

[2100] RCD コンクリートのせん断強度に関する実験的考察

瀬古 育二(水資源開発公団試験所)

山口 温朗(水資源開発公団試験所)

正会員 ○自閑 茂治(水資源開発公団試験所)

1. はじめに

ダムコンクリートのせん断強度、特に水平打継目のせん断強度の把握は、コンクリートダムの滑動に対する構造的安定性を評価する上で非常に重要である。¹⁾ また、最近新施工法として注目されているRCD(Roller Compacted Dam)工法においては、貧配合でゼロスランブの超硬練りRCDコンクリートを振動ローラを用いて締固めることから、打継目におけるブリージングやレイタンスが少なく、その打継目処理方法の合理化が強く求められており、この点からもその打継目のせん断強度の把握は最優先課題の一つとなっている。

一方、コンクリートのせん断強度試験法については、従来より多くの研究者が様々な試験法を提案しているが、それらの多くは供試体の作成方法が複雑であったり、特別な試験装置を必要とするなど、上述のような硬練りのダムコンクリートを対象とした試験には必ずしも合致しないと考えられた。

そこでここでは、ダムコンクリートのせん断強度を容易に求めることができる簡易一面せん断試験機を新たに開発し、これを用いてRCDコンクリートを対象に室内試験により以下の実験的検討を行った。

- (1) RCDコンクリートの均一部および打継目のせん断強度の把握
- (2) 打継目処理方法(グリーンカット、打設面清掃、敷モルタル)のせん断強度に与える影響の検討

ここでは、以上の実験結果について述べるとともに、有限要素法による上記試験の応力解析を行い、試験の妥当性についても検討を加えた。

2. せん断試験の概要

2.1 簡易一面せん断試験機

今回開発した簡易一面せん断試験機を図-1に示す。本試験機は、岩石のせん断強度試験に用いられているI.B.G.規格案「鉾山における岩石のせん断強さ試験実施基準案」²⁾で示されているせん断試験装置をコンクリート供試体またはボーリングコア供試体($\phi 200 \times H200$)用に改良したものである。

試験の概要は、載荷方向とせん断破壊面の傾斜角 α を上下に配置したスペーサを用いて可変とし、破壊荷重 P から次式で求められる直応力 σ およびせん断応力 τ より、Mohr-Coulombのせん断破壊基準線 $\tau = \tau_0 + f\sigma$ を特定するものである。

$$\sigma = \frac{P}{A} \sin \alpha, \quad \tau = \frac{P}{A} \cos \alpha \quad (A: \text{せん断面積})$$

したがって、異なった傾斜角 α ごとに応力(σ, τ)の点がプロットできれば、 $\sigma - \tau$ 面上にせん断破壊基準線を描くことが可能となる。(図-2)

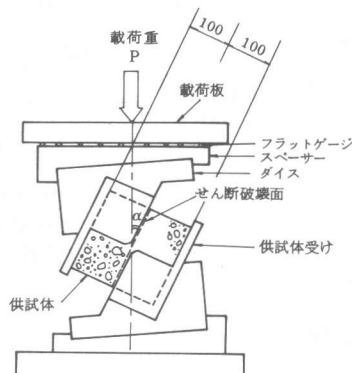


図-1 簡易一面せん断試験機

2.2 試験仕様

本せん断試験で対象としたRCDコンクリートの供試体配合を表-1に示す。表に示した配合は、実ダムで使用が予定されているものである。3)

また、表-2に試験ケースを示す。試験ケースは、均一部(ケースA)と打継目(ケースB~F)の試験に大別することができる。さらに、打継目の試験では、ダムで通常行われている打継目処理のうち、グリーンカット、打設面清掃および敷モルタルの各工程に着目し、それぞれの影響について検討するものとした。また、圧縮強度、引張強度等の他の強度特性についても、あわせて試験を行った。

主な試験仕様は次の通りである。

- (1) 供試体寸法は $\phi 200 \times H200$ であり、 $G_{max} 40 \text{ mm}$ 以下にウェットスクリーニングする。
- (2) 打継目供試体作成のためのモールドは、想定せん断面の中心に打継目がかかるように、分割モールド($\phi 200 \times H100 \times 2$)を使用し、新旧コンクリートの打設間隔を3日とする。
- (3) RCDコンクリート供試体の締固めにはボッシュタンパ、グリーンカットにはワイヤブラシ(カット厚 $1 \sim 2 \text{ mm}$)を用いる。
- (4) 傾斜角 α は $20^\circ \sim 40^\circ$ に設定可能であるが、せん断破壊に特定する目的で、主として 25° 、 30° 、 35° の3角度とし、1角度につき5本の供試体を用いる。
- (5) 载荷速度は、せん断面に働くせん断応力の増で $4 \sim 5 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ とする。

表-1 供試体配合

	G _{max} (mm)	air (%)	W/C+F (%)	F/C+F (%)	s/a (%)	W	C+F	S	G	ad. No.8
RCDコンクリート	150	1.5±1.0	77	35	27	100	130	608	1661	0.25
敷モルタル	5	—	60	35	100	300	500	1397		—

表-2 試験ケース

ケース	供試体	グリーンカット*	打設面清掃**	敷モルタル**	備考
A	均一部	—	—	—	材令7, 28, 91日
B	打継目	ワイヤブラシ	水洗い	0.5 cm	材令 28, 91日
C	打継目	—	水洗い	0.5 cm	材令 28日
D	打継目	—	ワイヤブラシ水洗	0.5 cm	材令 28日
E	打継目	—	—	0.5 cm	材令 28日
F	打継目	—	—	—	材令 28日

* 旧コンクリート打込み24 h後

** 新コンクリート打込み直前

3. 試験結果と考察

3.1 均一部におけるせん断強度

試験結果の例を表-3、図-3、4に示す。

せん断応力 τ

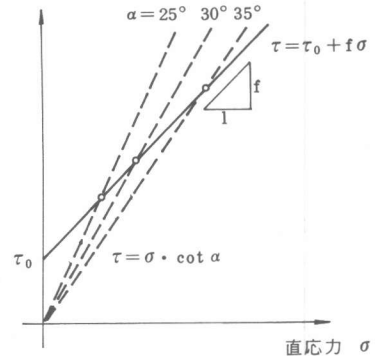


図-2 せん断破壊基準線の特定

表-3 強度試験結果

ケース	材令 (日)	純せん断強度 τ_0 (kgf/cm ²)	摩擦係数 f	相関係数 r	圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)	引張強度 σ_t (kgf/cm ²)
均一部	7	8.56	1.11	0.972	60.9	6.40
	28	12.99	1.06	1.000	81.2	10.1
	91	36.90	0.87	1.000	15.7	13.1
打継目	28	15.84	1.02	0.989		
	91	28.32	0.91	0.971		
	28	19.53	0.83	0.994		
	28	20.95	0.95	1.000		
	28	18.85	0.88	1.000		
	28	3.72	1.23	0.990		

図-3は、均一部（ケースA）のせん断強度を28日強度で示したものであるが、一軸圧縮強度 σ_c 、引張強度 σ_t についてもMohr円で示してある。図によれば、各試験値は若干のばらつきを有するものの、せん断破壊基準線に近接しており、本試験手法がほぼ妥当であることおよび得られたせん断破壊基準線が、圧縮、引張の両者のMohr円をほぼ包絡することなどがわかる。

3.2 打継目におけるせん断強度

図-4は、各試験ケースの結果をまとめて示したものであるが、これにより打継目のケースB～Fを、次の3組に大略分けることができる。

まず、一連の打継目処理を施したケースBおよびDであるが、両者とも均一部（ケースA）の強度を上回る結果となった。したがって、RCDコンクリートの場合、通常の打継目処理を行えば打継目による弱面の形成が有スランブコンクリートほど大きくないことがわかる。

次に、打継目処理からグリーンカットを省略したケースCおよびEにおいては、純せん断強度 τ_0 はケースB、Dと遜色はないものの、摩擦係数fが0.83～0.88と若干劣るものとなった。したがって、グリーンカットの有無が摩擦係数fに影響を与えていることが考えられる。ここで、打設面清掃の有無については、顕著な差異は生じなかった。

一方、打継目処理を省略したケースFでは、純せん断強度 τ_0 が他と比べて1/4～1/5と非常に小さいものとなった。このことから、打継目処理の有無、特に敷モルタルの有無が、純せん断強度 τ_0 に与える影響が大きいと考えられる。

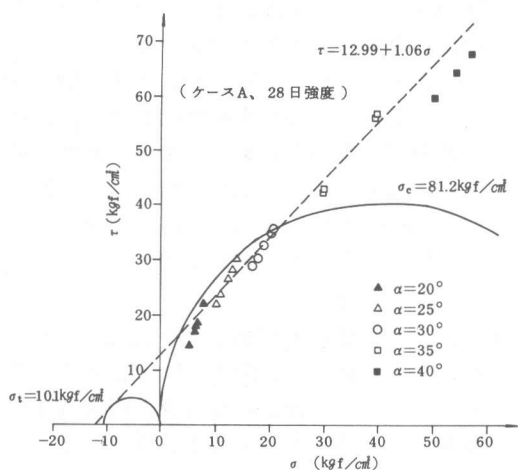


図-3 均一部のせん断強度(ケースA、28日強度)

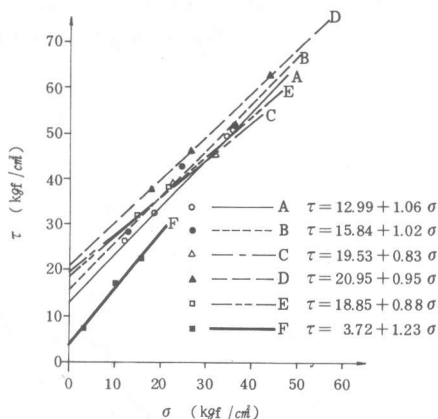


図-4 各ケースにおけるせん断破壊基準線

4. せん断試験の応力解析

4.1 解析の目的

ここに提案したせん断試験は非常に汎用性が高く有効な試験であるけれども、試験の機構上想定せん断破壊面では不均一な応力分布となり、厳密な意味でのせん断強度とは若干異なることが考えられる。

そこでここでは、簡易一面せん断試験においてコンクリート供試体に生じる応力の解析を行い、試験の理論的背景について考察するものとした。

4.2 解析手法

せん断試験の応力解析は、モデルを2次元平面ひずみ状態と仮定し、有限要素法によって行った。表-4および5には解析ケースおよび入力物性を、図-5には解析モデルの例をそれぞれ示した。ここで、鋼材上端に等分布荷重として与えた載荷荷重 P は、せん断面上に働く全垂直力と全せん断力の関係が、Mohr-Coulomb式による破壊限界（安全率 $n=1.0$ ）となるように設定している。

4.3 解析結果と考察

図-6に、せん断面上に発生する主応力分布を各解析ケースで比較した。図によれば、いずれの傾斜角においても、鋼材との接触部（両端部）において圧縮主応力の集中があるが、中央部ではほぼ均等な応力分布となること、圧縮主応力の方向は傾斜角 α が小さければ小さいほど、せん断面方向に近くなること、傾斜角 α の増加に伴って破壊

表-4 解析ケース

解析 ケース	解析の 対象	せん断 傾斜角 α	載荷重 P (kgf)
A-1	均一部	$\alpha = 30^\circ$	1,640
A-2	均一部	$\alpha = 20^\circ$	1,004
A-3	均一部	$\alpha = 40^\circ$	4,868
B-1	打継目	$\alpha = 30^\circ$	1,640

表-5 入力物性

材 料	弾性係数 E (kgf/cm ²)	ポアソン比 ν	せん断強度 τ_0 (kgf/cm ²)	摩擦係数 f
コンクリート	2.0×10^5	0.2	30	1.0
敷モルタル	1.4×10^5	0.2	50	1.0
鋼 材	2.1×10^6	0.3	4,600	1.0

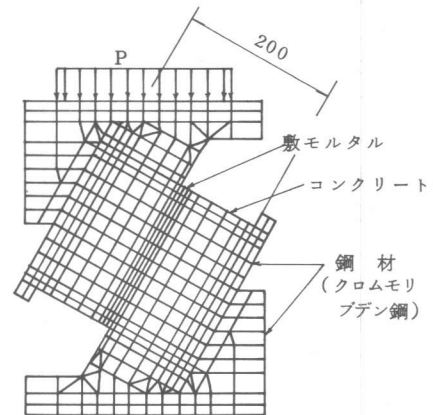


図-5 解析モデルの例(ケースB-1)

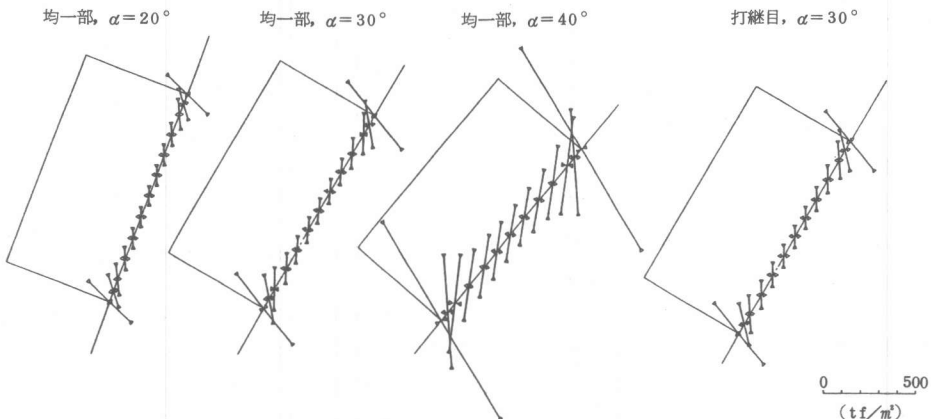


図-6 せん断面上に発生する主応力分布

載荷重 P が増加しせん断面上の圧縮主応力も全般的に増加するが、引張主応力の大きさはほとんど変化しないことが認められる。

また図-7 には、せん断面上に発生する直応力 σ およびせん断応力 τ の分布を示した。ただし、各傾斜角によって載荷荷重 P が異なるため、平均応力 $\sigma_0 (=P/A \cdot \sin \alpha)$ および $\tau_0 (=P/A \cdot \cos \alpha)$ でそれぞれ規格化してある。図によれば、せん断応力の分布は各傾斜角によって大きく変わらず平均化されているのに対し、直応力の分布は傾斜角の大きさによって変化し、特に傾斜角 $\alpha=20^\circ$ の場合には、負の直応力が発生している。なお、打継目における応力の発生は、均一部の同傾斜角の場合とほぼ同様となった。

図-8 には、せん断面上に働く直応力 σ およびせん断応力 τ の組合せによって得られるせん断面方向の局所安全率の分布を示した。ここで、局所安全率 n は、Mohr-Coulomb のせん断破壊基準を用いて次式の安全率

$$n = \frac{\tau_0 + f\sigma}{\tau}$$

で定義している。なお、図ではせん断面方向の局所安全率 n に加えて、主応力の関係から求められる任意方向の最小局所安全率 FS についても、あわせて示してある。

$$FS = \frac{2\sqrt{(\tau_0 + f\sigma_{\max})(\tau_0 + f\sigma_{\min})}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}$$

図によれば、打継目の場合を除いて各傾斜角とも断面中央部の局所安全率が低く、いずれも破壊限界の 1.0 を下回る。ここで、コンクリートの破壊をぜい性を有する逐次破壊と考えれば、このことは試験値が真のせん断強度よりも若干低い値を示す可能性のあることを示している。先の試験結果より得られた均一部のせん断破壊基準線が、Mohr の包絡線よりも若干下回るのは、主としてこのような理由によるものと考えられる。また、 $\alpha=20^\circ$ および 30° では、せん断面方

向の安全率 n および最小局所安全率 FS がほぼ同等であるのに対して、 $\alpha=40^\circ$ では、 n と FS の値が異なっている。これは、前者の場合最小局所安全率 FS の方向がせん断面方向とほぼ

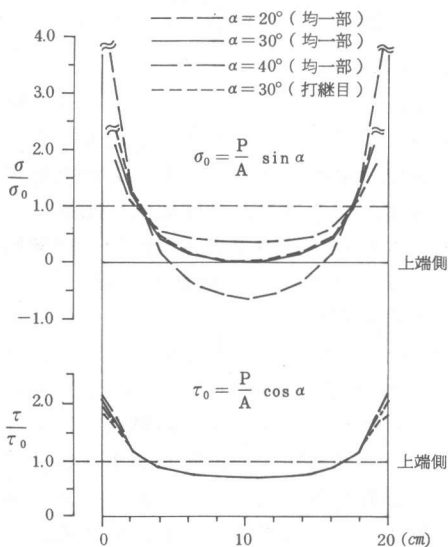


図-7 せん断面上に発生する直応力およびせん断応力

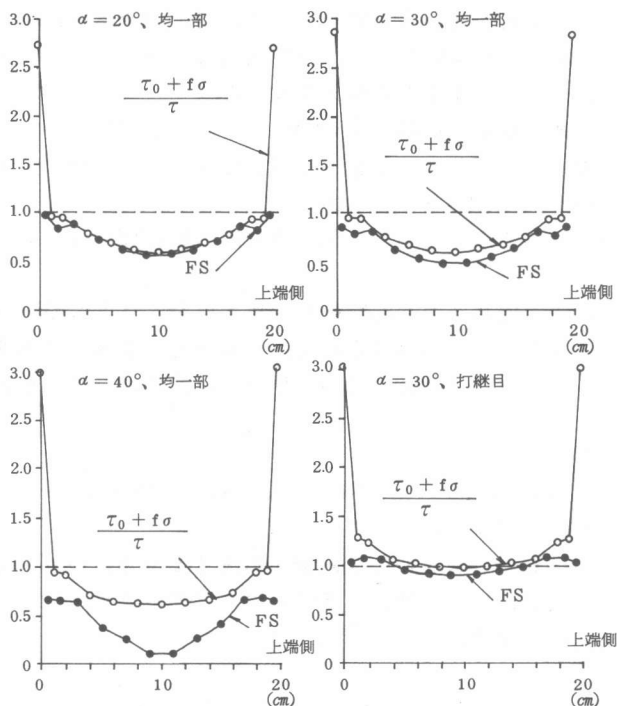


図-8 せん断面上の局所安全率分布

一致することを示すのに対し、後者の場合せん断面方向とは異なった方向でせん断破壊することがあることを示している。

5. 結 論

本研究は、ダムコンクリートのせん断強度の把握を目的として、簡易一面せん断試験機を新たに開発し、これを用いたRCDコンクリートのせん断強度試験結果および同試験の妥当性の検証を目的とした応力解析結果の両者について考察を加えたものである。

まず、前者のせん断強度試験結果について、結論をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 本せん断試験で得られたせん断破壊基準点(σ , τ)は、ばらつきも小さくほぼMohr-Coulombのせん断破壊基準線上にある。したがって、本試験方法がほぼ妥当であることが考えられる。
- (2) 均一部におけるせん断破壊基準線は、一軸圧縮強度 σ_c 、および引張強度 σ_t の両者のMohr円を若干下回るもののほぼ包絡する。
- (3) RCDコンクリートの打継目におけるせん断強度特性のうち、純せん断強度 τ_0 については、敷モルタルの寄与が大きい。また摩擦係数 f については、グリーンカットの有無が影響を与えている。これは、グリーンカットによる弱層の除去および粗面の形成等の効果であると考えられる。一方、打設面清掃の有無については顕著な差異は認められなかった。

次に、応力解析結果についてまとめると以下の通りとなる。

- (1) 解析によれば、せん断面上での応力分布は均一とはならない。特に、想定せん断破壊面の両端部では圧縮主応力の集中が生じるが、中央部ではほぼ均等な応力分布となる。
- (2) せん断面上の応力状態を、せん断に対する局所安全率で評価すると、いずれの傾斜角の場合も破壊限界の1.0を下回る。したがって、試験値は真のせん断強度よりも若干低目の値を示すものと考えられる。
- (3) せん断面の傾斜角 $\alpha=20^\circ$ の場合、引張破壊が、一方 $\alpha=40^\circ$ の場合、異なった方向でのせん断破壊が発生する可能性がある。したがって、せん断試験上適切な傾斜角の範囲は、 $\alpha=30^\circ$ 付近である。
- (4) 以上で示した均一部供試体の応力的な傾向は、打継目供試体の場合においてもほぼ変わることはない。

以上、簡易一面せん断試験の実用性およびRCDコンクリートの均一部、打継目のせん断強度特性が明らかにされた。今後とも、現場コア供試体での検証も含めRCDコンクリートにおける打継目処理の合理化の可能性について検討する予定である。

〔参考文献〕

- (1) D.C.Henny : Stability of Straight Concrete Gravity Dams, Trans. of A.S.C.E., Vol.99, 1934
- (2) 石島訳 : 岩石の強度試験法に関する基準、日本鉱業会誌、Vol.81 №926、1965
- (3) 山口、自閑、解良 : RCDコンクリートの配合設計(I)、水資源開発公団試験所第一試験課報告、第8601号、1987