

DOI: 10.11779/CJGE2024S10028

# 超高沥青混凝土心墙坝砂板岩堆石料试验研究

张石<sup>1</sup>, 吴世勇<sup>1</sup>, 吴忠<sup>1</sup>, 凌华<sup>2,3</sup>, 傅华<sup>2,3</sup>, 石北啸<sup>2,3</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024;

3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 开展了超高沥青混凝土心墙坝砂板岩堆石混合料的试验研究。研究表明: 随板岩含量的提升和孔隙率的增大, 应力应变曲线软化特性趋弱硬化特性增强、剪切峰值降低, 剪切过程中的体变增大且剪胀现象减弱, 相应的线性强度  $c$ ,  $\varphi$  和非线性强度指标  $\varphi_0$ ,  $\Delta\varphi$  均降低, 邓肯模型参数  $K$  与  $K_b$  减小; 建立了同时可反映孔隙率、板岩含量的强度指标及邓肯模型参数经验公式, 能较高精度地预测不同板岩含量、不同孔隙率砂板岩堆石混合料的工程力学特性; 板岩含量是影响渗透性能的重要因素, 随板岩含量的提升渗透系数降低, 工程建设中对于含板岩的堆石料应关注排水设计。

**关键词:** 砂板岩堆石料; 强度指标; 变形参数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0191-06

**作者简介:** 张石(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工结构方面的研究工作。E-mail: 904463987@qq.com。

## Experimental study on sand slate rockfill materials for ultra-high asphalt concrete core dams

ZHANG Shi<sup>1</sup>, WU Shiyong<sup>1</sup>, WU Zhong<sup>1</sup>, LING Hua<sup>2,3</sup>, FU Hua<sup>2,3</sup>, SHI Beixiao<sup>2,3</sup>

(1. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 3. MWR Key Laboratory of Reservoir Dam Safety Nanjing 210024, China)

**Abstract:** A series of tests are conducted on the engineering mechanical properties of sand slate rockfill materials for an ultra-high asphalt concrete core dam. It is found that with the increase of the porosity and slate content, the softening behavior of stress-strain curve weakens and the peak strength decreases. The volume change increases, and the shear dilation phenomenon fades during the shearing process. The linear strength indexes  $c$  and  $\varphi$ , the nonlinear strength indexes  $\varphi_0$  and  $\Delta\varphi$ , and the Duncan model parameters  $K$  and  $K_b$  all decrease. The empirical formulas for the strength indexes and deformation parameters are proposed to predict the engineering mechanical properties of the sand slate rockfill materials with different slate contents and porosities precisely. It is also found that the permeability decreases with the increase of the slate content. The slate content is one important factor for the permeability performance of rockfill materials, and the drainage design of the rockfill area should be considered in the dam design.

**Key words:** sand slate rockfill material; strength index; deformation parameter

## 0 引言

沥青混凝土心墙作为土石坝防渗体具有防渗性能好、对土石坝的不均匀沉降适应能力强<sup>[1,2]</sup>、塑性性能好、耐久性和自愈能力强等优点。国内已建设一批高沥青混凝土心墙堆石坝, 如去学大坝最大坝高 173.2 m, 心墙高度 132 m<sup>[3]</sup>, 冶勒大坝最大坝高 124.5 m<sup>[4]</sup>; 国外建成最高的沥青混凝土心墙坝是奥地利的 Finsterntal 坝, 坝高 149 m, 但其心墙高度仅为 96 m; 挪威的 Storglomvatn 坝, 坝高 125 m, 心墙高度 123 m<sup>[3]</sup>。

高沥青混凝土心墙堆石坝工程常在中国西南、西

北地区, 根据就近取材、因料设计的原则, 部分工程所采用的料场可能会同时含硬岩料和软岩料, 甚至由于硬岩和软岩互生且呈薄层状态无法挑选。因此, 会利用含一定软岩料比例的堆石混合料填筑坝体, 如两河口水电站<sup>[5]</sup>、苗尾水电站<sup>[6]</sup>、江达水电站、玛沁抽水蓄能电站等均采用了砂板岩料。板岩料一般形状扁平、不利于填筑压实, 岩性差, 不利于控制坝体沉降, 因此板岩含量对堆石料力学特性的影响及板岩料的合理利用是这些工程建设所面临的关键技术问题之一。

收稿日期: 2024-04-29

李小泉等<sup>[7]</sup>探讨了含部分软岩堆石料的物理力学性质及软岩含量对其力学性质影响,认为软岩含量在30%内的堆石料具有低压缩性,高抗剪强度,仍可满足高土石坝堆石区工程要求。陆希<sup>[8]</sup>认为软硬岩掺配料可以达到较大的干密度、较高的压缩模量,掺配料作为特高面板堆石坝的填筑料是可行的,但最好用于下游堆石区,并应最大限度的利用开挖料。傅华等<sup>[9]</sup>对比了片麻岩与砂板岩料三轴试验后的破碎率,认为母岩强度越高、细颗粒含量越高、粗颗粒土的浑圆度越好、颗粒破碎率越小,且随着围压和应力的增大,颗粒破碎率也呈增大趋势。张延亿等<sup>[10]</sup>研究了砂板岩料的湿化特性,认为湿化体积应变与应力较好地符合线性关系,湿化剪切应变与应力比则较好地符合幂函数关系。

本文对某 150 m 的超高沥青心墙堆石坝的砂板岩堆石料开展系统试验,研究板岩含量、孔隙率对堆石料力学特性的影响,建立强度指标、模量等力学指标参数随板岩含量及孔隙率的经验公式,为类似工程砂板岩力学特性的研究提供借鉴与参考。

1 母岩特性与物性指标

超高沥青心墙堆石坝工程拟用的堆石料场砂、板岩呈互层状态,板岩无法剥离,靠近坝址区侧板岩含量高,远离侧砂岩含量高,料场岩性存在较强的空间不均衡性,填筑时堆石料的砂、板岩含量会在一定范围内波动变化。

根据地质报告,弱风化砂岩饱和单轴抗压强度平均为 102.92 MPa,弱风化板岩为 25.8 MPa,两种岩性力学特性差异大,板岩含量是影响其工程力学特性的关键因素,为合理利用料场及为填筑料设计提供依据,开展不同板岩含量、不同孔隙率的对比试验研究。对板岩含量高的混合料(板岩含量 55%~100%)开展了 18%, 19%, 20% 三种孔隙率对比试验,而对砂岩含量高的(板岩含量 30%~45%)仅开展了 19%, 20% 两种孔隙率对比试验。堆石料试验干密度及孔隙率见表 1。

考虑到料场砂板岩占比不均一,板岩含量较高时爆破碾压后混合料颗粒破碎较严重、<5 mm 细料含量相应偏高,初步确定的堆石料设计级配包络线见图 1。对于设计级配平均线,先采用相似级配(缩尺比例因子  $n=2.4$ )再采用等量替代方法缩制得到最大粒径为 60 mm、小于 5 mm 粒径颗粒含量为 25% 的试验模拟级配。

表 1 试样孔隙率及干密度

Table 1 Porosities and dry densities of samples

岩性及 坝料组成	相对质量 密度	干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	制样干密度 对应孔隙率/%
30%板岩+ 70%砂岩	2.73	2.21	19.0
		2.18	20.0
40%板岩+ 60%砂岩	2.74	2.22	19.0
		2.19	20.0
55%板岩+ 45%砂岩	2.75	2.26	18.0
		2.23	19.0
		2.20	20.0
		2.26	18.0
70%板岩+ 30%砂岩	2.76	2.24	19.0
		2.21	20.0
		2.27	18.0
85%板岩+ 15%砂岩	2.77	2.24	19.0
		2.22	20.0
		2.28	18.0
100%板岩	2.78	2.25	19.0
		2.22	20.0
		2.22	20.0

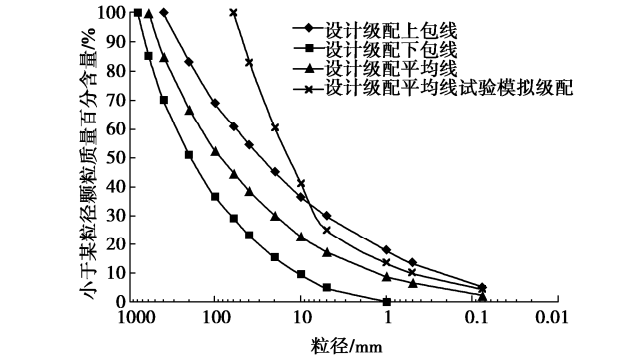
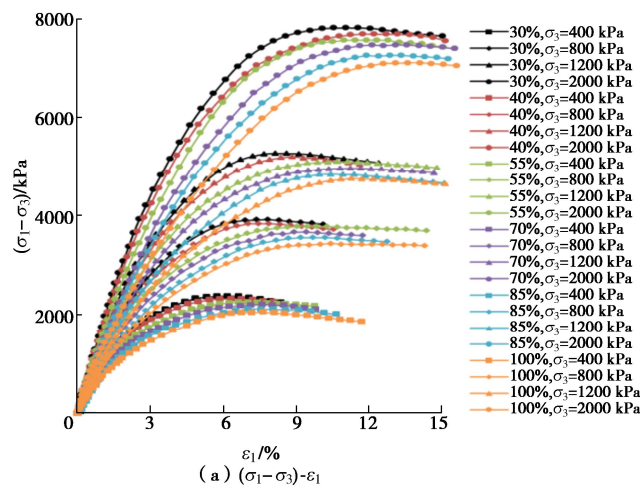


图 1 设计级配与试验级配

Fig. 1 Design and test gradations

2 三轴试验

依据《水电水利工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006》<sup>[11]</sup>,开展不同孔隙率、不同板岩含量堆石料的固结排水三轴试验,试样尺寸为  $\Phi 300\text{ mm}\times H700\text{ mm}$ ,试验围压为 400, 800, 1200, 2000 kPa。其中,孔隙率  $n=19\%$  时不同板岩含量堆石料的三轴试验试验曲线见图 2。



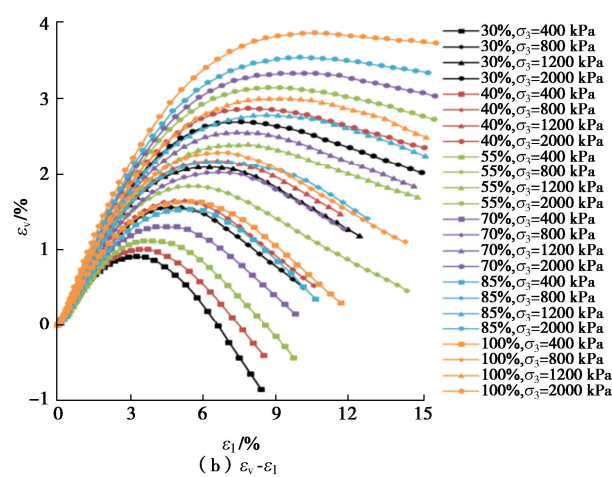


图 2 三轴试验曲线 ( $n=19\%$ )

Fig. 2 Curves of triaxial tests

由图 2 (a) 应力-应变曲线可以看出, 在各围压情况下堆石料均或多或少地表现出了应变软化特性, 当围压较低时, 主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )在轴向应变较小时就出现了峰值, 随后主应力差随应变发展有逐渐降低的趋势; 随围压的增大, 主应力差出现峰值时的轴向应变逐渐增大, 应变软化性逐渐降低。但由于孔隙率达到了 19%, 即使围压 2000 kPa 时, 100%板岩料也在轴向应变 15%前达到了剪切峰值。

对比相同围压下不同板岩含量堆石料的 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )- $\varepsilon_1$  曲线。可发现, 板岩含量越高, 峰值越低, 且峰值出现时所对应的轴向应变越大。

观察图 2 (b) 体变-应变曲线, 不同板岩含量的堆石料均在剪切过程中产生了剪胀现象, 且在低围压时非常显著。当围压提高后, 剪切过程中产生的体变增大, 剪胀性逐渐减弱、剪缩性增强。

对比相同围压下的不同板岩含量堆石料的  $\varepsilon_v - \varepsilon_1$  曲线, 可发现, 板岩含量越高, 剪切过程中产生的体变越大, 体积变形出现峰值时所对应的轴向应变越大, 剪胀性减弱、剪缩性增强。

### 3 板岩含量对工程力学特性的影响

#### 3.1 强度指标随板岩含量的变化

不同孔隙率、不同板岩含量堆石料的线性强度指标凝聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ , 非线性强度指标  $\varphi_0$ ,  $\Delta\varphi$  及在各围压下的主应力差峰值见表 2。

由表 2 可以发现, 孔隙率相同时, 随板岩含量的增加, 主应力差峰值减小, 且随围压的增大, 减小的幅度呈增大趋势。这主要是因为板岩饱和抗压强度较低、岩性相对较差, 板岩含量提升后, 堆石料综合母岩性质降低, 高应力作用下的颗粒破碎越严重, 因此剪切峰值降低明显。另外, 同种板岩含量情况下, 随

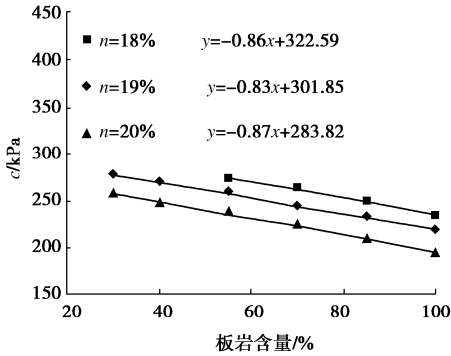
孔隙率的降低, 颗粒之间的接触增强、细粒能更好的充填于骨架孔隙, 因此主应力差峰值增大。

表 2 强度指标及剪切峰值

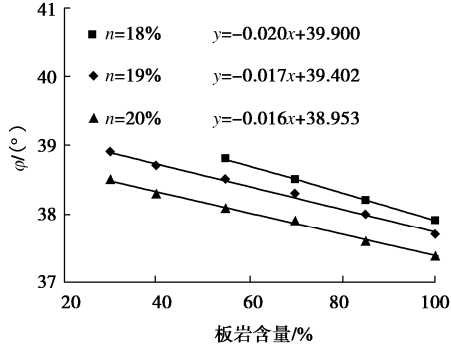
Table 2 Strength indexes and peak values of shear

板岩 含量/ %	孔隙 率/ %	$c/kPa$	$\varphi /(^\circ)$	$\varphi_0 /(^\circ)$	$\Delta\varphi /(^\circ)$	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ 峰值/kPa			
						$\sigma_3 =$ 400 kPa	$\sigma_3 =$ 800 kPa	$\sigma_3 =$ 1200 kPa	$\sigma_3 =$ 2000 kPa
30	19	276.0	38.9	54.6	10.2	2396.1	3941.6	5294.2	7830.9
30	20	256.9	38.5	53.5	9.8	2270.3	3776.5	5118.9	7565.8
40	19	268.2	38.7	54.2	10.1	2342.2	3861.3	5226.1	7707.2
40	20	247.4	38.3	53.0	9.6	2219.1	3693.4	5037.5	7453.0
55	18	273.5	38.8	54.4	10.2	2372.5	3899.4	5282.7	7766.8
55	19	258.7	38.5	53.6	9.8	2271.9	3807.9	5125.0	7584.7
55	20	237.1	38.1	52.4	9.3	2157.1	3625.2	4967.4	7344.5
70	18	263.9	38.5	54.0	10.1	2326.6	3785.3	5175.3	7629.7
70	19	243.0	38.3	53.1	9.7	2228.1	3690.5	4989.1	7488.6
70	20	225.0	37.9	51.8	9.0	2096.9	3536.0	4851.7	7221.2
85	18	250.0	38.2	53.1	9.7	2224.7	3707.0	5020.3	7450.6
85	19	231.7	38.0	52.2	9.3	2133.6	3578.4	4866.8	7276.4
85	20	209.7	37.6	51.0	8.8	2029.1	3410.4	4703.4	7065.7
100	18	234.9	37.9	52.4	9.4	2149.9	3556.6	4892.7	7264.5
100	19	218.2	37.7	51.4	9.0	2066.0	3458.6	4780.1	7128.7
100	20	194.6	37.4	49.9	8.2	1939.2	3321.1	4622.3	6915.9

由于上述原因, 随板岩含量  $P_b$  的提升和孔隙率的增大, 线性强度  $c$ ,  $\varphi$  与非线性强度指标  $\varphi_0$ ,  $\Delta\varphi$  均减小。点绘板岩含量与强度指标的关系曲线, 见图 3, 4。



(a)  $c - P_b$



(b)  $\varphi - P_b$

图 3 线性强度指标随板岩含量的变化

Fig. 3 Variation of linear strength indexes with slate content

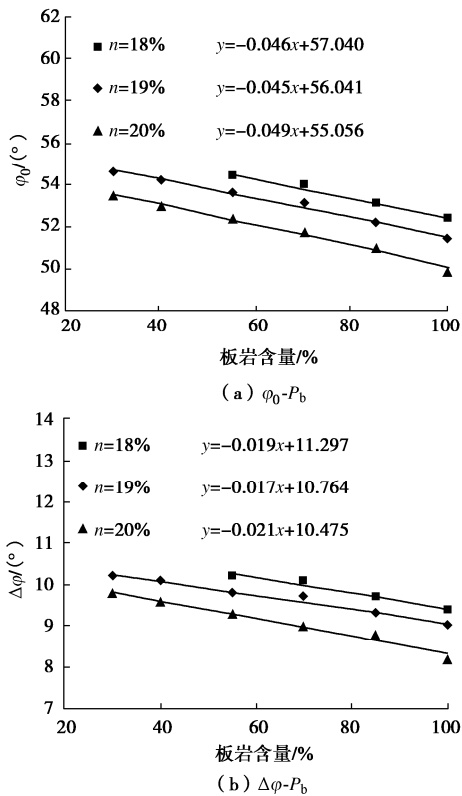


图4 非线性强度指标随板岩含量的变化

Fig. 4 Variation of nonlinear strength indexes with slate content

由图 3, 4 发现随板岩含量提升而导致的线性和非线性强度指标的降低均可线性描述; 且对于不同孔隙率试样, 强度指标的降低幅度或图 3, 4 中直线斜率基本一致。因此当孔隙率固定时, 凝聚力  $c$  随板岩含量的变化可表述为

$$c = c_0 - \alpha_c \cdot P_b = c_{100} + \alpha_c \cdot (100 - P_b) \quad (1)$$

式中:  $c_0$  为板岩含量为 0% 时的凝聚力;  $c_{100}$  为板岩含量为 100% 时的凝聚力;  $\alpha_c$  为随板岩含量变化引起的凝聚力变化量, 可取斜率均值 0.85;  $P_b$  为板岩含量, 计算时不带%; 当孔隙率为 20% 时,  $c_0$  为 283.8 kPa,  $c_{100}$  拟合值为 198.8 kPa, 也可直接采用试验值 194.6 kPa。

考察不同孔隙率时 100% 板岩料的  $c_{100}$ , 发现也可近似线性描述, 见图 5。因此由式 (1), 可得到

$$c = c_{100}^{20} + (n - 20)\beta_c + \alpha_c \cdot (100 - P_b) \quad (2)$$

式中:  $c_{100}^{20}$  为孔隙率为 20%, 板岩含量为 100% 时的凝聚力;  $\beta_c$  反映凝聚力  $c$  随孔隙率的变化, 其值为 -19.9;  $n$  为孔隙率, 计算时不带%。

类似, 可以得到  $\phi$ ,  $\phi_0$ ,  $\Delta\phi$  随孔隙率、板岩含量变化的计算公式:

$$\phi = \phi_{100}^{20} + (n - 20)\beta_\phi + \alpha_\phi \cdot (100 - P_b) \quad (3)$$

$$\phi_0 = \phi_{0,100}^{20} + (n - 20)\beta_{\phi_0} + \alpha_{\phi_0} \cdot (100 - P_b) \quad (4)$$

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{100}^{20} + (n - 20)\beta_{\Delta\phi} + \alpha_{\Delta\phi} \cdot (100 - P_b) \quad (5)$$

利用式 (2) ~ (5), 可预测不同孔隙率、不同板岩含量砂板岩堆石混合料的强度指标, 考虑到试验具体情况, 建议使用时孔隙率范围为 17%~21%、 $P_b$  含量范围为 15%~100%。

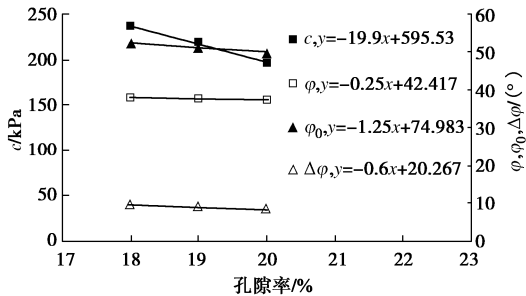


图5 纯板岩料强度指标随孔隙率  $n$  的变化

Fig. 5 Variation of strength indexes with porosity for slate rockfill materials

### 3.2 变形特性随板岩含量的变化

根据试验结果, 整理得到的不同孔隙率、不同板岩含量堆石料的邓肯模型变形参数  $K$ ,  $K_b$ ,  $n$  和  $m$  值见表 3。

表3 邓肯模型参数

Table 3 Parameters of Duncan model

板岩含量/%	孔隙率/%	$K$			$n$	$R_f$	$K_b$			$m$
		试验	计算	相对误差/%			试验	计算	相对误差/%	
30	19	1113.2	1141.6	-2.5	0.21	0.62	586.0	587.4	-0.2	0.10
	20	968.5	954.5	1.4	0.23	0.62	457.3	431.7	5.6	0.14
40	19	1057.9	1068.6	-1.0	0.21	0.62	529.0	524.1	0.9	0.11
	20	902.0	893.5	0.9	0.23	0.62	386.9	385.1	0.5	0.17
55	18	1138.7	1157.6	-1.7	0.20	0.64	585.0	601.0	-2.7	0.10
	19	989.4	967.9	2.2	0.21	0.64	435.6	441.7	-1.4	0.14
70	20	819.3	809.3	1.2	0.24	0.63	328.5	324.6	1.2	0.20
	18	1021.3	1048.5	-2.7	0.20	0.63	501.3	506.6	-1.0	0.12
85	19	882.6	876.7	0.7	0.21	0.62	364.9	372.3	-2.0	0.17
	20	744.1	733.0	1.5	0.23	0.63	278.4	273.6	1.7	0.22
100	18	918.9	949.7	-3.4	0.20	0.63	402.8	426.9	-6.0	0.16
	19	795.3	794.0	0.2	0.22	0.62	315.3	313.8	0.5	0.19
	20	668.0	663.9	0.6	0.23	0.63	239.1	230.6	3.6	0.23
	18	829.2	860.2	-3.7	0.20	0.62	347.3	359.8	-3.6	0.19
	19	717.6	719.2	-0.2	0.22	0.62	268.2	264.4	1.4	0.21
	20	618.2	601.3	2.7	0.23	0.63	210.3	194.3	7.6	0.25

由表 3 可以看出, 随板岩含量的提高,  $K$  值与  $K_b$  降低,  $n$  与  $m$  值增大。其主要原因在于: 板岩含量提高后, 堆石料综合岩性变差, 力学特性向软岩过渡, 导致其切线弹性模量和体积模量降低, 相应的  $K$  值与  $K_b$  降低。另外, 孔隙率增大后, 干密度降低, 颗粒之间的接触面积减小, 细颗粒填筑骨架内部孔隙相对不紧密, 抵御变形的能力减弱, 因此随孔隙率的增大,  $K$  值与  $K_b$  降低。

考虑到邓肯模型参数  $K$  与  $K_b$  是影响土石坝变形

的最主要的两个参数, 仅分析  $K$  与  $K_b$  随孔隙率和板岩含量的变化。绘制  $K$ - $P_b$ ,  $K_b$ - $P_b$  关系曲线, 见图 6。

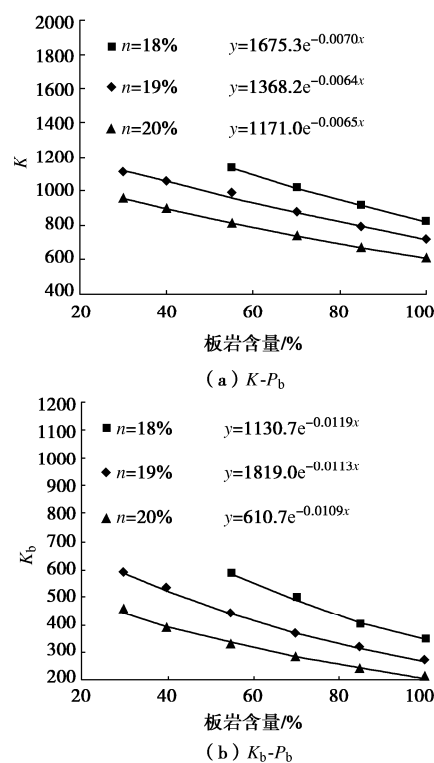


图 6 变形参数随板岩含量的变化

Fig. 6 Variation of deformation parameters with slate content

发现  $K$ - $P_b$  可用指数函数描述:

$$K = \delta_K \cdot e^{-\theta_K \cdot P_b}, \quad (6)$$

式中,  $\delta_K$ ,  $\theta_K$  均为试验参数。不同孔隙率条件下的  $\delta_K$  差异较大, 但  $\theta_K$  值接近, 即不同孔隙率条件下的  $K$  值随板岩含量的衰减程度相似。

考察不同孔隙率堆石料的  $\delta_K$ , 并点绘  $\delta_K$ - $n$  关系曲线, 见图 7, 发现也可用指数公式描述  $\delta_K$ - $n$  的关系, 则式 (6) 可写为

$$K = \delta_K \cdot e^{-\theta_K \cdot P_b} = \mathcal{G}_K \cdot e^{-b_K n} \cdot e^{-\theta_K \cdot P_b} \quad (7)$$

式中:  $\mathcal{G}_K$  为 41737;  $b_K$  为 0.179;  $\theta_K$  可取均值, 即 0.0063。

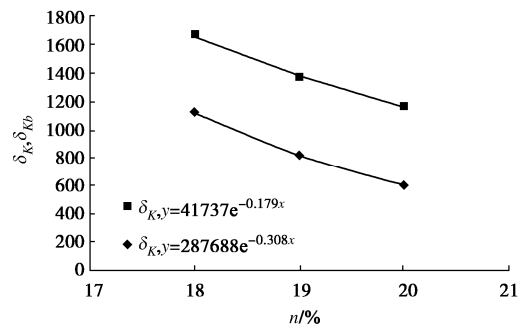


图 7  $\delta_K$  与  $\delta_{Kb}$  随孔隙率  $n$  的变化

Fig. 7 Variation of  $\delta_K$  and  $\delta_{Kb}$  with porosity

类似, 可用下式描述  $K_b$  随孔隙率、板岩含量的变化:

$$K_b = \mathcal{G}_{K_b} \cdot e^{-b_{K_b} n} \cdot e^{-\theta_{K_b} \cdot P_b} \quad (8)$$

由图 6, 7,  $\mathcal{G}_{K_b}$  为 287688,  $b_{K_b}$  为 0.308,  $\theta_{K_b}$  为 0.0114。

由式 (7), (8) 计算得到的各孔隙率及各板岩含量堆石料邓肯模型参数  $K$  与  $K_b$ , 见表 3。  $K$  的相对误差为 -3.7%~2.7%,  $K_b$  的相对误差为 -6.0%~7.6%, 均具有较高的精度, 能够很好地预测不同孔隙率、不同板岩含量堆石料的邓肯模型变形参数。

对于参数  $R_f$ , 由于各试验结果相差不大, 可取平均值 0.63; 对于参数  $n$  与  $m$ , 为方便和简单起见, 可采用插值法得到。

#### 4 板岩含量对渗透性能的影响

依据《水电水利工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006》, 采用常水头法开展了 19%孔隙率条件下不同板岩含量堆石料的渗透系数试验, 渗流方向从下往上, 试样尺寸为  $\Phi 300 \times H300$  mm, 试验结果见表 4, 其中  $k_{20}$  为标准温度条件下的渗透系数。

表 4 渗透系数试验结果

Table 4 Results of permeability coefficient tests

板岩含量/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	$k_{20}$ /(cm·s <sup>-1</sup> )
30	2.21	$1.92 \times 10^{-2}$
40	2.22	$1.26 \times 10^{-2}$
55	2.23	$9.67 \times 10^{-3}$
70	2.24	$8.05 \times 10^{-3}$
85	2.24	$6.33 \times 10^{-3}$
100	2.25	$4.79 \times 10^{-3}$

板岩含量  $P_b$  为 30%时渗透系数为  $1.92 \times 10^{-2}$  cm/s, 板岩含量为 100%时渗透系数为  $4.79 \times 10^{-3}$  cm/s, 随混合料中板岩含量的提升, 渗透系数逐渐降低。这是因为, 制样过程中的振动击实会引起颗粒破碎, 由于板岩料岩性较差, 含量越高其颗粒破碎越严重, 细颗粒含量增加越显著, 因此随板岩含量的提升, 渗透系数降低。整体而言, 当填筑孔隙率为 19%时, 本工程料场砂板岩混合料的渗透性不是非常通畅, 应做好堆石区料的排水分区设计。

#### 5 结 论

开展了不同板岩含量、不同孔隙率砂板岩堆石料的工程力学特性试验研究, 得到以下 4 点结论。

(1) 随板岩含量和孔隙率的增大, 三轴应力应变曲线软化特性减弱、主应力差峰值降低, 剪切过程中的体变增大、剪胀性减少。

(2) 随板岩含量和孔隙率的增大, 线性强度  $c$ ,

$\varphi$ , 非线性强度指标  $\varphi_0$ ,  $\Delta\varphi$  均降低, 邓肯模型参数  $K$  与  $K_b$  减小。

(3) 提出了强度指标及邓肯模型参数经验公式, 能较高精度预测不同板岩含量、不同孔隙率砂板岩堆石料的力学特性指标参数。

(4) 板岩含量是影响渗透性能的重要因素, 随板岩含量的提升渗透系数降低, 工程建设中应关注砂板岩堆石料的排水设计。

#### 参考文献:

- [1] 岳跃真, 郝巨涛, 孙志恒, 等. 水工沥青混凝土防渗技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. (YUE Yuezhen, HAO Jutao, SUN Zhiheng, et al. Seepage Control Technique of Hydraulic Asphalt Concrete[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 谭 凡, 黄 斌, 饶锡保. 沥青混凝土心墙材料动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **31**(增刊 1): 383-387. TAN Fan, HUANG Bin, RAO Xibao. Experimental study on dynamic properties of asphalt concrete core material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **31**(S1): 383-387. (in Chinese))
- [3] 刘士佳, 孔彩粉, 杨 健, 等. 去学水电站 170 m 级高沥青混凝土心墙堆石坝设计[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, **5**(5): 31-35. (LIU Shijia, KONG Caifen, YANG Jian, et al. Design of quxue hydropower station 170m-level high asphalt concrete core rock-fill dam[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, **5**(5): 31-35.(in Chinese))
- [4] 何顺宾, 胡永胜, 刘吉祥. 冶勒水电站沥青混凝土心墙堆石坝[J]. 水电站设计, 2006, **22**(2): 46-53. (HE Shunbin, HU Yongsheng, LIU Jixiang. Yele hydropower station asphalt concrete core rock—fill dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2006, **22**(2): 46-53. (in Chinese))
- [5] 赵勇进. 两河口水电站砂、板岩各向异性的研究[J]. 四川水力发电, 2009, **28**(2): 113-118. (ZHAO Yongjin. An isotropic properties of sandstone and slate at Lianghekou hydropower station[J]. Sichuan Water Power, 2009, **28**(2): 113-118. (in Chinese))
- [6] 鄢 镜, 黄泰仁. 苗尾水电站片状砂板岩筑坝技术研究[J]. 云南水力发电, 2021, **37**(7): 50-57. (YAN Jing, HUANG Tairen. Research on dam construction technology of sheet sandstone-slate in Miaowei hydropower station[J]. Yunnan Water Power, 2021, **37**(7): 50-57. (in Chinese))
- [7] 李小泉, 李 建, 罗 欣. 含部分软岩的堆石料用于高土石坝堆石区基本特性研究[J]. 水电站设计[J]. 2015, **31**(1): 84-87. (LI Xiaoquan, LI Jian, LUO Xin. Study on basic characteristics of rockfill with partial soft rock used in rockfill area of high earth-rock dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2015, **31**(1): 84-87. (in Chinese))
- [8] 陆 希. 特高混凝土面板堆石坝软硬岩掺配料工程特性研究[J]. 西北水电, 2022(5): 150-160. (LU Xi. Study on engineering characteristics of soft and hard rock mixture for ultra-high concrete face rockfill dam[J]. Northwest Hydropower, 2022(5): 150-160. (in Chinese))
- [9] 傅 华, 凌 华, 蔡正银. 粗颗粒土颗粒破碎影响因素试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, **37**(1): 75-79. (FU Hua, LING Hua, CAI Zhengyin. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2009, **37**(1): 75-79. (in Chinese))
- [10] 张延亿, 邓 刚, 温彦锋, 等. 球应力循环条件下堆石料变形特性的试验研究[J]. 水力发电学报, 2018, **37**(3): 106-112. (ZHANG Yanyi, DENG Gang, WEN Yanfeng, et al. Experimental study on deformation characteristics of rockfill materials under cyclic loading of spherical stress[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, **37**(3): 106-112. (in Chinese))
- [11] 水电水利工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006[S]. 北京: 中国电力出版社出版, 2007. (Code for Coarse-Grained Soil Tests for Hydropower and Water Conservancy Engineering: DL/T 5356—2006[S]. Beijing: China Electric Power Publishing House, 2007. (in Chinese))

(编校: 孙振远)