

せん断変形を受けたフィルダムの進行性破壊対策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 17～平 19

担当チーム：ダム構造物チーム

研究担当者：山口嘉一、佐藤弘行、林 直良

【要旨】

1999年8月17日に発生したトルココジャエリ地震や同年9月21日に発生した台湾集集地震では、断層活動によって生じた地表面変状（断層変位）により、橋、ダム、トンネル、ライフラインなど多くの社会基盤施設に甚大な被害を受けた。我が国においても、断層変位に伴う被害軽減が重要な課題となっている。また、レベル2地震動に対してある程度の損傷を許容した耐震性能照査が提案されている。このような状況から、フィルダムについては、断層変位や大規模地震時のすべりによりせん断変形を受けたコアの進行性破壊対策に関する研究を進める必要がある。

ダムは貯水を目的とした構造物であるため、断層変位や大規模地震時のすべりによる一時的な被害にとどまらず、形成されたせん断層を通しての貯水による堤体侵食という二次的な被害についても考慮する必要がある。そこで、本研究では、フィルダムの遮水機能を受け持つコアにせん断層が形成された場合の浸透破壊抵抗性や仮にせん断層を通して集中的な浸透が発生しても、コアの細粒分が流亡せず、コアの損傷の進行防止が図れる適切なフィルタ（極限フィルタ）粒度条件についての実験的研究を実施した。

キーワード：せん断変形、断層変位、浸透破壊、コア、極限フィルタ

1. はじめに

1999年8月17日に発生したトルココジャエリ地震や同年9月21日に発生した台湾集集地震では、断層活動によって生じた地表面変状（断層変位）により、橋、ダム、トンネル、ライフラインなど多くの社会基盤施設に甚大な被害を受けた。我が国においても、断層変位に伴う被害軽減が重要な課題となっている¹⁾。また、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震において、多くの社会基盤施設に甚大な被害を受けたことから、各種施設についてレベル2地震動に対してある程度の損傷を許容した耐震性能照査が提案されている。ダムについても、2005年3月に国土交通省河川局治水課より「大規模地震に対するダムの耐震性能照査指針(案)」²⁾が通知され、現在国土交通省所管の実ダム等を対象とした試行を実施している。このような状況から、フィルダムについては、断層変位や大規模地震時のすべりによりせん断変形を受けたコア（遮水ゾーン）の進行性破壊対策に関する研究を進める必要がある³⁾。

ダムは貯水を目的とした構造物であるため、断層変位や大規模地震時のすべりによる一時的な被害にとどまらず、形成されたせん断層を通しての貯水の浸透による堤体、特にコアの侵食という二次的な被害につい

ても考慮する必要がある。そこで、フィルダムの遮水機能を受け持つコアにせん断層が形成された場合でも、一般的なフィルダムにおける水圧（動水）勾配条件下においてコアのせん断層沿いに浸透破壊が発生、進行するのかを検討する必要がある。また、浸透破壊が発生、進行することが予想される場合には、その部分を通して集中的な浸透が発生しても、コアの細粒分が流亡せず、コアの損傷の進行防止が図れる適切なフィルタ（極限フィルタ）の粒度条件について検討する必要がある。

本研究では、せん断変形を受けたフィルダムコアの進行性破壊に関する基礎的検討として、せん断変形を受けた締固めたコア材料の浸透破壊抵抗性を評価することを目的とし、せん断層をピンホールにて模擬した浸透破壊試験とコア材料に集中的な浸透が発生した場合でも有効に作用するフィルタの粒度条件を検討する極限フィルタの実験を行った。さらに、せん断変形を受けたコアの浸透破壊抵抗性評価における安全側の余裕度について検討するため、コアがせん断変形を受けた後、速やかに貯水位を低下させる対応をとることで、どの程度のせん断層の強度回復がなされるかについての実験的検討を行った。なお、河川管理施設等構造令

規則第 10 条⁴⁾によると、「フィルダムには、ダムの堤体の点検、修理等のため貯水池の水位を低下させることのできる放流設備を設けるものとする。」と規定されている。

2. せん断変形後のコアの浸透破壊抵抗性評価

2.1 試験方法および条件に関する検討

せん断変形を受けたロックフィルダムのコア材料の浸透破壊抵抗性を厳密に評価するためには、せん断変形をさせたコア材料を模擬した供試体を用いて浸透破壊試験を実施する必要がある。このためには、締め固めて作製した供試体を一面せん断試験機などによりせん断し、その後、その状態で引き続き、あるいはせん断変形させた供試体を周面の水密性が確保できる他の容器の中に入れて、浸透破壊（パイピング）試験を実施しなければならない。このような試験を実施するためには、かなり大がかりな試験装置が必要となるうえ、これまでこのような試験研究がほとんど行われていないため、試験方法についても基準が無く、かなりの試行錯誤が必要になるものと考えられる。

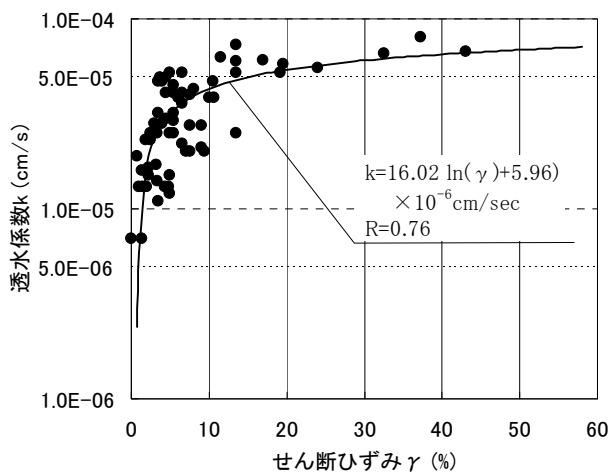
本研究の最終目的が、せん断変形を受けたロックフィルダムのコア材料の浸透破壊機構の解明ではなく、浸透破壊発生後の進行性破壊の防止対策についての研究であること、また、本研究が基礎的研究であることも考慮し、コア材料がせん断されて形成されたせん断層をピンホールにて模擬して、ピンホール内壁沿いの浸透破壊抵抗性について検討する試験を実施することとした。ただし、ピンホール径の設定にあたっては、ほとんどない既往の研究であるせん断変形後の粘性土

の遮水性に関する研究成果⁵⁾を考慮した。

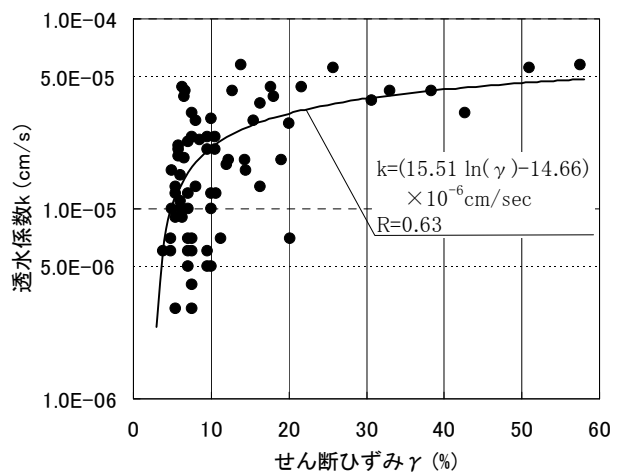
既往の研究⁵⁾では、基盤の不等沈下に伴うコア着岩部のせん断変形を初期的な原因とする遮水壁部の水理的破壊に関する実験的研究を行っている。実験では、着岩部が浸透流によって破壊する過程において透水性が増大するであろうことに着目し、せん断変形後の透水性を調査している。主たる成果は以下に示すとおりである。

まず予備実験として、せん断変形後の透水性に対する影響要因として、基盤条件（底板反力 P' ）、材料の細粒分（粒径 $74\mu\text{m}$ 以下の土粒子）含有率 P_F 、締め固め条件（締め固め度 ρ_d/ρ_{dmax} ； ρ_d は乾燥密度、 ρ_{dmax} は最大乾燥密度）、飽和度 S_r の 4 要因を選定した実験を行い、供試体全体の透水性は P_F および S_r に依存し、せん断変形後に透水性がかなり大きくなるという結果を得ている。

次に本実験では、供試体各部分の変位量および透水量を予備実験よりも詳細に計測することにより、せん断変形（せん断ひずみ）と透水性との関係について詳細に検討している。 $S_r=60\%$ で $P_F=40\%$ と $P_F=60\%$ の場合について、せん断ひずみ γ と透水係数 k との関係を図-2.1 に示す。この場合、せん断層の幅についての情報は無いが、透水係数は、せん断層を含む $150 \times 150\text{mm}$ の通水断面における平均的な値として求めている。この図によると、 k は γ の初期の増加に伴い対数的に大きくなり、 $\gamma=10\%$ 程度で初期の 10 倍程度になっているが、これ以上 γ が大きくなっても k はあまり変化していない。



a) $P_F=40\%$ 試料



b) $P_F=60\%$ 試料

図-2.1 せん断ひずみと透水性との関係 ($S_r=60\%$)⁵⁾

本研究で実施したピンホールを有する円柱形の供試体に対する浸透破壊試験の詳細については後述するが、供試体直径100mmに対してピンホール径を1、2、4mmとした場合の供試体の通水断面全体の平均透水係数は、ピンホールが無い供試体の透水係数の $10^3 \sim 10^4$ 倍となっている。よって、この値は既往の研究におけるせん断層部による透水性増加比率よりもはるかに大きく、本研究における径1、2、4mmのピンホールを有する供試体を用いた浸透破壊試験は、せん断変形を受けたコア材料の浸透破壊抵抗性を評価する試験としては、設計上十分安全側の試験となっていると考えられる。

2.2 試料

試験に用いた試料は、実際のロックフィルダムのコア材料であるA材料およびB材料の2種類とした。A材料は最大粒径 $D_{max}=19\text{mm}$ に粒度調整した風化千枚岩、B材料は $D_{max}=2$ および 19mm に粒度調整した泥岩、砂岩、火山礫凝灰岩互層と崖錐および降下堆積物の混合材料である。両材料の粒度分布および物理特性を図-2.2 および表-2.1 に示す。

また、A材料について締固め透水試験を行った結果、最適含水比 $w_{opt}=17.5\%$ で最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.758\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=18.8\%$ で最小透水係数 $k=4.7 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ を得ている。B材料について締固め試験を行った結果、 $D_{max}=2\text{mm}$ 試料においては $w_{opt}=28.0\%$ で $\rho_{dmax}=1.469\text{g/cm}^3$ 、 $D_{max}=19\text{mm}$ 試料においては $w_{opt}=27.9\%$ で $\rho_{dmax}=1.514\text{g/cm}^3$ を得た。なお、 $D_{max}=19\text{mm}$ 試料について、 w_{opt} で締固めて $0.95 \rho_{dmax}$ の乾燥密度で作製した供試体に対する透水試験を行った結果、透水係数 $k=2.11 \times 10^{-6}\text{cm/sec}$ を得た。図-2.3にA材料の締固め透水試験結果、図-2.4にB材料の締固め試験結果を示す。

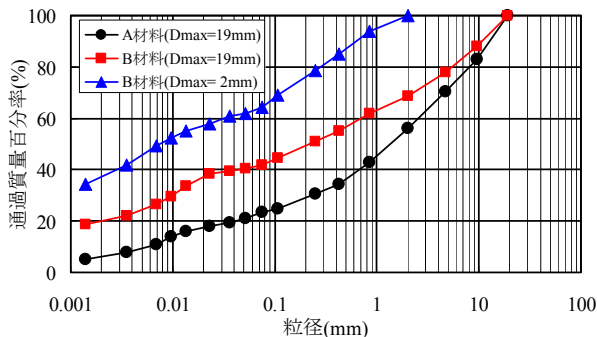


図-2.2 試料の粒度分布

表-2.1 試料の物理特性

材 料	A材料	B材料		
粒 度	最大粒径 D_{max} (mm)	19	19	2
	60%粒径 D_{60} (mm)	2.54	0.71	0.03
	50%粒径 D_{50} (mm)	1.34	0.22	0.01
	30%粒径 D_{30} (mm)	0.23	0.01	-
	10%粒径 D_{10} (mm)	0.0061	-	-
	均等係数 U_c	416	-	-
	曲率係数 U_c'	3.41	-	-
土粒子の密度 (g/cm^3)	2.775	2.756	2.743	
液性限界 LL(%)	41.7	64.5		
塑性限界 LL(%)	30.6	32.2		
塑性指数 PI	11.1	32.3		

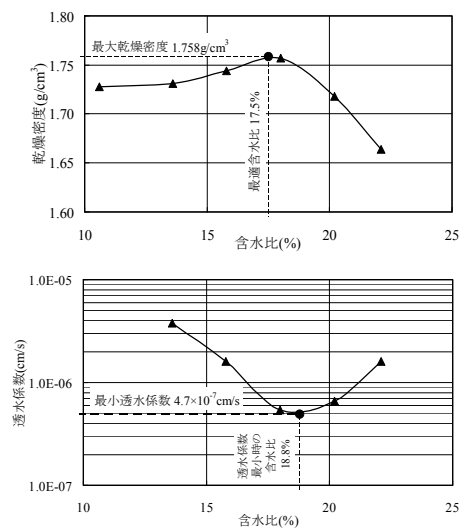


図-2.3 締固め透水試験結果 (A材料、 $D_{max}=19\text{mm}$)

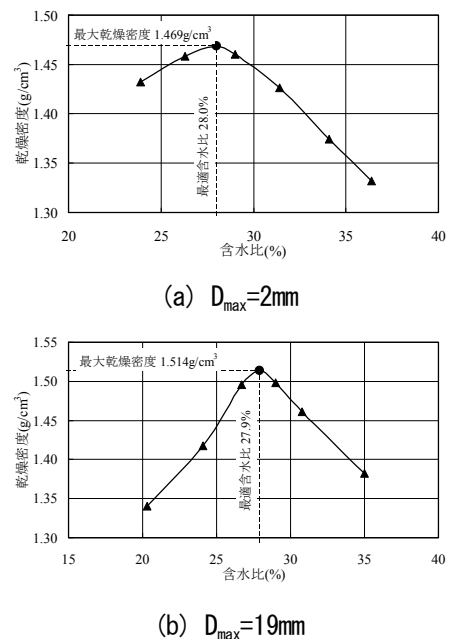


図-2.4 締固め試験結果 (B材料)

2.3 ピンホールを有する供試体に対する浸透破壊試験

2.3.1 試験方法

A 材料は、含水比を w_{opt} と $w_{opt}+3\%$ に調整した試料を内径 100mm、高さ 127mm の高さ方向に 3 分割可能なモールド（高さは上、中、下それぞれ 21、85、21mm）内で 1Ec のエネルギーで締め固めた。その後、締め固めた試料の上、下 21mm の高さの部分をカットして直径 100mm、高さ 85mm の供試体を作製した。ピンホールは締め固め終了後に、ピンホール径と同等の直径のニードルを挿入することにより作製した。

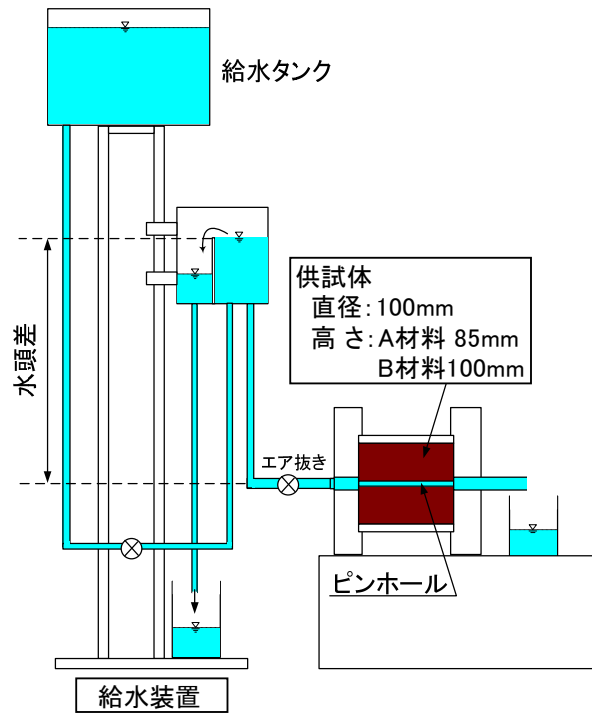
B 材料は、内径 100mm、高さ 100mm のモールド内に、含水比を w_{opt} に調整した試料を 1 層あたりの締め固め後の厚さが 16.7mm となるように 6 層に分けて投入し、1 層ごとに 1Ec 締め固めの ρ_{dmax} の 95% の乾燥密度となるように作製した。ピンホールは、あらかじめモールドの中央にピンホール径と同じ直径のニードルを固定し、試料の投入後にニードルが変形しないように注意しながら締め固め作業を行い、締め固め終了後に供試体からニードルを引き抜くことにより作製した。

ピンホール径は、両材料ともに 1、2、4mm の 3 種類とした。

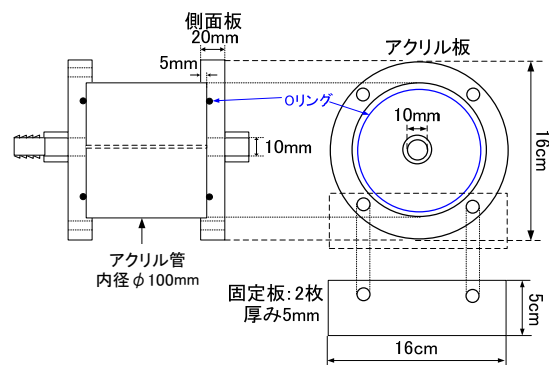
ピンホールを形成した供試体は、ピンホールが水平になるように一定圧給水装置に接続した。試験装置を図-2.5 に示す。試験は、動水勾配を 2 より開始し、30 分ごとに動水勾配を 2 ずつ上昇させ、動水勾配 30 まで連続して試験を実施する。流量は、一動水勾配の 30 分経過直前の 3 分間以内に 1~2 分程度の測定を行った。試験終了後には供試体をピンホールの長手方向に分割し、ピンホール周辺の状況を観察した。供試体本数は、含水比 (w_{opt}) とピンホール径 ($\phi=1, 2, 4\text{mm}$) の各組み合わせで 3 本とした。なお、試験で規定している動水勾配 i は、供試体の上下流水位差を供試体高さで除した値として定義している。

2.3.2 試験結果

A 材料の試験結果について、補正動水勾配 i' と流量 Q の関係を図-2.6 にまとめて示す。補正動水勾配とは、配管等における水頭損失を考慮して動水勾配 i を補正したものである。水頭損失はモールド内に供試体を設置していない状態における通水試験より求めた。通水試験では、供試体を設置している場合と同様に、各動水勾配における流量を測定した。



(a) 試験装置全体



(b) モールドの詳細

図-2.5 試験装置の概要

ピンホール径 $\phi=1\text{mm}$ の場合、両含水比とも流量のばらつきが大きく、かつ動水勾配の増加に伴う流量の上昇が見られない。試験終了後のピンホール周辺の観察では、何ら変状が認められなかったため、相対的に粗粒な粒子による目詰まりが原因と考えられる。 $\phi=2\text{mm}$ の場合、 w_{opt} については動水勾配の上昇に対し安定した流況となっており、動水勾配 $i=30$ でも破壊や目詰まりは発生しなかったが、 $w_{opt}+3\%$ については、動水勾配 $i=30$ になる前の 3 供試体平均の $i'=17.8$ で侵食破壊が発生している。また、 $\phi=4\text{mm}$ の場合も $\phi=2\text{mm}$ とほぼ同様の結果が得られているが破壊時の補正動水勾配は 3 供試体平均で

$i^*=11.9$ であった。 $\phi=2$ および 4mm のケースでは、試験条件が同じ 3 本の供試体での結果のばらつきが小さく、かつ $w_{\text{opt}}+3\%$ の破壊前のデータに限れば、同一ピンホール径の w_{opt} の場合とほぼ同じ i^*-Q 関係を示すことがわかる。

表-2.2 には、 $\phi=2$ および 4mm の破壊前の (i^* , Q) データの回帰係数 a , b ($Q=ai^{*b}$) と相関係数を示す。この表からは、ピンホール径が同じであれば係数 a , b の値に差がないことがわかる。また、ピンホール径によらず、 b の値は約 0.5 であり、ピンホール中の水流は乱流であることがわかる。表-2.2 の中には、 $w_{\text{opt}}+3\%$ 供試体が侵食破壊を開始する際の i^* と i^* およびその時点でピンホール径は全く侵食されていないとして計算した破壊開始時の流速も示している。この表より、ピンホール径ごとに侵食破壊開始時の $i^*(i^*)$ に大きな差がなく、ばらつきの小さい結果が得られていることがわかる。また、破壊開始時の流速は 3 供試体の平均で $\phi=2\text{mm}$ の場合約 280cm/s 、 $\phi=4\text{mm}$ の場合約 305cm/s とピンホール径による差はあまりなく、A 材料は、流速 300cm/s 程度の流速により侵食されたことがわかる。

B 材料の試験結果について、補正動水勾配 i^* と流量 Q の関係を図-2.7 にまとめて示す。なお、B 材料については、 w_{opt} の供試体のみの試験しか実施していないことに留意されたい。

$D_{\text{max}}=19\text{mm}$ 供試体において、ピンホール径 $\phi=1\text{mm}$ の場合、動水勾配の上昇に対し安定した流況となっており、破壊や目詰まりは発生しなかった。試験終了後のピンホール周辺の観察でも、何ら変状が認められなかった。 $\phi=2$ および 4mm の場合も $\phi=1\text{mm}$ の場合と同様の結果が得られており、 $\phi=4\text{mm}$ のケースでは試験条件が同じ 3 本の供試体の結果におけるばらつきが、極めて小さいことがわかる。

$D_{\text{max}}=2\text{mm}$ 供試体において、ピンホール径 $\phi=2\text{mm}$ の場合、 $D_{\text{max}}=19\text{mm}$ 供試体の $\phi=2\text{mm}$ の場合と同様の結果が得られており、3 本の供試体での結果のばらつきは、 $D_{\text{max}}=19\text{mm}$ 供試体のケースに比べてさら

表-2.2 A 材料試験結果一覧 ($\phi=2, 4\text{mm}$ の場合)

供試体条件	供試体番号	乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	破壊時の動水勾配		破壊時の流速 (cm/s)	$Q=a \cdot i^{*b}$ (破壊前)		
			i^*	i^*		a	b	相関係数
w_{opt}	①	1.760	-	-	-	2.375	0.480	0.997
	②	1.761	-	-	-	2.286	0.477	0.999
	③	1.763	-	-	-	2.391	0.498	0.996
	平均	1.761	-	-	-	2.351	0.485	0.997
$w_{\text{opt}}+3\%$	①	1.718	16.0	15.8	260.7	2.499	0.437	0.995
	②	1.720	18.0	17.8	293.5	2.271	0.484	0.999
	③	1.716	20.0	19.8	279.5	2.366	0.448	0.995
	平均	1.718	18.0	17.8	277.9	2.379	0.456	0.996
w_{opt}	①	1.762	-	-	-	9.968	0.523	1.000
	②	1.756	-	-	-	10.005	0.498	1.000
	③	1.758	-	-	-	10.859	0.469	0.999
	平均	1.759	-	-	-	10.277	0.497	1.000
$w_{\text{opt}}+3\%$	①	1.718	14.0	11.3	300.0	10.365	0.519	0.999
	②	1.721	14.0	11.5	289.1	10.487	0.497	0.999
	③	1.716	16.0	12.9	326.1	10.675	0.516	0.998
	平均	1.718	15.0	11.9	305.1	10.509	0.511	0.999

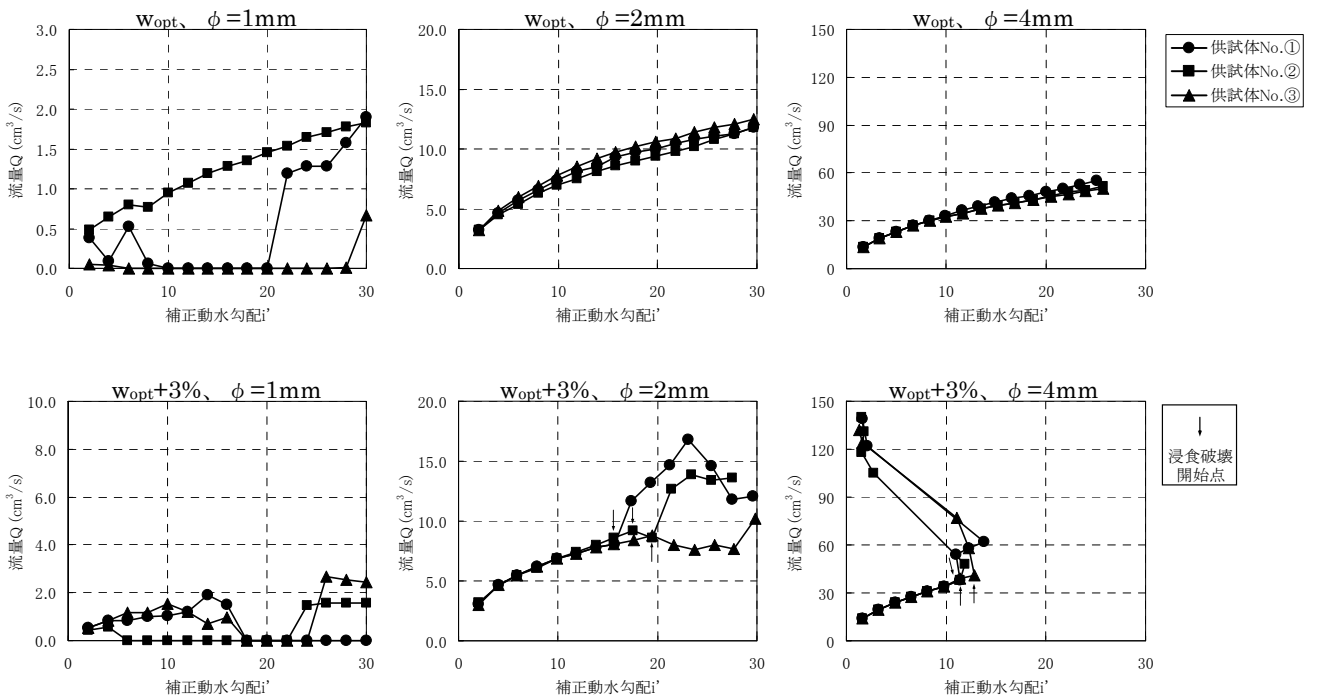


図-2.6 補正動水勾配と流量の関係 (A 材料、 $D_{\text{max}}=19\text{mm}$)

に小さいことがわかる。

表-2.3 には、 (i', Q) データの回帰係数 a, b ($Q=ai'^b$) と相関係数を示す。この表からはピンホール径が同じであれば最大粒径に関係なく、 a, b の値に差がないことがわかる。また、ピンホール径 $\phi=2, 4\text{mm}$ の場合、 b の値は $0.50\sim 0.56$ で、ピンホール内の水流はほぼ乱流であると考えられる。ピンホール径 $\phi=1\text{mm}$ の場合、 b の値は $0.63\sim 0.70$ で、ピンホール内の水流は完全に乱流ではない流況と考えられる。

2.4 浸透破壊抵抗性評価

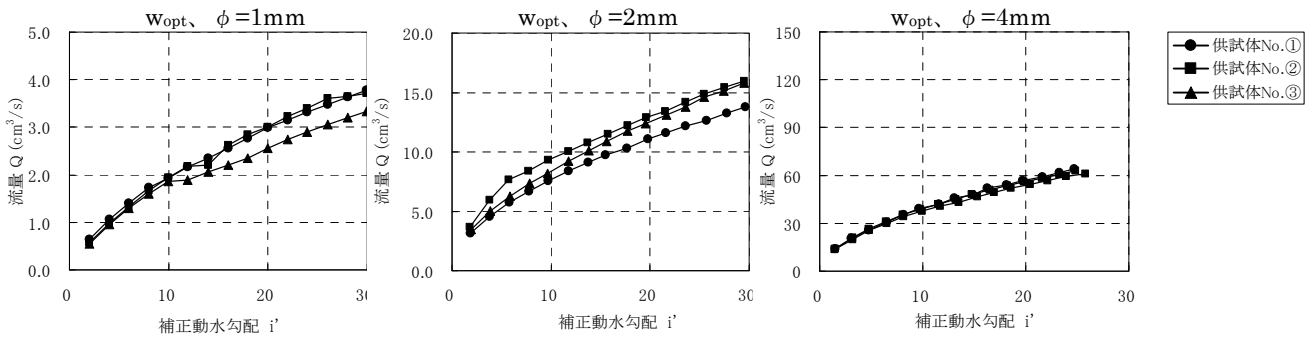
締固めたコア材料に形成されたせん断層をピンホールにより模擬して浸透破壊試験を実施した。その結果、コア材料の浸透破壊抵抗性について以下の知見を得た。

- ① A 材料に対する試験結果から w_{opt} の供試体のほうが $w_{opt}+3\%$ に比べて、浸透破壊抵抗性が大きい。これは同材料を用いて実施した段階圧および一定圧パイピング試験より得られた、ピンホールの無い供試体の限界動水勾配を考慮した浸透破壊抵抗性の大小関係に一致する^{6), 7)}。
- ② 最大動水勾配 $i=30$ という条件下で浸透破壊が発生したのは、A 材料の $w_{opt}+3\%$ の供試体のみで、破壊時の補正動水勾配はピンホール径 ϕ

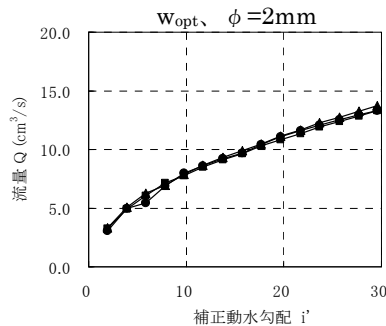
$=2\text{mm}$ で 18 程度、 $\phi=4\text{mm}$ で 12 程度であった。我が国のロックフィルダムのコア部における上下流方向の動水勾配は平均的に 2 程度であること、ピンホール径 $1\sim 4\text{mm}$ の透水性は、せん断変形による透水性増加を十分考慮できるものであることから、実際のフィルダムのコアは、ある程度大きいせん断変形を受けた場合でもその後の浸透により直ちに壊滅的な破壊には至らないと考えられる。

表-2.3 B 材料試験結果一覧

供試体条件		供試体番号	$Q=ai'^b$		
最大粒径	孔径		a	b	相関係数
$D_{max}=19\text{mm}$	$\phi=1\text{mm}$	①	0.433	0.643	0.998
		②	0.375	0.694	0.995
		③	0.393	0.633	0.990
		平均	0.400	0.657	0.994
	$\phi=2\text{mm}$	①	2.243	0.535	1.000
		②	2.948	0.500	0.993
		③	2.369	0.557	0.999
		平均	2.520	0.530	0.997
	$\phi=4\text{mm}$	①	11.146	0.546	0.999
		②	11.062	0.529	0.999
		③	11.360	0.535	1.000
		平均	11.189	0.536	0.999
$D_{max}=2\text{mm}$	$\phi=2\text{mm}$	①	2.262	0.531	0.994
		②	2.452	0.501	0.998
		③	2.463	0.508	0.998
		平均	2.392	0.513	0.996



(a) $D_{max}=19\text{mm}$



(b) $D_{max}=2\text{mm}$

図-2.7 補正動水勾配と流量の関係 (B 材料)

3. コアのせん断破壊後の貯水位低下による強度回復の評価

3.1 試験方法および条件に関する検討

前述のように、貯水した状況下で一度せん断や引張などの損傷を受けたことにより発生したコア内の亀裂が、その後の貯水位低下後の時間経過によりどのように強度を回復するのかを検討することは、フィルダムの進行性破壊に対する安全性を評価するうえで重要となる。

そこで、せん断あるいは引張により一度水压破碎したコア材料について、貯水位低下後の圧密によりどの程度水压破碎抵抗性が回復するかを検討するため、一度水压破碎させた供試体を再圧密して亀裂を再付着させた後、再び水压破碎試験を行う再開試験を行った。

3.2 試料

本試験の試料に、前章のピンホールを有する供試体に対する浸透破壊試験で使用した $D_{max}=2\text{mm}$ の B 材料を使用した。試料の物理特性等は、「2.2 試料」を参照されたい。

3.3 水压破碎における再開試験

3.3.1 試験方法

実験装置の概要を図-3.1 に、供試体の寸法を図-3.2 に示す。試験の手順は以下のとおりである。

- ① 写真-3.1 のように、内径 30cm、高さ 30cm の 3 つ割りモールド内で w_{opt} の試料を 1Ec での締固め度 D 値=95%締固めて供試体を作製する。締固め層数は 15 層 (1 層あたり 2cm) とした。なお、図-3.3 のように、供試体とペDESTAL およびトップキャップとの境界からの漏水を防ぐため、うなぎ止めを設置するとともにベントナイトを境界部に塗布した。また、注水孔には通水性を確保したうえで孔壁を保護するため砂を詰めることとしたが、破碎後の亀裂に砂が入り込まないように注水孔に通水性のよい合成繊維の袋を入れてから砂を詰めた。
- ② 写真-3.2 のように、大型三軸圧縮試験装置を改良した装置に供試体を設置し、飽和させた後、所定の圧密応力で圧密を行う。圧密時間は 3t 法により決定した。
- ③ 注水孔の水圧を 10kPa/min で徐々に増加させ、供試体を水压破碎させる。
- ④ 注水圧をゼロに戻し、ゴムスリーブ内に排水された水を排水させる。
- ⑤ ②と同じ圧密応力でなるべく長時間再圧密さ

せるため約 2 日間供試体を再圧密させる。

- ⑥ 注水孔の水圧を 10kPa/min で徐々に増加させ、供試体を再び水压破碎させ再開口させる。

なお、圧密応力は 100kPa と 400kPa の 2 ケースとした。

3.3.2 試験結果

図-3.4 に圧密応力 100kPa の時の圧密曲線、図-3.5 に圧密応力 400kPa の時の圧密曲線を示す。なお、1 度目の水压破碎によりメンブレン内に若干水が残り、再圧密時の圧密量にはその水の排水量も加味されてしまうため、再圧密時の圧密曲線は厳密な圧密量の測定にはなっていない。図-3.4 の圧密応力 100kPa の時の圧密曲線を見ると、再圧密時の圧密量は、初期圧密量の約半分程度となっている。また、図-3.5 の圧密応力 400kPa の時の圧密曲線を見ると、再圧密時の圧密量は、初期圧密量の約 1/8 程度となっている。図-3.4 と図-3.5 を比較すると、圧密応力 400kPa の時の初期圧密量は圧密応力 100kPa の時の初期圧密量の 3 倍程度、再圧密量はほぼ同じ程度となっている。

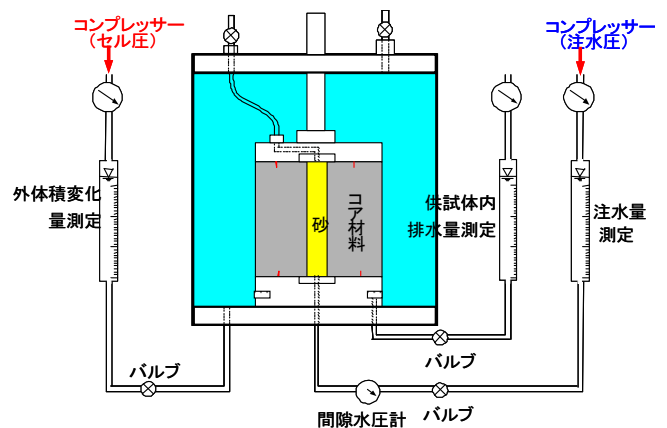


図-3.1 実験装置の概要

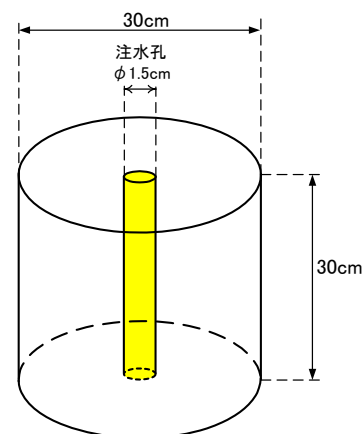


図-3.2 供試体寸法



写真-3.1 供試体作製状況

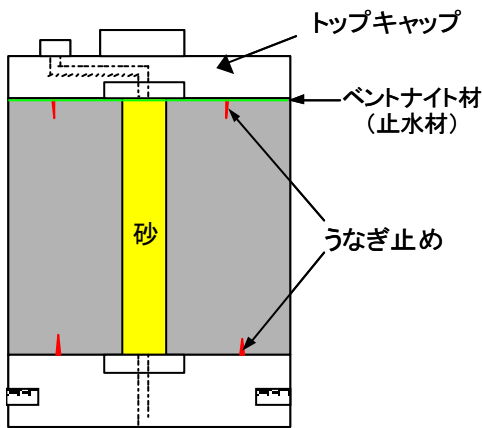


図-3.3 供試体の設置状況

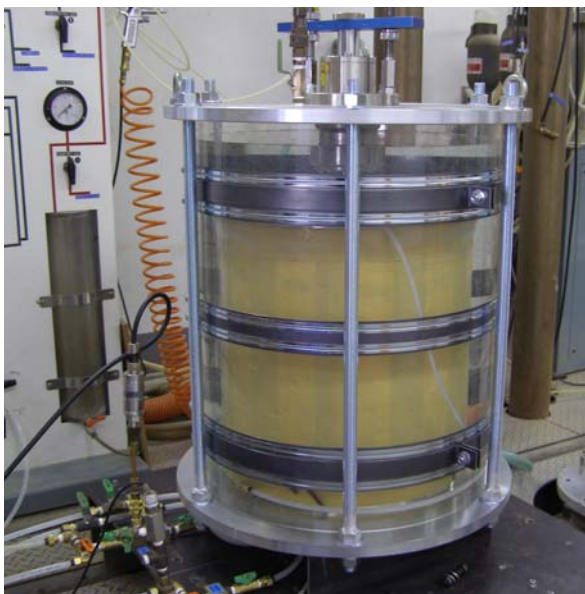


写真-3.2 大型水圧破碎試験装置の状況

図-3.6 に圧密応力 100kPa の時の注水圧と注水量の関係、図-3.7 に圧密応力 400kPa の時の注水圧と注水量の関係を示す。また、表-3.1 に、初期破碎圧と再開口圧の値を示す。いずれの圧密応力においても、初期破碎圧および再開口圧は拘束圧よりも大きく、かつ、再開口圧は初期破碎圧よりも小さくなった。なお、破碎までの同一の注水圧時の注水量を比較すると、再開口試験時の注水量が初期破碎試験時の注水量よりも若干少なくなっている。これは、再圧密により圧密量が増えたため供試体が若干密になり浸透水量が少なくなったことによるものと考えられる。

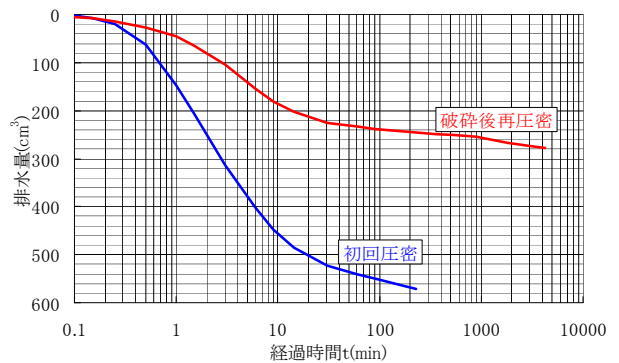


図-3.4 水圧破碎試験前と再圧密時の圧密曲線 (圧密応力 100kPa の場合)

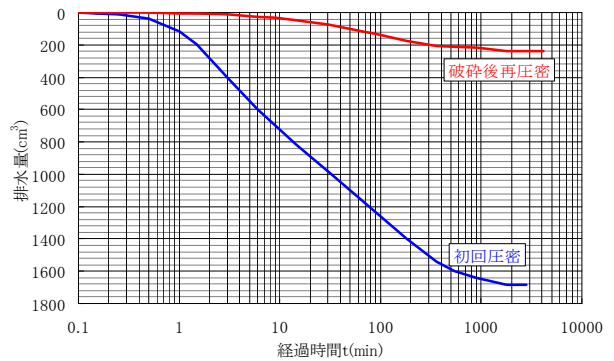


図-3.5 水圧破碎試験前と再圧密時の圧密曲線 (圧密応力 400kPa の場合)

写真-3.3 に圧密応力 100kPa の時の再開口試験後に観察された供試体外側に存在した亀裂、写真-3.4 に再開口試験後に供試体を解体して観察された注水孔に存在した亀裂を示す。筆者ら（土木研究所）が他に実施した大型供試体による水圧破碎試験においては、亀裂は約 180 度の方向に 2 本観察されるケースが多かったが、今回の再開口試験においては供試体に観察された亀裂はいずれの圧密応力においても

1本のみであった。これは、亀裂が1本しか発生しなかったのか、あるいは再圧密により他の亀裂が再附着して観察できなかったのか、さらに亀裂が小さいため供試体解体時に観察することができなかったのか、原因は不明である。

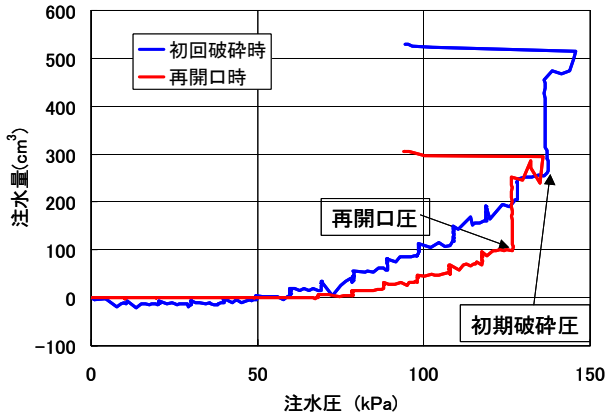


図-3.6 初回水圧破碎試験と再開口試験の注水圧と注水量の関係（圧密応力 100kPa の場合）

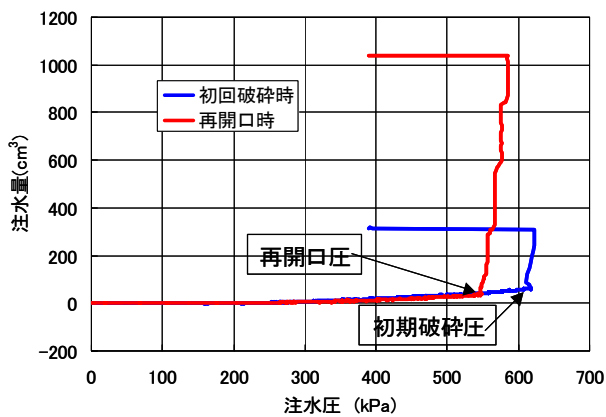


図-3.7 初回水圧破碎試験と再開口試験の注水圧と注水量の関係（圧密応力 400kPa の場合）

表-3.1 圧密応力、初期破碎圧と再開口圧
(単位: kPa)

圧密応力	初期破碎圧	再開口圧
100	137	126
400	614	546

また、観察された亀裂はいずれのケースにおいても縦の亀裂であり、これはこれまで実施された他の水圧破碎試験と同様の結果となった⁸⁾。写真-3.5に、発生した亀裂沿いに供試体を分断した時の様子を示す。写真-3.5において、赤い線内の領域が、水圧破碎により通水した領域と考えられる範囲であ



写真-3.3 供試体外側に発生した亀裂
(圧密応力 100kPa の場合)
(スケールの3の数字の上に縦筋状のもの)

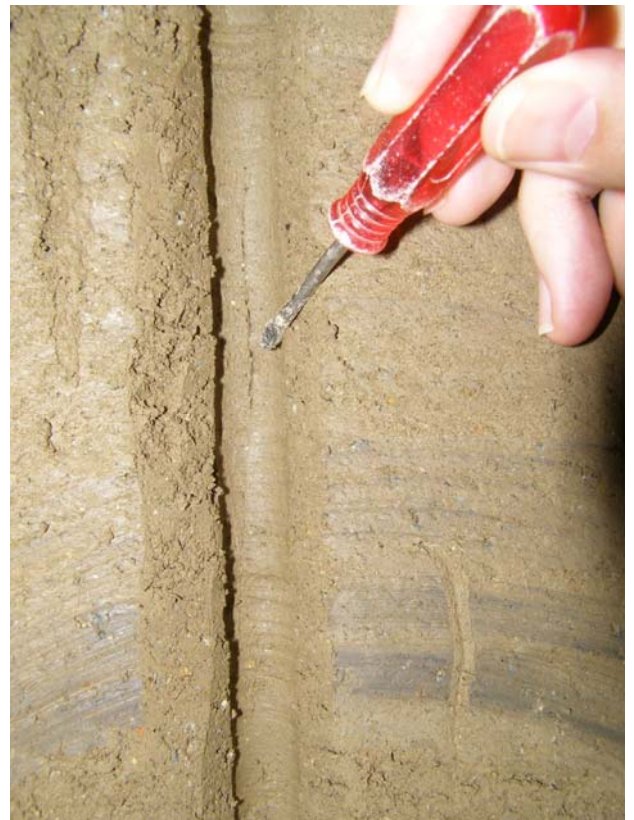


写真-3.4 注水孔に発生した亀裂
(圧密応力 100kPa の場合)
(ドライバの先端にある縦筋状のもの)



写真-3.5 水圧破碎した亀裂の範囲
(圧密応力 100kPa の場合)
(赤い線で囲まれた範囲)

る。亀裂沿いに供試体を分断した際に、写真-3.5では多少見づらいものの、水圧破碎により発生した亀裂表面は滑らかであり、他の領域とは目視で明確に区別することができた。なお、圧密応力 400kPa の時に発生した亀裂も同様な状況であった。

3.3 考察

本研究では、せん断あるいは引張により一度水圧破碎したコア材料について、破碎後の圧密によりどの程度水圧破碎抵抗性が回復するかを検討するため、一度水圧破碎させた供試体を再圧密して亀裂を再附着させた後、再び水圧破碎試験を行う再開口試験を行った。その結果、水圧破碎発生後の再圧密により水圧破碎抵抗性がある程度回復すること、また再開口時の破碎圧は最初の水圧破碎時の破碎圧よりは小さいものの拘束圧よりは大きくなること、などが分かった。

一般的に、水圧破碎の破碎圧は以下の式に従うものと考えられている⁸⁾。

$$\sigma_f = m\sigma_3 + n \quad (3.1)$$

ここで、 σ_f は破碎圧、 σ_3 は拘束圧、 m と n は定数である。一般的には、 m は1から2の間の値と考えられている。また、水圧破碎が引張破壊による現象である場合には、 n は引張強度になると考えられている。なお、十分に厚い厚肉円筒形の弾性体においては、理論的に m は2、 n は引張強度となる。

本研究の結果においては、試験数量が少ないため定数 m と n を定量的に精度よく評価することは難しいが、拘束圧と破碎圧の関係を整理した図-3.8を見

ると、初期破碎圧においては m は1.3~1.5程度、 n は小さな値となり、再開口圧においては m は1.2~1.4程度、 n は小さな値となることが推定される。初期破碎時および再開口時において m が1よりも大きいことは、浸透路長が本試験程度に長い場合には、水圧破碎による破碎圧は拘束圧よりも比較的大きくなる可能性を示唆しており、また、水圧破碎後にある程度の再圧密が行われれば、水圧破碎に対する抵抗性が再び確保される、つまり再圧密により水圧破碎に対する進行性破壊に対する抵抗性が得られる可能性をも示唆しているものと考えられる。このことから、一度せん断破壊(変形)を受けたフィルダムのコア材料でも、貯水位の低下による作用水圧の低下、さらには再圧密によりある程度の強度回復が期待できることがわかった。このことは、せん断破壊(変形)したコア材料の浸透による進行性破壊に対する安全側の余裕と考えることができる。

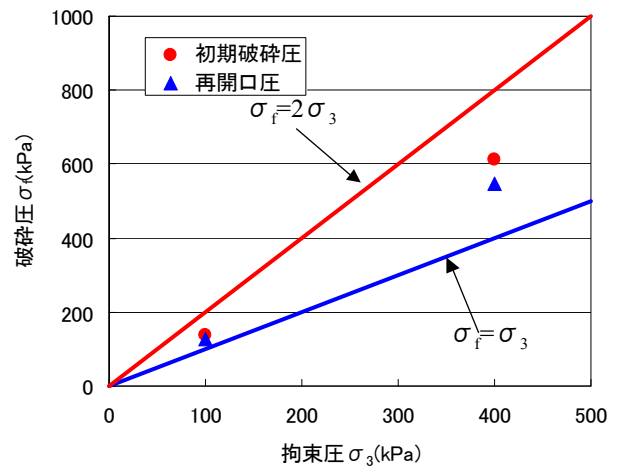


図-3.8 拘束圧と破碎圧の関係

4. コアのせん断変形後の集中漏水に対しても有効に作用するフィルタ

4.1 試験方法の選定と課題の設定

フィルダムのフィルタは、浸透水を安全に排出するとともに、コア材料の流出を防ぐことを目的として設置される。粘性土であるフィルダムのコア材料は、地震や水圧破碎、万一の施工上の不備や分散粘土の存在等により亀裂が生じた場合、その粘着性により亀裂は閉塞されることなく保持され、集中的な浸透が発生する恐れがある。一方、2章における、ピンホールを有する締固めたコア材料の浸透破壊試験結果からせん断破壊(変形)を受けたコアについても、フィルダムのコアに発生する平均動水勾配よ

りもかなり大きな浸透破壊抵抗性を有することが判明している。しかし、ピンホールによるせん断層の単純なモデル化、実際のフィルダムのコアの物性のばらつきなども考慮して、設計上安全側の立場から、コアにおける集中浸透を想定した極限状態においても有効に働くフィルタに関する実験的検討方法は、既往の研究から以下の2種類に大別できる。

1つの方法は、Vaughanら^{9),10),11)}のフィルタ試験(Filter Test : F試験)やTownsendら¹²⁾のダーティ・ウォータ試験(Dirty Water Test : DW試験)である。これらの試験では、コアゾーンに集中浸透が発生し、その水中に遮水材料の細粒分が取り込まれて懸濁水になった状態を想定したスラリーを作成し、それをフィルタ中に通過させてフィルタの遮水材料の補足に関する有効性を判定する。つまり、コアゾーンに集中浸透が発生し、浸透水中にコア材料の微細粒子が取り込まれて濁水となって流出するという状態を想定している。図-4.1にDW試験装置の概要を示す。筆者ら(土木研究所)は、我が国の既設フィルダムのコア材料を用いて、DW試験の手順の確認、試験仕様およびフィルタの有効性判定基準の確立を目的として試験を行っている^{13),14)}。また、DW試験は、後述するNEF試験に比べ、厳しい試験条件を想定していると考えられる¹⁵⁾。

もう1つの方法は、Sherardら^{16),17)}の非侵食試験(No Erosion Filter Test : NEF試験)に代表される。この試験では、コア材料を締固めて作製した供試体に、集中浸透を発生させる水みちを形成し、そこに高圧水を流して供試体下流に配したフィルタのコア材料の流亡防止に関する有効性を判定する。つまり、コアゾーンへの集中的な浸透までを対象としている。図-4.2にNEF試験装置の概要を示す。筆者ら(土木研究所)は、我が国の実際のフィルダムで使用されているコア材を使用し、Sherardらと同様なNEF試験を実施した。その試験結果が、Sherardらの提案したフィルタ基準(表-4.1参照)と比較的良く一致することを確認している¹⁸⁾。また、Sherardらが実施した試験においては、フィルタの有効性判定が目視観察のみに依存し、人為的誤差が多分に含まれている可能性があるため、筆者ら(土木研究所)は客観的なフィルタの有効性判定方法として、加積侵食指数(排出水の濁度に流出量を乗じて求めた侵食指数の加積値)を用いた定量的なフィルタの有効性判定方法を提案し、その有用性を確認している¹⁹⁾。

これらの試験より、フィルタ基準の確立にはDW

試験とNEF試験を併用した検討が必要であるが、我が国のコア材料のように粗い粒子を含む場合には、土質材料の大半が細かい粒径の粒子のみで構成される場合に非常に良好な結果が得られるDW試験に比べ、NEF試験の方が適しているのではないかとの結論も得られている²⁰⁾。本研究では、できる限り現場条件を再現するとの立場から、フィルタ材料の締固め度を変えてNEF試験を実施し、締固め度がフィルタの有効性に与える影響について明らかにするとともに、新たなフィルタ基準の指標について提案を行う。

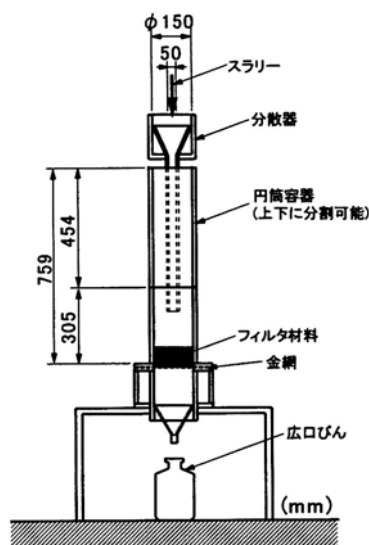


図-4.1 DW試験装置の概要¹²⁾

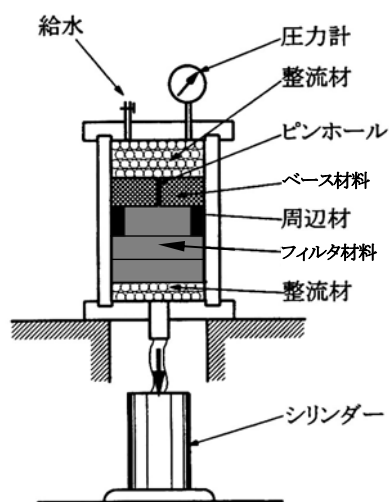


図-4.2 NEF試験装置の概要^{16),17)}

表-4.1 Sherardらが提案したフィルタ基準^{16),17)}

グループ	細粒分含有率 [*] A (%)	設計基準 ^{**} (適切な安全率を加味してある)
①	85 ~ 100	$D_{15}/d_{85} \leq 9$
②	40 ~ 85	$D_{15} \leq 0.7$ (mm)
③	0 ~ 15	$D_{15}/d_{85} \leq 4$
④	15 ~ 40	$D_{15} \leq 0.7 + (40-A)(4 \times d_{85} - 0.7)/25$ (mm)

*) 4.76mmふるいを通過する部分の細粒分 (<0.074mm) 含有率。

**) D_{15} : フィルタ材料の15%通過粒径、 d_{85} : ベース材料の85%通過粒径。

4.2 試料

コア材料に相当するベース材料の粒度分布を図-4.3に、土質試験結果の一覧を表-4.2に示す。さらに、ベース材料の締め固め透水試験結果を図-4.4に示す。このベース材料は、我が国の一般的なコア材料と考えると大きな問題はない。

フィルタ材料は、粒径0.425mmから3.35mmまでの堅固で清浄な砂および礫を粒度調整したものとした。フィルタ材料の粒度分布を図-4.5に示す。

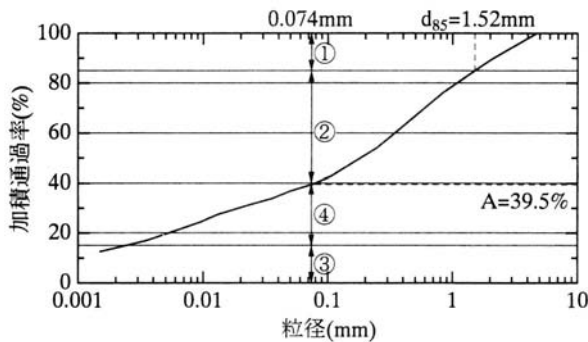


図-4.3 ベース材料の粒度分布

表-4.2 ベース材料の土質試験結果

粒 度	最大粒径 D_{max} (mm)	4.75
	60%粒径 D_{60} (mm)	0.35
	50%粒径 D_{50} (mm)	0.19
	30%粒径 D_{30} (mm)	0.019
土粒子の密度 (g/cm^3)		2.712
液性限界LL (%)		57.8
塑性限界PL (%)		29.1
塑性指数PI		28.7
IEc締め固めによる最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)		1.645
IEc締め固めによる最適含水比 w_{opt} (%)		21.1
IEc締め固めによる最小透水係数 k_{min} (cm/s)		1.0×10^{-8}
IEc締め固めによる最小透水係数時の含水比 w_{kmin} (%)		22.7

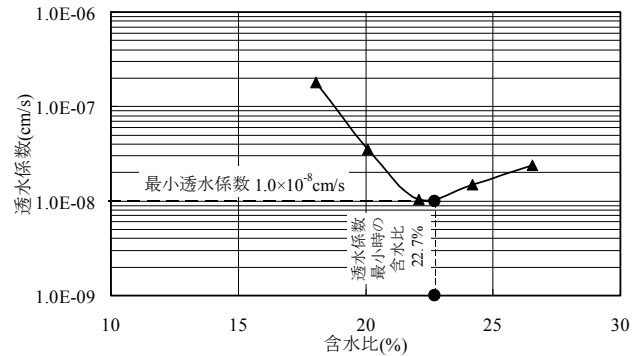
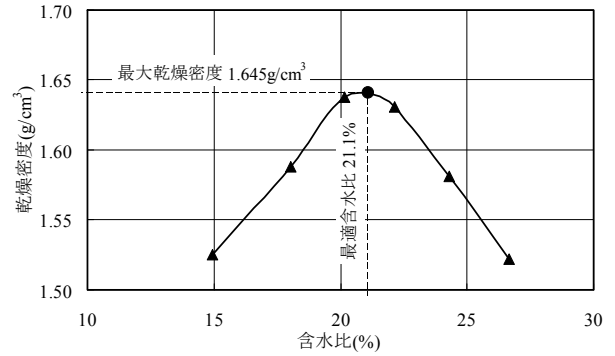


図-4.4 ベース材料の締め固め透水試験結果

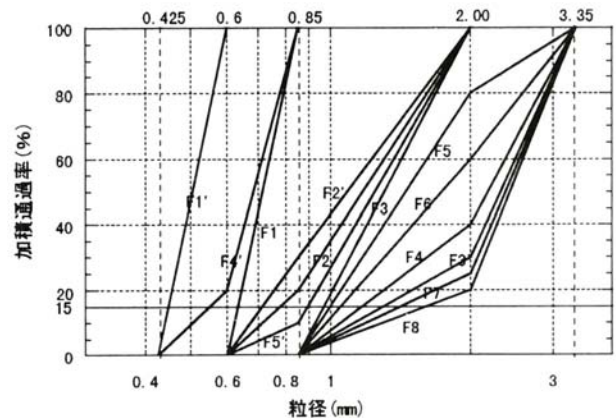


図-4.5 フィルタ材料の粒度分布

4.3 試験方法

4.3.1 NEF 試験

NEF 試験装置の内部構成は図-4.2に示すとおりで、まず、モールドの底に金網を敷き、その上に整流材としてガラスビーズを入れる。続いてフィルタ材料を2層に分けて投入する。ここで、上層フィルタの外周部には、透過水がモールド壁面に沿って流れ出すことを防ぐため、より繊細なフィルタ材料(周辺材)を設置する。フィルタ材料の締め固めはモールドを木槌で叩くことにより行い、締め固め条件はモールド側面の木槌による打撃回数135回を基本とし、27回、0回(投入のみ)の3種類を設定した。なお、

打撃回数 135 回はフィルタ材の材料分離を発生させないほぼ最高の打撃回数である。フィルタ層厚は 80mm としている。次に、最適含水比に調整したベース材料をフィルタの上に敷きならし、最大乾燥密度を目標に突き固める。突き固め回数や層数は、あらかじめベース材料の突固め試験をフィルタ上で実施して決定した。ベース材料厚は 25mm としている。ベース材料を突き固めた後、ベース材料を貫通する直径 2mm のピンホールをモールド中央に鉛直に作製した。このピンホールは、フィルダムのコア部に発生した上下流方向の水みちを模擬している。コアに発生したせん断層を直径 2mm のピンホールで模擬することの妥当性については、「2.1」において検証済みである。最後に、ベース材料の上に整流材としてガラスビーズを充填し、供試体が完成する。

試験では、モールド上部の圧力計で 392kPa の圧力水を給水した。ベース材料厚が 25mm で、水圧が 400m 相当の水頭であることから、動水勾配は約 16,000 となり、我が国のフィルダムのコアにおける平均動水勾配 2 程度よりはるかに大きく、極めて設計上安全側の試験条件設定となっている。原則として、通水はモールド下部より水が排出されてから 10 分間実施し、排出される水の濁度や流出量を 1 分間ずつ計測した。試験終了後、直ちにモールドを解体し、ピンホール周辺およびベース材料とフィルタの接触面の侵食状況を観察した。

Sherard らは、最終的にフィルタを通して排出された水が清浄であり、かつピンホール周辺およびベース材とフィルタの接触面に侵食が見られない場合、フィルタを有効と判定している。今回も、基本的にはこの方法に従ってフィルタの有効性を判定したが、判定により客観性を持たせるため、筆者ら（土木研究所）が提案している加積侵食指数の経時変化による判定も補助的に導入している。

4.3.2 フィルタ材料に対する定水位透水試験

本研究では、フィルタ材料の粒径の他にその締固め度がフィルタ効果に与える影響を評価することも目的としている。つまり、フィルタ効果はフィルタ材料の粒径よりもフィルタ層の間隙径の大きさに、より強く依存するはずである。そこで、間隙径を良く反映しているパラメータの 1 つとして、フィルタ材料の透水性を求めるために NEF 試験に用いたフィルタ材料と同一の粒度、締固め条件で作製した供試体に対して、定水位の透水試験を実施した。表-4.3 に透水試験仕様の概要を示す。

表-4.3 定水位透水試験仕様の概要

供試体の大きさ	直径	10cm
	高さ	12.7cm
	体積	1000cm ³
フィルタ材料	締固め層数	5層
	1層の層厚	約25mm
透水試験	方法	定水位法
	通水方法	供試体の下部より上部に通水
	飽和方法	供試体の最下部より30秒間に1cmの割合で水位上昇
	通水の安定化	所定の水位に上昇後の5分間
	動水勾配	①0.05 ②0.10 ③0.20
	流量の測定	5分間の流量の安定化後、継続して流量を測定
	各動水勾配の透水係数	安定した流量になった後の3回測定の平均値

4.4 試験結果

4.4.1 NEF 試験

図-4.6 にフィルタ材料の 15% 粒径 D_{15} と 10 分間の加積侵食指数 $\Sigma E(T=10)$ の関係を示す。この図より締固めエネルギーが同じであれば、概ねフィルタ材料の D_{15} が大きい順に加積侵食指数が大きくなるのがわかる。また、同一粒度のフィルタ材料では、フィルタ材料の締固めエネルギーが小さい順に加積侵食指数が大きくなる。

フィルタ材料を標準の締固めエネルギー（135 回打撃）で作製した供試体における、フィルタ材料の D_{15} と $\Sigma E(T=10)$ の関係では、 $D_{15}=0.9\text{mm}$ 付近で $\Sigma E(T=10)$ の急増点が見られ、概ね目視観察による有効と非有効の境界点に一致している。同様に、フィルタ材料の締固めエネルギーが 27 回打撃の場合には $D_{15}=0.7\text{mm}$ 付近、投入のみの 0 回打撃では $D_{15}=0.6\text{mm}$ 付近で、 $\Sigma E(T=10)$ の急増点が見られ、概ね目視観察による有効と非有効の境界点に一致している。しかし、有効と非有効の境界点での D_{15} は、締固め度の違いにより異なっている。

前述したように、フィルタ効果がフィルタ層の間隙径の大きさに依存すると考え、 D_{15} 単独ではなく D_{15} とフィルタ層全体の間隙を表す指標である間隙比 e との積 $e \cdot D_{15}$ をフィルタ効果判定の新しい指標として導入する。そこで $e \cdot D_{15}$ と $\Sigma E(T=10)$ の関係を図-4.7 に示す。この図より、 $e \cdot D_{15}$ が増加するにつれて $\Sigma E(T=10)$ も増加するが、 $\Sigma E(T=10)$ が急増する前の $e \cdot D_{15}$ は締固めエネルギーによらず 0.5mm 程度となり、それ以下の値では目視区分による判定が有

効、また多少幅はあるが $e \cdot D_{15} = 0.7\text{mm}$ 以上では目視区分による判定が非有効となり、フィルタ効果判定指標として $e \cdot D_{15}$ の D_{15} に対する優位性を見出すことができる。

4.4.2 定水位透水試験

D_{15} と透水係数 k_{15} (水温 15°C の値に換算) の関係を図-4.8 に示す。また、間隙比の影響も考慮して整理した $e \cdot D_{15}$ と透水係数 k_{15} の関係を図-4.9 に示す。

これらの図よりフィルタ材料の透水係数は粒度や締固め度の違いにより差はあるが、 $k=10^{-2} \sim 10^{-1}\text{cm/s}$ オーダと全般に大きい。我が国のフィルタの透水係数が、 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ である²¹⁾ことを考慮すると、本試験のフィルタの透水性は実際のフィルタの透水性よりも 1~2 オーダ程度大きいことがわかる。

図-4.8 から、締固めエネルギーが同じならば粒度 (D_{15} 粒径) が細かいほど透水係数は小さい傾向を示し、両対数紙上では両者にはほぼ直線関係があることがわかる。また、フィルタ材料の粒度が同じならば、締固めエネルギーが大きいほど透水係数は小さい傾向を示す。

一方、図-4.9 から、 $e \cdot D_{15}$ と透水係数 k_{15} との間には、締固めエネルギーによらず、明瞭な直線関係が認められ、 D_{15} よりも $e \cdot D_{15}$ の方が透水係数 k_{15} との相関が高いことがわかる。このことから、 $e \cdot D_{15}$ の D_{15} に対するフィルタ効果判定指標としての優位性を見出すことができる。

また、図-4.10 に $e \cdot D_{15}$ と k_{15} の関係を NEF 試験の有効・非有効に区分して示す。この図からも $e \cdot D_{15}$ の方が D_{15} よりもフィルタ層の間隙径との相関が高いことがわかる。

4.5 フィルタの間隙の影響を加味した基準の提案

本研究では、コアのせん断破壊に伴い集中浸透が発生するという極限状態を想定した NEF 試験を、できる限り現場条件に近い状態で実施するとの立場から、フィルタの締固め度を変化させて実施した。その結果、NEF 試験の結果に基づいて提案されているフィルタの 15% 粒径 D_{15} による基準よりも、フィルタの締固め度の影響を考慮できる間隙比 e と D_{15} の積を指標とすることの優位性を示すことができた。

また、試験で使用しているフィルタ材料の粒度は、均等係数の小さい材料であるのに対して、実際のフィルタの材料は、粒度分布範囲が広く、締固め度の間隙比は試験のフィルタにおける間隙比よりさらに小さくなる。

以上より、コアのせん断破壊に伴い、集中浸透が発生した場合を想定すると、①まず、従来の NEF 試験結果に基づくフィルタ基準に照らして、コア材料の進行性破壊防止の可能性を検討し、②進行性破壊防止が困難との結果が得られた場合は、現場のフィルタ条件を再現した NEF 試験を実施し、その効果について、検討するという流れで対応することとなる。

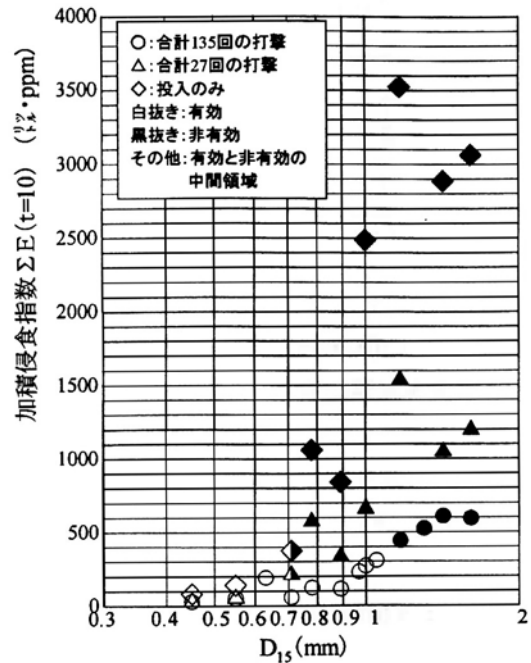


図-4.6 D_{15} と $\Sigma E(T=10)$ の関係

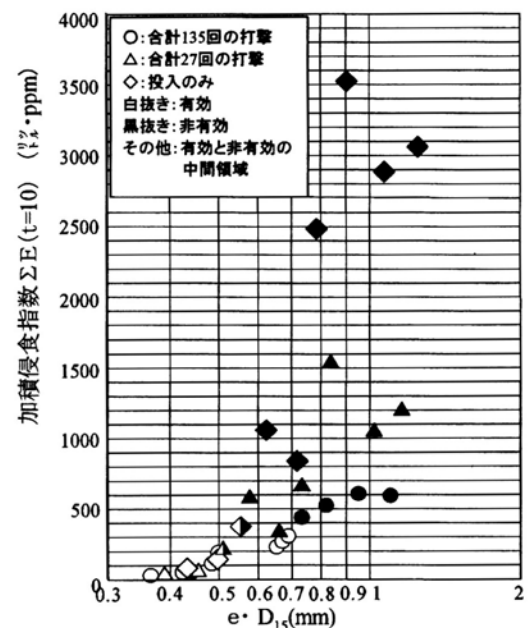


図-4.7 $e \cdot D_{15}$ と $\Sigma E(T=10)$ の関係

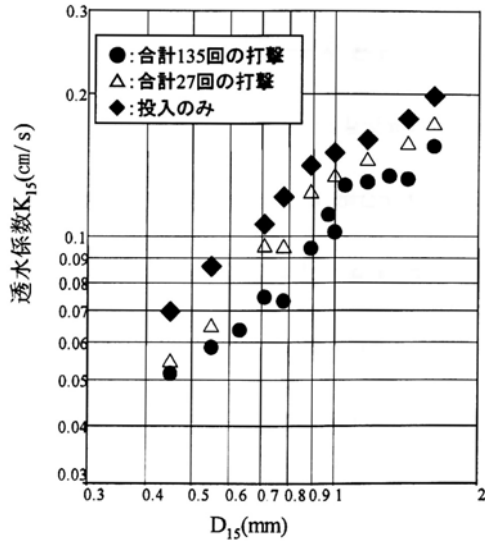


図-4.8 D_{15} と透水係数 k_{15} の関係

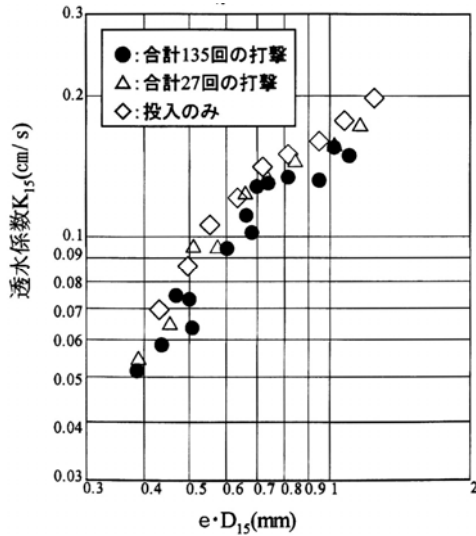


図-4.9 $e \cdot D_{15}$ と透水係数 k_{15} の関係

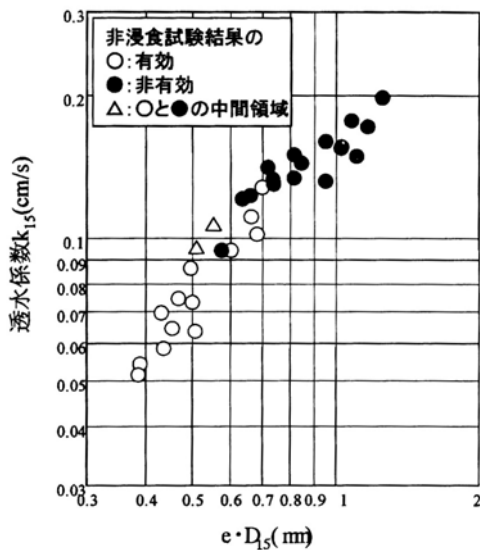


図-4.10 $e \cdot D_{15}$ と透水係数 k_{15} の関係
(非侵食試験の有効・非有効による区分)

5. まとめ

本研究では、せん断変形を受けたフィルダムコアの進行性破壊に関する基礎的検討として、せん断層をピンホールにて模擬した浸透破壊試験とコア材料に集中的な浸透が発生した場合でも有効に作用するフィルタの粒度条件を検討する極限フィルタの実験を行った。さらに、せん断変形を受けた後、速やかに貯水位を低下させる対応をとることで、どの程度のせん断層の強度回復がなされるかについての実験的検討を行った。以下に、得られた成果をとりまとめる。

(1) せん断変形後のコアの浸透破壊抵抗性評価

締固めたコア材料に形成されたせん断層をピンホールにより模擬して浸透破壊試験を実施した結果、 w_{opt} より $w_{opt}+3\%$ の供試体の浸透破壊抵抗性が小さいが、破壊時の動水勾配は12~18で、我が国のロックフィルダムのコア部における上下流方向の平均的な動水勾配である2程度より十分大きいことがわかった。なお、ピンホール径1~4mmの透水性は、せん断変形による透水性増加を十分考慮できるものである。以上より、実際のフィルダムのコアは、ある程度大きいせん断変形を受けた場合でもその後の浸透により直ちに壊滅的な破壊には至らないと考えられる。

(2) コアのせん断破壊後の貯水位低下による強度回復の評価

一度水圧破碎させた供試体を再圧密して亀裂を再付着させた後、再び水圧破碎試験を行う再開口試験を行った結果、水圧破碎発生後の再圧密により水圧破碎抵抗性がある程度回復すること、また再開口時の破碎圧は最初の水圧破碎時の破碎圧よりは小さいものの拘束圧よりは大きくなることがわかった。

これらことから、一度せん断破壊(変形)を受けたフィルダムのコア材料でも、貯水位の低下による水圧の低下、さらには再圧密により、ある程度の強度回復が期待できることがわかった。これは、せん断破壊(変形)したコア材料の浸透による進行性破壊に対する安全側の余裕と考えることができる。

(3) コアのせん断変形後の集中漏水に対しても有効に作用するフィルタの粒度条件

コアに形成されたせん断層を通じた集中浸透が発生することを想定、模擬したフィルタ試験であるNEF試験の結果、有効と非有効の境界点でのフィルタ材料の15%粒径 D_{15} は、締固め度の違いにより異なり、フィルタ効果がフィルタ層の間隙径の大きさ

に依存することがわかった。そこで、 D_{15} 単独ではなく D_{15} とフィルタ層全体の間隙を表す指標である間隙比 e との積 $e \cdot D_{15}$ をフィルタ効果判定の新しい指標として導入したところ、フィルタ効果判定指標として $e \cdot D_{15}$ の D_{15} に対する優位性を見出すことができた。

この結果より、より実態に近い形で、フィルタの間隙の影響を加味したフィルタ基準を提案すると以下の流れとなる。

- ① 従来の NEF 試験結果に基づくフィルタ基準に照らして、コア材料の進行性破壊防止の可能性を検討する。
- ② ①の結果、進行性破壊防止が困難との結果が得られた場合は、現場のフィルタ材料の状況を再現した NEF 試験を実施し、その効果について検討する。

参考文献

- 1) Konagai, K., Hori, M. and Meguro, M.(eds.) : Proc. Workshop on Seismic Fault-induced Failures, Jan. 2001.
- 2) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説，2005年3月。
- 3) 猪俣 純,永山 功ほか：大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料,国土交通省国土技術政策総合研究所資料, No.244, 独立行政法人土木研究所資料, No.3965, pp.75-78, 2005年3月。
- 4) (財) 国土開発技術センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令, 改定第1刷, (社) 日本河川協会, 山海堂, pp.47-51, 2000年1月。
- 5) 副田悦生, 近藤悦吉, 中村博久: 粘性土の剪断変形後の透水性に関する研究, 電力土木, No.206, pp.103-108, 1987年1月。
- 6) 今林 豊, 山口嘉一, 吉田 等: フィルダム遮水材料の締固め含水比とパイピング特性の関係, 第32回地盤工学研究発表会講演集, pp.1957-1958, 1997年7月。
- 7) 今林 豊, 山口嘉一, 川崎将生, 吉田 等: 長時間通水によるフィルダム遮水材料のパイピング抵抗性, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集. 第3部門, pp.490-491, 1997年9月。
- 8) 田頭秀和: 既往研究事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、地盤工学会、pp.141~148、2002年11月。
- 9) Soares, H. F. : Experiments on the Retention of Soils by Filters, A Thesis Submitted to the University of London for the Degree of Master of Philosophy in the Faculty of Engineering, 1980.
- 10) Vaughan, P. R. : Design of Filters for the Protection of Cracked Dam Cores Against Internal Erosion, Preprint 3420 Presented to ASCE Convention, Chicago, 1978.
- 11) Vaughan, P. R. and Soares, H. F. : Design of Filters for Clay Cores of Dams, ASCE, Vol.108, GT1, 1982.
- 12) Townsend, F. C. and Stanfill, D. C. : An Experimental Evaluation of Sand Filters for Dispersive Clays, Department of Civil Engineering, University of Florida, 1987.
- 13) 藤澤侃彦, 中村 昭, 山口嘉一, 川崎将生: 懸濁水に対するフィルダムの粒状フィルタの機能評価, 大ダム, No.162, pp.11-19, 1998年1月。
- 14) (社) 地盤工学会: 遮水ゾーンにおける集中浸透に対するフィルタ基準, 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発表論文集, p.105, 2002年11月。
- 15) 中村 昭, 山口嘉一, 矢萩賢仁, 田原則雄: ダーティ・ウォータ試験と非侵食試験によるフィルタ基準に関する考察, 第29回土質工学研究発表会講演集, pp.1879-1882, 1994年6月。
- 16) Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. and Talbot, J.R. : Filters for Silts and Clays, ASCE, Vol.110, GT6, 1984.
- 17) Sherard, J. L. and Dunningan, L. P. : Filters and Leakage Control in Embankment Dams, Proc. Symp. Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE, pp.1-29, 1985.
- 18) 中村 昭ら: 非侵食試験によるフィルタ機能の評価, 建設省土木研究所資料, 第3236号, 1994年1月。
- 19) 吉田 等, 山口嘉一, 矢萩賢仁, 川崎将生: 非侵食試験によるフィルタの有効性判定指標の提案, 土木技術資料, Vol.40, No.3, 1998年3月。
- 20) 中村 昭, 山口嘉一, 矢萩賢仁, 田原則雄: 非侵食試験によるフィルタ性能の検討, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp.2237-2240, 1993年6月。
- 21) 松本徳久, 山口嘉一, 山野雅彦: フィルタ基準に関する調査と考察, 建設省土木研究所, 第2903号, 1990年10月。

RESEARCH ON COUNTERMEASURES AGAINST PROGRESSIVE FAILURE OF EMBANKMENT DAMS DAMAGED BY SHEAR DEFORMATION

Abstract : By the fault displacement during the 1999 Kocaeli Turkey Earthquake and the 1999 Chichi Taiwan Earthquake, many lifelines such as bridges, dams and tunnels were severely damaged. Mitigation measures for lifelines against catastrophic failure due to fault displacement are very important. In recent years, for many lifelines the guidelines for seismic performance evaluation during large earthquakes are proposed, and they allow some damage to lifelines during large earthquakes. Therefore, we should conduct research on countermeasures against progressive failure of embankment dams damaged by shear deformation caused by fault displacement or sliding failure due to large earthquakes.

Because dams are structures to store water, we should consider secondary damage after fault displacement or sliding failure such as erosion in core zone where concentrated seepage is caused by shear deformation. In this research, we conduct experiments on seepage failure in shear deformed zone, and experiments on critical filters changing grain size distribution which work effectively to protect core zone from progressive erosion due to concentrated seepage.

Key words : shear deformation, fault displacement, seepage failure, earth core, critical filter