

◆ ダム分野における新技術特集 ◆

フィルダム用ジオテキスタイルフィルタの効果と適用可能性

古田光弘* 三木博史**

1. はじめに

ロックフィルダムはその築造材料のほとんどに天然材料を用いることから、建設には建設地近傍に良質な築造材料が大量に存在することが必要である。特にゾーン型ダムのロックフィルダムは、中心の遮水ゾーンの上下流側に、半透水ゾーン、透水ゾーンが配置された構造となっており、各ゾーンに適切な材料を用いることが重要である。特にパイピング現象を防止することを目的として、比較的薄く設計される半透水ゾーンはフィルタゾーンとも呼ばれ、厳しい粒度基準(フィルタ五則)を満足する砂礫材料を用いる必要がある。そのため、建設地近傍で粒度基準を満足する砂礫材料が入手不可能な場合は、煩雑な粒度調整をするか、遠方から適正な材料を運搬するなどしなければならず、施工費に大きく影響する。

近年、繊維分野でジオテキスタイルフィルタ(以下、ジオテキフィルタ)という新材料が実用化されている。ジオテキフィルタは主に石油繊維を材料とする不織布で、様々な厚さ、開孔径、引張強度をもつ製品が各社より提案されている。また、工業製品であることから、比較的安価に均質な材料を得ることが可能であるという長所がある。そこで、本材料を遮水ゾーンと半透水ゾーンの間に配置することにより、厳しい粒度基準に適合しない砂礫材料でも、フィルタ材料として用いることができれば、工費を縮減できる可能性がある。

本報は、ジオテキフィルタをロックフィルダムにおける砂礫フィルタの補助材料として用いる際の適用性を調査するため、加圧ダーティウォーター試験および非侵食試験の2種類の試験を実施し、考察を行ったものである。

2. 加圧ダーティウォーター試験(DW試験)

2.1 試験概要

筆者らは既存の試験法に改良を加えた、加圧

Study on the Effect and Potential of Geotextile Filter for Rock-fill Dam Filter Material.

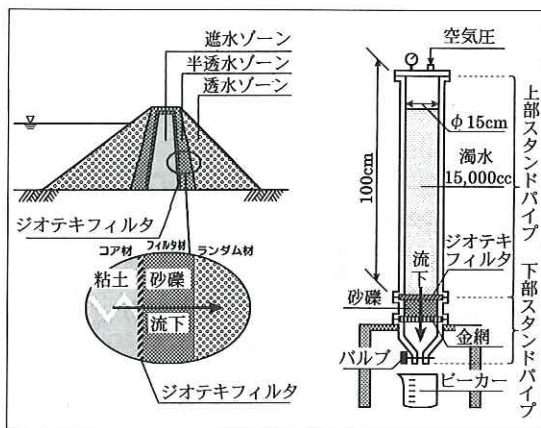


図-1 フィルダムの模式図と DW 試験器の概要

ダーティウォーター試験(以下、DW試験という)を考案し、各種ジオテキフィルタの適応性を調査した。図-1にフィルダムの模式図とDW試験器の概要を示す。

本試験は、遮水ゾーンに亀裂が発生し、貯留水が大水压により亀裂部から遮水ゾーンの材料である粘性土(以下、コア材という)を削り取りながら、濁水となり流れ出すという極限条件を想定した試験である¹⁾。

2.2 試験方法

2.2.1 試験準備

試験の前段階として、準備作業を以下の作業手順で実施した。

- (1) コア材の2mmふるい通過分60gと水道水15,000ccをバケツに投入し、よく攪拌して濁水を作成する。
- (2) 試験器本体下部のバルブを閉じ、下部スタンドパイプを水道水で満たす。
- (3) 下部スタンドパイプ内に、金網(開口:0.105mm)、砂礫フィルタ(厚さ:5.5cm)を設置する。
- (4) 砂礫フィルタを水締めする。突き固めなどは行わない。
- (5) 製造段階で付着した油分に起因する撥水効果が実験に影響を及ぼすことを避けるため、ジ

オテキフィルタ ($\phi 20\text{cm}$) を中性洗剤でよく洗浄し、砂礫フィルタ上に 1 枚設置する。

(6) 上部スタンドパイプ ($\phi 15\text{cm}$) を設置し、バケツに作成した濁水 15,000cc を上部から投入、耐圧蓋を閉じる。

(7) エアコンプレッサにより、耐圧蓋から上部スタンドパイプ内を所定の空気圧に加圧する。

2.2.2 損傷したジオテキフィルタの作製

施工中の各種損傷を考慮して、あらかじめジオテキフィルタに損傷を与えて実験を行うケースも想定した。以下に、各損傷の方法を示す。

(1) 摩擦損傷：図-2a) に示す様な条件下でタンパにより振動締め固めをおこない摩擦損傷を与えた。想定した損傷状況は、タンパによる締め固め、重機の通過などによる、表面の毛羽立ち、圧縮による開孔などである。

(2) 貫入損傷：図-2b) に示す様な条件下で CBR 試験機により貫入損傷を与えた。想定した損傷状況は重機の通過、周囲から突出した粗粒材料など、静的圧迫荷重による突き破りなどである。

(3) 衝撃損傷：図-2c) に示す様な条件下で重錘の自然落下力により衝撃損傷を与えた。想定した損傷状況は、リフト工法による透水ゾーンの盛立てなど、動的な衝撃荷重による突き破りなどである。

(4) 引張損傷：図-2d) に示す様な条件下で引張試験機の引張力により引張損傷を与えた。想定した損傷状況は、敷設時の引張りなどである。

2.3 試験手順

試験は以下の作業手順で実施した。

(1) バルブを開放し、流出する濁水を約 1,000～1,500cc ずつピーカにとる。

(2) 濁水が全て流出したら、スタンドパイプを分解し、砂礫及びジオテキフィルタの状態を観察する。

(3) 各ピーカの濁水に混入するコア材の重量を求める。重量は計測した濁水の濁度から換算して求める。

2.4 試験ケース

試験のケースは、各種条件下での適用の可否の境界を求めることを目的とし、a) 砂礫単体の適用性試験、b) ジオテキフィルタ A の適用性試験、c) 各種ジオテキフィルタの適用性試験、d) 厚さを変化したジオテキフィルタの適用性試験、e) 各種損傷を加えたジオテキフィルタの適用性試験、の 5 群に分けて実施した。各ケースで変化させた条件項目は以下に示す (2)～(4) の 3 項目である。

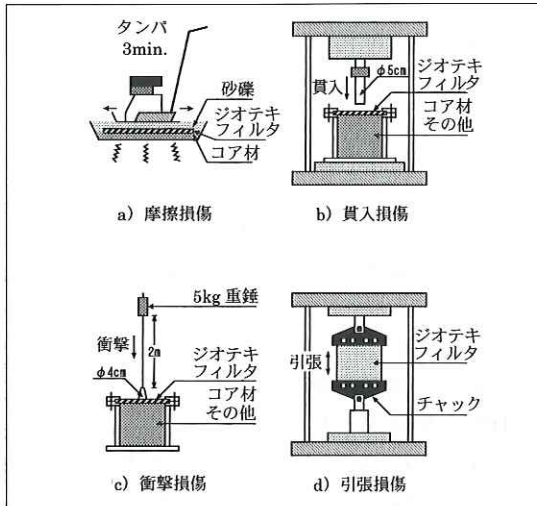


図-2 ジオテキフィルタへの損傷の与え方

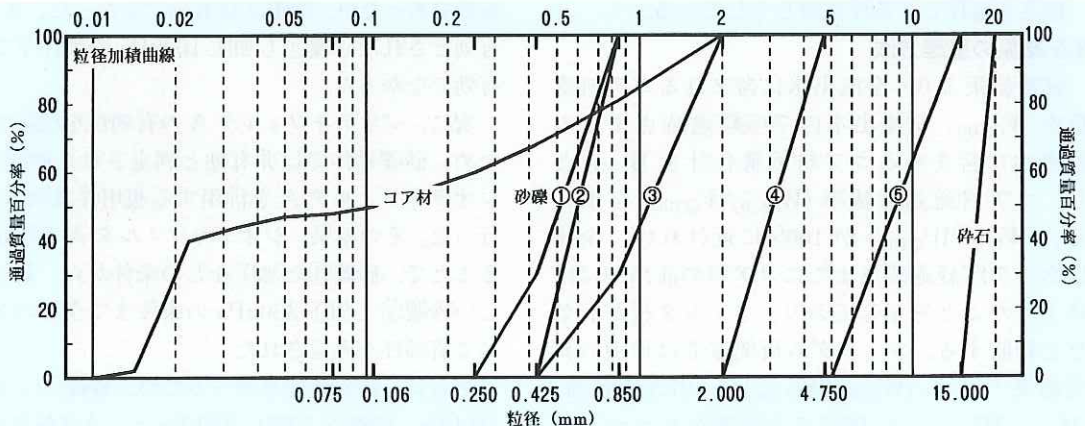


図-3 試験に用いた砂礫フィルタとコア材

表-1 試験に用いたジオテキフィルタ

	厚さ (mm)	開孔径 (mm)	透水係数 (cm/s)	引張強度 (tf/m : kN/m)	引張強度 (kgf : N)	材料種別
ジオテキフィルタ A	3.00	0.11	1.65×10^{-1}	2.16 : 21.2	62.3 : 611	スパン bond系
ジオテキフィルタ B	2.95	0.10	2.27×10^{-1}	2.08 : 20.4	66.0 : 647	
ジオテキフィルタ C	3.10	0.10	1.78×10^{-1}	1.25 : 12.3	44.0 : 431	
ジオテキフィルタ D	3.10	0.11	2.14×10^{-1}	1.25 : 12.3	44.0 : 431	フェルト系
ジオテキフィルタ E	5.00	0.10	3.00×10^{-1}	1.50 : 14.7	46.3 : 454	
ジオテキフィルタ F	10.20	0.10	1.86×10^{-1}	1.64 : 16.1	28.9 : 283	

スパンbond系: ポリエステル、ポリプロピレン系の長繊維をランダムに配列して接合
フェルト系: ポリエステル、アクリル系の再生短繊維を結合

(1) コア材: 実際のダムに用いられた代表的なコア材を用いた。図-3 に粒度分布を示す。

(2) 砂礫フィルタ: 砂礫フィルタとして 5 種類の粒度分布をもつ砂礫を用いた。砂礫①～④は砂岩を最大粒径 5mm でクラッシングしたもので、ふるい分け、配合により、粒度調整を行って作成した。また、砂礫⑤は一般に碎石 6 号と呼ばれるものをそのまま用いた。図-3 に粒度分布を示す。

(3) ジオテキフィルタ: 各社より河川堤防の吸出し防止材として実用化されている材料、全 7 種類を用いた。表-1 に試験に用いたジオテキフィルタの特性を示す。

(4) 圧力: 国内のロックフィルダムには 100～150m 程度の高さのものもある。そのため、遮水ゾーンに完全な亀裂が生じた場合、最大 1500kPa の圧力が直接フィルタ材に作用する可能性がある。本試験では試験器の限界から 300～450kPa までしか加圧していないが、実際のロックフィルダムでは 400cm 以上で施工される砂礫フィルタの厚さを、本試験では 5.5cm と安全率 15 程度を確保して条件を厳しくしている。

2.5 結果の整理方法

試験結果より、全流出水に含まれるコア材重量を W_{Q100} 、全流出水の 70%経過時点までの流出水に含まれるコア材重量合計を W_{Q70} とし、コア材通過重量率 (W_{Q70}/W_{Q100}) を求める。 (W_{Q70}/W_{Q100}) が 100%に近ければ、全流出水の 70%経過時点までにコア材の流出がほぼ終了したことを示しており、フィルタ材が有効だと判断する。フィルダム研究室では以前の研究結果¹⁾ から $(W_{Q70}/W_{Q100}) > 97\%$ で有効、 $(W_{Q70}/W_{Q100}) > 90\%$ では有効かどうかを試験状況から判断するという基準を提案してい

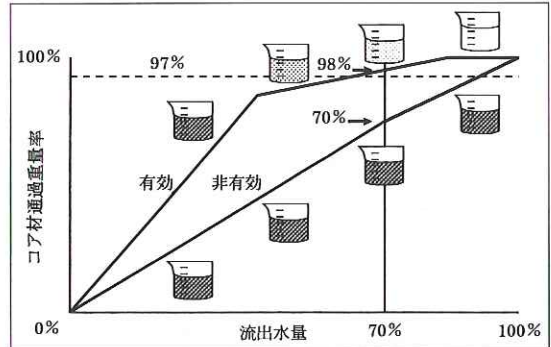


図-4 結果の整理方法

るが²⁾、今回は $(W_{Q70}/W_{Q100}) > 97\%$ は問題なく有効、損傷を与えたジオテキフィルタに関しては、 $(W_{Q70}/W_{Q100}) > 90\%$ ならば損傷が加わっても大きな能力低下がないと判断し有効とした（図-4 参照）。

2.6 試験結果

2.6.1 DW 試験結果

DW 試験結果を表-2 に示す。

まず、通常のロックフィルダムと同様に砂礫フィルタ単体の場合について適用性試験 a) を行った。その結果、加圧なしの条件下では、砂礫①、②は有効であったが、砂礫③は有効でなかった。また、有効とされた砂礫②も加圧 100kPa の条件下では有効でなかった。

次に、ジオテキフィルタ A の有効性を検証するため、砂礫単体では非有効と判定された砂礫に、ジオテキフィルタ A を併用する適用性試験 b) を行った。その結果、ジオテキフィルタ A を併用することで、砂礫③と加圧なしの条件から、最も厳しい砂礫④と加圧 300kPa の条件まで全てのケースで有効性が確認された。

さらに、限界性能を調べるため、砂礫④で加圧 450kPa、砂礫⑤で加圧 300kPa という試験を行った結果、非有効との結果を得たが、それほど急激

表-2 DW 試験結果
a) 砂礫単体の適用性試験

砂礫単体	砂礫①	砂礫②	砂礫③
加圧なし	○99%	○99%	×60%
加圧100kPa		×測定不可	

b) ジオテキフィルタ A の適用性試験

ジオテキフィルタ A	砂礫③	砂礫④	砂礫⑤
加圧なし	○99%		
加圧100kPa	○98%		
加圧200kPa	○97%		
加圧300kPa	○97%	○97%	△95%
加圧450kPa		△91%	

c) 各種ジオテキフィルタの適用性試験

砂礫④	ジオテキフィルタ				
	B	C	D	E	F
加圧300kPa	○97%	△95%	×測定不可	×測定不可	×測定不可

d) 厚さを変化したジオテキフィルタの適用性試験

厚さ (mm)	1.50	2.00	3.00	4.00	6.00
引張強度 kN/m	9.7	13.0	21.6	33.0	68.6
ジオテキ フィルタ A	×89%	△95%	○97%	○97%	○97%

e) 各種損傷を与えたジオテキフィルタの適用性試験

砂礫④ 加圧300kPa	摩擦損傷 タンバ3分	貫入損傷	
		500kPa	1,000kPa
ジオテキフィルタ A	○95%	○←	○95%
ジオテキフィルタ B	○95%	○←	○95%
ジオテキフィルタ C	×70%	×76%	×70%

砂礫④ 加圧300kPa	衝撃損傷		
	砂礫	ベース材	ローム
ジオテキフィルタ A	○93%	○96%	○93%
ジオテキフィルタ B	○95%	○93%	○95%
ジオテキフィルタ C	×74%	×88%	×70%

砂礫④ 加圧300kPa	引張損傷		
	10%	25%	50%
ジオテキフィルタ A	○←	○←	○96%
ジオテキフィルタ B	○94%	○94%	×70%
ジオテキフィルタ C	×70%	×70%	×70%

○有効、△非有効 (抵抗有)、×非有効 百分率: (W_{Q70}/W_{Q100}) の値
な性能低下を起こさないことが確認できた。

また、上記の条件下からジオテキフィルタを同程度の開孔径をもつ各種ジオテキフィルタに変更して、適用性試験 c) を行った。その結果、ジオテキフィルタ B についてはほぼ同様に高いコア材流出防止効果が確認されたが、ジオテキフィルタ C、D、E、F については有効性が認められなかった。

しかし、ジオテキフィルタ C にはある程度のコア材流出防止効果が見られ、ジオテキフィルタ A、B に似た挙動を示したのに対し、ジオテキフィルタ D、E、F については、同程度の開孔径をもつにもかかわらず、激しい濁水の流出により計測さえ不可能であり、全く有効性が認められなかった。

以上の相違はジオテキフィルタの製法に起因するものと考えられる。スパンボンド系ジオテキフィルタは長繊維を重ね合わせるように製造されているのに対し、フェルト系のジオテキフィルタは短繊維を圧縮して製造される。そのため、スパンボンド系に比較して引張に対する抵抗力の弱いフェルト系は高水圧に対して容易に開孔径を拡大する傾向があり、有効性が認められなかったものと考えられる。

一方で、厚さのみ異なる同じ性質のジオテキフィルタ間での適用性試験 d) も行った。厚さ 3.00mm 以上のジオテキフィルタについていずれも有効であったのに対し、薄いジオテキフィルタでは効果も低くなることが確認された。引張に対する抵抗力の大きいスパンボンド系ジオテキフィルタであっても、薄いものは引張抵抗力も小さく非有効となりやすい傾向があると思われる。

2.6.2 損傷試験結果

損傷試験結果を表-2 に合わせて示す。適用性試験 e) の結果、有効性が確認されたスパンボンド系ジオテキフィルタでは、いずれも試験においてもジオテキフィルタ A、B のコア材通過重量率は 95%程度と高いコア材流出防止効果が確認され各種損傷に対して高い耐久性が確認されたのに対し、ジオテキフィルタ C はほとんどの損傷に対して 70%を示し、各種損傷に対してほとんど耐久性を発揮しないことが判明した。

また、試験の目視状況から引張損傷を与えたケースでは他の損傷のケースに比べ激しい流出状況を示し引張損傷に対する耐久性の弱さが懸念された。

これらの試験状況から、ジオテキフィルタ A、B が有効であったこと、厚さ 3.00mm 以上のジオテキフィルタ A が有効であったこと、ジオテキフィルタが引張損傷に対して弱点を露呈しやすいことなどを勘案すると、有効と非有効の境界は概ね引張強度に支配されており、今回の試験においては引張強度 20kN/m が境界であることがわかった。

以上の結果より、引張強度 20kN/m 以上のジオテキフィルタを用いて、過度の引張負荷を作用させないように注意して施工することが重要であるという結果が得られた。万が一、過度の引張負荷が作用することが懸念される場合は、同じ物性のジオテキフィルタなら厚さの大きな強度の高い材料を用いることが望ましいといえる。

3. 非侵食試験 (NEF 試験)

DW 試験が、泥水状態のコア材に対するジオテキフィルタの面的な限界性能を調査する試験であるのに対し、非侵食試験 (以下、NEF 試験という) は亀裂の入ったコア材に対するジオテキフィルタの性能を調査する試験である。図-5 に NEF 試験器の概要を示す。

3.1 NEF 試験の概要

NEF 試験は、フィルダムの遮水ゾーンを模した突固めた粘性土に、直径 1mm もしくは 2mm のピンホールを空け、高圧水を作用させるといものである。試験は以下の手順で行う。

- (1) 下部筒の内部が、図-5 に示す構成になるように、図-3 に示すような粒度分布を持つ各試料土 (碎石、砂礫④、周辺材、コア材) を投入する。碎石、砂礫フィルタは木槌で試験器側面を軽く叩くことにより振動締固めを行う。
- (2) 洗剤で油分を除去したジオテキフィルタを配置し、上部筒を接続することで挟み込む。
- (3) 上部筒の内部にコア材を作成する。コア材は、最大乾燥密度 ρ_{dmax} の 90~95% を満足す

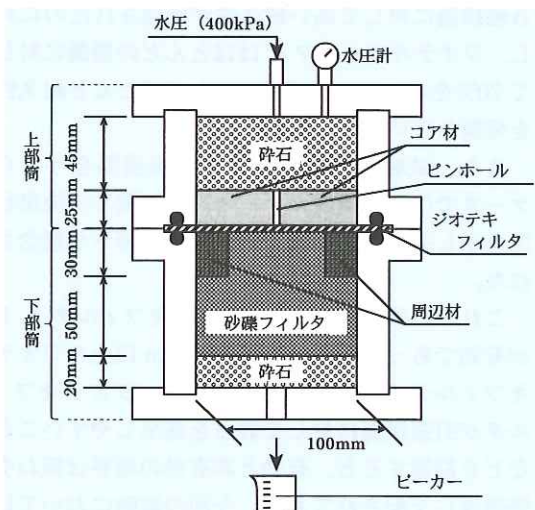


図-5 NEF 試験器の概要

るように、ランマ落下高さ 8cm、突固め回数 10 回、3 層仕上げの条件で成形する。

- (4) コア材に直径 1mm もしくは 2mm の針金を貫入してピンホールを空ける。
- (5) 上部碎石を投入、上部蓋を閉め、上部バルブに耐圧ホースを接続する。
- (6) 400kPa の水圧を加圧し、上部バルブを開放して実験を開始する。
- (7) 実験開始から流出開始までの時間を記録し、その後 1 分間隔にピーカに流出水の採水を行う。実験は 12 分が経過するまでとする。
- (8) 採水された流出水の水量、濁度を計測する。

試験結果の判定は、流出水の濁度、流出速度、加積侵食指数 ($\Sigma E_i = \Sigma (\text{流出量 } Q_i \times \text{濁度の経時変化度 } D_i)$) に着目した。フィルダムの安定においては、漏水の速度、コア材の流亡が危険因子であるから、流出速度が遅く、濁度が小さいほうが望ましく、その積が速やかに極小に落ち着く結果が得られたジオテキフィルタほど有効だと考えられる³⁾。

3.2 試験ケース

試験に用いたコア材及びジオテキフィルタは、DW 試験と共通である (前出の図-3、表-1 参照)。試験ケースは、単体ではフィルタとして適用できない粗粒の砂礫フィルタ④に、ジオテキフィルタの種類、ジオテキフィルタへの損傷の有無、ピンホールの径などを組み合わせて決定し、コア材の流亡が阻止可能か否かを試験した (なお、DW 試験で非有効と判断されたジオテキフィルタ E, F は今回試験を実施しなかった)。

3.3 試験結果

図-6 にピンホール径 1mm の試験結果を示す。濁度がバラつかず減少傾向、流速が減少傾向、加積侵食指数の傾きが小さいものを有効とした。

上述の判定法に従って適用の可否を検討した結果、得られた試験結果を表-3 に合わせて示す。

先に行った DW 試験の結果からも明らかのように、ジオテキフィルタは高圧水下においては目が開くことで実質の開孔径が大きくなり、引張強度の弱い材料は非有効になりやすいという傾向を得ているが、今回の試験においてもジオテキフィルタ C, D が非有効と判断されたことでその傾向は裏付けられている。

また、損傷を与えたケースでは各損傷モードでコア材流亡防止能力が減少し、いずれのケースで

も有効と判断されたのは 6mm 厚のジオテキフィルタ A だけであったが、これは厚さが大きい材料の方が各種損傷による影響を受けにくいと考えられる。

表-3 試験結果

砂礫④ 加圧 400kPa	ピンホール 径 1mm	ピンホール 径 2mm	摩擦損傷	衝撃損傷	引張尊重
ジオテキ フィルタ A	6.0mm 厚	○	○	○	○
	3.0mm 厚	○	○	×	×
	1.5mm 厚	○	△	—	—
ジオテキフィルタ B	○	○	△	×	△
ジオテキフィルタ C	△	×	—	—	—
ジオテキフィルタ D	×	×	—	—	—

○有効、△非有効(抵抗性あり)、×非有効(抵抗性なし)

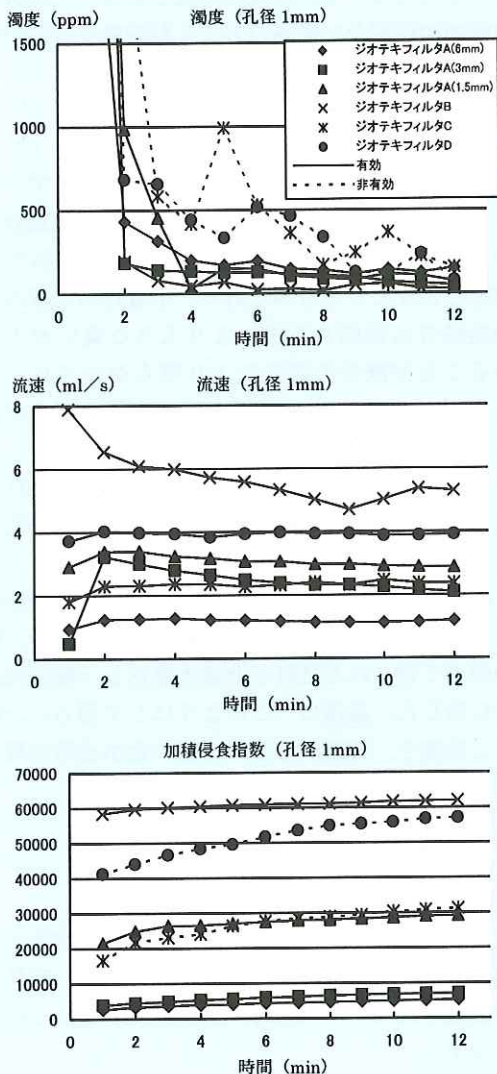


図-6 試験結果グラフ

4. まとめ

筆者らが、DW 試験および NEF 試験の実施により、各種ジオテキフィルタのフィルダムへの適用性を調査した結果、以下の知見が得られた。

- 1) フィルダムのような高水圧が作用する条件下で、ジオテキフィルタに高水圧が作用した場合、引張力によりジオテキフィルタの目が開き開孔径は性能試験により求めた数値よりも大きくなるため、厚めのスパンボンド系ジオテキフィルタを用いて損傷による性能の低下を防ぐ必要がある。
- 2) ジオテキフィルタは一般に引張損傷に対して弱点を露呈しやすいため、今回の試験によれば引張強度 20kN/m を適用境界として、ジオテキフィルタの適用の可否を決定すればよい。

ジオテキフィルタの適用によるフィルダム施工のコスト削減効果は大きいと思われるため、今後はジオテキフィルタの長期安定性などについて追求し、実際への適用へ向けて検討していきたい。

なお、本研究の実施にはフィルダム研究室の山口主任研究員(現室長)、川崎研究員に多くの助言等頂きました。末尾ながら、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤原ほか：フィルダムコア材の分散性と適切なフィルタ，土木研究所資料第 3100 号，1992.2
- 2) 中村ほか：非侵食試験によるフィルタ機能の評価，土木研究所資料第 3236 号，1994.1
- 3) 三木ほか：加圧ダークティウォータ試験によるジオテキフィルタスタイルフィルタのフィルダムへの適用性調査，第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1885-1886,1998.7

古田光弘*



建設省土木研究所
材料施工部土質研究室
研究員
Mitsuhiro FURUTA

三木博史**



同 土質研究室長、工博
Dr.Hiroshi MIKI