

◆ 報 文 ◆

# フィルタ材料の許容最大細粒分含有率に関する実験的検討

山口嘉一\*

## 1. はじめに

フィルダムのフィルタ材料は、保護すべき遮水材料の粒度に応じてある粒度条件、つまりフィルタ基準<sup>1),2)</sup>を満足しなければならない。この基準は5項目から成り立っているが、そのうちフィルダムの建設に際して最も遵守困難あるいは遵守するためのコストが多くなるものが、「フィルタ材料は粘着性のないもので、200番(0.074mm)ふるいを通す細粒分を5%以上含んではならない」という細粒分含有率規定である。細粒分含有率が高くなると透水性が低下するとともに粘着性が大きくなる。透水性があまり低下すると、フィルタとしての排水機能を果たさなくなる。一方、フィルタ材料が粘着性を有していると、大規模地震動や断層変位等の原因で遮水ゾーンとともにフィルタゾーンに亀裂が発生した場合、水浸後もその亀裂が保持され、遮水ゾーンに発生する集中浸透に伴う粒子流亡を防止できなくなる。細粒分を全く含有しなければ、その材料は明らかに非粘着性と考えられるが、フィルダムのフィルタ材料のような砂礫主体の材料が細粒分を含有する場合、どの程度の含有率から粘着性を有するようになるのか、またそれはどのような試験により判定するかなどについては系統立てた研究がほとんどなされてこなかった。

本報文においては、フィルタ材料の非粘着性を判定するための試験方法として Vaughan<sup>3),4)</sup>が提案した Sand Castle 試験の詳細仕様や結果評価時の留意点などについて検討する。さらに、この試験の結果より細粒分含有率と粘着性の関係について考察するとともに、透水係数や塑性指数などの他の物性も考慮したうえで、最終的に許容最大細粒分含有率について考察する。

## 2. Sand Castle 試験の方法

### 2.1 試験の種類

Vaughan<sup>3),4)</sup>によって提案された Sand Castle 試験の手順を図-1に示す。フィルタ材料をモールド

ド内で締固め、それを水中に完全に沈める。水中内で静かにモールドを引き抜き、フィルタ材料が安息角程度の角度で崩壊した場合は非粘着性、安息角以上の角度で崩壊または形状を保持した場合は粘着性と判定する。しかし、試験の詳細な仕様や結果の評価時の留意点などについては明確に示されていない。

ここでは、Sand Castle 試験の具体的方法や結果の評価方法を詳細に検討するため、以下に示す3種類の安息角試験を実施する。

- (a) 気中安息角試験
- (b) 水中安息角試験
- (c) 水浸安息角試験

### 2.2 気中安息角試験

気乾試料を落下高さを低く抑えて自然落下させ、安定した円錐型の山を形成させる。円錐底面の直径  $D$  と高さ  $H$  を測定する。なお、直径  $D$  は4箇所所で測定し、その平均値を求める。 $D$  と  $H$  を次式に代入して安息角  $\theta$  を算出する。

$$\theta = \arctan(2H/D) \quad (1)$$

なお、すべての安息角試験は同一試料に対して3回繰り返す、結果に大きなばらつきがないことを確認した後、その平均値を安息角とする。

### 2.3 水中安息角試験

水を張った水槽の中に、水面の直上から気乾試料を落下させ、安定した円錐型の山を形成させる。

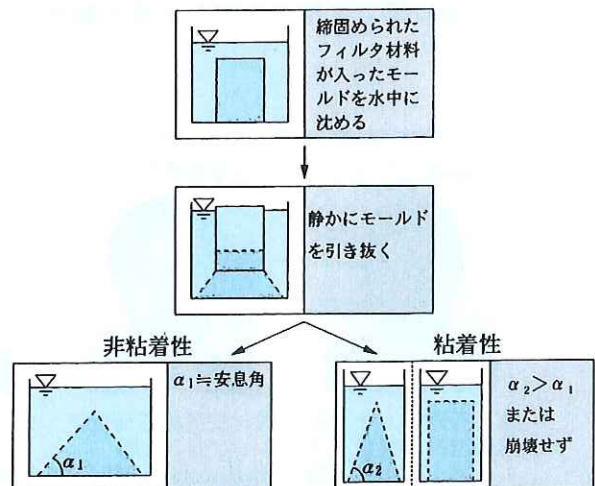


図-1 Sand Castle 試験の手順

Experimental Study on Allowable Maximum Fine Content of Filter Materials

その後の手順は、気中安息角試験と同じである。なお、この試験は、Vaughan が提案した方法とは直接的には関連はないが、非粘着性材料を水中落下させたときの山の形状や安息角を確認することで、後述の水浸安息角試験結果を詳細に分析するための基礎資料とする目的で実施する。

2.4 水浸安息角試験

試料を内径 150mm、高さ 175mm のモールド内において、後述する方法で締固めて供試体を作製し、それを静かに水を張った水槽内で完全に水浸させる。ゆっくりとモールドを抜き取り、最終安定状態における円錐型の山の高さ  $H$  と底面の直径  $D$  を他の安息角試験と同様に測定し、式 (1) により安息角を算出する。

(1) 細粒分を含有していない試料の場合

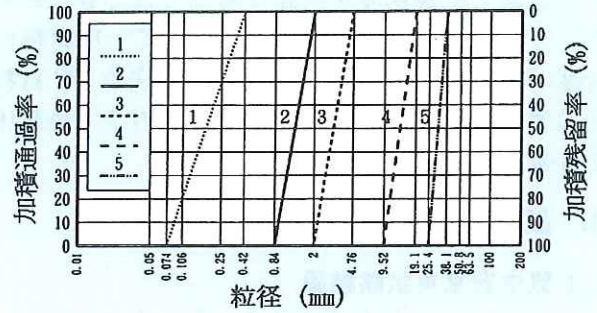
締固め方法は、砂の最大密度試験方法 (JSF-T-161) に準じて行う。内径 150mm、高さ 175mm のモールド内に試料を 10 層に分けて投入し、各層ごとに打撃点を回転させながらモールドの側面を均等に木槌 (打撃面直径 35mm、質量 162.6g) で 100 回打撃して試料を締固める。打撃回数は合計 1000 回となる。この締固め方法により、細粒分を含有していない試料は、かなり良く締まった状態になるものと考えられるため、設計時の非粘着性判定の観点からは安全側の対応といえる。

(2) 細粒分を含有する試料の場合

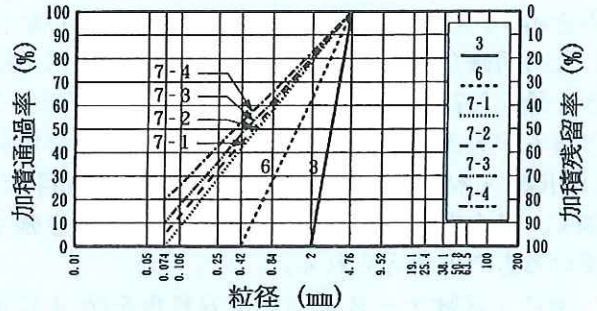
JIS-A-1210 の突固めによる土の締固め試験の要領により供試体を作製する。試料は最適含水比に調整し、使用するモールドは内径 150mm、高さ 175mm で締固めエネルギーは  $1E_c$  とする。なお、試料含水比を最適含水比としたのは、締固めエネルギー一定の条件下で、最も水浸崩壊が発生しにくいと考える最大乾燥密度状態を形成するためである。つまり、設計時の非粘着性判定の観点からは安全側の対応といえる。

3. 試料と試験ケース

図-2 に示す粒度分布を持つ試料を準備する。図-2(a) は、非粘着性と考えられる細粒分を含有しない均一なフィルタ (均等係数  $U_c = 1.2 \sim 2.4$ ) で、これを用いた試験を試験ケース 1 とする。図-2(b) は、粒度調整により最大粒径を 4.76mm として粒度範囲を変え、さらに粒径 0.074mm 以下の細粒分含有率を変えて準備した広範囲粒度のフィルタ ( $U_c = 3.4 \sim 30$ ) で、これを用いた試験を試験ケース 2 とする。なお、粒度 ⑦-1、⑦-2、⑦-3、⑦-4 の細粒分含有率はそれぞれ 0、5、10、



(a) 均一フィルタ (試験ケース 1)



(b) 広範囲フィルタ (試験ケース 2)

図-2 試料の粒度分布

20%としている。また、全試料の最大粒径を最大で 38.1mm としているのは、締固め試験 (JIS-A-1210) で内径 150mm モールドを使用した場合の試料の許容最大粒径を準用したためである。

試料には、粒子形状についての検討も行うために、円礫 (河床礫) と角礫 (砂岩碎石) を準備した。さらに、実際のフィルダムのフィルタ材料 (千枚岩と石灰岩の混合材料) も用い、ここでは、それぞれを A 材料 (真比重  $G_s = 2.65$ 、絶対乾比重  $G_b = 2.60$ 、吸水率  $Q = 0.91\%$ )、B 材料 ( $G_s = 2.71$ 、 $G_b = 2.67$ 、 $Q = 0.81\%$ )、C 材料 ( $G_s = 2.72$ 、 $G_b = 2.64$ 、 $Q = 1.13\%$ ) と呼ぶ。また、均一フィルタには標準砂とガラスビーズも用いた。なお、試験ケース 2 において B 材料、C 材料に添加する 0.074mm 以下の細粒分には実際のフィルダムのコア材料を用いた。最終的な粘着性の判定の重要な指標となるそれぞれに添加したコア材料の塑性指数は 22.3 と 21.9 である。

表-1 に、B、C 材料の粒度 ⑦-1~4 の液塑性限界試験結果を示す。また、力学試験としては、締固め試験、透水試験などを実施しているが、細粒分を含有する試料の締固め (2.4 の (2) の方法)・透水試験結果を表-2 に示す。

なお、B および C 材料の粒度 ⑦-1 については、細粒分を含有しないが、2.4 の (1) の方法とともに、2.4 の (2) の方法でも密度試験を行った。しかし、B 材料については締固め曲線から最適含水比

および最大乾燥密度を決定することはできなかった。そこで、水浸安息角試験において、B材料の粒度⑦-1については2.4の(1)の方法で、C材料の粒度⑦-1については2.4の(2)の方法で供試体を作製した。

#### 4. 試験結果

##### 4.1 気中安息角試験結果

図-3には、細粒分を含まない均一な粒度のフィルタに対する試験ケース1より求めた気中安息角を示す。この図によると、2点のデータしかないため明確な傾向のつかめないガラスビーズを除き、最大粒径が大きくなると気中安息角が若干ではあるが大きくなる傾向がある。また、その傾向は円礫(A材料)よりも角礫(B材料、C材料)が強く、気中安息角は材料の表面粗度の影響を強く受けるものと考えられる。

次に、試験ケース2の気中安息角を図-4に示す。B材料では細粒分がない範囲(粒度③、⑥、⑦-1)では均等係数が大きくなると気中安息角は小さくなるが、細粒分が混入してくるとその増加により気中安息角が上昇する傾向を示す。C材料では粒度⑦-1~⑦-4の比較で細粒分含有率の差

表-1 B、C材料の液塑性限界試験結果一覧

試料名	粒度番号	液性限界 WL (%)	塑性限界 Wp (%)	塑性指数 Ip
B材料	⑦-1	NP	NP	NP
	⑦-2	NP	NP	NP
	⑦-3	16.0	13.2	2.8
	⑦-4	20.9	12.8	8.1
C材料	①-1	NP	NP	NP
	⑦-2	NP	NP	NP
	⑦-3	18.9	15.7	3.2
	⑦-4	26.6	18.8	7.8

表-2 細粒分を含有する試料に対する締め固め・透水試験結果

試料名	粒度番号	細粒分含有率 (%)		最適含水率 $W_{opt}$ (%)	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ 時の透水係数 $k_{opt}$ (cm/s)	最小透水係数 $k_{min}$ (cm/s)	$k_{min}$ 時の含水比 $W_{kmin}$ (%)
		当初調整	締め固め後*					
B材料	⑦-1	0.0	3.5 (+3.5)	—	—	$5.1 \times 10^{-3**}$	$5.1 \times 10^{-3**}$	—
	⑦-2	5.0	8.5 (+3.5)	9.6	1,946	$9.2 \times 10^{-5}$	$2.6 \times 10^{-5}$	11.5
	⑦-3	10.0	13.4 (+3.4)	8.5	2,024	$1.7 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-6}$	10.8
	⑦-4	20.0	21.5 (+1.5)	9.6	2,092	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.6 \times 10^{-7}$	11.6
C材料	⑦-1	0.0	9.3 (+9.3)	8.5	1,917	$5.7 \times 10^{-3}$	$5.6 \times 10^{-3}$	8.0
	⑦-2	5.0	14.2 (+9.2)	9.4	1,934	$6.0 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-4}$	11.6
	⑦-3	10.0	18.2 (+8.2)	9.4	1,960	$5.4 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$	10.7
	⑦-4	20.0	27.9 (+7.9)	10.5	2,006	$2.7 \times 10^{-6}$	$9.0 \times 10^{-7}$	12.1

\* ( )内の値は締め固め後の当初調整粒度に対する細粒分含有率の増加分を示す。

\*\* 締め固め曲線が平坦であるため  $W_{opt}$ 、 $\rho_{dmax}$  の判定ができなかったため平均透水係数を示す。

による影響は特に認められないが、細粒分がない範囲(粒度③、⑥、⑦-1)では均等係数が大きくなると気中安息角も大きくなる傾向が認められる。

##### 4.2 水中安息角試験結果

図-5は気中安息角(a)と水中安息角(b)を比較したものである。C材料の粒度①を除く細粒分を含有しない均一フィルタでは、 $b = a \pm 2$ 度の範囲に収まり、両者には大きな差がない。一方、BおよびC材料の粒度⑦-2は、粒度範囲が広く、細粒分が含有されていることから、水中落下時に

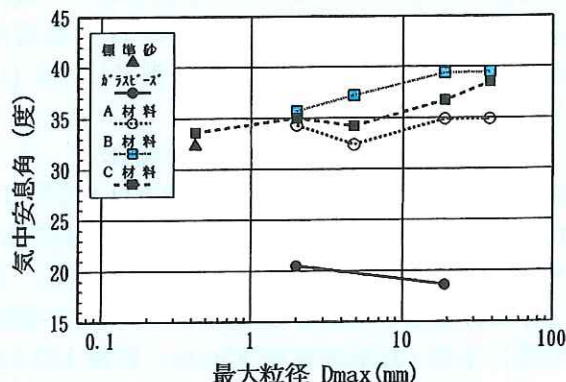


図-3 気中安息角 (試験ケース 1)

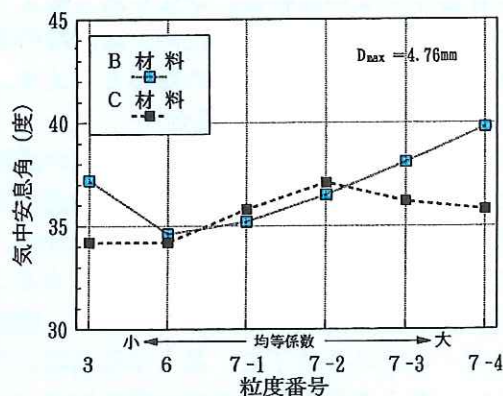


図-4 気中安息角 (試験ケース 2)

材料分離が発生したため水中安息角が少し小さくなったものとする。

本来、水中安息角試験においては、水締め効果により形成された円錐型の山の乾燥密度は、気中試験のそれよりも大きくなると考えられる。同一礫質材料であれば乾燥密度が大きい方が強度、ここでは安息角が大きくなる。しかし一方で飽和強度が気乾強度よりも若干小さいことが一般的である。そのため、これらの影響が相殺しあい、結果として気中安息角と水中安息角に大きな差が見られなかったものとする。

以上より、細粒分を含まず均一粒径の砂礫であるため非粘着性と考えられる均一フィルタでは、水中安息角は、気中安息角に近いことがわかる。なお、水中安息角は次の水浸安息角試験において締固め試料が完全崩壊した場合の安息角に比較的近いと考えられる。つまり、Vaughan の Sand Castle 試験における気中安息角と水浸安息角に基づく非粘着性判定方法が概ね妥当であると推察される。

#### 4.3 水浸安息角試験結果と非粘着性の判定

図-6 は、細粒分を含まず均一粒径の砂礫であるため非粘着性と考えられる試験ケース 1 のフィルタ材料の気中安息角と水浸安息角の差を最大粒径との関係として整理したものである。B 材料では最大粒径が大きくなると気中安息角と水浸安息角の差は小さくなる傾向があるが、ガラスビーズ、A 材料、C 材料では最大粒径との関係における明瞭な傾向は認められない。ただし、B 材料の粒度⑤で水浸安息角が気中安息角を上回っており、Vaughan の定義に従うと粘着性材料と判定されるが、これは粒径が大きいため円錐型の山がきれいに形成されないことによる測定誤差の影響と考えられる。よって、Sand Castle 試験を非粘着性材料に対して行った場合の  $\{(気中安息角) - (水浸安息角)\} (x)$  の値は、概ね 0~+6 度になるものと考えられる。Vaughan の定義によると、 $x$  が 0 になる材料が非粘着性材料となる。しかし、気中状態と水浸状態では密度、強度、応力状態が異なり、たとえ非粘着性材料であっても 2 つの安息角が厳密に一致するとはいえない。さらに、気中安息角試験においては、ある程度きれいな円錐型の山が形成されるまで試料を落下させるが、水浸安息角試験においては、円柱形供試体の崩壊により形成される円錐型の山の形状を測定対象としているため、完全に崩壊したと考えられるケースにおいても、気中安息角試験ほどきれいな山でない

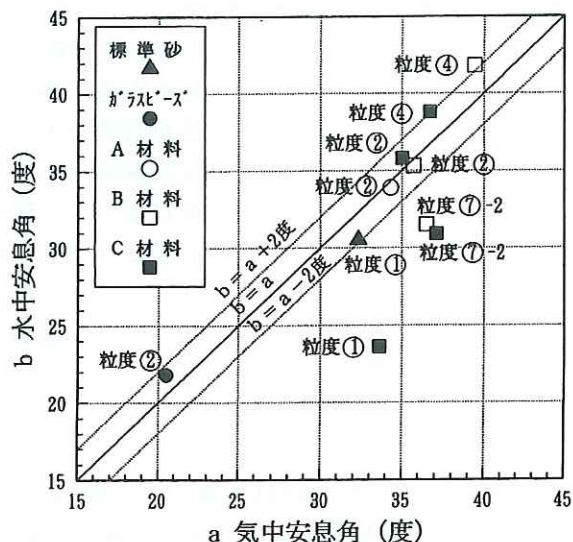


図-5 気中安息角と水中安息角の関係

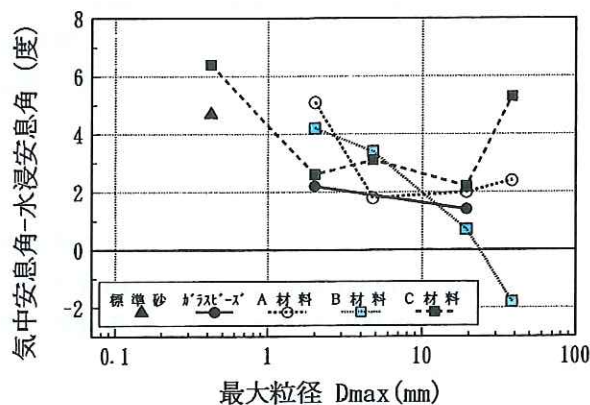


図-6 気中安息角と水浸安息角の差 (試験ケース 1)

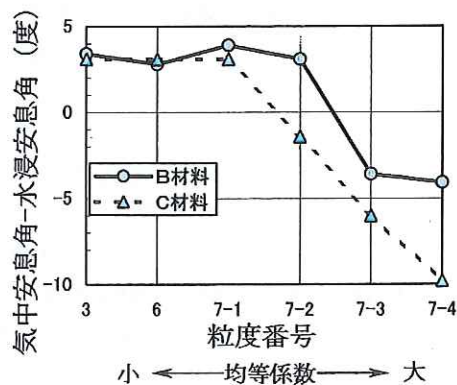


図-7 気中安息角と水浸安息角の差 (試験ケース 2) 場合も見受けられた。よって、今回の非粘着性材料を用いた試験ケース 1 の結果に基づくと、非粘着性材料の場合、 $x$  は 5~6 度以下の正值になると考える。

次に、試験ケース 2 の気中安息角と水浸安息角の差を図-7 に示す。この図より、B 材料では粒度⑦-1、⑦-2 までは  $x$  が +3~+4 度で推移しており非粘着性材料と判定されるが、粒度⑦-3、⑦-4 は -3~-4 度となり粘着性材料と判定され、非

粘着性であるか否かの境界は粒度⑦-2と⑦-3の間にあると考えられる。C材料ではB材料ほど明瞭な境界はないものの、 $x$ が正から負に移行している粒度⑦-1と⑦-2の間に非粘着性が否かの境界があると考えられる。なお、水浸試験時における締固め試料の崩壊状況の観察結果によると、B材料、C材料とも、⑦-2も含めそれより粒度の粗いものは水浸後瞬時に崩壊が開始したが、⑦-3と⑦-4では水浸後ある程度の時間経過の後崩壊が開始したり、最終的に完全な崩壊に至らなかったりした。

これらの結果から、Sand Castle 試験を実際のフィルダムのフィルタ材料に適用する場合には、細粒分含有率を数種類に変化させて試験を実施し、細粒分含有率と  $x$  の関係を整理し、 $x$  が正值であること、この関係の中での変曲点での細粒分含有率のほか、水浸安息角試験時の崩壊状況の観察結果などを総合的に検討したうえで非粘着性の判定を行う必要がある。

### 5. 考察

本章では、ここまでの試験結果と既往の研究結果などを整理・分析することにより、粘着性のか透水性能なども考慮したうえでフィルタ材料の許容最大細粒分含有率について考察する。

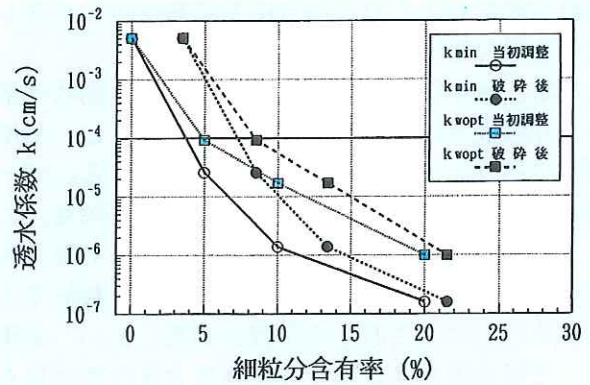
#### (1) 塑性指数と粘着性の関係

米国農務省土壌保全局 (SCS) の指針<sup>5)</sup>に、非粘着性材料であるための条件として塑性指数が NP であること、という規定がある。今回の液性・塑性限界試験の結果(表-1参照)によると、B、C材料はともに粒度⑦-1、⑦-2のNPに対し、粒度⑦-3、⑦-4では塑性指数が得られている。

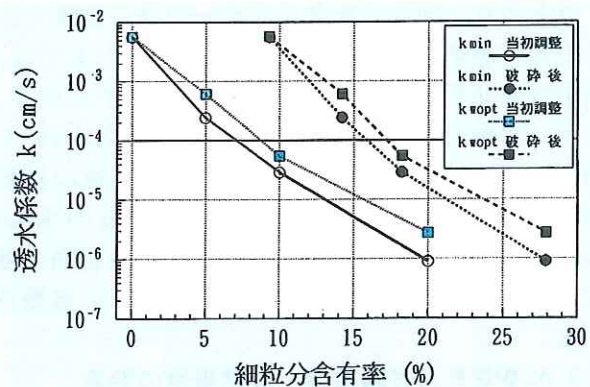
#### (2) 細粒分含有率と透水性の関係

設定粒度の細粒分含有率は、粒度⑦-1から⑦-4がそれぞれ0%、5%、10%、20%となっているが、表-4に示すとおり、締固め後には、B材料ではそれぞれ3.5%、8.5%、13.4%、21.5%に、C材料ではそれぞれ9.3%、14.2%、18.2%、27.9%となっている。B材料では1.5~3.5%、C材料では7.9~9.3%が締固め時の破碎により細粒分が増加していることになり、B材料に比べC材料の破碎に対する抵抗性が劣っていることがわかる。

図-8は、細粒分含有率と締固め・透水試験より得た最小透水係数  $k_{min}$  および最適含水比時の透水係数  $K_{wopt}$  の関係を示している。細粒分含有率は、締固め前の当初調整粒度と締固めによる破碎後の粒度の両方の値で示している。いずれのケー



(a) B材料



(b) C材料

図-8 細粒分含有率と透水係数の関係

スにおいても細粒分含有率が大きくなると透水係数は小さくなるのがわかる。フィルタ材料の透水係数は、一般的にコア材料の透水係数との関係やフィルタゾーンに間隙水圧が残留しないように、 $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 以上であることが要求されることが多い<sup>6)</sup>。いま、締固められたフィルタ材料がフィルタゾーンとしての役割を果たすことから、細粒分含有率も締固めによる粒子破碎後の値で評価すべきである。そこで、最小透水係数が  $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 以上となる締固め破碎後の細粒分含有率がとりうる最大値と考えると、その最大値はB材料では7.2%、C材料では15.8%となる。

#### (3) 総合評価

Sand Castle 試験および各種基本物性から、フィルタ材料に要求される非粘着性、透水性を満足するための細粒分含有率についての検討を行った結果を表-3に示す。非粘着性の条件からは塑性指数でNPであること、Sand Castle 試験から得られる気中安息角と水浸安息角の差が正であること、また透水性の条件からは最小透水係数が  $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 以上であること、を考慮して許容される最大の細粒分含有率の検討結果を示している。細粒分含有率は、前述したように、締固めによる粒子破碎後の値で評価すべきであるが、ここでは

表-3 フィルタ性能に基づく許容細粒分含有率

判定項目	判定条件	許容細粒分含有率		
		B材料	C材料	
非粘着性	塑性指数	NP	5~10%以下 8.5~13.5%以下	5~10%以下 14.2~18.2%以下
	Sand Castle 試験	(気中安息角) - (水浸安息角) ≥ 0	5~10%以下 8.5~13.5%以下	0~5%以下 9.3~14.2%以下
透水性	透水係数 ≥ 1 × 10 <sup>-4</sup> cm/s	3.7%以下 7.2%以下	7.0%以下 15.8%以下	

注) 下線は、各判定項目における締固め破碎後の許容細粒分含有率の小さい方の値を示す。

当初調整粒度での値と破碎後の粒度での値を併記している。

B材料では非粘着性の条件よりも透水性の条件から細粒分含有率が制限されることがわかり、その値は当初調整粒度で3.7%以下、1Ecの締固めエネルギーによる粒子破碎後で7.2%以下となる。

一方、C材料では、非粘着性の条件のうち Sand Castle 試験結果から細粒分含有率が制限され、塑性指数や透水性の条件から決まる細粒分含有率よりも小さな値となっており、その値は当初調整粒度で0~5%の間、1Ecの締固めエネルギーによる粒子破碎後で9.3~14.2%の間となる。

いま、現在のフィルタ基準である細粒分含有率を5%以下とする規定に従えば、十分フィルタとしての非粘着性、透水性条件を満足することがわかる。さらに、細粒分含有率が規定の5%を越えるとすぐに非粘着性、透水性条件を満たさないということはなく、材料によっては、2~3%の超過であればフィルタ材料として使用可能となる場合もある。

## 6. 結論

今回、Vaughanによって提案された Sand Castle 試験の試験手順の確認、またフィルタ材料に対する非粘着性評価の可能性の検討を目的とした実験的研究を実施した。その結果、Sand Castle 試験を非粘着性材料に対して行った場合、{(気中安息角)-(水浸安息角)}(x)の値は、概ね0~+6度となった。この結果のほか、広範囲粒度のフィルタにおけるxの値および水浸安息角試験時の供試体の崩壊状況なども踏まえて、xが正值なら非粘着性、負値なら粘着性という判定基準を提案した。ただし、Sand Castle 試験を実際のフィルダムのフィルタ材料に適用する場合には、細粒分含有率を数種類に変化させて試験を実施し、細粒分含有率とxの関係を整理し、xが正值であること、この関係の中での変曲点での細粒分含有率のほか、

水浸安息角試験時の崩壊状況の観察結果などを総合的に検討したうえで非粘着性の判定を行う必要がある。

また、Sand Castle 試験および各種基本物性から、フィルタ材料に要求される非粘着性、透水性を満足するための細粒分含有率について考察した。Sand Castle 試験結果から、

液性・塑性限界試験結果がNPとなる試料は概ね非粘着性材料と考えられ、塑性指数による非粘着性の判定の可能性がある。また、非粘着性と考えられる材料でも、フィルタ材料としての透水性の条件を満足しない場合も想定され、細粒分含有率の制限が、非粘着性の条件によるか透水性の条件によるかは、材料によって異なる。

今後は、ここで提案した Sand Castle 試験の方法と結果の評価方法に従い、実際のフィルダムにおけるフィルタ材料の非粘着性の判定を行い、必要に応じたフィードバック研究を行っていきたい。

## 参考文献

- 1) (社)日本大ダム会議：第2次改訂 ダム設計基準, p.88, 1978年8月
- 2) 建設省河川局監修：建設省河川砂防技術基準(案), 設計編〔I〕, 山海堂, p.196, 1985年10月
- 3) Vaughan, P. R.: Design of Filters for the Protection of Cracked Dam Cores Against Internal Erosion, Preprint 3420 Presented to ASCE Convention, Chicago, 1978.
- 4) Vaughan, P. R. and Soares, H. F.: Design of Filters for Clay Cores of Dams, ASCE, Vol.108, GT1, 1982.
- 5) U. S. Department of Agriculture Soil Conservation Service Engineering Division: Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters, Soil Mechanics Note No.1201-V1, 1986.
- 6) 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, 建設省土木研究所資料, 第2903号, 1990年10月

山口嘉一\*



独立行政法人土木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. Yosikazu YAMAGUCHI