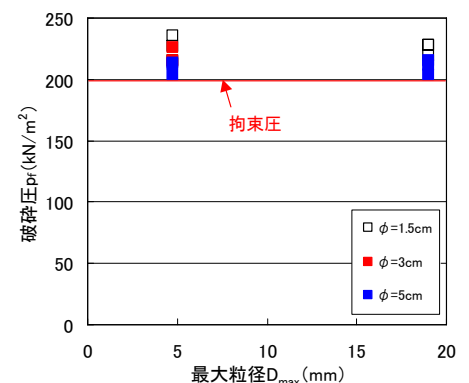


図 3 $D_{\max}$ の影響

($\Delta p=9.8\text{kN/m}^2/\text{min}$ 、 $\sigma_3=196\text{kN/m}^2$)

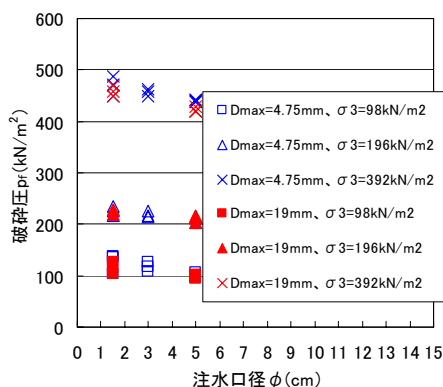


図 4 ϕ の影響

($\Delta p/\Delta t=9.8\text{kN/m}^2/\text{min}$)

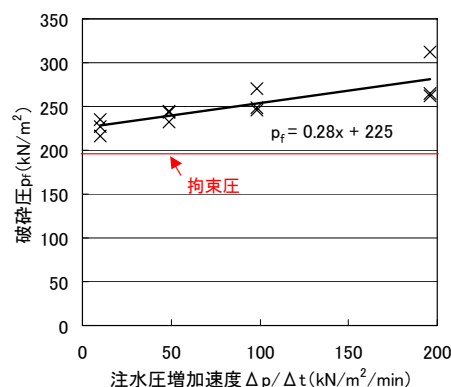


図 5 $\Delta p/\Delta t$ の影響

($D_{\max}=4.75\text{mm}$ 、 $\phi=3\text{cm}$ 、 $\sigma_3=196\text{kN/m}^2$)

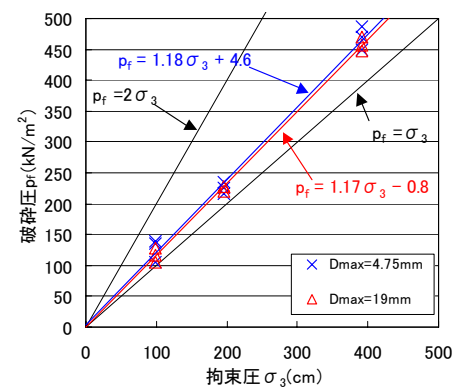


図 6 σ_3 の影響

($\phi=1.5\text{cm}$ 、 $\Delta p/\Delta t=9.8\text{kN/m}^2/\text{min}$)