

水平一次元流条件下での原位置浸透破壊試験

山口嘉一¹・吉田 等²・綿谷博之³

¹正会員 工博 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室 室長 (〒305-0804茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工修 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室 室長 (〒305-0804茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 株式会社建設技術研究所福岡支社地質部 (〒810-0041福岡県福岡市中央区大名2-4-12)

近年、わが国では、ダム基礎地盤が軟岩や砂礫層で構成される事例が増えている。これら強度の小さい地盤に対しては、設計時にその浸透破壊抵抗性を精度良く、かつ効率的に評価する必要がある。

本研究では、針貫入試験やピック貫入試験などの簡易試験および室内浸透破壊試験による既往調査から、浸透破壊抵抗性が極めて小さいと評価されていた砂礫層に対して原位置浸透破壊試験を実施した。原位置試験は、結果の解析が容易な水平一次元流条件下で行った。ここでは、原位置浸透破壊試験の方法と結果について報告するとともに、既往の研究成果も踏まえて、ダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性に対する調査方針を提案した。

Key Words : *soft rock, gravel deposit, dam, seepage failure, in-situ test*

1. はじめに

良好な地質条件のダムサイトの多くが既に選択的に開発されたため、軟岩、風化岩、破碎岩といった強度の小さい岩盤や砂礫層上にダムを建設する事例が近年増加してきている。このようなサイトにおけるダム建設では、湛水時の基礎地盤の浸透破壊に対する安全性の評価と必要に応じた対策工の検討が必要となる。そのため筆者らのグループは、ダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性を精度良く、かつ効率的に評価するための研究を進めている¹⁾⁶⁾。

まず、ダム基礎地盤は、その調査対象範囲が極めて広いうえ、かなり多くの種類の地質で構成されていることが一般的であるため、針貫入試験やピック貫入試験などの簡易試験による浸透破壊抵抗性の概略評価に関する研究を行い¹⁾、精査としての室内および原位置浸透破壊試験の効率的な実施を可能にした。

次に、簡易試験結果を参考に、対象地質を限定して現場から乱さない試料を採取し、それに対して室内浸透破壊試験を行う。室内浸透破壊試験については、既往の研究成果も参照したうえで、ダム基礎地盤から採取した試料を対象とした標準的な試験方法と結果の解析方法を提案した²⁾。なお、浸透破壊抵抗性の指標としては、限界動水勾配を採用している。

最後に、簡易試験と室内浸透破壊試験の結果を総合的に分析して、浸透破壊抵抗性が極めて小さい地質、つまり限界動水勾配が1桁程度と評価された地質に対しては、室内試験に比べて大規模でその物性の不均一性を包含して評価できる原位置浸透破壊試験を実施することを提案している。しかし、筆者らのグループが原位置浸透破壊試験に関する研究を始める時点では、Tosabayashi *et al.*⁷⁾、松本ら⁸⁾、米国内務省開拓局 (USBR)⁹⁾の単一のボーリング孔からの注水による単孔注水式試験を用いた研究事例がある程度であった。まず、筆者らのグループは、理論的検討により単孔注水式試験の問題点を明らかにしたうえで³⁾⁴⁾、これらの問題点を解決するために、複数の隣接したボーリング孔から注水する多孔注水式試験³⁾⁴⁾や、単一のボーリング孔から揚水するとともに周辺のボーリング孔での水位変化を観測する単孔揚水式試験⁵⁾⁶⁾を提案し、現場での実証試験を行った。これらの新たに提案した原位置浸透破壊試験を用いることで基礎地盤の浸透破壊抵抗性評価の精度をかなり高めることができた。しかし、これらの試験には、限界動水勾配の算出や浸透破壊発生を観察等に関して解決すべき課題があり、標準的な試験仕様の確立には至っていない。

以上のような既往の研究経緯および解決すべき課題を踏まえて、本研究では、試験対象地盤において大型の

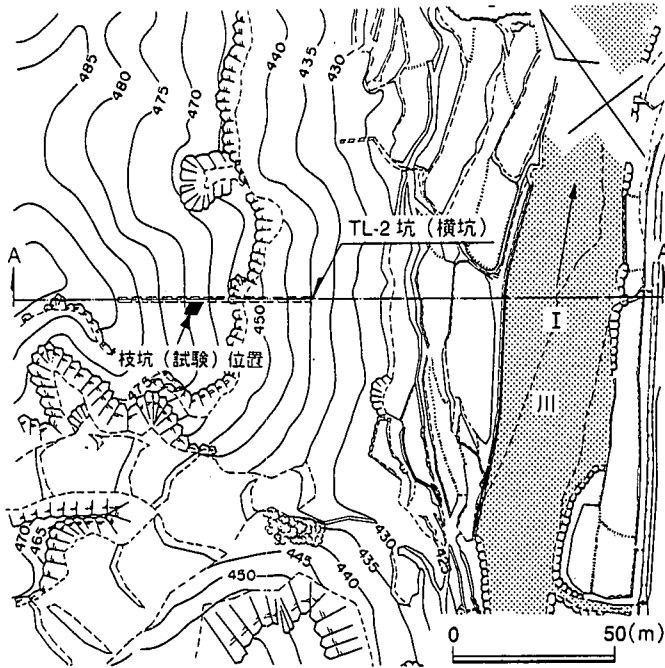


図-1 試験サイトの平面図

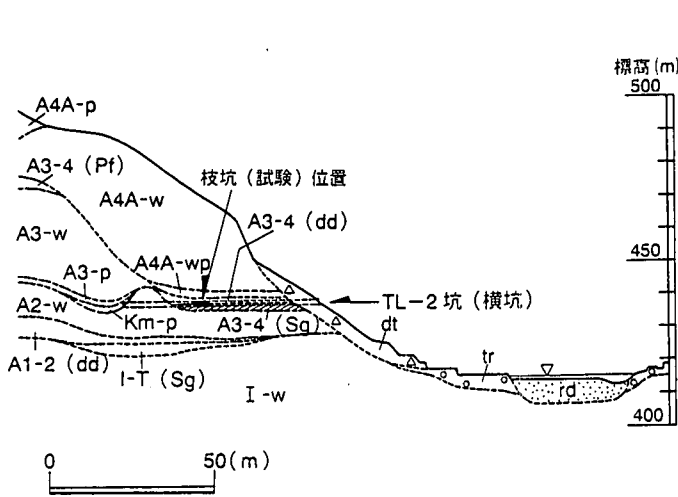


図-2 A軸方向の地質断面

凡 例

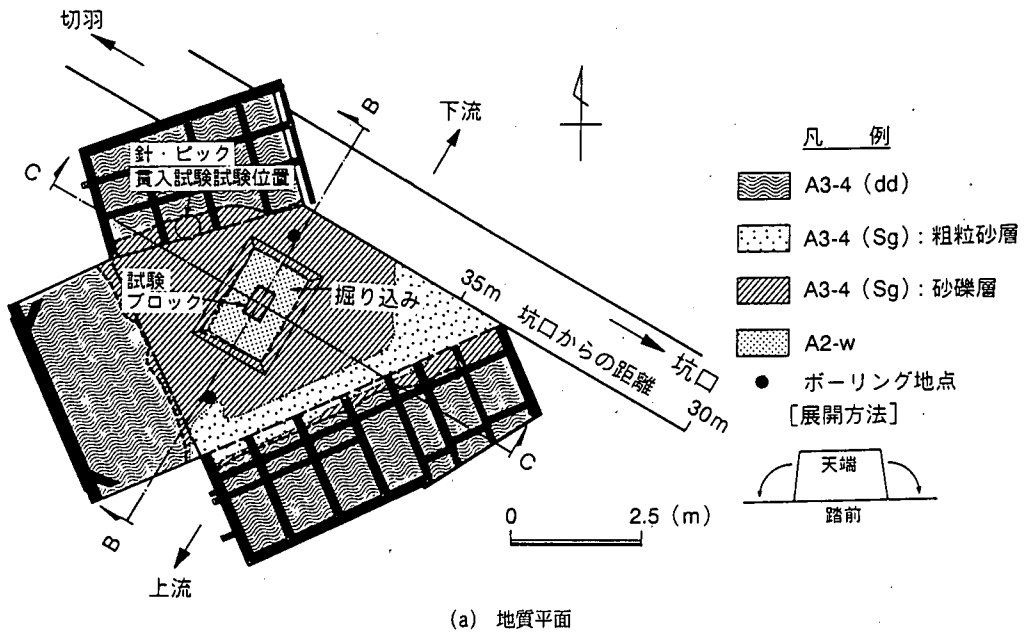
地質時代	地質記号	地 層 名
完 新 世	rd	現河床堆積層
	dt	崖錐堆積層
	tr	段丘堆積層
新 第 更	A4A-w	火砕流5 溶結凝灰岩
	A4A-wp	細粒軽石凝灰岩
	A3-4 (Pf)	降下火砕物
	A3-4 (dd)	岩屑流堆積物2
	A3-4 (Sg)	水成堆積物2
生 四 新	A3-w	火砕流4 溶結凝灰岩
	A3-p	軽石凝灰角礫岩
	Km-p	火砕流3 軽石凝灰角礫岩
	A2-w	火砕流2 溶結凝灰岩
	A1-2 (dd)	岩屑流堆積物1
	I-T (Sg)	水成堆積物1
代 紀 世	I-w	火砕流1 溶結凝灰岩

直方体試験ブロックを切り出し、適切な周囲止水を施した後、限界動水勾配の算出が容易となる水平一次元浸透流を試験ブロックに発生させる原位置浸透破壊試験方法の開発を目的としている。なお、原位置試験前に簡易試験や乱さない試料に対する室内浸透破壊試験を実施し、これらの結果により原位置試験の精度を検証するとともに、対象地盤の浸透破壊抵抗性を総合的に評価する。最後に、得られた成果に基づいて、ダム基礎地盤を対象とした浸透破壊抵抗性調査方針を提案する。

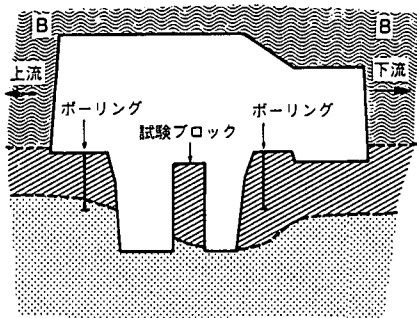
2. 試験対象地盤の地質概要と物性

(1) 地質概要

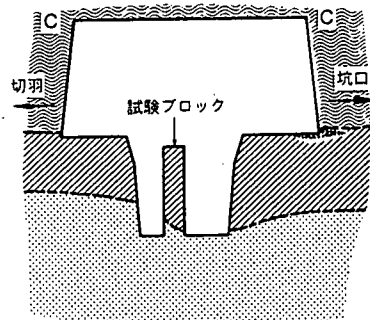
試験サイトには、火砕流堆積物（溶結凝灰岩、軽石凝灰角礫岩）および火砕流間の堆積物（降下火砕物、岩屑流堆積物、水成堆積物）が分布する。試験サイトの平面図を図-1に、試験を実施したTL-2坑（横坑）軸に一致するA軸方向の地質断面を図-2に示す。地層名は、火砕流堆積物に対しては時代の古いものから1, 2, 3, …と番号を付けるとともに、その層相を示した。また、各火砕流間の堆積物に対しては、その成因に着眼した名



(a) 地質平面



(b) B軸方向地質断面



(c) C軸方向地質断面

図-3 TL-2坑の枝坑内の地質分布

称のみとし、火砕流堆積物と同様、同一名称となるものについては時代の古いものから番号を付けた。以下、地層名は図-2の凡例中の地質記号で表現する。

試験対象地質は、図-2中の水成堆積物2 (A3-4 (Sg)) である。A3-4 (Sg) は、横坑調査やボーリング調査結果より、数10cm~数mの層厚での連続した分布が推定されている。層相は、直径5~6cm以下の礫 (石英安山岩礫、スコリア礫、軽石礫) を多く含む緩い砂礫層を主体とするが、散在的に連続性のない粗粒砂層や細粒凝灰質砂層を含む。ここで、スコリアと軽石は、ともに火山碎屑物の一種で、密度の小さい多孔質なものを指すが、このうち黒色を呈するものがスコリア、淡黄色を呈するものを軽石と定義されている。

試験は、A3-4 (Sg) の代表的層相を最も広い範囲で観察できるTL-2坑の枝坑中央部で実施した (図-1, 図-2参照)。枝坑内で観察される地質分布の詳細を図-

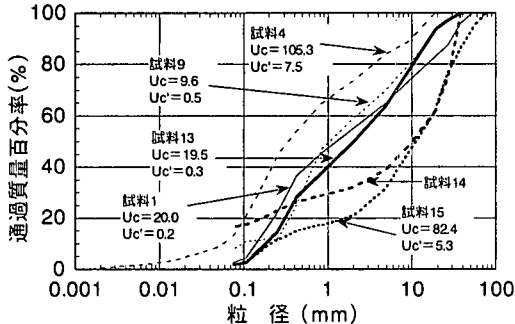
3に示す。なお、B軸およびC軸方向の地質断面は、試験前に実施したボーリング調査や試験ブロック切り出し時の観察結果などから推定した。

枝坑内の踏前から天端にかけては、スコリア凝灰岩およびスコリアと軽石の混在層からなるA3-4 (dd) が分布する。踏前から下位には、試験対象地質のA3-4 (Sg) が層厚1~2mで分布し、その下位には非溶結~弱溶結凝灰岩からなるA2-wが分布する。枝坑の本坑坑口側の踏前付近には、A3-4 (Sg) 中の粗粒砂層が層厚10数cmで分布するが、連続性はない。したがって、試験対象となる枝坑中央部はA3-4 (Sg) の砂礫層が主体をなす。ただし、砂礫層の礫間を充填する基質中に、層厚数cm規模のブロック状の細粒凝灰質砂が散在するが、図-2中にはその分布位置を示していない。以下、A3-4 (Sg) は、特に断りのない限り、その代表層相である砂礫層のみを指すものとする。

表-1 A3-4 (Sg) の物性値一覧

試料番号	採取方法	粒 度 試 験										土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	湿润密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比 e	自然含水比 w_n (%)	飽和度 S_r (%)	透水係数 k (cm/sec)		
		含有率 (%)					粒 径 (mm)												均等係数 U_c	曲率係数 U_c'
		礫分	粗砂分	細砂分	シルト分	粘土分	最大	D_{60}	D_{30}	D_{10}										
1	US	44.9	18.6	33.9	1.1	1.5	37.5	3.0	0.31	0.15	20.0	0.2	2.727	-	-	-	-	-	-	
2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.672	1.516	0.889	-	33.1	-	
3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.710	1.551	0.846	-	34.7	-	
4		26.0	20.0	41.0	11.0	2.0	19.0	0.6	0.16	0.0057	105.3	7.5	2.864	-	-	-	-	-	-	
5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.5×10 ⁻¹
6		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.691	1.528	0.879	10.7	34.9	1.9×10 ⁻¹
7		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.691	1.535	0.871	10.2	33.6	-
8		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.691	1.540	0.864	9.8	32.5	-
9		41.0	34.0	17.0	8.0	0.0	26.5	2.1	0.48	0.22	9.6	0.5	2.871	-	-	-	-	-	-	-
10		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.595	1.456	0.921	9.6	29.0	3.7×10 ⁻²
11		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.635	1.502	0.863	8.9	28.8	-
12		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.625	1.518	0.836	7.0	23.4	1.8×10 ⁻²
13	DS	49.9	21.5	26.7	1.9	26.5	3.9	0.44	0.2	19.5	0.3	2.797	-	-	-	-	-	-	-	
14		78.7	6.1	13.3	1.9	26.5	17.3	1.39	-	-	-	-	-	2.788	-	-	-	-	-	
15		67.7	5.7	9.6	17.0	53.0	17.3	4.4	0.21	-	-	-	-	2.872	-	-	-	-	-	

US:乱さない試料, DS:乱した試料.



※試料番号は表-1による.

図-4 A3-4 (Sg) の粒径加積曲線

なお、地下水位は、既往調査のボーリング孔内水位から、枝坑踏前の下位18m付近に分布することがわかっている。

(2) 物 性

枝坑踏前および枝坑周辺の本坑側壁から採取したA3-4 (Sg) 試料に対する土質試験結果として得た物性値の一覧を表-1に示す。なお、試料1~12は、内径11.4cm、高さ11.4cmの円筒形モールドにて採取した乱さない試料で、試料13~15は、それぞれ無作為に10kg程度を採取した乱した試料である。以下に当地質の物性値を整理する。

① 図-4に粒度試験を実施した6試料の粒径加積曲線を示す。粒径加積曲線にはばらつきがみられるが、乱さない試料1, 4, 9は、サンプリング手法の違いによる影響を受け、乱した試料13~15と比べて、最大粒径の差はあまり大きくないが、礫分含有率がかなり小さいことがわかる。

② 土粒子の密度は、石英安山岩礫の密度を強く反映し、 $\rho_s=2.8\text{g/cm}^3$ 前後の高い値を示す。

③ 密度は、湿润密度 $\rho_t=1.59\sim 1.71\text{g/cm}^3$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.45\sim 1.56\text{g/cm}^3$ である。

④ 間隙比は、 $e=0.83\sim 0.93$ とやや大きい値を示す。

⑤ 自然含水比は、 $w_n=7.0\sim 10.7\%$ で、飽和度は、 $S_r=23.4\sim 34.9\%$ である。飽和度が20~30%台と小さいのは、前述したように、地下水面が枝坑踏前よりかなり低いところに分布することに加え、次に示す高い透水性に起因する小さい保水性によると考えられる。

⑥ 透水係数は、室内透水試験で求めており、 $k=1.8\sim 1.9\times 10^{-1}\text{cm/sec}$ と大きい値を示す。

以上のような物性、特に比較的大きい間隙比および透水係数から、A3-4 (Sg) の浸透破壊抵抗性は小さいと予想された。

3. 簡易試験と室内浸透破壊試験

山口ら¹⁾は、針およびピック貫入試験、洗掘抵抗試験といった簡易試験のほか、一軸圧縮試験や室内浸透破壊試験を本論文で対象としている試験サイト近傍の多くの地層に対して実施し、簡易試験結果と一軸圧縮強さおよび限界動水勾配に比較的良好な相関があることを示した。

本章では、既往の研究成果¹⁾のうち、A3-4 (Sg) に限って、針およびピック貫入試験結果と室内浸透破壊試験結果を整理しておく。なお、室内浸透破壊試験結果については、今回一部再評価を行ったが、限界動水勾配値に大きな変化はなかった。また、既往の研究では従来単位系を用いていたが、本論文文中では適宜SI単位系に変換して示す。

(1) 針およびピック貫入試験

針およびピック貫入試験は、それぞれ最大径0.84mm

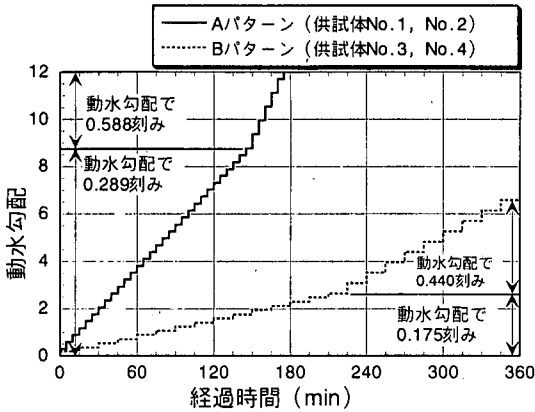


図-5 室内浸透破壊試験の昇圧パターン

の木綿針¹⁰⁾および中村、佐々木¹¹⁾がその形状を決定したピックを試験対象地盤に貫入させ、貫入荷重と貫入量を計測する。得られた貫入荷重を貫入量で除することにより、それぞれ針貫入勾配NP (N/mm) およびピック貫入勾配PP (N/mm) を算出する。ただし、試験器の最大貫入荷重と最大貫入量は、それぞれ98Nと10mmである。

両試験は、TL-2坑の枝坑を掘削する前に、枝坑坑口に相当する深度35m付近の本坑上流側側壁で、礫間の基質部を対象に各7点で行っている。

7点で得られたNP (N/mm) とPP (N/mm) の(最大値, 最小値, 平均値)は、それぞれ(0.3, 0.0, 0.04), (0.5, 0.0, 0.14)と極めて小さい値を示す。これは、表-1からも明らかのように、A3-4 (Sg) の未固結な基質部の間隙が大きいことに起因していると考えられる。

山口ら¹²⁾は、NPおよびPPと一軸圧縮強さ q_u との関係を分析し、 $NP \leq 2N/mm$ および $PP \leq 4N/mm$ となる地層は $q_u \leq 0.1MN/m^2$ となることを示している。また、山口ら²⁾が別途実施した研究成果から、 $q_u \leq 0.1MN/m^2$ の地層は、浸透破壊抵抗性の指標である限界動水勾配 i_{cr} が10程度以下となることを示している。これらの成果と上記のNPおよびPPの値から、今回試験対象としているA3-4 (Sg) の浸透破壊抵抗性はかなり小さいと推定される。

(2) 室内浸透破壊試験

(1)節の針およびピック貫入試験位置から採取したA3-4 (Sg) の乱さない4試料からそれぞれ作製した供試体No.1~4に対し、室内浸透破壊試験を行った。

供試体は、No.1とNo.3が直径11.4cm、高さ11.4cmの円柱形、No.2とNo.4が直径20.0cm、高さ20.0cmの円柱形である。また、試験は、既に提案している標準的な試験方法に従って実施した¹²⁾。詳細は文献1)および2)を参照されたい。

昇圧は、供試体を十分飽和させた後、図-5に示す動水勾配により規定した2種類のパターンに従って行った。

表-2 限界動水勾配候補の一覧
(山口ら¹⁾による、一部再評価)

供試体No.	ib	iu	id	if
1	8.18	1.75	2.63	8.18
2	5.26	4.39	2.34	5.26
3	6.14	5.70	1.40	6.14
4	5.70	0.53	2.11	5.70

表-3 限界動水勾配と簡易試験結果
(山口ら¹⁾による、一部再評価)

供試体No.	icr		NP(N/mm)	PP(N/mm)
	個別	平均	平均	平均
1	1.75	1.51	0.04	0.14
2	2.34			
3	1.40			
4	0.53			

なお、供試体No.1と供試体No.2はAパターンで、供試体No.3とNo.4はBパターンで昇圧した。

浸透破壊抵抗性の指標となる限界動水勾配 i_{cr} の候補として、以下の4種類の動水勾配を求めた¹⁾。

ib: 流量と動水勾配の比例限界点での動水勾配。限界点を求める際、動水勾配と透水係数の関係も参考にする。

iu: 供試体上面で、最初の噴砂が確認されたときの動水勾配。

id: 供試体上面の変位と動水勾配の関係における変位急変点での動水勾配。なお、供試体表面の耐力が低下したことによる沈下方向への変位が発生する場合は、沈下方向への変位が発生する直前の動水勾配をidとする。

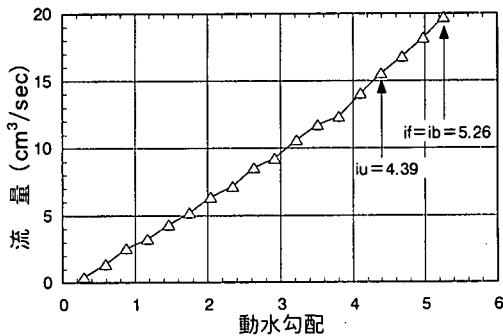
if: 供試体が完全に破壊する直前の動水勾配。

試験結果より求めたib, iu, id, ifを表-2に示すとともに、一例として供試体No.2の流量、透水係数および変位と動水勾配との関係を図-6に示す。供試体No.2と同様、全ての供試体において動水勾配と流量および動水勾配と透水係数の関係において、明瞭な変化点が認められないため、供試体が完全に破壊した直前の動水勾配時点を流量の急増点とみなし、ib=ifとした。

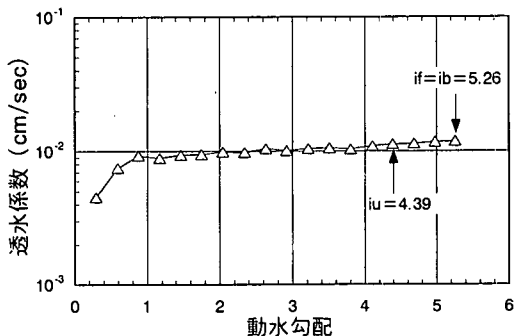
なお、試験終了後の供試体解体時の観察結果から、水の流れを阻害し、試験結果に影響を及ぼすような大礫が供試体内に存在していなかったことを確認している。また、表-2より、供試体寸法や昇圧パターンの違いによる各動水勾配に与える顕著な影響は認められない。

限界動水勾配 i_{cr} は、設計上安全側の立場から、ib (=if), iuおよびidの最小値として決定している。その結果、噴砂発生開始時の動水勾配iuか、供試体上面の変位急変点の動水勾配idを i_{cr} として採用した。表-3にA3-4 (Sg) の i_{cr} を前述のNPおよびPPの平均値とともに示す。

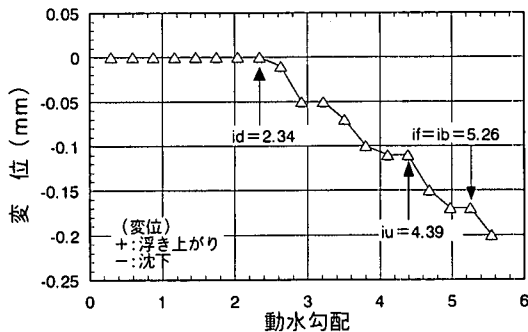
4供試体の i_{cr} は、0.53~2.34の範囲にあり、その平均値



(a) 動水勾配と流量の関係



(b) 動水勾配と透水係数の関係



(c) 動水勾配と供試体表面変位の関係

図-6 室内浸透破壊試験結果の一例 (供試体 No.2)

は1.51である。

(1)節の簡易試験結果と既往の研究成果²⁾から、A3-4 (Sg) の浸透破壊抵抗性は限界動水勾配で評価した場合、10以下の小さい値であることが推定された。実際に室内浸透破壊試験結果として得た4供試体の i_{cr} の平均値は1.51であった。さらに、限界動水勾配候補の最大値を与える完全破壊直前の動水勾配 i_r の4供試体平均値でも6.32と10より小さい値である。

ダム基礎地盤の限界動水勾配として、1.51という値はかなり小さいと考えられるので、より詳細に検討するために、室内浸透破壊試験より大規模に、かつ原位置のありのままの地盤に対して実施する原位置浸透破壊試験を

実施することが必要であると考えた³⁾。

4. 原位置浸透破壊試験の方法

原位置浸透破壊試験は、実際のダム基礎地盤を想定し、その不均一性をできる限り考慮できる規模で、かつダム湛水後の基礎地盤に作用する浸透流状況に近く、結果の解釈が容易な水平一次元流条件下で実施することが望まれる。

本研究では、この考え方に従って、試験対象地質であるA3-4 (Sg) から大規模な直方体ブロックを切り出して供試体とし、水平一次元流条件下での原位置浸透破壊試験を実施した。

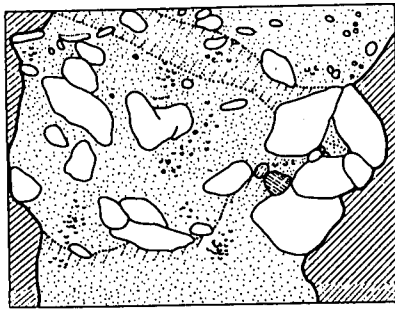
(1) 試験ブロックの切り出し

試験ブロックは、高さ30cm、幅40cm、長さ60cmの直方体とし、枝坑中央部で通水方向に設定したブロック長手方向が河川の流向と概ね平行 (TL-2坑軸に直交) となるよう切り出した (図-3参照)。また、切り出しは、A3-4 (Sg) に対して相対的に難透水層となるA2-wまで行った。なお、A3-4 (Sg) の透水係数は、表-1に示すように $1.8 \times 10^{-2} \sim 1.9 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$ であるのに対し、A2-wは表-1の試料1~12と同様、内径11.4cm、高さ11.4cmの円筒形モールドにて採取した乱さない試料を用いた室内透水試験で、 $1.5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ の透水係数を得ている。

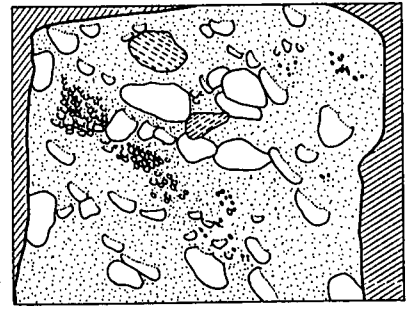
試験ブロックより深部の遮水処理は、ブロック切り出しに伴う掘削部において、鋼板をA2-wまで根入れし、試験ブロックと鋼板の隙間を無収縮モルタルで充填することにより行った。

試験ブロックの性状や試験中の変状を詳細に観察するため、図-7に示すように通水方向に直交する断面をスケッチした。注水側および排水側断面のスケッチは通水前に、その他の断面のスケッチは試験終了後の試験ブロック解体時に実施した。排水側断面のスケッチには試験ブロックの変状位置を記録するために設置した観察用メッシュ (1メッシュは5cm × 5cm) を併せて示した。なお、図-7のスケッチのうち、排水側断面のみ排水側から見た図で、その他は注水側から見た図である。また、図-7から明らかなように、比較的大きな礫が存在するため、通水断面は初期設定の縦30cm、横40cmよりも若干小さい断面に切り出している。ただし、注水側と排水側断面については、実際には試験ブロックが存在する部分にも一部周面止水用の無収縮モルタルを塗布している。

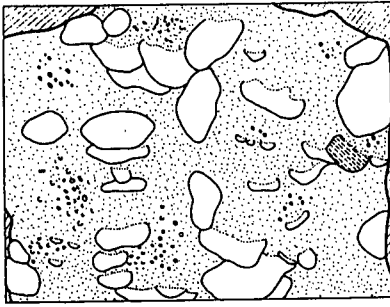
図-7からもわかるように、試験ブロックは局所的に粒径10cm前後の石英安山岩礫と軽石礫を含むが、大半が粒径5~6cm以下の石英安山岩礫、軽石礫およびスコリア礫を多く含むA3-4 (Sg) を代表する層相からなる。ただし、排水側通水面の1か所には、層厚数cmの



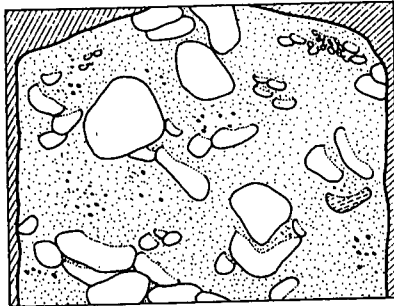
(a) 注水側：注水側から見た断面



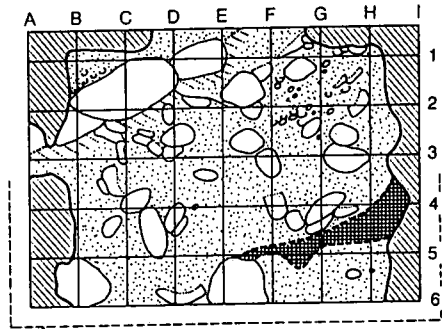
(d) 注水側から45cm：注水側から見た断面



(b) 注水側から15cm：注水側から見た断面



(c) 注水側から30cm：注水側から見た断面



(e) 排水側：排水側から見た断面

観察用メッシュの外枠

0 10 20 (cm)

- 石英安山岩礫
- 軽石礫
- スコリア礫
- 基質部
- 凝灰質砂
- モルタル
- 褐色風化部

【試験ブロック切断位置】

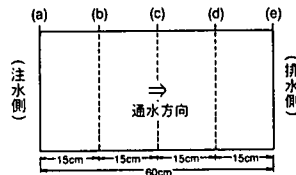
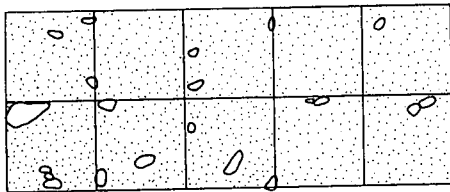


図-7 試験ブロック通水面の状況



礫(石英安山岩, 軽石) 0 10 20(cm)
基質部

図-8 針およびピック貫入試験面の状況

表-4 針およびピック貫入試験の結果

試験	項目	最大	最小	平均	標準偏差	変動係数
針貫入勾配	NP (N/mm)	0.7	0	0.19	0.13	0.71
ピック貫入勾配	PP (N/mm)	0.7	0	0.18	0.11	0.61

※データ数は、針およびピック貫入勾配ともに100。

ブロック状細粒凝灰質砂が認められたため、試験中の変状観察時は、特にこの凝灰質砂周辺に注意を払った。

また、試験ブロック近傍の枝坑側壁では、簡易試験である針およびピック貫入試験を再度実施した(図-3参照)。これらの簡易試験は、縦20cm、横50cmの長方形領域を縦10cm、横10cmの正方形の10ブロックに分割し、礫間の基質部を対象に各ブロック10点ずつ、計100点で実施した。簡易試験面の状況を図-8に、試験結果を表-4に示す。試験面は、粒径5cm以下の石英安山岩礫および軽石礫が分布するA3-4 (Sg) の代表的層相を示しており、試験ブロックの一部に見られた細粒凝灰質砂の分布は認められなかった。NPおよびPPの平均値は、ともに0.2N/mm程度と既往の研究⁹⁾と同様、かなり小さい値が得られた。この結果からも浸透破壊抵抗性が小さいと推定された。

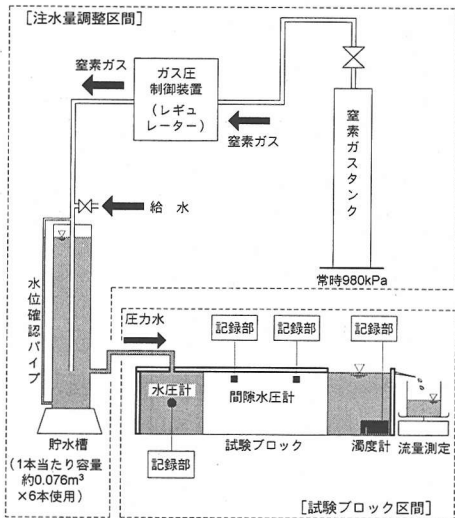


図-9 試験装置の構成

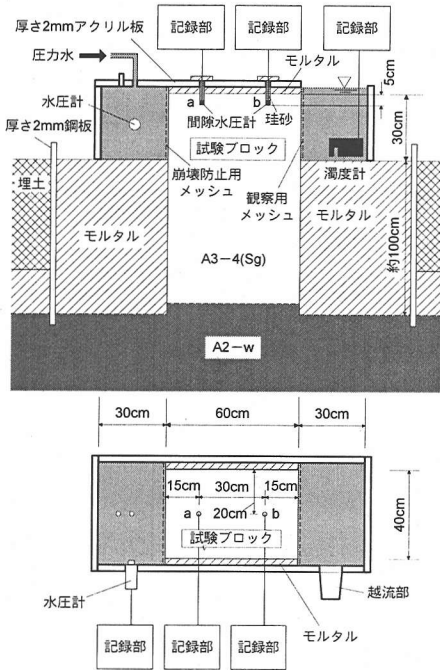


図-10 試験ブロック区間の詳細

(2) 試験装置

本試験に用いた装置は、注水量調整区間と試験ブロック区間からなる。図-9に試験装置の構成を、図-10に試験ブロック区間の詳細を示す。

注水量調整区間は、貯水槽内の水に窒素ガスで圧力を載荷する機構とし、圧力はレギュレーターで調整した。また、貯水槽は内空断面の等しい6本（それぞれの容量は約0.076m³）を使用して連続的な給水を可能にした。また、貯水槽をマリOTTサイホンとすることで水位の

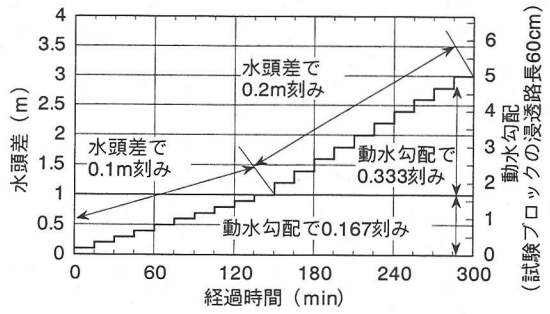


図-11 原位置浸透破壊試験の昇圧パターン

低下によらず一定圧力の載荷を可能にした。なお、貯水槽の吐出口は、試験ブロック区間の水槽上面および排水水位に一致させた。

試験ブロック区間は、A3-4 (Sg) の試験ブロックと試験ブロックを取り囲む水密性の高いアクリル製水槽よりなっており、注水槽側面の中央部には水圧計（測定範囲：0～980kPa，精度：±0.5%）を設置した。排水槽は、ブロック上面を基準に越流させる機構とし、また、排水側試験ブロック断面変状の目視観察を補足するために、排水槽内水の濁度の経時変化を濁度計（測定範囲：0～500ppm，精度：±2%）により測定した。

試験ブロックと水槽側面および試験ブロックと上蓋との隙間は、硬化時の収縮が極力小さく、かつ載荷圧に対して十分な耐力を有する無収縮モルタルを充填した。また、試験ブロックの図-10に示す2か所に、通水中の試験ブロック内の間隙水圧分布を知るための間隙水圧計（測定範囲：0～686kPa，精度：±0.2%）を上面から深さ5cmの地点に埋設した。

(3) 試験方法

試験では、まず注水槽および排水槽から同時にゆっくりと注水して試験ブロックを完全に水没させた。試験ブロック内の間隙水圧計の指示値から求まるブロック内水位が徐々に上昇し、注水および排水槽内水位に一致することを確認する。この時点で試験ブロックが飽和したと判断し、昇圧を開始した。昇圧は、注水槽と排水槽の水頭差で規定した図-11に示すパターンに従って行った。なお、1圧力段階の継続時間は15minとした。

各水頭段階の注水量は貯水槽の水位降下量と貯水槽の断面積より、排水量は越流水の質量を測定することで求めた。また、試験中は、試験ブロック内の間隙水圧と排水槽内水の濁度も併せて測定した。

5. 原位置浸透破壊試験の結果

(1) 浸透流解析による水平一次元流の検証

今回の試験では、試験対象となる直方体ブロックの

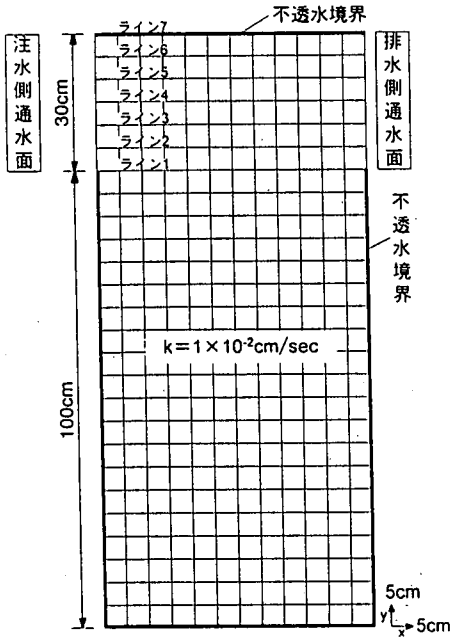


図-12 浸透流解析用の有限要素モデル

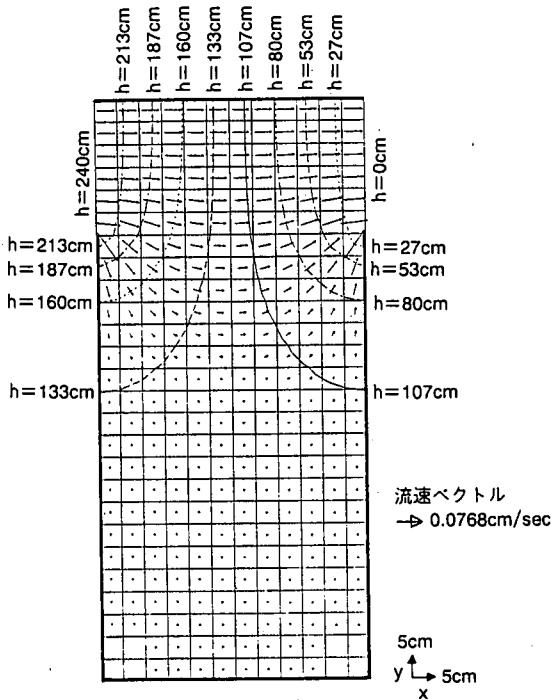


図-13 浸透流解析結果

底面は不透水境界ではなく、その下位に約1m厚のA3-4 (Sg) が分布する。そこで、試験結果を解析する前に、仮定した水平一次元流の妥当性を検証するため、均一透水場を対象としてダルシー則に基づく飽和浸透流解析(定常状態)を実施した。浸透流解析用の有限要素モデルを図-12に示す。解析時の境界条件は、図-12に示すと

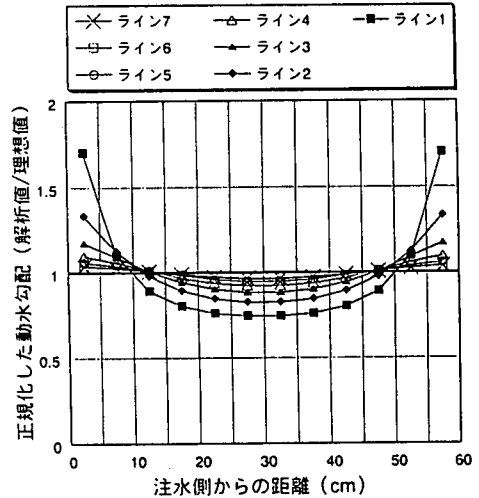


図-14 正規化した動水勾配の分布

り、注・排水側の通水面を水位固定境界、その他を不透水境界とした。また、解析はA3-4 (Sg) の透水係数を $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 、注水側と排水側の水頭差 Δh を240cmとして実施した。なお、本解析では、試験前の飽和作業により解析全領域が完全に飽和していたと考えた。

解析から得られたポテンシャル分布および流速ベクトルを図-13に示す。図-13中のポテンシャルhの値は、排水側通水面で0cmとして算出した値である。また、試験ブロック内の水頭差が理想的な水平一次元流に従って減衰した場合、x軸方向に隣り合う格子点間の水頭差を格子点間距離で除して求めた動水勾配は全て4.0となる。そこで、今回の解析結果から得られるx軸方向に隣り合う格子点間の動水勾配と理想動水勾配の比を正規化した動水勾配(解析値/理想値)として、そのx方向分布を図-12のライン1~7沿いに整理し、図-14に示した。以下では、水平一次元流条件下で得られる各種パラメータ値を理想値と総称する。図-14からは、ライン1~7全てにおいて注水側からの距離0~10cmおよび50~60cmの注・排水側近傍で動水勾配の解析値が理想値を上回り、注水側からの距離10~50cm間で解析値が理想値を下回っている。また、注水側からの距離が等しければ、試験ブロックの上方ほど、理想値からの隔たりは小さくなる傾向にある。この点を詳細に分析すると、試験ブロックの底面にあたるライン1沿いの正規化した動水勾配は0.745~1.703の範囲に分布しているが、ライン1より5cm上方のライン2沿いでは0.825~1.335、10cm上方のライン3沿いでは0.883~1.175と、徐々に動水勾配が理想値に近づいている。この結果から、均一透水場を想定すれば、今回の原位置浸透破壊試験の条件下において、試験ブロックの上部3分の2程度の領域では、理想値との差が最大でも2割以下の動水勾配を示し、水平一次元流に比較的近い流れが達成されていると考えられる。さらに、試験ブ

ロックの浸透破壊については、排水側断面において発生した破壊が注水側へ進展するという形態が想定される。いま、排水側断面において局所的破壊が発生した際の排水側近傍の動水勾配は、図-14から明らかなように、試験ブロック全体の平均動水勾配(理想値)よりも大きい。そのため、排水側断面における局所的破壊発生時のブロック全体の平均動水勾配を限界動水勾配とすることが設計上安全側の対応となる。

次に、水平一次元流を仮定して、単位奥行き当たり全流量を試験ブロック高さ30cmと平均動水勾配4.0の積で除して求めた透水係数は $1.50 \times 10^2 \text{ cm/sec}$ となり、解析モデルで設定した透水係数の1.5倍程度の値となる。これは、図-13中の流速ベクトルからも明らかなように、試験ブロック下15~20cmの深さの領域まで比較的流速の大きい水の流れが発生しているためである。よって、今回の原位置試験結果として得られる流量値を用いて、水平一次元流を仮定して透水係数を算出すると、実際よりも5割程度の過大評価となる。

(2) 計測値の経時変化および試験ブロックの変状

各圧力段階の計測項目は、注水槽の水頭、試験ブロック中の間隙水圧(水頭表示)、排水槽の濁度、注水量および排水量である。

試験中の時間経過に伴う各計測値の変化を図-15に示す。各地点の水頭差は、各地点での水頭値と排水側での水頭値の差として定義している。動水勾配は、2地点間の水頭差をその水平距離で除した値である。また、正規化した水頭差と動水勾配とは、それぞれの実測値を理想値で除した値である。透水係数の算出時には、水平一次元流を仮定している。ただし、通水断面が設定の縦30cm、横40cmより若干小さいことは考慮しなかった。さらに、濁度上昇量とは、ある設定動水勾配段階の濁度のその直前段階の濁度に対する上昇量である。

なお、試験は注水側と排水側の水頭差3m(動水勾配5.0)の段階で、給水能力不足により終了したため、室内浸透破壊試験で見られた供試体の完全な破壊には至っていない。

各計測値の経時変化から以下のことがわかる。

① 間隙水圧計設置地点での水頭差は、注水側水頭差の上昇に応じて上昇する傾向を示している。間隙水圧計a地点の水頭差は、試験中はほぼ理想値に近い値を示している。しかし、間隙水圧計b地点では、試験初期から理想値よりかなり低い値を示していたものが、約200min経過後から急増し理想値に近づいていっている。この水頭差分布により、注水側と間隙水圧計aの間の動水勾配は理想値に比較的近く、逆に間隙水圧計bと排水側の間のそれは理想値よりもかなり小さくなっている。さらに、間隙水圧計aとbの間の動水勾配は、試験を通じて理想値

の0.9~1.4倍程度、試験初期値を除くと1.2~1.4倍程度の値となっている。これらの現象の原因としては、試験ブロックの透水性分布の不均一性のほか、低間隙水圧値の測定精度や各設定水頭差時において完全な定常浸透状態に達していない可能性などが考えられる。

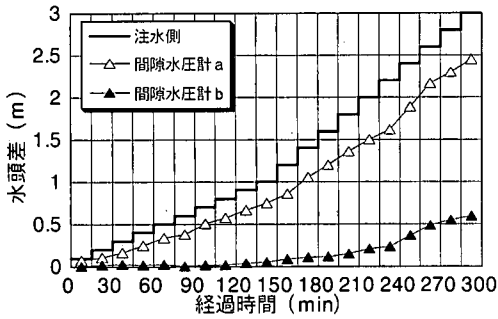
② 流量は、注水量および排水量ともに経時的に増加するが、その増加速度は経時的に減少している。また、注水量の方が排水量を常に $10 \sim 30 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 程度上回っている。流量の上昇速度の経時的減少は、試験ブロック中の目詰まりが原因と考える。また、注水量が排水量を上回る原因の一つとして、試験ブロックおよびその下位に分布するA3-4(Sg)の飽和が不十分であることが考えられる。しかし、両者の差が経時的に縮まる傾向にないことから、飽和が不十分であることよりも試験ブロック下の地盤における遮水処理が完全でなかったことの方が影響が大きいと考えられる。

③ 注水量および排水量をもとに水平一次元流を仮定して算出した透水係数は、初期的にはそれぞれ $1.0 \times 10^1 \text{ cm/sec}$ 、 $5.1 \times 10^2 \text{ cm/sec}$ であったものが経時的に徐々に小さくなり、試験終了時でそれぞれ $1.4 \times 10^2 \text{ cm/sec}$ 、 $8.7 \times 10^3 \text{ cm/sec}$ になっている。なお、(1)節で述べたように、この方法では透水係数を5割程度過大評価していることになるが、そのことを加味しても試験ブロックは 10^2 cm/sec オーダーの透水係数を有していることになり、表-1に示す室内透水試験から得られた透水係数とオーダー的に一致している。

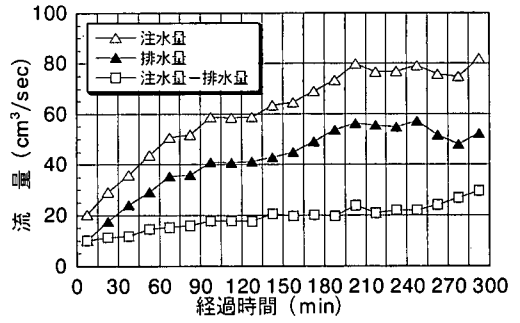
④ 濁度は、試験ブロックの飽和作業時から排水槽内の水に濁りが発生したため、その初期値でも13.6ppmを示している。また、濁度は、試験開始と同時に上昇傾向を示し、その上昇量は180min(動水勾配2.33)以降で急増する。なお、濁度変化との関連が強いと考えられる排水側通水面の変状としては、試験ブロックの注水側と排水側の水頭差が1.0m、動水勾配で1.67の時点で、図-7(e)に示したスケッチの格子点B・4付近の基質部で噴砂が確認され、この噴砂はこれ以降試験終了まで継続した。

(3) 限界動水勾配の決定

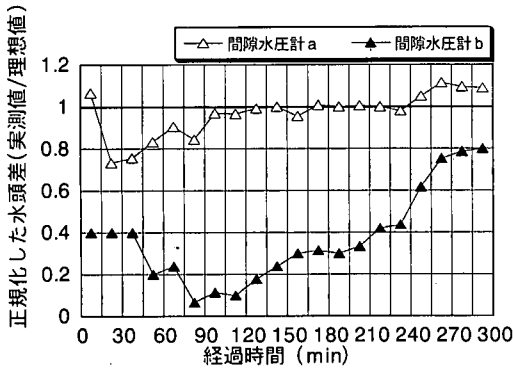
地盤の物性に関して、均一であるか不均一であるかは試験規模に依存する相対的な概念であるとの観点¹³⁾に立てば、ある規模以上で試験を実施することで物性の代表値を得られることになる。いま、原位置浸透破壊試験の対象地質であるA3-4(Sg)の最大粒径が5~6cm程度(2章(2)節参照)であるのに対し、試験ブロックの通水断面は30cm×40cmである。一方、山口ら^{13),14)}の室内透水試験用円柱形供試体の適切な寸法に関する研究によれば、供試体の直径および高さが試料の最大粒径の5倍程度以上あればよいとされている。浸透破壊試験の原理は定水位透水試験の原理と同じであるので、山口ら^{13),14)}



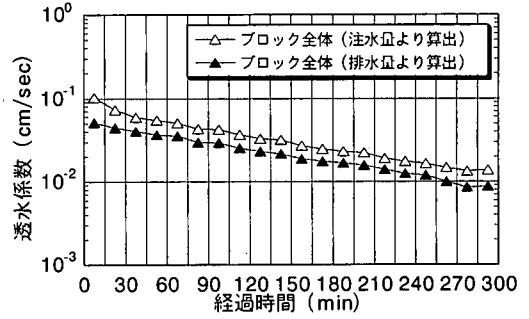
(a) 時間-水頭差関係



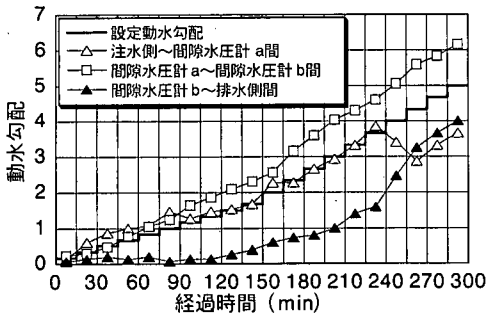
(e) 時間-流量関係



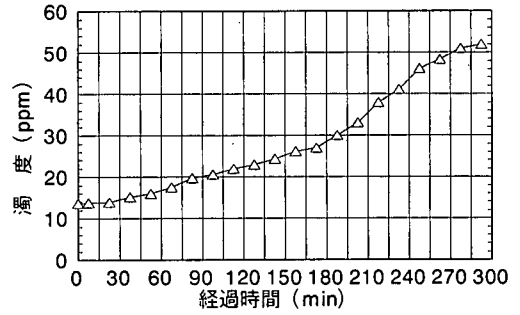
(b) 時間-正規化水頭差関係



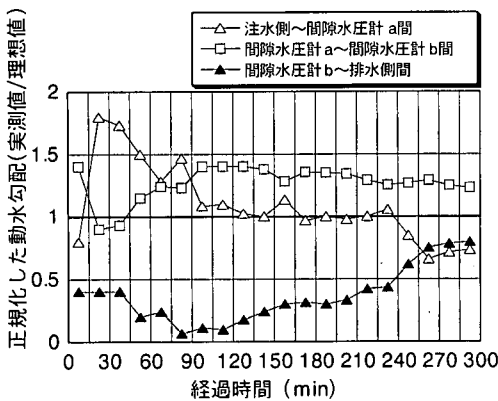
(f) 時間-透水係数関係



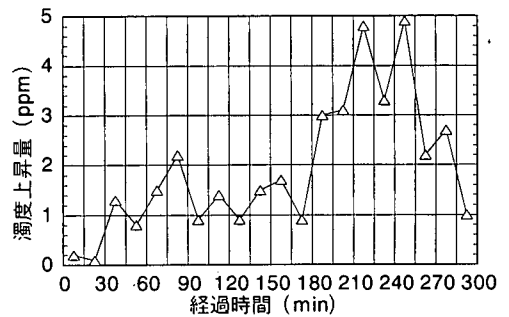
(c) 時間-動水勾配関係



(g) 時間-濁度関係

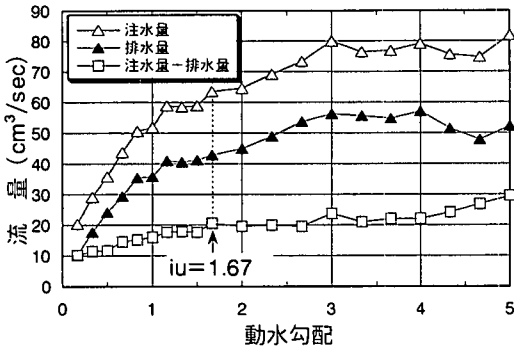


(d) 時間-正規化動水勾配関係

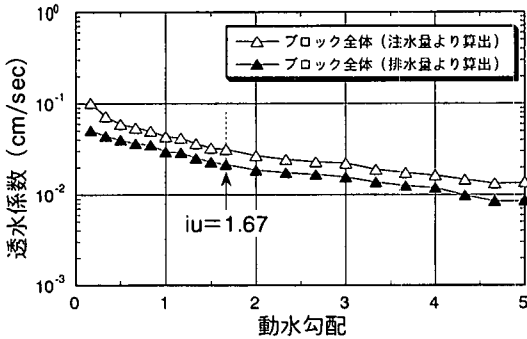


(h) 時間-濁度上昇量関係

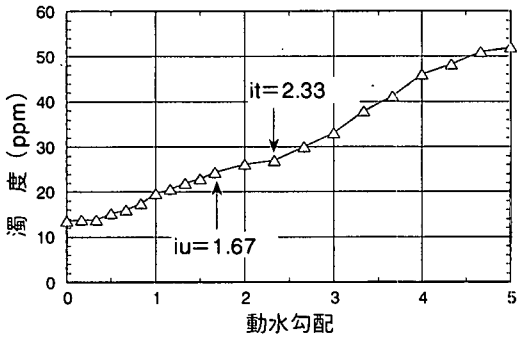
図-15 計測値の経時変化



(a) 動水勾配-流量関係



(b) 動水勾配-透水係数関係



(c) 動水勾配-濁度関係

図-16 動水勾配と流量、透水係数、濁度の関係

の研究成果から今回実施した規模の原位置浸透破壊試験により浸透破壊抵抗性の代表値を求めることができると考えた。そのため、(2)節の試験ブロック内の間隙水圧分布からも明らかのように、試験ブロック内の局所レベルにおける透水性の不均一性が存在することを認めたくて、限界動水勾配 i_{cr} を試験ブロック全体の平均的な値で評価することが適切であると考えた。また、限界動水勾配は試験ブロック全体の平均的な値で評価するものの、室内浸透破壊試験と同様、噴砂などの局所的な破壊あるいは変状の発生を限界動水勾配の評価に反映することにより設計上安全側の対応をとった。さらに、(1)節の均一透水場を仮定した浸透流解析の結果に対する考察においても、浸透破壊が排水側から注水側へ進展すると

考えると、試験ブロック全体を平均的に取り扱った限界動水勾配の評価が設計上安全側の対応となることを示した。

限界動水勾配 i_{cr} の候補として、試験ブロックの変位計測を行っていないこと、ブロックが完全な破壊に至っていないことから、原位置試験における i_d と i_f は求められない。ただし、 i_f は試験時の最大動水勾配である5.0よりも大きいことは明らかである。一方、(2)節で述べたように、動水勾配 $i = 1.67$ で降噴砂が連続的に発生していたため、 $i_u = 1.67$ と評価できる。

また、図-16に流量、透水係数および濁度と動水勾配との関係を示す。動水勾配と流量の関係からは、流量急増という観点からの明瞭な比例限界点が認められないため、 i_b の評価には至らない。

次に動水勾配と濁度の関係は、全般に濁度が緩やかな上昇傾向を示す中で、 $i = 2.33$ に変化点が認められる。これは、 $i = 1.67$ 以降の連続的な噴砂の影響を受けたものと考えられる。この動水勾配と濁度の関係における変化点の動水勾配を i_t と定義し、限界動水勾配候補とする。

以上、原位置浸透破壊試験から得られた限界動水勾配候補は、 $i_u = 1.67$ と $i_t = 2.33$ である。 i_t の発生原因が i_u 以降の連続的な噴砂にあることに加え、設計上安全側の判定として、限界動水勾配 i_{cr} には $i_u = 1.67$ を採用することが妥当と判断される。

(4) 限界動水勾配の総合評価

室内および原位置浸透破壊試験で、各種の変状指標に基づく限界動水勾配候補の最小値として決定した限界動水勾配 i_{cr} は、それぞれ1.51 (4供試体の平均) と1.67とかなり近い値を示す。室内試験用の試料をA3-4 (Sg) の基質部から選択的に採取したことにもよるが、3章(2)節で示したように、室内試験用供試体には水の流れを阻害して試験結果に影響を及ぼすような大礫が存在しなかった。このことから、室内試験の個々の限界動水勾配は0.5~2.4の範囲でばらついているものの、その平均値は地質の代表値としては意味のある数字と考えられる。結果として、この平均値と原位置試験の限界動水勾配がかなり近い値となった。よって、今回試験対象としたA3-4 (Sg) の浸透破壊防止対策工設計のための設計限界動水勾配としては両試験結果より若干小さい1.5を採用することが妥当と考えられる。また、室内および原位置試験とも、この限界動水勾配時点では、局所的な変状が発生し始めてはいるが、完全な破壊には至っていない。しかし、浸透破壊のような進行破壊現象では、局所的な変状が発生するような状況下に長期間置かれた場合に、破壊が徐々に進行して全体的な破壊に至る可能性が高いと考える。特に、ダム基礎地盤には大きな貯水圧が長期間にわたって作用するため、局所的な変状が発生した時点

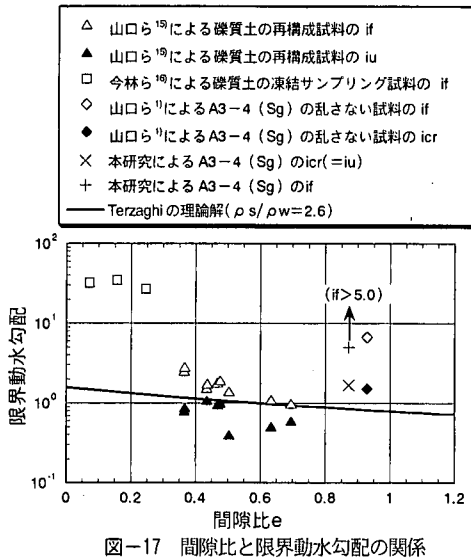


図-17 間隙比と限界動水勾配の関係

での動水勾配を設計限界動水勾配とする方法に妥当性を見出すことができる。

今回試験対象としたA3-4 (Sg)の限界動水勾配と既往の研究における礫質土のそれを比較するために、間隙比と限界動水勾配の関係として整理したものを図-17に示す。図中には、室内および原位置浸透破壊試験から得られたA3-4 (Sg)のicrとif、山口ら¹⁵⁾による礫質土の再構成試料のiuとifおよび今林ら¹⁶⁾による礫質土の凍結サンプリング試料のif (完全破壊に至るまで噴砂現象は見られずiuはifに等しい)を示している。また、間隙比と限界動水勾配の基準となる関係として、Terzaghi¹⁷⁾の理論限界動水勾配icn (= (ρ_s/ρ_w-1)/(1+e), ρ_s/ρ_w=2.6, ρ_s:土粒子の密度, ρ_w:水の密度, e:間隙比)も図中に示した。なお、A3-4 (Sg)の室内試験結果については、4供試体の平均値を用いている。また、原位置浸透破壊試験のifは、if>5.0として図化している。

図-17より、今回試験対象としたA3-4 (Sg)は、間隙比eが0.871 (表-1の平均値)とかなり大きい、限界動水勾配icrはicnよりも大きく、山口ら¹⁹⁾の間隙比の小さい再構成試料 (e=0.365~0.696)のifと同程度の値を有していることがわかる。このことから、A3-4 (Sg)の構成粒子間には、弱い結合が発達しているものと推察する。

6. ダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性調査方針の提案

本章では、筆者らのグループの既往の成果^{11~16)}および本研究の成果をもとに、ダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性調査の方針を図-18に示すように提案する。なお、以下の文中番号は図-18中の番号に一致する。

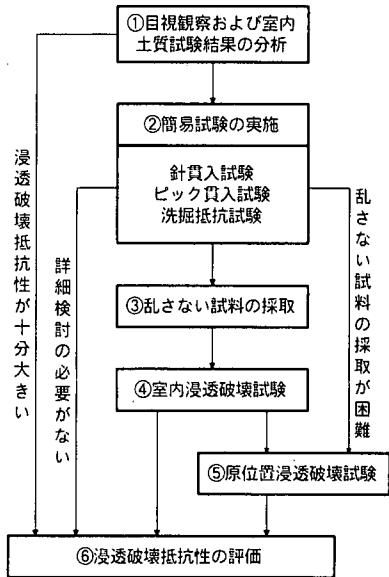


図-18 浸透破壊抵抗性調査の方針

表-5 一軸圧縮強さと限界動水勾配の関係と浸透破壊抵抗性の検討方法 (山口ら²⁾による、単位系変換)

浸透破壊に対する検討	詳細検討を要する			詳細検討は要しない
	原位置試験	室内試験および原位置試験	室内試験 (確認程度)	
一軸圧縮強さ qu(MN/m ²)	qu ≤ 0.1	0.1 < qu < 1	1 ≤ qu	
限界動水勾配 icr	icr ≤ 10	10 < icr < 100	100 ≤ icr	

① ダムサイトでは、通常、十分な数量、密度での地質調査が行われている。そこで、ボーリングコア、調査横坑ならびに地表露頭の目視観察結果を参考に、ダム基礎の中で浸透破壊抵抗性が小さいと考えられる地質や箇所等を概略把握する。その際、地質調査とともに実施される一般的な室内土質試験結果として得られる各地質の間隙比、礫率、飽和度、透水係数、一軸圧縮強さ等を参考とする。なお、山口ら²⁾は、一軸圧縮強さquと限界動水勾配icrに比較的高い相関性があることを示したうえで、浸透破壊抵抗性の検討方法を表-5に示すような形で提案している。

② ①において浸透破壊抵抗性が小さいと考えられた地質に対して、針およびピック貫入試験を主、洗掘抵抗試験を従とする簡易試験を実施し、浸透破壊抵抗性の詳細検討の必要性を評価する。なお、山口ら¹¹⁾は、多くの地質に対する各種試験結果に基づき、qu ≤ 0.1MN/m², NP ≤ 2N/mm, PP ≤ 4N/mm, ST ≤ 200sec (ST:洗掘抵抗値)を満たす地質の限界動水勾配icrは全て15以下になることを示し、浸透破壊抵抗性の詳細検討を要する地質の選定に有用な基準として提案している。

③ 簡易試験の結果、詳細検討の必要性があると評価

された地質から室内浸透破壊試験用の乱さない試料を採取する。この際、試料寸法の制約を考慮し、対象地質の中でも相対的に浸透破壊抵抗性が小さいと考えられる箇所から試料を採取することが望まれる。具体的には、川崎らの研究¹⁰⁾や本研究で行ったように、簡易試験面をメッシュ区分するなどの工夫をすることで、簡易試験結果を反映できる試料採取箇所の選定が必要である。

一方、浸透破壊抵抗性の詳細検討が必要と評価される地質は、乱さない試料の採取が困難なことも珍しくない。このような場合、凍結サンプリング^{10),11)}等の特殊な採取法を用いる以外は、浸透破壊試験は原位置試験によるべきである。

- ④ 室内浸透破壊試験は、比較的安価でその原理が単純であるため、同一地質についてもできるだけ多くの試験を実施し、試料寸法の制約に起因する試験結果のばらつきに対応する必要がある。
- ⑤ 室内浸透破壊試験結果として極めて i_{cr} が小さいと評価された地質、あるいは乱さない試料の採取が困難なほど強度の小さい地質に対しては、原位置浸透破壊試験を実施する。原位置浸透破壊試験は、地盤の不均一性を考慮できる規模で、かつ本研究のように水平一次元流を発生させる機構で行うことが望ましい。試験中の浸透破壊発生の確認は、排水面における目視観察によるところが大きいため、あらかじめ通水面の詳細スケッチを行っておくことで目視観察の精度を上げることが重要と考えられる。なお、試験対象地質が地下深部に存在する場合は、結果の解釈等に課題を残しているが、ボーリング孔を利用した原位置浸透破壊試験¹²⁾⁻¹⁴⁾で対応せざるを得ない。ただし、地下深部に存在し、かつ貯水池に露頭していない地質については試験を実施する必要はないか、試験の優先度は低いと考える。
- ⑥ 最後に、簡易試験、室内および原位置浸透破壊試験結果から対象地質の浸透破壊抵抗性の評価を行う。個々の浸透破壊試験に際しては、各種の変状が発生した時点の動水勾配を限界動水勾配候補として求めておき、設計上安全側の観点および浸透破壊という進行性の破壊形態を考慮して、限界動水勾配候補のうち最も小さいものを限界動水勾配 i_{cr} として採用すべきである。

7. おわりに

本研究では、各種の室内土質試験結果、針およびピック貫入試験、洗掘抵抗試験といった簡易試験結果や室内浸透破壊試験結果から、浸透破壊抵抗性が非常に小さいと評価されていた砂礫層に対して水平一次元流条件下で原位置浸透破壊試験を行った。これらの試験の結果に基づいて、対象地質の浸透破壊抵抗性を総合的に評価するとともに、ダム基礎地盤を対象とした浸透破壊抵抗性

調査方針について検討した。

得られた知見および原位置浸透破壊試験実施時の留意点は以下のとおりである。

- ① 試験条件を模擬して、均一透水場を対象に実施した浸透流解析の結果、試験ブロック底面が不透水境界でないため、ブロック下部では水平一次元流状態との隔たりが大きいものの、ブロックの上部3分の2の領域では水平一次元流に近い状態になっていることを確認した。また、試験ブロックの浸透破壊形態を考慮すると、限界動水勾配をブロック全体の平均動水勾配をもって規定することが設計上安全側の対応になることを示した。
- ② 原位置浸透破壊試験の実施にあたっては、試験ブロックが平均的な取り扱いにより浸透破壊抵抗性の代表値を得ることができる規模を有していることを確認する必要がある。本研究では、試験ブロックの寸法と対象地質の最大粒径との比をもって試験ブロック規模の妥当性を検証した。
- ③ 限界動水勾配を試験ブロック全体の平均的な値として評価する場合でも、浸透破壊が進行性破壊であることを考慮すると、試験中の排水側断面における局所的破壊の発生の探知が重要となる。
- ④ 原位置試験で得られた限界動水勾配 i_{cr} ($=i_u=1.67$) は、室内浸透破壊試験で得られた i_{cr} の平均値1.51にほぼ一致した。このことは、数多くの乱さない試料に対して室内浸透破壊試験を実施することで、大規模領域の平均的な浸透破壊抵抗性の評価が可能であることを示唆していると考えられる。
- ⑤ 筆者らのグループの既往の研究成果¹⁵⁾⁻¹⁶⁾および本研究の成果をもとにダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性調査方針を提案した(6章参照)。
今後は、実際のダム基礎地盤を対象に、提案した浸透破壊抵抗性調査方針に従って調査を実施し、データを蓄積するとともに、必要に応じた試験方法の改善、簡易試験結果からの浸透破壊抵抗性推定精度の向上等を図る必要があると考える。また、これまで対象としてきた単一地層の浸透破壊抵抗性の評価のみならず、物性の異なる地質境界部、特に軟質地質と高透水性の亀裂性岩盤の境界部における浸透破壊抵抗性の評価も行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 山口嘉一, 小川直樹, 川崎将生, 中村 昭: 簡易試験によるダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性の評価, 応用地質, Vol. 38, No.3, pp.130-144, 1997.8.
- 2) 山口嘉一, 田原則雄, 松本徳久: ダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性に関する基礎的研究, 応用地質, Vol. 35, No.2, pp.1-13, 1994.6.
- 3) Takebayashi, S., Matsumoto, N. and Yamaguchi, Y.: A

- mathematical model for field piping test, *Int. Symp. Analytical Evaluation of Dam Related Safety Problems*, ICOLD, pp.319-328, 1989.7.
- 4) 山口嘉一, 松本徳久: 多孔注水式原位置浸透破壊試験の提案と適用例, 応用地質, Vol. 35, No.5, pp.40-49, 1994.12.
 - 5) 中村 昭, 山口嘉一, 小川直樹: 原位置および室内試験による軟岩の浸透破壊抵抗性の評価, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 岩の力学連合会等, pp.419-424, 1994.1.
 - 6) 中村 昭, 山口嘉一, 山本裕之, 小川直樹: ダム基礎軟岩の浸透破壊抵抗性評価, ダム技術, No.99, pp.16-24, 1994.12.
 - 7) Tosabayashi, H., Hojo, K. and Matsumoto, N.: Investigation of permeability and grouting for soft rock foundation of Izarigawa Dam, *Proc. Int. Symp. Weak Rock*, pp.1153-1158, 1981.
 - 8) 松本徳久, 尾芦直人, 池田 隆: ダム基礎軟岩の調査と設計, 建設省土木研究所資料, 第1947号, pp.33-45, 1983.3.
 - 9) U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation: *Design and analysis of Auburn Dam*, Vol. 1, pp.7-23-7-29, 1977.8.
 - 10) 土木学会: 軟岩の調査・試験の指針(案) - 1991年版 -, pp.56-60, 1991.
 - 11) 中村康夫, 佐々木靖人: 軟岩ダム基礎の岩盤分類のための簡易試験法(その1), ダム技術, No.52, pp.27-35, 1991.1.
 - 12) 安中武幸, 井上久義, 成岡 市: 圃場土壌の水移動を支配する粗間隙構造, 土壌の物理性, No.66, pp.3-9, 1992.12.
 - 13) 山口嘉一, 安仁屋勉, 松本徳久: フィルダム土質材料の締固め, 透水試験に関する考察, 建設省土木研究所資料, 第2820号, 72p., 1990.1.
 - 14) 松本徳久, 山口嘉一, 安仁屋勉: フィルダム土質材料の締固めおよび透水試験, ダム工学, No.3, pp.52-64, 1991.9.
 - 15) 山口嘉一, 松本徳久, 横井一秀: 粒度範囲の広い砂のバイピング特性, 第25回土質工学研究発表会(岡山)講演集, pp.1677-1678, 1990.6.
 - 16) 今林 豊, 山口嘉一, 川崎将生, 吉田 等: 凍結サンプリング法による礫質土の乱さない試料に対する室内バイピング試験, 第33回地盤工学研究発表会(山口)講演集, pp.1851-1852, 1998.7.
 - 17) Terzaghi, K.: Effect of minor geologic details on the safety of dams, *Amer. Inst. Min. and Met. Engrs. Tech. Publ.*, 215, pp.31-44, 1929.
 - 18) 川崎将生, 山口嘉一, 中村 昭: 礫岩層中に介在する凝灰質砂の浸透破壊抵抗性評価, 第31回地盤工学研究発表会(北見)講演集, pp.2143-2144, 1996.7.
 - 19) 時松孝次, 大原淳良: 講座-地盤の熱的問題-, 凍結サンプリング, 土と基礎, Vol.38, No.11, pp.61-68, 1990.11.

(1998.12.7受付)

IN-SITU SEEPAGE FAILURE TEST ON HORIZONTAL ONE-DIMENSIONAL FLOW CONDITION

Yoshikazu YAMAGUCHI, Hitoshi YOSHIDA and Hiroyuki WATATANI

Recently, in Japan, many dam sites are composed of soft rocks or gravel deposits. For these foundations with very low strength, seepage failure potential should be investigated accurately and efficiently in the designing stage.

In-situ seepage failure test was conducted for gravel deposits, which had been evaluated to be low in seepage failure potential from the results of previous investigation using laboratory seepage failure test and simple tests such as needle penetration test and pick penetration test. For the easier analysis of results, in-situ test was made on horizontal one-dimensional flow condition. In this paper, the method and the results of in-situ test were reported, and guidelines on investigation of seepage failure potential of dam foundations were also proposed.