

せん断変形を受けたフィルダムコアの 進行性破壊抵抗性に関する基礎的研究

山口嘉一* 佐藤弘行** 林 直良*** 吉永寿幸****

1. はじめに

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を踏まえ、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に関する基準・指針が提案されている。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)」¹⁾ (以下、指針(案)と呼ぶ)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。同指針(案)によると、フィルダムについては、大規模地震により、すべり等の塑性変形が発生しても貯水が堤体を越流せず、またすべり面沿いに貯水が浸透した場合でも浸透破壊が発生して進行性破壊とならないことを確認する必要があることが示されている。

フィルダムは貯水を目的とした構造物であるため、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。

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、せん断層を径の小さい孔(以下、ピンホールと呼ぶ)にて模擬した浸透破壊試験を行った。

2. 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囲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。

本研究が基礎的研究であることを考慮し、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、数少ない既往の研究事例の一つであるせん断変形後の粘性土の遮水性に関する副田らの研究成果²⁾を考慮した。

副田ら²⁾は、フィルダム基礎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。

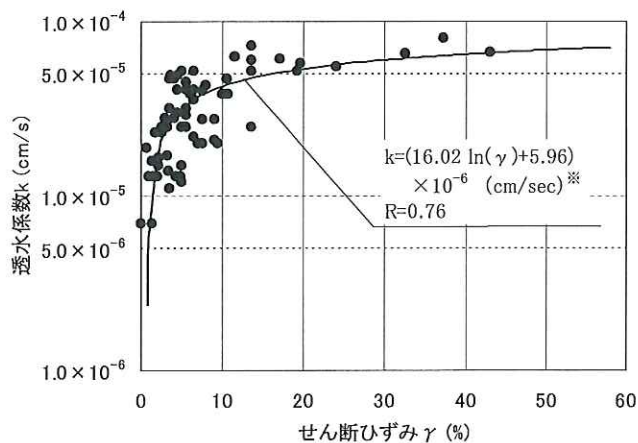
まず予備実験では、せん断変形後の透水性に対する影響要因として、供試体全体の透水性は材料の細粒分含有率 P_F および飽和度 S_r に依存し、せん断変形後に透水性がかなり大きくなるという結果を得ている。

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 とせん断層を含む $150 \times 150 \text{ mm}$ の通水断面(断

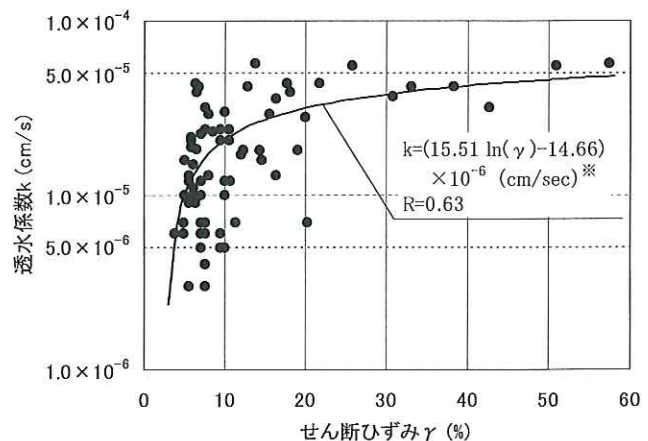
面積：225cm²)における透水係数 k との関係を図-1に示す。この図に基づき、既往の研究では、「 k は γ の初期の増加に伴い対数的に大きくなり、 $\gamma=10\%$ 程度で初期の10倍程度になっているが、これ以上 γ が大きくなっても k はあまり変化していない」と評価している。

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(断面面積：78.5cm²)の平均透水係数を求めると $10^{-2}\sim 10^{-3}$ cm/sオーダーであるのに対して、ピンホールが無い供試体の通水断面全体の平均透水係数は 10^{-6} cm/sオーダー^{3)、4)}であるため、本研究のピンホールを有する供試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。この倍率は、先に示した既往の研究事例におけるせん断層を含む通水断面(150mm×150mm)の平均透水係数の増加比率($\gamma=10\%$ 程度での透水係数は初期の透水係数の10倍程度)よりもはるかに大きい。よって、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、流亡するおそれのある土粒子周辺における流速の大小が重要な流亡要因になるとの考えに基づくと、設計上十分安全側の試験となっていると考える。

3. 試料



a) $P_F=40\%$ 試料



b) $P_F=60\%$ 試料

※図中のせん断ひずみ γ は百分率で入力

図-1 せん断ひずみと透水性との関係 ($S_r=60\%$)²⁾

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 $D_{max}=19$ mmに粒度調整した風化千枚岩、B材料は $D_{max}=19$ および2mm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および表-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 $\rho_{dmax}=1.758$ g/cm³、含水比 $w=18.8\%$ で最小透水係数 $k=4.7 \times 10^{-7}$ cm/sを得ている。B材料については、今回の試験において、両粒度ともに締固め試験は実施しているが透水試験は実施していない。B材料の締固め試験では、 $D_{max}=19$ mmにおいて最適含水比 $w_{opt}=27.9\%$ で最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.514$ g/cm³、 $D_{max}=2$ mmにおいて最適含水比 $w_{opt}=28.0\%$ で最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.469$ g/cm³を得ている。なお、B材料の $D_{max}=19$ mmについては、厳密な意味では粒度分布が異なるが、比較的粒度分布に近い材料を用いて別途実施した締固め透水試験結果より、最適含水比 $w_{opt}=26.1\%$ で

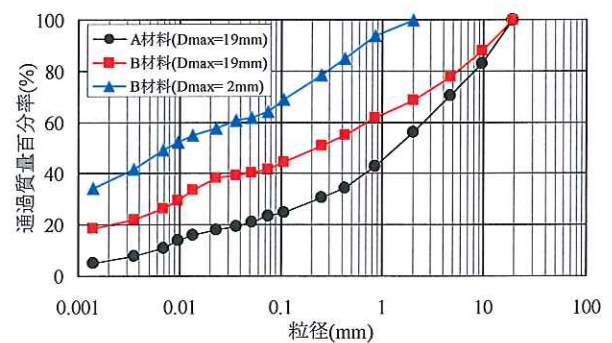
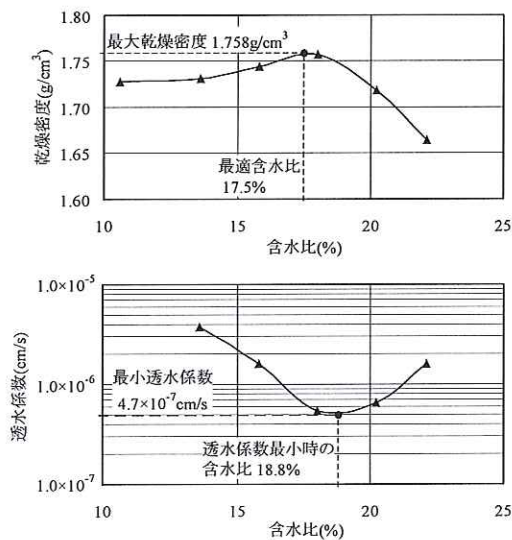
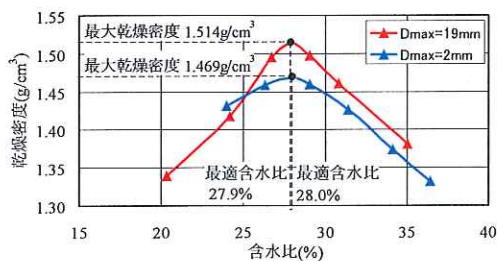


図-2 試料の粒度分布

最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.523\text{g/cm}^3$ 、透水係数 $k=7.9 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ を得ている。試験時のモールドの径や後述するが締固め密度等の違いを考慮すると、 $D_{max}=19\text{mm}$ の透水係数は $10^{-7} \sim 10^{-6}\text{cm/s}$ オーダーであると推測される。図-3にA材料の締固め透水試験結果、図-4にB材料の締固め試験結果を示す。

表-1 試料の物理特性

材 料	A材料	B材料
最大粒径 $D_{max}(\text{mm})$	19	19
60%粒径 $D_{60}(\text{mm})$	2.54	0.71
50%粒径 $D_{50}(\text{mm})$	1.34	0.22
30%粒径 $D_{30}(\text{mm})$	0.23	0.01
10%粒径 $D_{10}(\text{mm})$	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
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-3 締固め透水試験結果 (A材料、 $D_{max}=19\text{mm}$)図-4 締固め試験結果 (B材料、 $D_{max}=19$ および 2mm)

4. ピンホールを有する供試体に対する浸透破壊試験

4.1 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85mmのモールド内に

において、1Ecのエネルギーでランマーにより締固めて供試体を作製した。ピンホールは締固め終了後に、ピンホール径と同じ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、含水比を w_{opt} と $w_{opt}+3\%$ に調整した試料を内径100mm、高さ100mmのモールド内に、1層ごとに $\phi=40\text{mm}$ 程度の突き棒で1Ec締固めの ρ_{dmax} の95%の乾燥密度となるように締固めて6層で供試体を作製した。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固め作業を行い、締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-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。

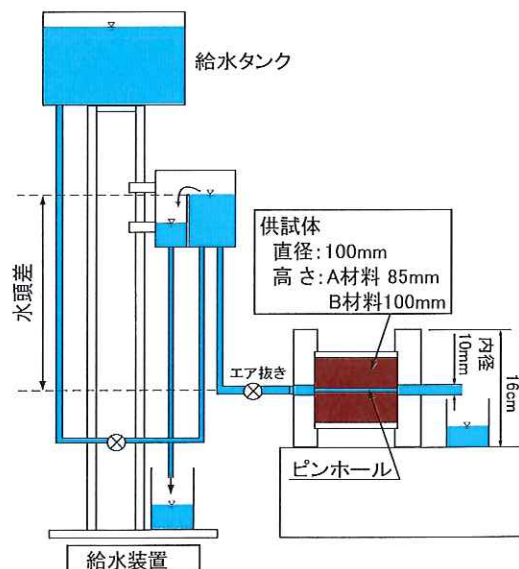


図-5 試験装置の概要

4.2 試験結果

4.2.1 A材料の試験結果

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-6に示す。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。侵食破壊は、動水勾配と流量の関係における流量の急増を基本として、流出水の濁りにも着目して判定した。

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、 $w_{\text{opt}}+3\%$ 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、動水勾配と流量の関係における流量の急増が認められたため侵食破壊が発生したと判断した。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 ($Q=a \cdot i'^b$)と相関係数を示す。この表からは、ピンホール径が同じで

表-2 A材料試験結果一覧 ($\phi=2$ 、 4mm の場合)

供試体条件	供試体番号	乾燥密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	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

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 $280\text{cm}/\text{s}$ 、 $\phi=4\text{mm}$ の場合約 $305\text{cm}/\text{s}$ とピンホール径による差はあまりなく、A材料は流速 $300\text{cm}/\text{s}$ 程度の流速により侵食されたことがわかる。

4.2.2 B材料の試験結果

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-7に示す。なお、B材料の $w_{\text{opt}}+3\%$ の供試体は、 $\phi=2\text{mm}$ のみの試験しか実施していないことに留意されたい。

$D_{\text{max}}=19\text{mm}$ の w_{opt} の供試体において、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、 $i=30$ でも破壊や目詰まりは発生しなかった。また、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

表-3 B材料試験結果一覧

供試体条件		供試体番号	$Q=a \cdot i'^b$		
最大粒径	孔径		a	b	相関係数
$D_{\text{max}}=19\text{mm}$	w_{opt}	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
	$\phi=1\text{mm}$	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
	$\phi=2\text{mm}$	①	1.733	0.591	0.998
		②	1.594	0.610	0.999
		③	1.736	0.616	1.000
		平均	1.688	0.605	0.999
	$w_{\text{opt}}+3\%$	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
$D_{\text{max}}=2\text{mm}$	w_{opt}	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
	$\phi=2\text{mm}$	①	2.130	0.537	0.996
		②	1.943	0.562	1.000
		③	1.861	0.587	0.999
		平均	1.978	0.562	0.999

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。 $\phi=2\text{mm}$ の $w_{\text{opt}}+3\%$ については、 w_{opt} の場合と同様の結果が得られており、破壊や目詰まりは発生しなかった。

$D_{\text{max}}=2\text{mm}$ の w_{opt} の供試体において、ピンホール径 $\phi=2\text{mm}$ の場合、 $D_{\text{max}}=19\text{mm}$ の w_{opt} の供試体の $\phi=2\text{mm}$ 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、 $D_{\text{max}}=19\text{mm}$ の w_{opt} の供試体のケースに比べてさらに小さいことがわかる。 $w_{\text{opt}}+3\%$ については、 w_{opt} の場合と同様の結果が得られている。

表-3には、 (i', Q) データの回帰係数 a 、 b ($Q=a \cdot i'^b$)と相関係数を示す。この表から w_{opt} の場合は、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。

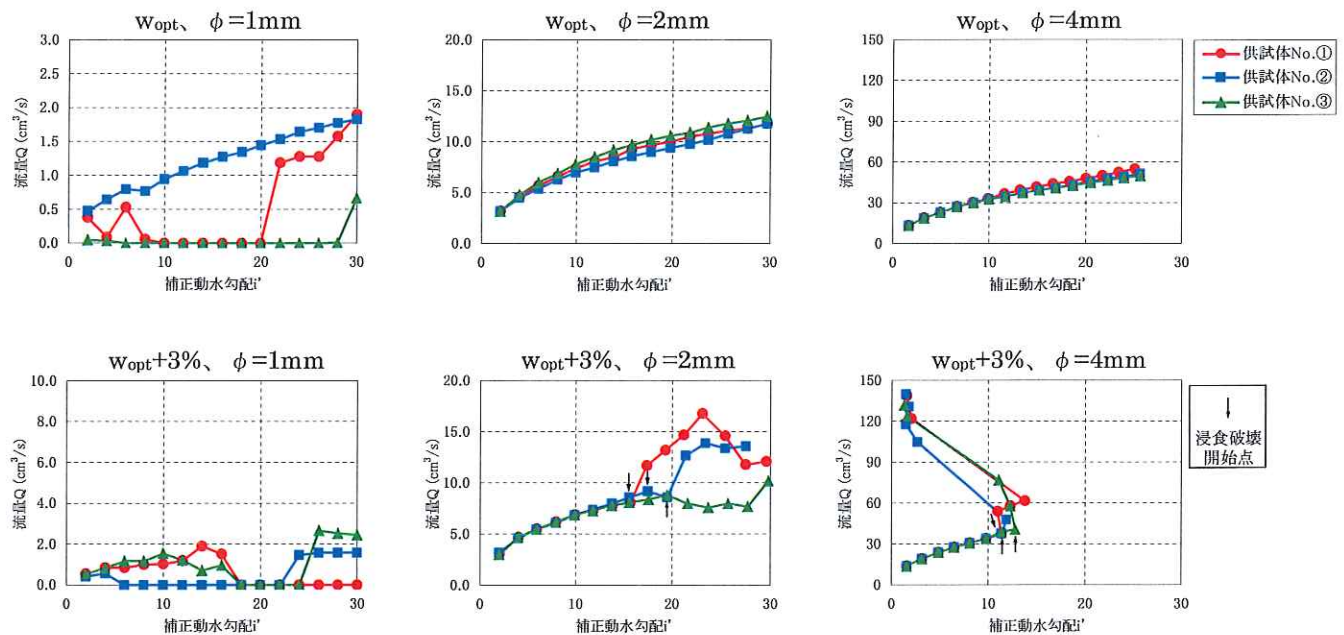


図-6 補正動水勾配と流量の関係 (A材料、 $D_{\text{max}}=19\text{mm}$)

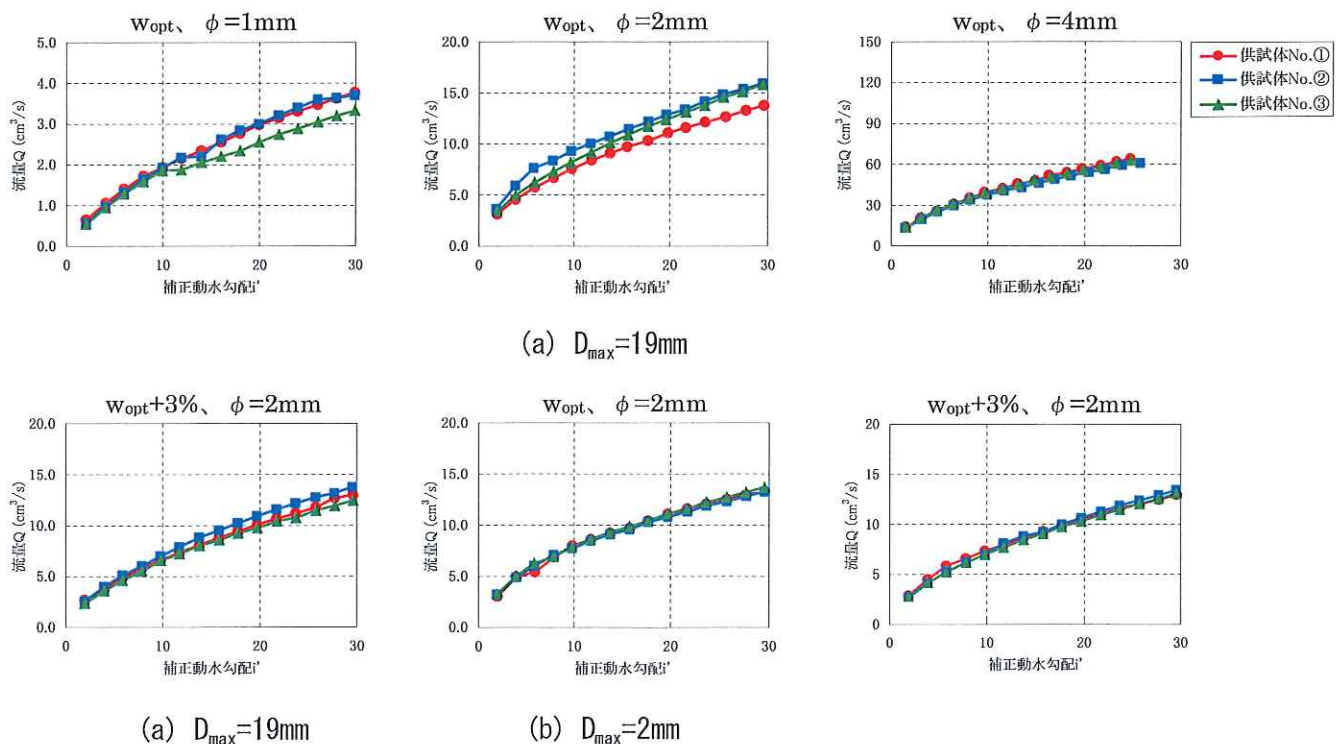


図-7 補正動水勾配と流量の関係 (B材料)

また、 w_{opt} のピンホール径 $\phi=2, 4\text{mm}$ 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。 w_{opt} のピンホール径 $\phi=1\text{mm}$ 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。 $w_{opt}+3\%$ の場合は、ピンホール径が同じであっても最大粒径で a, b の値に若干大きめの差があることがわかる。この理由について、明確なことは不明である。また、 b の値は w_{opt} の場合と比べてやや大きく、 $w_{opt}+3\%$ の $D_{max}=19\text{mm}$ 供試体のケースは b の値の平均が 0.61 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。

5. 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。これは同じA材料を用いて作製したピンホールの無い試供体（直径 100mm 、高さ 127mm ）に、本研究で用いたのと同様の装置を用いて動水勾配を段階的に上昇させて実施した浸透破壊試験の結果として得られた浸透破壊抵抗性の大小関係^{3), 4)}に一致する。
- (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 $\phi=2\text{mm}$ 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 $1\sim 4\text{mm}$ を有するコアの透水性は、せん断変形を受けたコアの透水性増加を十分上回るものであること

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。

6. 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を行った。以下に、得られた成果をとりまとめる。

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 $12\sim 18$ 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 $1\sim 4\text{mm}$ 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。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。

参考文献

- 1) 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、2005.3
- 2) 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、1987.1
- 3) 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
- 4) 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

山口嘉一*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研究
グループダム構造物
チーム上席研究員、工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

佐藤弘行**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研究
グループダム構造物
チーム主任研究員、工修
Hiroyuki SATOH

林 直良***



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研究
グループダム構造物
チーム研究員、工修
Naoyoshi HAYASHI

吉永寿幸****



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研究
グループダム構造物
チーム交流研究員
Hisayuki YOSHINAGA