

## 戦-15 低拘束圧条件下におけるロック材料強度に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：水工研究グループ（ダム構造物）

研究担当者：山口嘉一、佐藤弘行、林 直良

### 【要旨】

超大型土構造物であるロックフィルダムの建設では、設計施工の合理化やコスト縮減が強く求められている。本課題では、このような現状を踏まえ、表層すべり試験、一面せん断試験等により低拘束圧条件下におけるロック材料のせん断強度の評価を行い、これらの試験とロック材料に対する最も一般的なせん断試験である三軸圧縮試験を組み合わせたロック材料の拘束圧依存性を考慮した設計強度の設定方法について検討する。

平成 19 年度は、実ダムのロック材料を用いた低拘束圧条件下での大型三軸圧縮試験に加え、大型一面せん断試験および表層すべり試験を実施して 50kPa 以下の低拘束圧条件下での  $\phi_0$  を評価するとともに、原位置における原粒度ロック材料を用いた表層すべり試験を実施し、室内表層すべり試験との整合性の評価を行った。

キーワード：フィルダム、ロック材料、設計強度、拘束圧依存性、コスト縮減

### 1. はじめに

超大型土構造物であるロックフィルダムの建設では、設計施工の合理化やコスト縮減が強く求められている。しかし、現行のロックフィルダムの設計において、安定性を受け持つロック材料の強度は、三軸圧縮試験の結果をモール・クーロンの破壊規準により整理したうえで、粘着力をゼロとし、内部摩擦角のみを用いるという設定を行っている。そのため、低拘束圧条件下において極端に安全側に余裕をもった設計強度となっている。これまでもロック材料強度の拘束圧依存性については指摘されてきたが、三軸圧縮試験による低拘束圧領域での強度評価精度には課題があった。そこで、他の試験を組み合わせることで低拘束圧状態も含む拘束圧依存性を考慮したロック材料の強度を適切に評価することにより、ロックフィルダムの堤体設計の合理化を図る必要がある。

本課題では、上記の要請に応えるため、まず表層すべり試験、一面せん断試験等により低拘束圧条件下におけるロック材料のせん断強度を評価する。また、これらの試験とロック材料に対する最も一般的なせん断試験である三軸圧縮試験を組み合わせたロック材料の拘束圧依存性を考慮した設計強度の設定方法について提案する。

平成 19 年度は、実ダムのロック材料を用いた低拘束圧条件下での大型三軸圧縮試験に加え、大型一面せん断試験および表層すべり試験を実施して 50kPa 以下の低拘束圧条件下での  $\phi_0$  を評価するとともに、原位置に

における原粒度ロック材料を用いた表層すべり試験を実施し、室内表層すべり試験との整合性を評価した。

### 2. 現行設計法におけるロック材料強度評価の方法と課題

ロックフィルダムの主要築堤材料として使用されるロック材料のせん断強度については、現行の震度法に基づく設計法によりモール・クーロンの破壊規準から得られた粘着力  $c$  は考慮せずにゼロとし、内部摩擦角  $\phi$  のみを設計値として用いている<sup>1,2)</sup>。

これに対し、フィルダムについては、将来のより実際に近い荷重、強度状況を採用した設計法を視野に入れ、耐震性の照査法として、1991 年 6 月に「フィルダムの耐震設計指針（案）」<sup>3)</sup>が策定され、地震時の堤体の応答を考慮した修正震度法、ロック材料のせん断強度の拘束圧依存性を考慮した  $\phi_0$  法などを組み合わせた方法が提案されている。また、2005 年 3 月には「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」<sup>4)</sup>が国土交通省河川局治水課により策定・通知され、現在実ダムを対象とした試行を実施しているところである。この試行において、ロックフィルダムの耐震性能照査について、ロック材料の強度は拘束圧依存性を考慮して  $\phi_0$  法などを用いて、より実態に近い形で評価することが標準となっている。

現在、ロック材料に対する最も一般的なせん断強度試験である三軸圧縮試験では約 50kPa 以下の拘束圧条件下における試験を適切な精度で実施することが困難で

ある。そのため、ロック材料の拘束圧依存性を考慮したせん断強度の評価を適切に実施するためには、三軸圧縮試験以外の試験もあわせた低拘束圧条件下でのロック材料のせん断強度の評価を行う必要がある。

これらを踏まえ、平成 18 年度は、笠間産砕石を用いて大型三軸圧縮試験を実施し、拘束圧に依存した  $\phi_0$  を求め、低拘束圧となる領域でのせん断強度については、室内表層すべり試験を実施して静的安息角を計測し、これが三軸圧縮試験で最も低拘束圧における  $\phi_0$  以上の角度になることを示した<sup>5)</sup>。

しかし、笠間産砕石は極めて良質な砂岩であり、近年のロックフィルダムに使用されるロック材料を必ずしも代表していない可能性があるため、実ダムのロック材料を用いた試験を実施して既往の研究成果を検証する必要があると考えた。また、他の試験方法を用いて 50kPa 以下の低拘束圧域での具体的な  $\phi_0$  を計測し、これと三軸圧縮試験で得られる  $\phi_0$  と表層すべり試験で得られる静的安息角  $\phi_i$  とを比較し、低拘束圧条件下でのせん断強度評価精度の向上を図る必要があると考えた。

そこで平成 19 年度は、実ダムのロック材料を用いて低拘束圧条件下での大型三軸圧縮試験に加え、大型一面せん断試験および表層すべり試験を実施して 50kPa 以下の低拘束圧条件下での  $\phi_0$  を評価するとともに、原位置における原粒度ロック材料を用いた表層すべり試験を実施し、室内表層すべり試験との整合性を評価する。

### 3. 室内試験

#### 3.1 概要

室内試験に使用した試料は、実際のロックフィルダム建設現場で使用されているロック材料（以下、「A 材料」という）と、平成 18 年度に使用した笠間産砕石骨材と砕砂（以下、「B 材料」という）の 2 種類である。このうち、B 材料の物理特性やこの材料に対する大型三軸圧縮試験および表層すべり試験の結果については、平成 18 年度の報告書や筆者らの既発表論文<sup>5)</sup>で詳細に報告しているので、そちらを参照していただきたい。平成 19 年度は、A 材料の物理特性、A 材料に対する大型三軸圧縮試験と表層すべり試験、さらに両材料に対する大型一面せん断試験を実施した。

#### 3.2 試料の物理・締固め特性

A 材料は、実際のダム建設に用いられている材料を最大粒径 37.5mm に粒度調整したものを使用した。試

料の粒度分布を図-1 に示す。また、密度、吸水率については、表-1 に示すとおりであり、合成密度（絶乾）は 2.391g/cm<sup>3</sup>、合成吸水率は 4.66%であった。これに対し、B 材料の合成密度（絶乾）は 2.661g/cm<sup>3</sup>、合成吸水率は 0.66%であるため、A 材料は B 材料に比べて密度が小さく吸水率が大きいことがわかり、B 材料より強度的に若干劣ることが予想された。

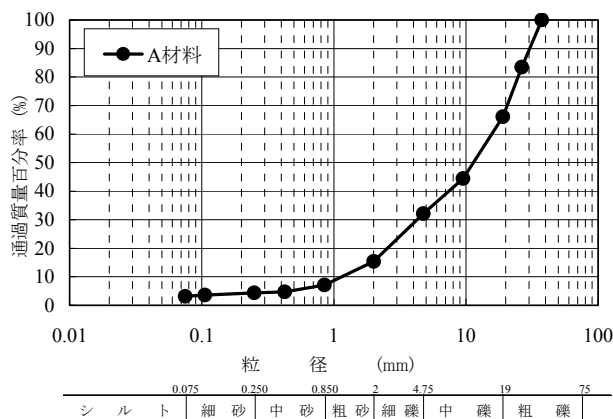


図-1 試料 (A 材料) の粒径加積曲線

表-1 試料 (A 材料) の密度・吸水率

試料の粒度 (mm)	37.5~19.0	19.0~9.5	9.5~2.0	2.0~0.85	0.85~
表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.488	2.482	2.523	2.484	2.570
絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.384	2.378	2.394	2.354	2.494
吸水率 (%)	4.37	4.37	5.36	5.52	3.04

次に、A 材料の最小・最大密度を測定し、後述する各種強度試験における締固め時間と相対密度の関係を把握するために締固め試験を実施した。締固め装置は、重量 37.9kg の電動ハンマーを用い、試料を内径 30cm、高さ 60cm の鋼製モールドに入れ、1 層あたり 10cm の厚さで所定の時間試料に振動を加え、これを 6 層分繰り返して締め固めた。

表-2 および図-2 に締固め試験の結果を示す。締固め時間と乾燥密度との関係から、最小乾燥密度  $\rho_{dmin}$  = 1.348g/cm<sup>3</sup> と、締固め時間 120 秒で最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  = 1.889g/cm<sup>3</sup> の結果を採用した。これより、締固め時間 11.6 秒のときに相対密度  $D_r$  = 90% となる乾燥密度  $\rho_d$  = 1.816g/cm<sup>3</sup> を得られることがわかった。よって、後述の大型三軸圧縮試験において  $D_r$  = 90% となる締固め時間は 12 秒とすることとした。

表-2 試料 (A 材料) の締固め試験結果

締固め時間 (秒)	0	10	20	30	60	100	120
乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.348	1.812	1.837	1.858	1.880	1.886	1.889
相対密度 $D_r$ (%)	0.0	89.4	92.9	95.8	98.8	99.6	100.0
含水比 $w$ (%)	2.3	2.1	2.0	2.1	2.3	2.2	2.3

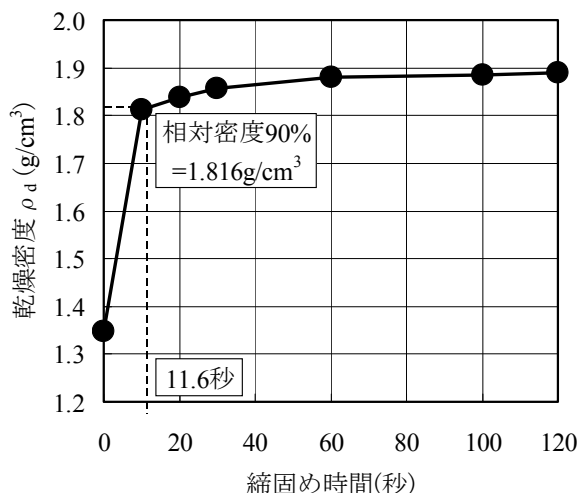


図-2 試料(A材料)の締固め時間と乾燥密度の関係

### 3.3 大型三軸圧縮試験

#### 3.3.1 試験方法

大型三軸圧縮 (CD) 試験は、飽和条件および不飽和条件の下で、49、98、196、294 kPa の 4 拘束圧条件で実施した。

供試体は、直径 30cm、高さ 60cm の円柱形とし、供試体密度は、締固め試験により得られた最大・最小密度より求まる  $D_r=90\%$  とし、それを得る締固め時間である 12 秒を採用し、1 層あたり 10cm の厚さで所定の時間振動を加え、これを 6 層分繰り返して締め固め、供試体を作製した。ただし、メンブレン厚は標準的な 2mm とし、結果の評価にあたってメンブレン補正は行っていない。

#### 3.3.2 試験結果

試験結果一覧を表-3 に示す。また、飽和、不飽和条件におけるモール円と破壊規準をそれぞれ図-3、4

に示す。なお、強度評価については、通常のモール・クーロンの破壊規準による評価と、原点を通る各拘束圧条件のモール円との接線から算出する  $\phi_0$  法による評価の 2 種類で行った。以下に、それぞれの関係式を示す。

$$\text{モール・クーロンの破壊規準: } \tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

$$\phi_0 \text{法: } \tau_f = \sigma_n \tan \phi_0 \quad (2)$$

ここに、 $\tau_f$  はせん断強度、 $c$  は粘着力、 $\sigma_n$  はせん断面に作用する垂直応力、 $\phi$  は内部摩擦角、 $\phi_0$  は粘着力  $c=0$  と設定して求めた各拘束圧における内部摩擦角である。

試験結果に示すとおり、不飽和条件の試験の方が飽和条件の試験より若干高い強度を示す。モール・クーロン破壊規準で整理した材料の強度直線から得られた内部摩擦角は、粘着力にほとんど差がない状況で、不飽和条件の方が飽和条件に比べ約  $3^\circ$  大きくなっている。また、 $\phi_0$  法による比較では、最も低拘束圧である 49kPa のときは同程度の強度を示すが、拘束圧が大きくなるほど飽和条件の方が小さくなり、 $3\sim 5^\circ$  の差となっていることがわかる。

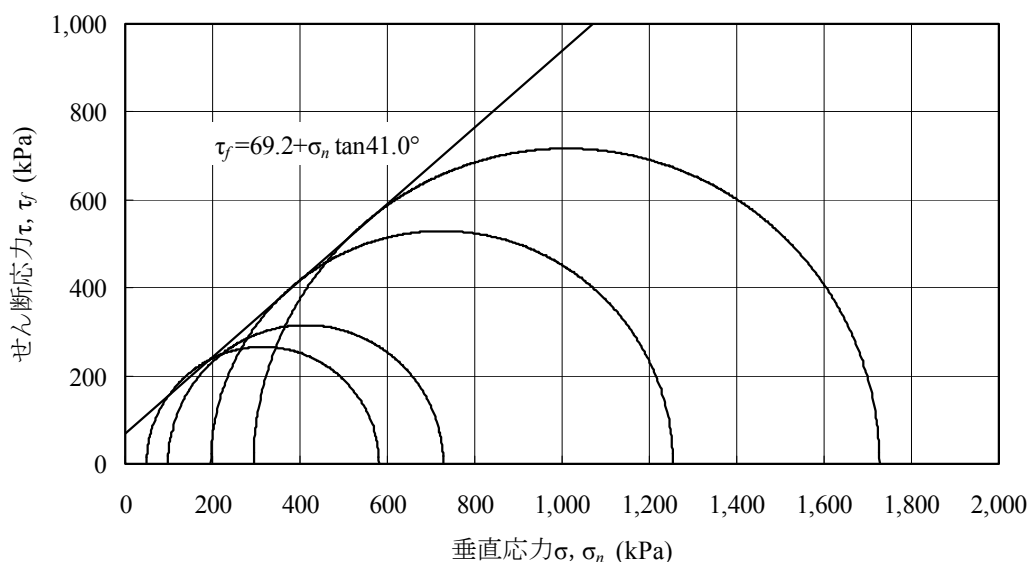
また、A 材料に対する試験結果をこれと同じ条件で実施した B 材料を用いた平成 18 年度の報告書や筆者らの既発表論文<sup>5)</sup>とを比較したものを表-4 に示す。表より、B 材料の方が  $\phi_0$  で  $4\sim 9^\circ$  程度、 $\phi_d$  で  $8\sim 9^\circ$  程度の大きい値が出ているが、これは B 材料が極めて堅固な碎石、砕砂であるためと考えられる。なお、A 材料は実ダムのロック材料を粒度調整したもので、そのロック材料の内部摩擦角の設計値が  $41.5^\circ$  (飽和条件、最大粒径 63mm、均等係数 10) であるので、今回の試験においても同程度の強度を得ていると考えている。

表-3 大型三軸圧縮 (CD) 試験結果一覧

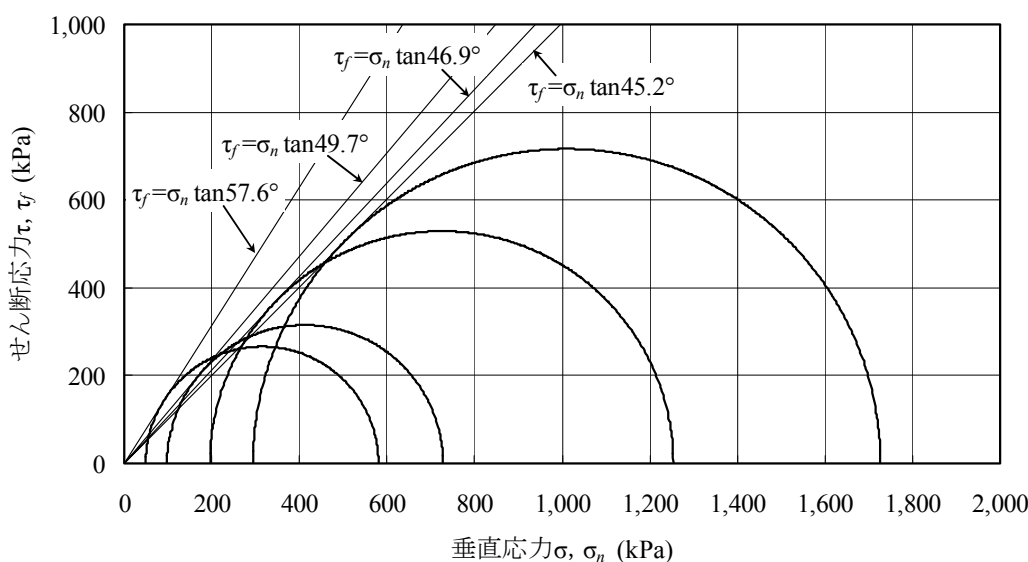
試験条件	拘束圧 (kPa)	乾燥密度 (g/cm³)	相対密度 (%)	最大軸差応力(kPa)	軸ひずみ (%) <sup>※1)</sup>	体積ひずみ (%) <sup>※1)</sup>	$\phi_0$ (°)	粘着力 $c_d$ (kPa) <sup>※2)</sup>	内部摩擦角 $\phi_d$ (°) <sup>※2)</sup>
飽和	49	1.814	89.6	532	5.0	-0.2	57.6	69.2	41.0
	98	1.813	89.5	630	7.5	-0.1	49.7		
	196	1.813	89.6	1,058	9.8	0.9	46.9		
	294	1.813	89.6	1,433	10.1	1.8	45.2		
不飽和	49	1.814	89.6	534	4.5	-2.5	57.7	75.1	44.2
	98	1.814	89.7	841	5.2	-1.6	54.2		
	196	1.814	89.6	1,328	5.9	-0.4	50.5		
	294	1.813	89.6	1,656	7.7	0.5	47.6		

※1) 「軸ひずみ」および「体積ひずみ」は、最大軸差応力時のひずみを示す。

※2) CD (圧密排水) 試験により求めた粘着力および内部摩擦角を  $c_d$ 、 $\phi_d$  と記す。



(a) モール・クーロンの破壊規準から得られた強度直線



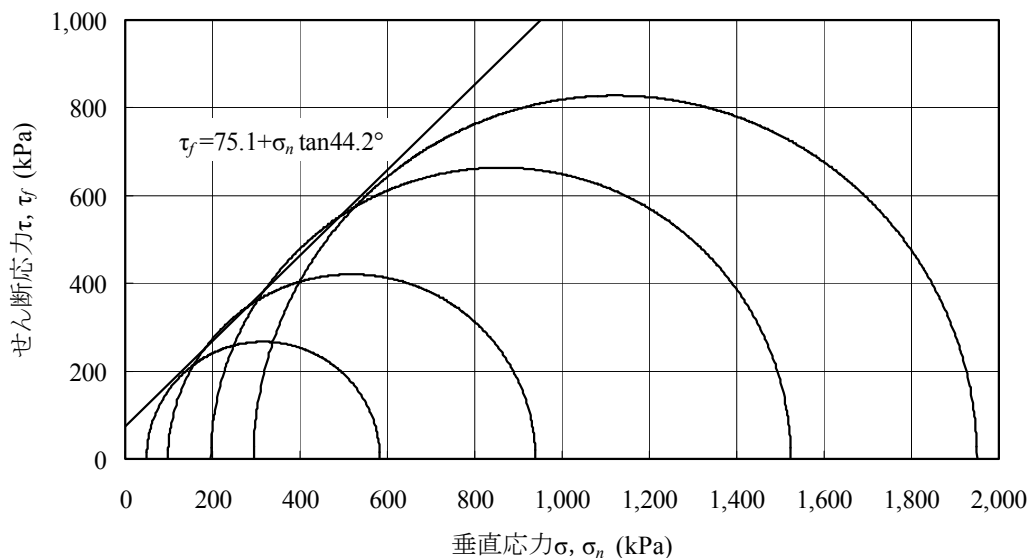
(b) φ<sub>0</sub>法により得られた強度直線

図-3 大型三軸圧縮 (CD) 試験結果 (飽和条件)

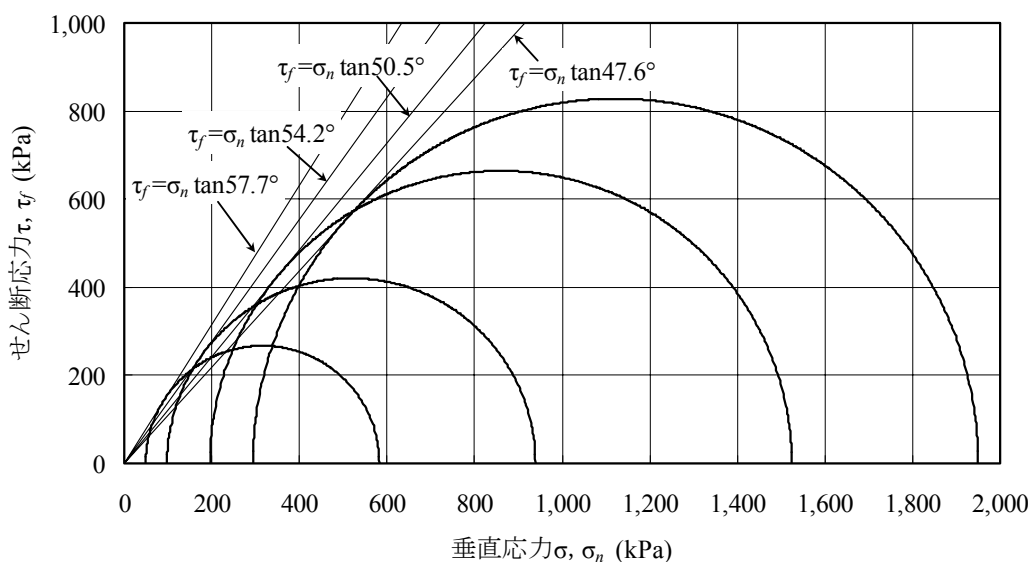
表-4 A材料の三軸圧縮試験結果と既往の研究成果 (B材料) との比較

試験条件	拘束圧 (kPa)	A材料					B材料				
		乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	相対密度 (%)	φ <sub>0</sub> (°)	c <sub>d</sub> (kPa) <sup>※</sup>	φ <sub>d</sub> (°) <sup>※</sup>	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	相対密度 (%)	φ <sub>0</sub> (°)	c <sub>d</sub> (kPa) <sup>※</sup>	φ <sub>d</sub> (°) <sup>※</sup>
飽和	49	1.814	89.6	57.6	69.2	41.0	2.220	87.7	61.9	80.1	50.1
	98	1.813	89.5	49.7			2.221	88.0	59.1		
	196	1.813	89.6	46.9			2.221	88.0	53.9		
	294	1.813	89.6	45.2			2.226	89.1	53.4		
不飽和	49	1.814	89.6	57.7	75.1	44.2	2.230	90.0	61.7	71.1	52.0
	98	1.814	89.7	54.2			2.221	88.0	59.5		
	196	1.814	89.6	50.5			2.234	90.9	55.8		
	294	1.813	89.6	47.6			2.221	88.0	54.5		

※) CD (圧密排水) 試験により求めた粘着力および内部摩擦角を c<sub>d</sub>, φ<sub>d</sub> と記す。



(a) モール・クーロンの破壊規準から得られた強度直線



(b)  $\phi_0$ 法により得られた強度直線

図-4 大型三軸圧縮 (CD) 試験結果 (不飽和条件)

### 3.4 表層すべり試験

#### 3.4.1 試験方法

表層すべり試験は、図-5 に示す装置を用いて実施した。

供試体作製においては1層10cmの2層とし、2層締固め後、供試体天端にて10cm格子により9点の高さを計測して供試体の体積を算出するとともに、投入質量等から供試体の密度等を算出した。締固め方法および密度計測方法の詳細については、平成18年度の報告書や筆者らの既発表論文<sup>5)</sup>を参照していただきたい。なお、相対密度の算出には、締固め試験で得た最小乾燥密度 $\rho_{dmin}=1.348\text{g/cm}^3$ および最大

乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.889\text{g/cm}^3$ を採用した。

試験は、図-5 に示す試験装置に取り付けたワイヤーをチェーンブロックにより衝撃が加わらない程度の低速にて徐々に吊り上げて容器を傾け、①試料が2~3個転がり落ちたときの角度、②試料の表面が一部崩れ出したときの角度、③試料の表面全体が崩れ出したときの角度、④試料が全体的に崩れ出したときの角度を測定し、静的安息角 $\phi_i$ として記録した。

表-5 に表層すべり試験の試験条件を示す。締固め時間は、相対密度の違いによる静的安息角 $\phi_i$ の変化を評価するため、供試体の1層ごとの締固め時間

を6パターンに変化させた。なお、締固めは、試験容器の斜面部に配慮し、その形状にあわせて試料を均質に締め固めるため、図-6に示すように、1層目については20cm×20cmの鉄板(標準タイプ)を3枚と30cm×20cmのもの(大型タイプ)を3枚敷き、

2層目は標準タイプのものを9枚敷き、締固め時の試料の浮き上がり等に注意しながら1ヶ所ずつ所定の締固め時間で実施した。また、試験は各締固め時間につき3供試体実施し、その平均を結果とした。

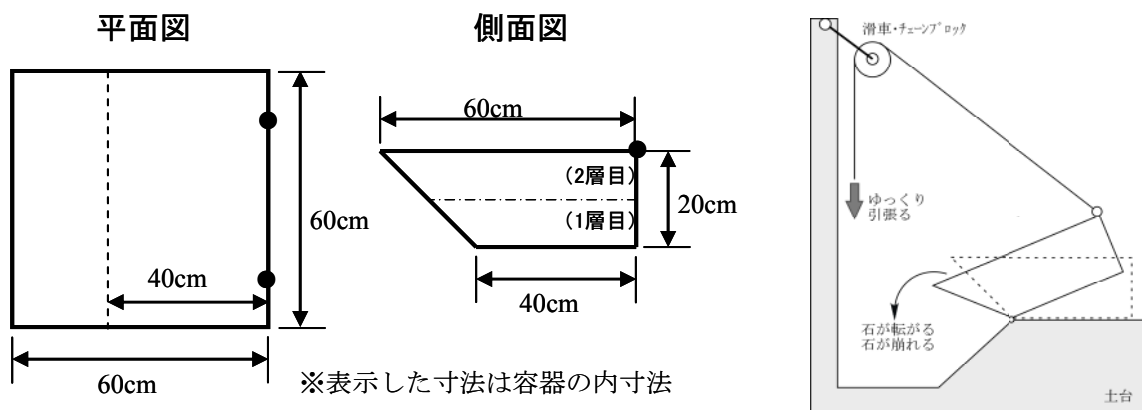


図-5 表層すべり試験装置の概要

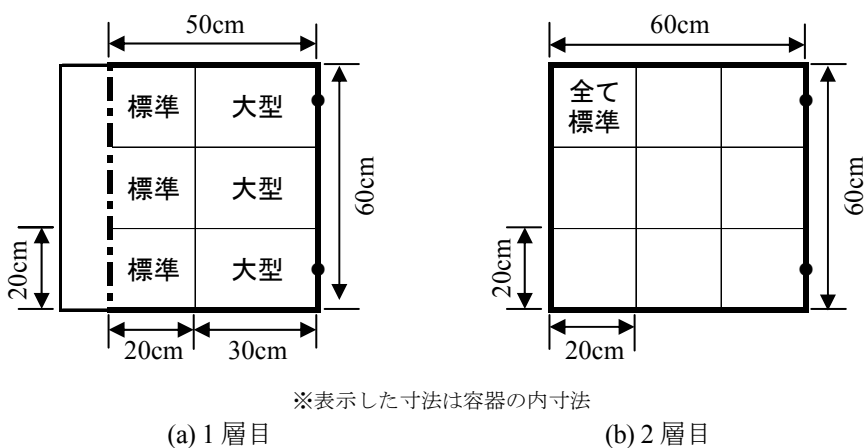


図-6 供試体締固め時の鉄板の配置

表-5 表層すべり試験条件一覧

締固め時間 (秒)	乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	間隙比 e	相対密度 D <sub>r</sub> (%)
0	1.453	0.65	25.2
5	1.840	0.30	93.3
10	1.874	0.28	98.0
20	1.914	0.25	103.3
30	1.911	0.25	102.8
70	1.962	0.22	109.3

### 3.4.2 試験結果

A 材料に対する表層すべり試験結果と、これと同じ条件で実施した B 材料を用いた平成 18 年度の報告書や筆者らの既発表論文<sup>5)</sup>の一覧を表-6 に示す。

この結果より、表層すべり試験では、試験精度の問題もあることが考えられるが、必ずしも岩片がより堅固な B 材料の静的安息角の方が大きい結果とはなっていないことがわかる。

表-6 A 材料の表層すべり試験結果と既往の研究成果 (B 材料) との比較

締固め時間 (秒)	A材料					B材料				
	相対密度 $D_r$ (%)	静的安息角 $\phi_i$ (°)				相対密度 $D_r$ (%)	静的安息角 $\phi_i$ (°)			
		状態①	状態②	状態③	状態④		状態①	状態②	状態③	状態④
0	25.2	31.8	41.1	45.1	54.6	21.8	35.9	43.7	47.6	52.8
5	93.3	48.8	61.3	68.5	72.1	84.0	47.3	状態不明	62.2	73.9
10	98.0	54.3	63.5	68.4	70.3	91.9	51.9	61.5	71.5	崩壊せず
20	103.3	57.5	67.7	70.8	74.9	96.3	49.2	64.7	70.7	崩壊せず
30	102.8	54.7	65.2	70.6	73.4	95.4	45.3	62.5	66.4	74.4
70	109.3	56.1	65.1	71.1	崩壊せず	88.4	49.0	57.3	65.1	65.9

状態①：試料が 2~3 個転がり落ちたときの角度  
 状態②：表面が一部崩壊したときの角度  
 状態③：表面が崩壊したときの角度  
 状態④：全面的に崩壊したときの角度

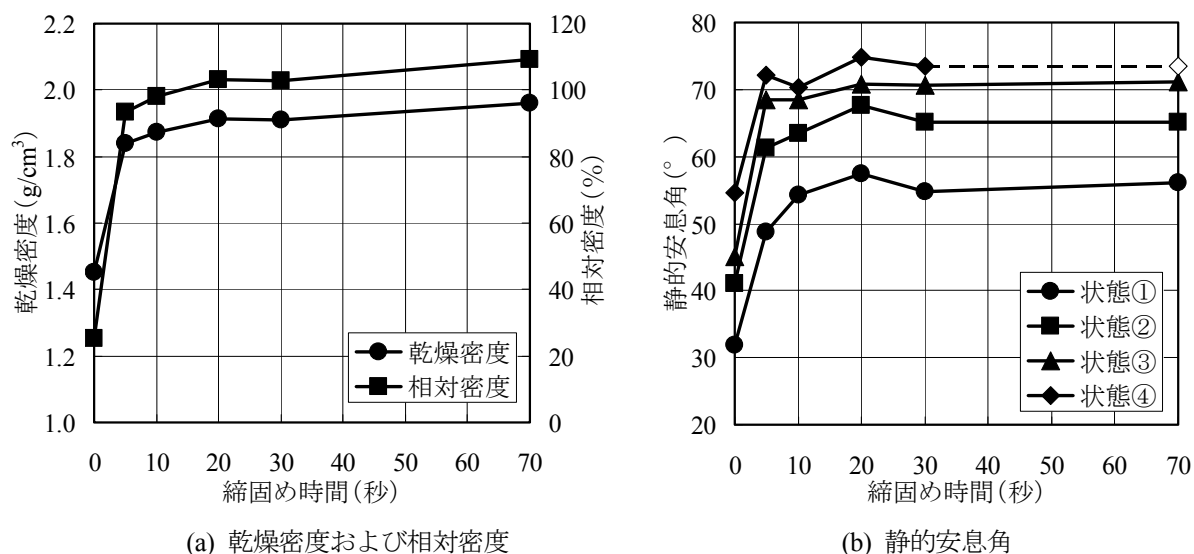


図-7 密度および静的安息角と締固め時間との関係 (A 材料)

また、供試体を作製する際の締固め時間と、締固め試験で求めた最大・最小乾燥密度を基に算出した相対密度の関係を図-7(a)に示す。これにより、締固め時間 5 秒で相対密度  $D_r=90\%$  を超えており、三軸圧縮試験で作製した供試体の相対密度と同程度以上になることがわかる。また、締固め時間 30 秒以降には、相対密度が低下する傾向がみられるものの、70 秒ではさらに増加している。なお、相対密度の低下には以下のような理由が考えられる。表層すべり

試験の供試体が隅角部を有するため、締固め試験の円柱供試体に比べて締固めにくい形状であること、締固め順序によりその周辺で既に締固めた箇所の試料の浮き上がりが発生させてしまい、締固め時間が長くなるとその影響が大きくなることから、結果として締固め時間が長くなると相対密度が低下する傾向を示したものと考えられる。また、その後の相対密度の増加については、過度な締固めによる粒子破碎の影響ではないかと考えられる。

次に、締固め時間と低拘束圧力条件下での内部摩擦角に相当する静的安息角  $\phi_i$  の関係を図-7(b)に示す。図-7(b)における締固め時間と静的安息角の関係は、図-7(a)の締固め時間と乾燥密度の関係と非常に良い対応を示していることがわかる。

静的安息角  $\phi_i$  は、全面崩落した場合の傾斜角度において締固め時間 0 秒で  $54.6^\circ$ 、5 秒以上の締固めで  $70\sim 75^\circ$  の大きな角度を示す。このことから、締固めにより表層部のロック材料のせん断強度がかなり大きくなることわかる。

なお、表-6の70秒における状態④および図-7(b)の波線部について、「全面的に崩壊」では試験容器形状による測定限界のため、その状況が明確に確認できなかったことを意味する。

### 3.5 大型一面せん断試験<sup>6)</sup>

#### 3.5.1 試験方法

大型三軸圧縮試験よりも低拘束圧条件での試験が可能であり、試験方法の原理も単純である大型一面せん断試験を、A材料およびB材料を用いて実施した。図-8は、試験に使用した大型一面せん断試験装置の模式図を示し、写真-1は、試験装置の全体写真を示す。主な試験条件等は以下に示すとおりである。

試験は、飽和条件および不飽和条件の下で、25、49、98、196kPaの4垂直応力条件とし、せん断中は垂直応力一定となるように制御した。供試体寸法は40cm×40cm×40cmとし、飽和条件においては、供試体全体が水中に入るようにタンクに水を張った状態で試験を行った。

供試体密度は、A材料については  $D_r=90\%$  に相当

する  $\rho_d=1.816\text{g/cm}^3$ 、B材料については別途実施した最小・最大密度試験<sup>5)</sup>により得られた  $D_r=90\%$  に相当する  $\rho_d=2.230\text{g/cm}^3$  となるように前述の電動ハンマーによる振動締固め法で作製した。

供試体作製にあたっては、せん断面が供試体作製時の打ち継ぎ面と一致しないよう、層厚については1層目を10cm、2層目を20cm、3層目を10cmとし、各層の体積と  $D_r=90\%$  相当の乾燥密度から算出される各層当たりの試料質量を計算し、各層ごとに所定の厚さになるように供試体を作製した。

せん断箱の初期せん断隙間は1mmとし、せん断面はベアリングで滑動するようになっている。また、せん断速度は、砂質土の標準一面せん断試験( $\phi 6\text{cm}$ )におけるせん断速度  $0.2\text{mm/min}$  ( $\approx 0.3\%/\text{min}$ )<sup>7)</sup> と同等のひずみ速度である  $1.3\text{mm/min}$  ( $\approx 0.3\%/\text{min}$ ) とした。なお、一面せん断試験装置については、せん断中の供試体のダイレイタンシーによりせん断箱と反力板との間に摩擦が発生し本来の試料のせん断強度以上の強度が結果として算出される可能性がある<sup>8)</sup> ため、その周辺摩擦を低減させる対策として、上部せん断箱と反力板の間にローラーを付けた。この対策により、供試体のダイレイタンシー増加に伴い、上部せん断箱が多少浮き上がることになるが、垂直応力は常時一定圧を保つように制御した。また、せん断隙間が試験中に変化することが考えられるが、 $\phi 6\text{cm}$  の標準供試体でのせん断隙間が  $0.2\sim 0.5\text{mm}$  であるのに対し、本試験の最大せん断応力を計測した時点での鉛直変位は数mmであり、供試体の大きさで比較すれば隙間による影響は無視してよいと考え、後述の結果については、せん断隙間やその影響については考察していない。



(a) 大型一面せん断試験装置全体

(b) 拡大写真

写真-1 大型一面せん断試験装置



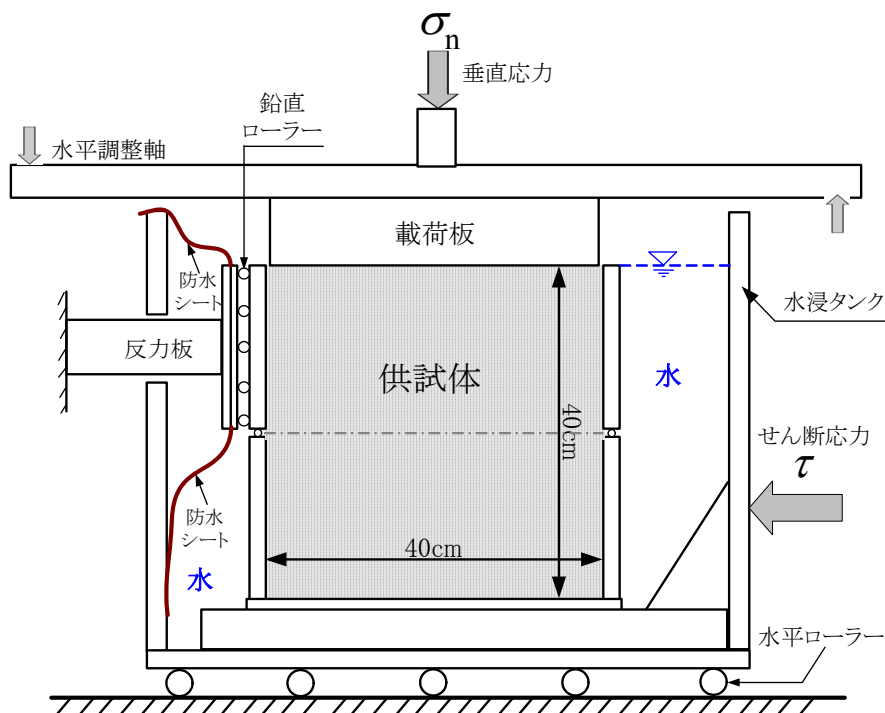


図-8 大型一面せん断試験装置の模式図

### 3.5.2 試験結果

試験結果の一覧を表-7に示す。なお、表中のせん断変位および鉛直変位は最大せん断応力が発生した時点で計測した値である。また、表-7の $\phi_0$ については、ある垂直応力において発生した最大せん断応力に対する点( $\sigma_m, \tau_p$ )と原点とを結んだ直線の勾配を $\phi_0$ としている。また、 $\phi_0$ および $c, \phi$ の算出にあたり、以下の述べるように垂直応力の補正を行い、比較検討を行った。まず、補正①として、試験装置として載荷した垂直応力にせん断箱の重量を加えたもので算出した。これは、反力板とせん断箱との摩擦低減を目的としてローラーを設置している

ため、せん断に伴うダイレイタンスーにより試料とともにせん断箱も浮き上がり、実際のせん断面には垂直応力のみだけでなく、上部せん断箱の重量も加わっているものと判断したためである。この結果を表-8に示す。次に、補正②として、ダイレイタンスーによる浮き上がりが生じているときに、上部せん断箱内部の供試体の自重もせん断面に作用していると想定し、補正①の重量にせん断面上の20cm分の重量を加えたもので算出した。この結果を表-9に示す。なお、いずれの補正においても、飽和条件下では水中での試験となるため、上部せん断箱の浮力に相当する重量を控除した。

表-7 大型一面せん断試験結果の一覧

(a) A 材料

試験条件	垂直応力 (kPa)	最大せん断応力(kPa)	せん断変位 (mm) <sup>※1)</sup>	鉛直変位 (mm) <sup>※1)</sup>	$\phi_0$ (°)	粘着力 $c_d$ (kPa) <sup>※2)</sup>	内部摩擦角 $\phi_d$ (°) <sup>※2)</sup>
飽和	24.65	51.53	9.97	-3.93	64.4	29.9	48.3
	49.62	89.49	8.14	-2.65	61.0		
	99.11	146.01	14.42	-2.86	55.8		
	198.22	249.93	15.85	-1.86	51.6		
不飽和	24.84	69.28	8.57	-4.92	70.3	42.8	51.1
	49.37	101.21	6.72	-2.51	64.0		
	99.73	178.62	11.82	-4.57	60.8		
	195.94	281.06	11.05	-2.06	55.1		

表-7 大型一面せん断試験結果の一覧

(b) B 材料

試験条件	垂直応力 (kPa)	最大せん断応力(kPa)	せん断変位 (mm) <sup>※1)</sup>	鉛直変位 (mm) <sup>※1)</sup>	$\phi_0$ (°)	粘着力 $c_d$ (kPa) <sup>※2)</sup>	内部摩擦角 $\phi_d$ (°) <sup>※2)</sup>
飽和	25.89	71.13	9.97	-3.93	70.0	37.4	56.0
	49.80	116.80	8.14	-2.65	66.9		
	98.50	183.55	14.42	-2.86	61.8		
	196.99	329.07	15.85	-1.86	59.1		
不飽和	25.27	78.03	8.57	-4.92	72.1	40.9	58.7
	49.80	129.13	6.72	-2.51	68.9		
	98.50	200.50	11.82	-4.57	63.8		
	196.37	363.40	11.05	-2.06	61.6		

※1) 「せん断変位」および「鉛直変位」は、最大せん断応力時の変位を示す。

※2) CD (圧密排水) 試験により求めた粘着力および内部摩擦角を  $c_d$ 、 $\phi_d$  と記す。

表-8 補正① (垂直応力+上部せん断箱重量) の結果一覧

(a) A 材料

試験条件	垂直応力 (kPa)	垂直応力+上部せん断箱重量 (kPa)	最大せん断応力(kPa)	$\phi_0$ (°)	粘着力 $c_d$ (kPa) <sup>※)</sup>	内部摩擦角 $\phi_d$ (°) <sup>※)</sup>
飽和	24.65	31.56	51.53	58.5	22.1	48.3
	49.62	56.52	89.49	57.7		
	99.11	106.01	146.01	54.0		
	198.22	205.12	249.93	50.6		
不飽和	24.84	32.85	69.28	64.6	32.9	51.1
	49.37	57.38	101.21	60.4		
	99.73	107.74	178.62	58.9		
	195.94	203.95	281.06	54.0		

(b) B 材料

試験条件	垂直応力 (kPa)	垂直応力+上部せん断箱重量 (kPa)	最大せん断応力(kPa)	$\phi_0$ (°)	粘着力 $c_d$ (kPa) <sup>※)</sup>	内部摩擦角 $\phi_d$ (°) <sup>※)</sup>
飽和	25.89	32.79	71.13	65.3	27.1	56.0
	49.80	56.70	116.80	64.1		
	98.50	105.40	183.55	60.1		
	196.99	203.89	329.07	58.2		
不飽和	25.27	33.28	78.03	66.9	27.7	58.7
	49.80	57.81	129.13	65.9		
	98.50	106.51	200.50	62.0		
	196.37	204.38	363.40	60.7		

※) CD (圧密排水) 試験により求めた粘着力および内部摩擦角を  $c_d$ 、 $\phi_d$  と記す。

表-9 補正②（垂直応力+上部せん断箱重量+供試体自重（想定せん断面上 20cm））の結果一覧

(a) A 材料

試験条件	垂直応力 (kPa)	垂直応力+上部せん断箱重量+供試体自重(kPa)	最大せん断応力(kPa)	$\phi_0$ (°)	粘着力 $c_d$ (kPa) ※)	内部摩擦角 $\phi_d$ (°) ※)
飽和	24.65	33.80	51.53	56.7	19.6	48.3
	49.62	58.76	89.49	56.7		
	99.11	108.25	146.01	53.4		
	198.22	207.36	249.93	50.3		
不飽和	24.84	36.41	69.28	62.3	28.4	51.1
	49.37	60.95	101.21	58.9		
	99.73	111.30	178.62	58.1		
	195.94	207.52	281.06	53.6		

(b) B 材料

試験条件	垂直応力 (kPa)	垂直応力+上部せん断箱重量+供試体自重(kPa)	最大せん断応力(kPa)	$\phi_0$ (°)	粘着力 $c_d$ (kPa) ※)	内部摩擦角 $\phi_d$ (°) ※)
飽和	25.89	35.54	71.13	63.4	23.1	56.0
	49.80	59.45	116.80	63.0		
	98.50	108.15	183.55	59.5		
	196.99	206.64	329.07	57.9		
不飽和	25.27	37.66	78.03	64.2	20.5	58.7
	49.80	62.19	129.13	64.3		
	98.50	110.89	200.50	61.1		
	196.37	208.76	363.40	60.1		

※) CD (圧密排水) 試験により求めた粘着力および内部摩擦角を  $c_d$ 、 $\phi_d$  と記す。

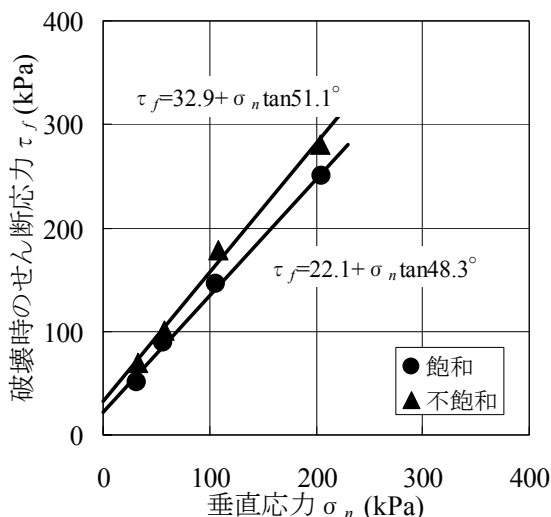
これらの結果より、垂直応力を補正した場合は試験装置による載荷荷重のみにより垂直応力を算出した場合に比べ、補正として加える垂直応力が増加するにつれて  $\phi_0$  は徐々に小さくなるのがわかる。 $\phi_0$  の変化が最も大きい垂直応力 25kPa の場合では、補正①においては A 材料で約 6°、B 材料で約 5° 小さくなり、補正②においては A 材料で約 8°、B 材料で 7~8° 小さくなっている。上部せん断箱重量を垂直応力に換算すると、飽和条件で 6.90kPa、不飽和条件で 8.01kPa となり、試験装置による垂直応力に対して 3 割程度の増加になる。また、供試体自重も考慮すると、飽和・不飽和条件で若干異なるが、垂直応力がさらに 1 割程度増加するため、 $\phi_0$  に与える影響も大きくなるのがわかる。なお、今回の試験における最大の垂直応力 196kPa の場合では、補正の影響が小さくなるため、 $\phi_0$  の変化も 1.5° 程度(表-7 と表-9 の差)に留まっている。

しかし、補正②に関しては、せん断ゾーンの分布

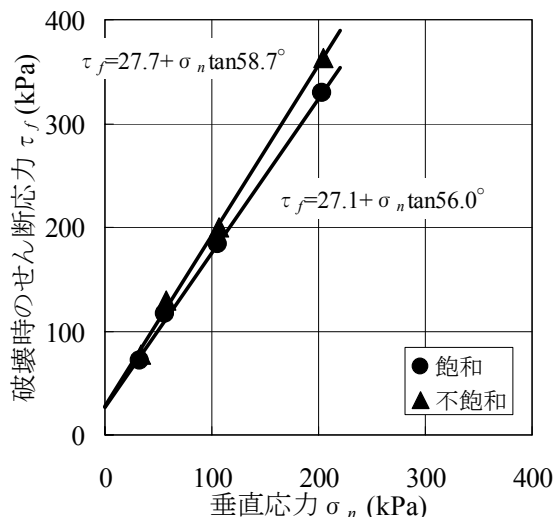
が不明であるため、供試体重量がせん断ゾーンに対してどのように作用しているか明確でないこと、供試体重量による影響は上部せん断箱重量の影響に比べて小さいことから、以下の考察については、補正①の結果を採用して行うこととする。

垂直応力と破壊時せん断応力（最大せん断応力）の関係を図-9 に示す。図中にはモール・クーロンの破壊規準に従った近似直線から得られた  $c$ 、 $\phi$  を示している。図-9 より、A 材料、B 材料ともに不飽和条件の方が飽和条件より内部摩擦角で 3° 弱大きくなっている。また、B 材料の方が、飽和条件下では  $\phi_0$  で 6~8° 程度、 $\phi_d$  で 8° 程度、不飽和条件下では  $\phi_0$  で 2~7° 程度、 $\phi_d$  で 8° 程度の大きい値となっている。この結果からも三軸圧縮試験と同様に B 材料の方が、強度が大きいことがわかる。

また、一面せん断試験と三軸圧縮試験の結果の整合性を確認するために、ロック材料のせん断強度の拘束圧依存性を考慮した曲線破壊規準（以下、「Ab

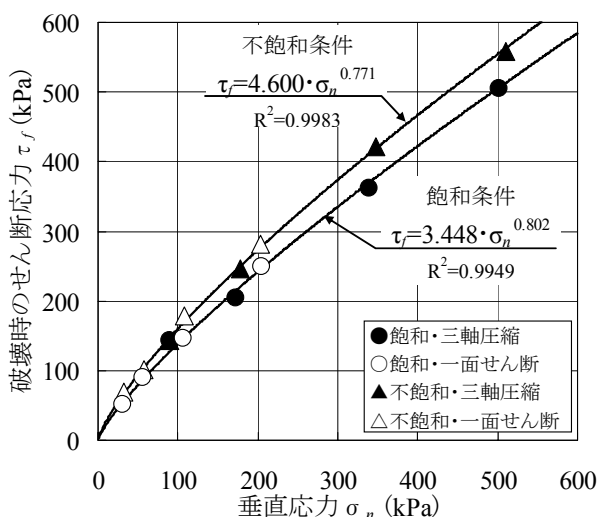


(a) A 材料

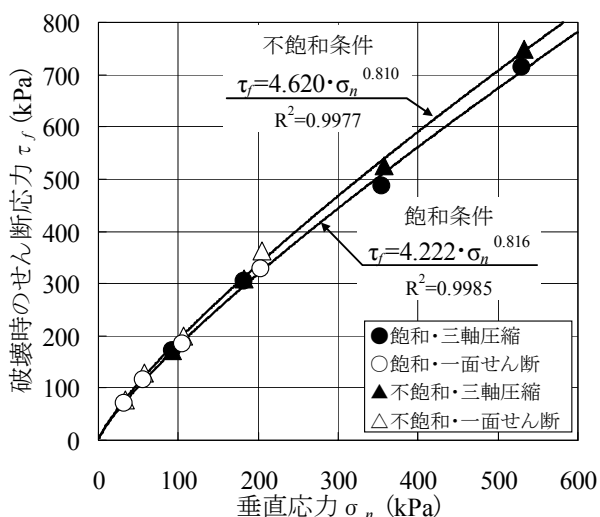


(b) B 材料

図-9 大型一面せん断試験結果による垂直応力と破壊時のせん断応力との関係



(a) A 材料



(b) B 材料

図-10 一面せん断試験と三軸圧縮試験のせん断強度の比較

法」という)によって比較したものを図-10に示す。なお、Ab法は式(3)で表される。

$$\tau_f = A(\sigma_n)^b \quad (3)$$

ここに、 $\tau_f$ はせん断強度、 $\sigma_n$ はすべり面に作用する垂直応力(有効応力)、Aおよびbは試験結果から得られる係数である。

図-10によると、今回実施したA材料の飽和および不飽和条件、B材料の飽和および不飽和条件のそれぞれの一面せん断試験の結果は、三軸圧縮試験の結果とほぼ一本のせん断強度曲線で表すことができ、

しかも非常に高い相関性を示していることがわかる。従来より一面せん断試験は、三軸圧縮試験より大きいせん断強度が得られ、またそれは、実際よりも大きいせん断強度である可能性が高いとされてきたが、今回実施した一面せん断試験装置のせん断箱周辺摩擦の除去対策が有効に働き、三軸圧縮試験と同様な結果を得られることがわかった。さらに、この改良した一面せん断試験により、三軸圧縮試験では対応できない50kPa程度以下の拘束圧条件下におけるせん断強度の評価も可能になったといえる。また、垂直応力と最大のせん断応力の関係が原点を通る曲線

で近似できることから、ロック材料のせん断強度には拘束圧依存性があることがわかる。

ところで、一面せん断試験では、せん断面に作用する垂直応力  $\sigma_n$  と破壊時のせん断応力  $\tau_f$  が得られるが、三軸圧縮試験との結果を比較する上では、拘束圧の取り扱いが異なる。そこで、一面せん断試験より得られた  $\sigma_n$ 、 $\tau_f$  および  $\phi_{0a}$  (一面せん断試験で得られた  $\phi_0$ ) を用いて、モール・クーロンの破壊規準線に接するモール円の最大主応力  $\sigma_{1a}$  および最小主応力  $\sigma_{3a}$  に換算して比較してみる。三軸圧縮試験で最も低拘束圧な条件から得られる  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  ( $\approx 50\text{kPa}$ ) および  $\phi_0$  と、一面せん断試験の小さい垂直応力の下で得られる  $\sigma_n$  ( $\approx 25\text{kPa}$ ,  $50\text{kPa}$ )、 $\tau_f$  および  $\phi_0$  から換算したモール円との関係は、図-11 の示す概念図のようになる。なお、 $\sigma_n$  と  $\sigma_1$  および  $\sigma_3$  の関係式は、式(4)に示すとおりである。

$$\sigma_n = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha / 2 \quad (4)$$

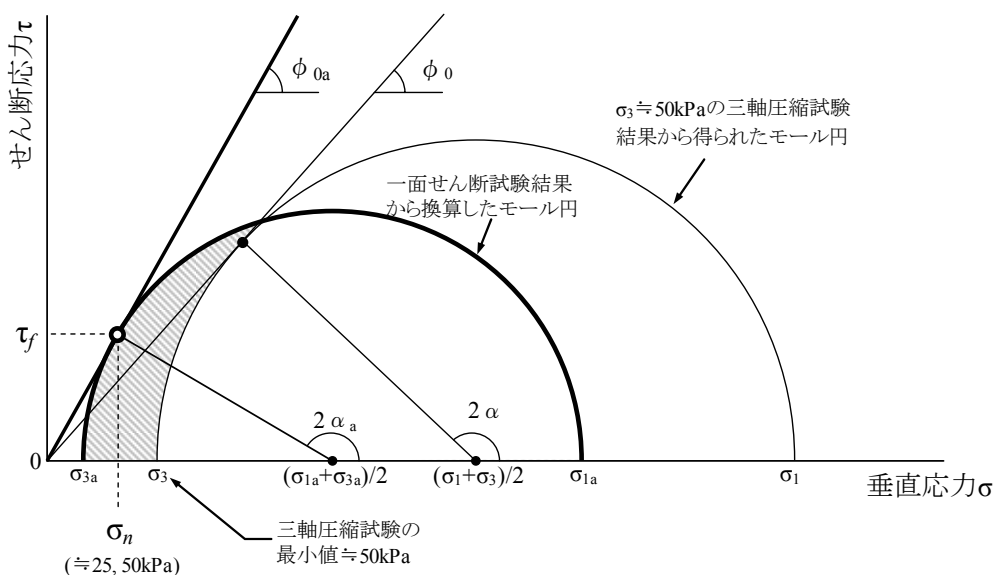


図-11 一面せん断試験結果の  $\sigma_3$  評価の概念

#### 4. 原位置試験<sup>9)</sup>

##### 4.1 試験概要

前章までの検討も含め、これまで低拘束圧条件下における拘束圧依存性を考慮したロック材料のせん断強度の評価方法について、室内における三軸圧縮試験、一面せん断試験、表層すべり試験により検討を進めてきた。しかし、これまでの検討では室内試験用に調整した、すなわち最大粒径が原粒度より小さい試料を用いて検討せざるを得ない状況であった。そこで、各種室内試験のうち、表層すべり試験を取り上げ、ロックフィルダムの盛立てに使用されてい

ここで、 $\alpha$  は供試体せん断面の傾斜角であり、

$$\alpha = 45^\circ + \phi_0 / 2 \quad (5)$$

この図より、垂直応力  $\sigma_n$  が三軸圧縮試験の拘束圧  $\sigma_3$  ( $\approx 50\text{kPa}$ ) 以下であるとき、換算して得られる一面せん断試験結果の最小主応力  $\sigma_{3a}$  は、 $\sigma_3$  より小さくなることがわかり、このことから一面せん断試験により  $\sigma_{3a}$  から  $\sigma_3$  ( $\approx 50\text{kPa}$ ) までの低拘束圧域において材料のせん断強度が評価できると考えられる。よって、本研究のように試験装置として載荷した垂直応力に上部せん断箱重量を補正して加えた場合においても、一面せん断試験 ( $\approx 25\text{kPa}$ ,  $50\text{kPa}$ ) の結果は、三軸圧縮試験の最も低拘束圧  $\sigma_3 \approx 50\text{kPa}$  での試験結果よりも低い拘束圧域でせん断強度を評価していることがわかる。

る原粒度ロック材料の低拘束圧条件下におけるせん断強度を評価するのに必要な静的安息角を得るために、建設中のダムにおいて、原位置表層すべり試験を実施した。

原位置試験に使用した材料は、3章で示した A 材料の原粒度材料である。原位置試験で使用したロック材料の粒度 (室内試験用材料 (A 材料) の粒度も併記) は、図-12 に示すとおりである。これらの材料を使用して、図-13 に概略を示す 2 種類の原位置表層すべり試験を実施した。

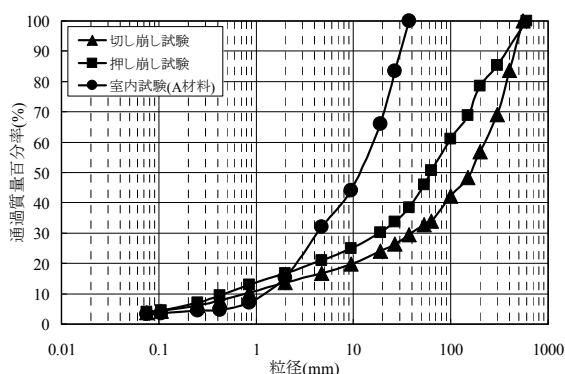
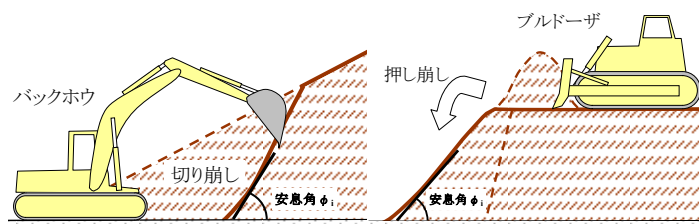


図-12 原位置試験に供したロック材料の粒度分布



(a) 切り崩し試験

(b) 押し崩し試験

図-13 原位置表層すべり試験の概略

#### 4.2 切り崩し試験方法

本試験は、実際の盛立仕様にに基づいた締め固められたロック材料を用いて実施した(図-13(a)参照)。1.2m<sup>3</sup>級大型バックホウにて堤体下流面の一部を掘削しておよそ5m四方の斜面を形成し、そこからさらに急勾配に切り崩し、斜面に崩落を発生させ、その状態における残存斜面の角度を安息角として計測した。安息角の測定は、作業の安全性に配慮しノンプリズム測距機能を搭載したトータルステーション(ノンプリズムモード測距精度10mm)を使用し、写真-2に示すイメージで斜面に格子状に設けた16の測点の座標を計測する方法を採用した。これを3ヶ所で実施した。なお、表中の傾斜角度は、斜面の格子点上の測点から斜面形状を描き、ほぼ1m間隔で斜面直交方向に設定した6断面の平均勾配角度の平均として求めた。また、各設定断面において相対的に緩勾配になっている箇所を緩勾配角度とし、その平均を求めた。

#### 4.3 押し崩し試験方法

本試験では、ロック材料を100t級大型ブルドーザの排土板で静かに谷に押し崩し、締め固めていない状態のロック材料での安息角を計測した(図-13(b)参照)。安息角の計測は、写真-3に示すイメージのとおり押し崩してできた斜面の上と下の端部座標をトータルステーション(測距精度2mm+2ppm×測定距離)で測量する方法とした。また、参考に、現地で簡易的に安息角を計測する方法として、測量した同一測線上の斜面に延伸したスタッフを当て、これにデジタル傾斜計(計測精度0.1°)を取り付けて計測した。試験は2回実施して平均的な安息角を求めた。

#### 4.4 試験結果

切り崩し試験および押し崩し試験の結果を表-10に示す。切り崩し試験の結果は、斜面の傾斜角度の3ヶ所の平均は75.9°、緩勾配角度でも66.7°とかなり大きい角度となっていることがわかる。なお、試験箇所の近傍2箇所で計測した乾燥密度の平均は2.046g/cm<sup>3</sup>、含水比は約6%であった。含水比が高めであった理由として、本試験の実施中は小雨が降っていたためと考えられるが、これによりロック材料が湿潤状態となり若干崩壊しづらい状況にあった可能性がある。

押し崩し試験の結果は、各測線で40°前後の安息角となり、全体平均で38.5°であった。この値は想定していたよりも若干小さい値であった。この原因として、崩れて斜面を落下する際に粒径の大きいロック材料が転がり落ち、斜面のすそ野が広がった可能性が考えられる。また、参考として計測した傾斜計での計測結果は、全体平均で39.6°であった。測量による計測結果と1°程度の差があったが、スタッフを当てた箇所の斜面の起伏により多少角度が変化することを考慮すると、測量結果とほぼ同じと考えられる。よって、斜面の角度を計測するには、傾斜計による簡易計測も有効であるといえる。なお、押し崩し試験後の試料に対し、3箇所現場密度試験を実施した結果、乾燥密度は1.924g/cm<sup>3</sup>、含水比は5.2%であった。

#### 4.5 室内試験と原位置試験との比較

締め固めたA材料に対する表層すべり試験の室内および原位置試験の結果の比較を図-14に示す。なお、比較対照として、既往の研究である大根ら<sup>10)</sup>の結果も併せて示す。大根らは、平均粒径が比較的小

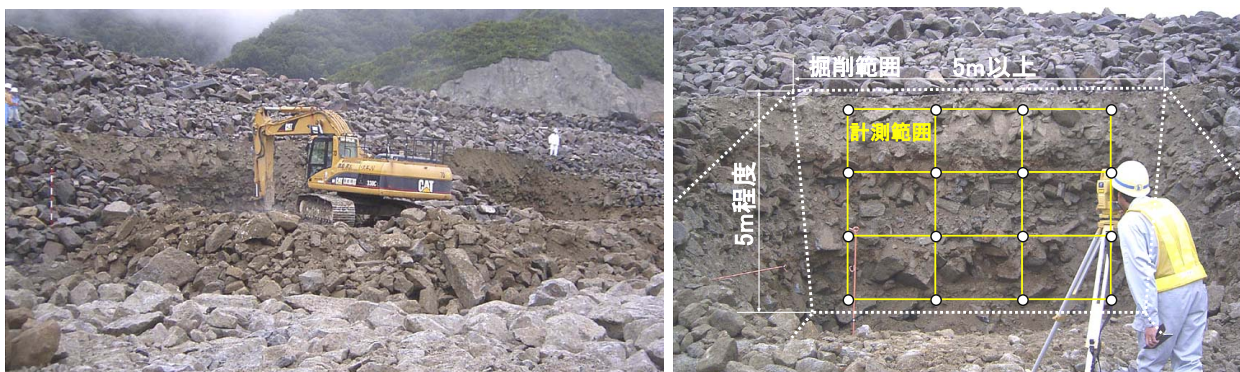


写真-2 切り崩し試験実施状況と安息角の計測イメージ

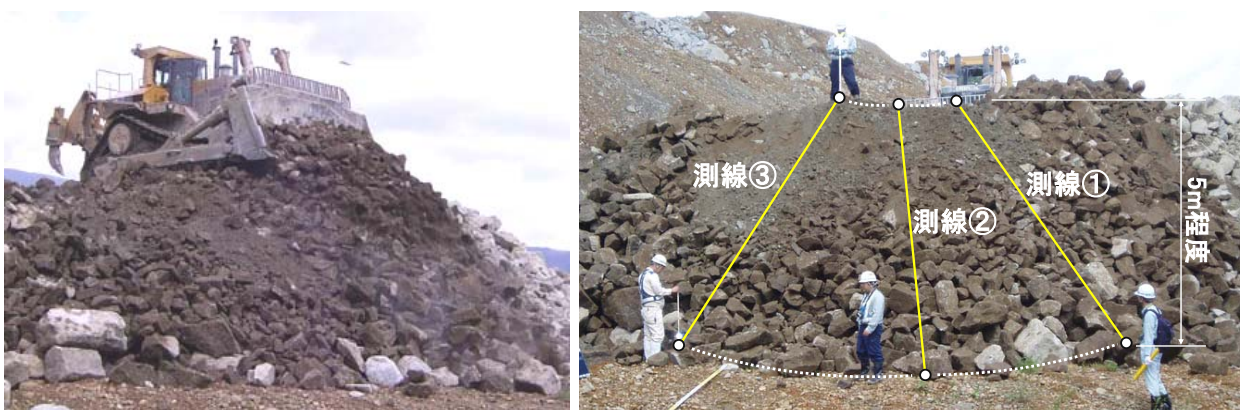


写真-3 押し崩し試験実施状況と安息角の計測イメージ

表-10 原位置試験結果

(a) 切り崩し試験による安息角

(b) 押し崩し試験による安息角

試験場所	現地計測結果(°)				試験	現地計測結果(°)					
	傾斜角度	平均	緩勾配角度	平均		計測方法	回数	測線①	測線②	測線③	各平均
①	80.2	75.9	70.7	66.7	測量	1回目	37.3	39.3	40.8	39.1	38.5
②	77.6		68.9			2回目	35.8	40.8	36.8	37.8	
③	69.8		60.4		傾斜計 (参考)	1回目	39.3	38.8	39.8	39.3	39.6
			2回目	39.4		40.4	39.8	39.9			

さい試料に対し、締め固めた試料を試験台に上載して台を傾けて試料の状態が変化するときの試料の法面の角度を計測する室内表層すべり試験を実施するとともに、平均粒径が大きいものについては試験方法は不明であるが、現場にて表層すべり試験を実施した。

室内試験の全面崩壊状態と原位置試験の残存斜面の傾斜角度が、いずれも締め固められた試料における限界状態の安息角であるとするれば、図-14の●-○で示されるように平均粒径が大きくなるほど安息角が大きくなる傾向にあることがわかる。また、室内試験の一部崩壊状態と原位置試験の残存斜面の緩勾配角度が、いずれも締め固められた試料において

比較的崩落しやすい状態での安息角であるとするれば、図-14の▲-△で示されるように限界状態の安息角と同様の傾向を示すことがわかる。また、これらは、値は異なるものの、大根ら<sup>10)</sup>の既往の研究成果とも同様の傾向を示すことがわかる。以上より、本研究で対象とした実ダムのロック材料であるA材料は、締め固めた状態であればかなり大きな安息角となり、かつ、平均粒径が大きくなるにつれて安息角は増加する傾向にあることがわかった。

ただし、原位置試験の試料は、降雨により気乾状態ではなく、含水比が若干大きくなっていることから安息角が気乾状態よりも大きめになっている可能性がある。そのため、室内試験において現場の状況

に合わせた再現試験（ただし、最大粒径は 37.5mm）を実施し、含水比の影響について検討する必要がある。この再現試験により原位置試験の結果を補正することができれば、安息角のより厳密な評価が可能になると考える。

また、締固め無しの試料による比較では、原位置の押し崩し試験の試料の崩落状況が室内試験における状態③（試料の表面全体が崩れ出したときの角度）

相当であると考え、室内試験結果の 45.1° に対し、原位置試験は 38.5° であった。これは前述のように、試料が崩れて斜面を落下する際に粒径の大きいロック材料が転がり落ち、斜面のすそ野が広がったためと考えられるが、逆に締め固めていない試料でも対象ロック材料の設計値である 41.5° に近い強度を持っていることがわかった。

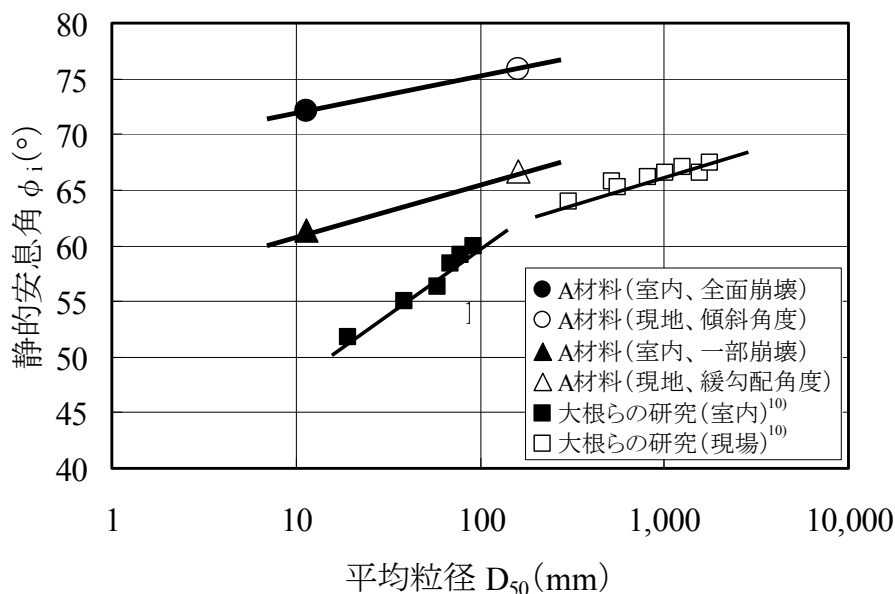


図-14 静的安息角  $\phi_i$  と平均粒度  $D_{50}$  の関係

### 5. まとめ

平成 19 年度は、低拘束圧条件下でのロック材料の強度評価についての検討を行うため、ロックフィルダムで実際に使用されているロック材料である A 材料と、比較対照として砕石 B 材料を用いて、大型三軸圧縮試験、大型一面せん断試験、表層すべり試験の室内試験に加え、原位置における原粒度ロック材料を用いた表層すべり試験を実施した。以下にその結果をまとめる。

- (1) A 材料を用いて室内試験を実施した結果、大型三軸圧縮 (CD) 試験では、4 拘束圧条件のモール円の接線から算出した  $\phi_d$  は、飽和条件で 41.0°、不飽和条件で 44.2° となった。また、原点を通る各拘束圧条件のモール円との接線から算出する  $\phi_0$  は、低拘束圧である 49kPa については、飽和条件で 57.6°、不飽和条件で 57.7° となり、低拘束圧における  $\phi_0$  は  $\phi_d$  よりも 15° 程度大きい結果となった。
- (2) より低拘束圧条件下での強度評価を行うため、A 材料を用いて表層すべり試験を実施した。こ

の際、締固め時間を変化させることで相対密度を変化させた。一部崩壊時の静的安息角について、締固め時間 0 秒 ( $D_r=25.2\%$ ) でも 45.1° の値を得ているが、 $D_r=90\%$  以上で 68° 以上となり、 $D_r=90\%$  以上の締固めにより静的安息角がかなり大きくなる結果となった。

- (3) A 材料および B 材料を用いて三軸圧縮試験よりも低拘束圧条件下での試験が可能である大型一面せん断試験を実施した。A 材料については、 $\phi_d$  は飽和条件で 48.3°、不飽和条件で 51.1° となり、B 材料については、 $\phi_d$  は飽和条件で 56.0°、不飽和条件で 58.7° となり、B 材料は A 材料よりも 8° 程度大きくなる結果となった。また、A 材料について、 $\phi_0$  は垂直応力 49kPa において飽和条件で 57.7°、不飽和条件で 60.4° となり、せん断箱の重量等を考慮した補正の実施の有無により多少変化するが、三軸圧縮試験との比較では同等以上の大きさとなった。またさらに低い垂直応力である 25kPa については、49kPa のときより 1° 以上大きくなった。これにより、低拘



束圧条件下では、拘束圧に依存した  $\phi_0$  で評価すれば、強度の増大が見込まれることがわかった。なお、本研究においては、試験結果については垂直応力を上部せん断箱重量により補正を行って整理した。

- (4) 原粒度ロック材料の低拘束圧条件下におけるせん断強度を評価するのに必要な静的安息角を得るために、原位置表層すべり試験を実施した。試験は、締め固めたロック材料で行う切り崩し試験と、締め固めていないロック材料で行う押し崩し試験の2種類としそれぞれの安息角を計測した。その結果、切り崩し試験の平均傾斜角度は、 $75.9^\circ$ となり、押し崩し試験の平均安息角は $38.5^\circ$ となった。切り崩し試験の結果と室内表層すべり試験で  $D_r=90\%$ 以上となる5秒締め固めたときの結果を比較すると  $4^\circ$ 程度大きくなった。これにより、原粒度ロック材料は、室内表層すべり試験と同等以上の強度が出ていることがわかった。また、押し崩し試験の結果は、原粒度ロック材料の設計値である内部摩擦角 $41.5^\circ$ に対し、 $3^\circ$ 小さい値となったが、逆に締め固めていない試料でも設計値に近い強度を持っていることがわかった。

表層すべり試験や一面せん断試験などの低拘束圧条件を対象とした強度試験においては、材料の粒度、締め固め、含水比等が大きく影響するものと考えられる。今後は、それら試験条件を変化させた試験をさらに実施し、低拘束圧条件下での所要精度を確保したうえでの拘束圧依存性を考慮したロック材料強度の評価方法を提案する。

## 参考文献

- 1) (財)国土開発技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令、(社)日本河川協会、2000年1月。
- 2) 建設省河川局監修：改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説、設計編 [I]、(社)日本河川協会、1997年10月。
- 3) 建設省河川局開発課：フィルダムの耐震設計指針(案)、(財)国土開発技術研究センター、1991年6月。
- 4) 国土交通省河川局治水課：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)、2005年3月。
- 5) 山口嘉一、佐藤弘行、中村洋祐、林 直良、倉橋 宏：低拘束圧条件下におけるロック材料強度の評価、ダム技術、No.249、pp.22-37、2007年6月。

- 6) 山口嘉一、佐藤弘行、林 直良、吉永寿幸、スレン ソッキアン、下村幸男：フィルダムのロック材料用大型一面せん断試験機の開発、第43回地盤工学研究発表会、2008年7月(投稿中)。
- 7) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説 第1回改訂版、pp.563-600、2000年3月。
- 8) (社)土質工学会：粗粒剤量の変形と強度、pp.132-167、1986年5月。
- 9) 山口嘉一、佐藤弘行、林 直良、吉永寿幸、佐々木健一、中野博英：ロックフィルダムの原粒度ロック材料を用いた表層すべり試験、平成19年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集(CD-ROM)、III-14、2008年3月。
- 10) 大根義男、成田国朝、奥村哲夫：アース・ロックフィルダムの地震時の斜面安定評価について、大ダム、No.158、pp.64-71、1997年1月。

## A STUDY ON EVALUATION OF STRENGTH OF ROCKFILL MATERIALS UNDER LOW CONFINING PRESSURE CONDITION

**Abstract:** In this study, we evaluate shear strength of rock materials under low confining pressure condition with several kinds of tests, and establish a rationalized method of setting their design strength considering the dependence of confining pressure.

In this fiscal year, we carried out large-scale triaxial compression tests under low confining pressure, large-scale box shear tests, and laboratory and field surface sliding tests for rock materials. Based on results of these tests and previous research works, we investigated evaluation method of the shear strength under low confining pressure comparing. In addition, we discussed the setting method of the design strength of rock materials considering the confining pressure dependence.

**Key words:** embankment dam, rockfill materials, design strength, dependence of confining pressure, cost reduction