

関西電力株式会社 総合技術研究所 正会員 菅 貞孝

原田 次夫

面方 卯佐男

1 まえがき

1976年にアメリカのアイダホ州で起ったティートンダムの決壊事故を契機に、その後のフィルダムの建設に対処すべく何らかの浸食破壊に対する研究の必要性が痛感せられた。筆者らは、フィルダムの破壊原因を基礎部岩盤のクラック内浸透流によるコア着岩部の浸食破壊が、支配的要因であることに的を絞って一連の実験・検討を行ってきた。以下は、実験結果から明らかになった浸食破壊に影響を与えると考えられる諸要因と耐浸食性との定性的な関係、ならびに分散分析手法を用いて得られた要因効果の定量的な検討結果についてとりまとめたものである。

2 実験装置および試料

実験装置は図-1に示すような構成で、図中コンプレッサーから分岐する(A)、(B)の系統はそれぞれ供試体上面への上載荷重(最大 5.0 kgf/cm^2)および上流側に静水圧(最大 2.5 kgf/cm^2)を作用させ、いずれも任意に調節・加圧できる。また、上述の実験装置のうち実験槽の詳細は図-2のとおりであり、同図には示していないが(B)、(C)の間にはフィルター土槽が接続できる構造になっている。さらに、これらの実験装置の他に浸食発生時を判定するための光透過式簡易濁度計がある。

実験に用いた試料は表-1に示すもので、同表の混合土は花崗岩の砕屑物(粒径 $D = 2.0 \sim 0.42 \text{ mm}$)、マサ土($D = 0.42 \sim 0.074 \text{ mm}$)ならびにミノソイル($D = 0.074 \text{ mm}$ 以下でカオリンを主成分とする陶土)を所定の粒度になるように実験室内で混合したものである。

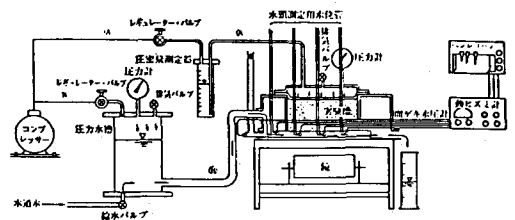


図-1 実験装置の構成

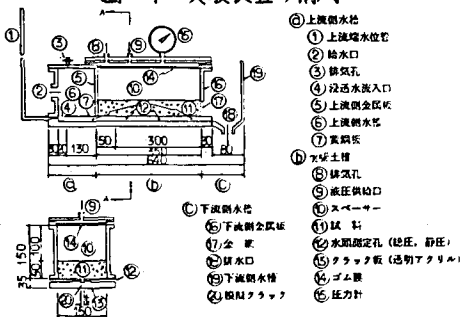


図-2 実験槽の詳細

表-1 実験に用いた試料の物性

3 実験条件および方法

浸食破壊に関する複雑多岐にわたる諸要因の中から代表的な要因を抽出し、表-2に示すような水準を設定した。同表の各要因と実験I、IIの別は $L_{27}(3^3)$ 型直交表に割付け、これを実験条件とし、各27ケースの実験を概ね以下に示す手順に従って実施した。

上述の直交表に割付けられた実験条件に従い実験土槽に供試体をセットする。その後、実験Iでは実験条件として設定された水頭増加速度で、また

項目	実験 試料	I			II (混合)								
		シルト	混合土	花崗土	1	2	3	4	5	6	7	8	9
土粒子比率 C_s	D_{max}	2.77	254	2.83	2.66	2.66	2.66	2.65	2.65	2.66	2.64	2.64	2.66
	D_{50}	200	200	200	0.25	0.42	2.00	0.25	0.42	2.00	0.25	0.42	2.00
	D_{10}	0.17	0.45	0.08	0.05	0.05	0.05	0.12	0.19	0.31	0.16	0.26	0.68
	$D_{60}(10^{-3})$	100	38	19	4.2	4.2	4.2	11	11	11	94	120	250
	$D_{90}(10^{-3})$	64	36	60	9.8	9.8	9.8	15	15	15	58	58	58
	均等係数 U_c	2.7	125	1.3	5.1	5.1	5.1	8.0	12.7	20.7	28	45	11.7
	不均係数 U_c	1.3	6.2	0.8	0.4	0.4	0.4	0.7	0.4	0.3	9.5	9.5	15.8
組成	細粒割合 $R(\%)$	5.26	27.3	59.0	70	70	70	4.5	4.5	4.5	20	20	20
	粘土分 $R(\%)$	8.8	12.0	8.0	34	34	34	2.5	2.5	2.5	10	10	10
	液性限界 $W_L(\%)$	28.9	27.0	50.5	30.3	30.0	15.2	27.5	24.8	29.3	25.1	NP	26.8
	塑性 $W_p(\%)$	26.2	13.7	29.8	15.7	16.7	1.81	17.2	17.0	15.7	19.7	NP	16.3
シメン	塑性指数 I_p	2.7	13.3	20.7	14.6	13.3	30.6	10.3	7.8	13.6	54	NP	10.5
	最高含水比 $W_{max}(\%)$	17.0	11.5	26.0	16.8	16.5	15.7	15.5	14.5	12.2	16.8	16.8	11.3
最大浸食 $Q(\%)$		1.7	3.1	1.53	1.76	1.78	14.9	1.80	1.83	1.92	1.69	1.76	1.95

実験Ⅱでは表-2の備考欄に示した水頭増加速度でそれぞれ模擬フラック内に通水し、各水頭段階の流速と濁度を測定する。濁度が20ppm以上に達した時点と浸食発生時と規定し、この水頭段階で実験を終了する。そして、この水頭段階での流速を耐浸食限界流速 V_{max} 、また、その逆数を100倍したものをエロージョンナンバー N として実験結果を評価した。

4 実験結果と考察

実験Ⅰ、Ⅱの結果について個々に分散分析を行ない、浸食破壊に対する主効果が有意だと推定された要因についてのみ分散比、奇子率を表-3に示した。また、図-3に P_F 、 b 、 θ および W の各要因の主効果曲線を示す。ただし、実験Ⅰの要因 M_a は純分類値であるため、図-3に示した諸要因のように計数的に表現できないので M_a を P_F に置きかえて同図に示した。さらに、実験Ⅰとほぼ同条件のもとで、ベントナイトを約13%含有する試料について実施した追加実験の結果を P_F の主効果曲線の上に併記した。

以下に、実験結果から考察される事項について述べる。実験Ⅰ、Ⅱで選定した要因のうち、 D_{max} 、 W 、 H_s および P は本実験で設定した水準の範囲では、浸食破壊に対する有意な主効果は認められなかった。主効果が有意な要因のうち M_a については、試料の構成材料が異なる実験Ⅰおよび試料の構成材料が同一の実験Ⅱの各実験において、ともに P_F の増加に伴い耐浸食性が低下している。このことは、試料の耐浸食性がいわゆる粘着力 C にあまり期待できないことを暗示しているものと考えられる。また、分散性、膨潤性等の物理化学的特性に富むベントナイト含有土では、他のすべての試料に比して極めて耐浸食性が低いことが分かった。実験Ⅰ、Ⅱで一貫して主効果が有意であると推定された要因 b については、 b が小さい程浸食破壊が生じにくいことが判明した。これは、 b が小さくなると、浸食されるフラック内を流下しうる試料の粒径範囲が狭くなること、およびPlandtlの運動量輸送理論より(実験でのフラック内流水は乱流であり、かつ、フラック内流水と試料の接触面は水理的粗面をなしている)、流れのせん断力が著しく低下するためと推察される。また、フラックの傾斜角 θ については、 $\theta = 90^\circ$ の場合に浸食破壊が生じ易い。これは、アーチングによりフラック近傍の試料にゆるみ領域が存在することに起因し、一方、 $\theta \neq 90^\circ$ の場合には、フラック内への比較的良好な入り込み土が存在するためと考えられる。

5 むすび

以上、浸食破壊に関する代表的な要因をパラメーターとした浸食現象について記述した。今後、さらにこれらの実験結果から推定された浸食破壊に対する主効果の大きい要因について多水準実験を実施し、耐浸食性との関係をより詳細に把握するとともに、試料のせん断強度と耐浸食性との関係についても究明したいと考えている。なお、本実験は、(株)建設企画コンサルタント・丸井英一氏の協力を得て実施したものである。

表-2 浸食破壊の主要因と水準

水頭	1	2	3	備考
試料差 M_a	シルト	混合土	T粘性土	
流速の条件 W	$W_{opt}-3\%$	W_{opt}	$W_{opt}+3\%$	
フラック幅 b (mm)	3.0	6.0	10.0	
フラック傾斜 θ (度)	30	60	90	
水頭増加速度 H_s	$10 \frac{cm}{min}$	$10 \frac{cm}{min}$	$10 \frac{cm}{min}$	
試料の粒径 D_{max}	0.25	0.42	2.0	
ベントナイト含有率 P (%)	20	45	70	
フラック幅 b (mm)	0.2	0.5	1.0	
流速の条件 W	$W_{opt}-3\%$	W_{opt}	$W_{opt}+3\%$	
上流圧 P (kg/cm ²)	3.0	4.0	5.0	

表-3 分散分析結果

項目	分散比	奇子率(%)
試料差 M_a	3.69*	8.0
フラック幅 b	7.71*	20.1
フラック傾斜 θ	6.06*	15.1
細粒の含有率 P	6.19**	19.3
フラック幅 b	9.68**	32.3

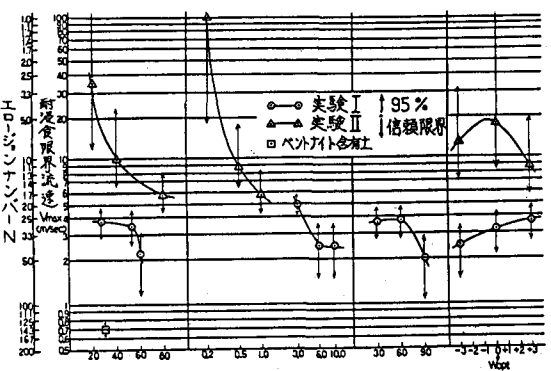


図-3 主効果曲線