DOI:10.3969/j.issn.1672 - 1144.2020.02.018

特高面板坝砂砾石料工程特性试验研究

任　艳[1],凌　华[2,3],米占宽[2,3],傅　华[2,3],王　芳[2,3]
(1.塔里木河流域大石峡水利枢纽工程建设管理局,新疆 库尔勒 841000;
2.南京水利科学研究院,江苏 南京 210029;
3.水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室,江苏 南京 210029)

摘　要: 利用室内大型试验设备,系统进行了某特高土石坝砂砾石填筑料的工程特性试验研究。试验结果表明:$P_{<5}$含量是砂砾石料压实性能的重要因素,起始随 $P_{<5}$含量的提高,最小干密度和最大干密度增加较快;其后增长趋缓,当超过某临界值后又有所降低,该临界值略大于 30%。随 $P_{<5}$含量的提高,相同相对密度砂砾石料的强度、初始切线弹性模量和切线体积模量增大,但超过该临界值后,又有降低的趋势。渗透系数测试结果表明,$P_{<5}$是影响渗透性能的重要因素,室内模拟试验时宜采用等量替代法进行超粒径处理。压实后的砂砾石料力学指标较优,是较为理想的高土石坝填筑料,但由于砂砾石料渗透系数低,抗冲刷能力差,采用砂砾石料填筑时应重视坝体排水和反滤设计。

关键词: 砂砾石料;工程特性;压实性能;渗透系数;变形
中图分类号: TV41　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1672—1144(2020)02—0106—05

Experimental Study on Engineering Characteristics of Sandy Gravel for High Concrete Faced Rock - filled Dam

REN Yan[1], LING Hua[2,3], MI Zhankuan[2,3], FU Hua[2,3], WANG Fang[2,3]
(1. *Dashixia Water Conservancy Project Construction Authority of Tarim River Basin, Korla, Xinjiang* 841000, *China*;
2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu* 210029, *China*;
3. *Key Laboratory of Earth - Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu* 210029, *China*)

Abstract: In this paper, a systematic experimental study on the engineering characteristics of sand gravel filling material for a super high concrete faced rock-filled dam was finished by using large scale test equipments. The test results show that the content of $P_{<5}$ is an important factor for the compaction performance of sandy gravel. At the beginning, the minimum dry density and the maximum dry density increase rapidly with $P_{<5}$. Then the increasing rate slow down within a certain scope of $P_{<5}$. When $P_{<5}$ exceeds a certain critical value which is slightly greater than 30%, the minimum dry density and the maximum dry density of sandy gravel decrease with the increase of $P_{<5}$. For the sand gravel materials with the same relative density, the strength, initial tangent elastic modulus and tangent bulk modulus first increase with the $P_{<5}$ content and then decrease when $P_{<5}$ pass the certain critical value. The test results also show that $P_{<5}$ is important factors for permeability coefficient, so equivalent substitution method is proposed when dealing with oversized particles. The compacted sand gravel material with the great mechanical index is an ideal filling material for high earth rock dam, however due to the low permeability and poor erosion resistance, drainage and filter design should be paid more attention.

Keywords: sandy gravel; engineering characteristics; compaction property; permeability coefficient; deformation

收稿日期:2019-11-20　　**修稿日期:**2019-12-15
基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404806);国家自然科学基金面上项目(51679149);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y317005;Y318006;Y320004;Y320005)
作者简介:任　艳(1966—),女,甘肃瓜州人,高级工程师,主要从事规划计划和工程建设工作。E-mail: 315423365@qq.com

砂砾石料综合单价约为爆破堆石料的 50%,具有易压实、软化系数大等特点,碾压时颗粒也不易破碎,压实后一般强度高、压缩性小[1-2],在水利水电、交通运输等行业中应用非常广泛。混凝土面板坝是当今水利水电工程建设的主流坝型之一。具有造价低、工期短、施工方便、坝坡稳定性好、抗震性能强等显著优点。1993 年后,国内吸取沟后面板砂砾石坝溃坝[3]教训和总结其它工程成功经验,已建成了坝高 164.8 m 阿尔塔什[4]、坝高 157 m 吉林台一级[5]、坝高 133 m 乌鲁瓦提[6]和坝高 123.5 m 黑泉面板砂砾石坝[7],现正拟新建一批 250 m 级的高面板砂砾石坝[8-9],如最大坝高 257.5 m 的茨哈峡和最大坝高 247 m 的大石峡面板砂砾石坝。相比百米级砂砾石面板坝,这些特高坝坝体内应力显著增加,应力分布更加复杂,导致坝体变形增大、面板裂缝,甚至引起安全问题,这对大坝的变形控制及渗流控制提出了严峻挑战。砂砾料的工程特性是确保砂砾石面板坝安全的基本要素,众多学者对其压实特性[10-11]、强度指标[12-15]、变形特性[14-15]和渗透性能[2,16]进行了研究,得到了一些有益的研究结论。

本文以某特高面板坝砂砾石填筑料为对象,研究了砂砾料的压实性能、强度指标、变形特性和渗透性能。

1　试验研究

开展相对密度试验研究了砂砾料的室内压实性能,通过大型三轴试验研究了砂砾料的强度指标及应力变形特性,通过渗透试验分析了各区砂砾料的渗透性能随级配的变化规律。

1.1　砂砾石料基本物理性质

试验材料为某特高面板堆石坝砂砾石填筑料,岩性以花岗岩、砂岩、微晶灰岩为主,其次为砾岩、粉细砂岩、页岩等,超径石以灰白色花岗岩为主,少量灰褐色变质砂岩和灰色灰岩。砂粒成份为石英、长石及岩屑等,粒径以中粒为主。根据各坝体分区料设计级配包络线采用等量替代法缩制成最大粒径不超过 60 mm 的室内试验模拟级配。相对密度试验试样筒尺寸为 Φ300 mm×360 mm,最小干密度试验采用人工法,最大干密度试验采用表面振动法。砂砾料的级配特性及相对密度结果见表 1。

表 1　试验级配与试验干密度

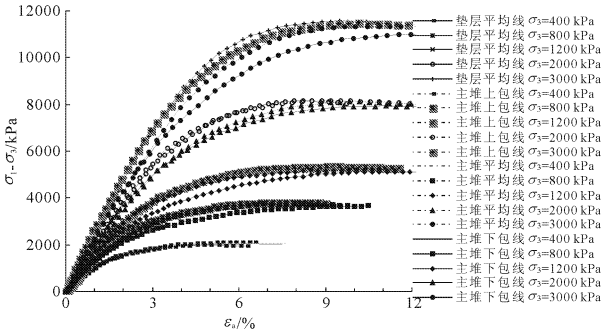
坝体分区	级配包络线	级配类型	小于某粒径颗粒质量百分含量/%												最小干密度/(g·cm^{-3})	最大干密度/(g·cm^{-3})	试验干密度/(g·cm^{-3})
			600 mm	400 mm	200 mm	80 mm	60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm			
垫层小区	平均线	设计及试验级配	—	—	—	—	—	100.00	89.00	71.00	55.00	38.30	28.00	18.50	1.80	2.26	2.20
	上包线	设计及试验级配	—	—	—	—	—	100.00	77.50	63.00	50.00	37.00	28.00	20.00	1.84	2.29	2.24
垫层区	平均线	设计及试验级配	—	—	—	—	100.00	88.00	68.75	55.00	42.50	30.00	21.50	14.50	1.89	2.31	2.26
	下包线	设计级配	—	—	—	100.00	90.00	76.00	60.00	47.00	35.00	23.00	15.00	9.00	—	—	—
		试验级配	—	—	—	—	100.00	83.5	64.50	49.20	35.00	23.00	15.00	9.00	1.89	2.32	2.27
	上包线	设计级配	—	—	100.00	—	77.00	69.00	55.00	45.00	37.00	30.00	25.50	20.50	—	—	—
		试验级配	—	—	—	—	100.00	87.40	65.35	49.60	37.00	30.00	25.50	20.50	1.90	2.33	2.28
主堆石区	平均线	设计级配	—	100.00	90.00	—	64.50	55.70	41.00	31.80	25.00	19.50	16.25	12.75	—	—	—
		试验级配	—	—	—	—	100.00	83.30	55.40	37.90	25.00	19.50	16.25	12.75	1.88	2.32	2.27
	下包线	设计级配	100.00	93.00	80.00	—	52.00	42.40	27.00	18.60	13.00	9.00	7.00	5.00	—	—	—
		试验级配	—	—	—	—	100.00	78.60	44.20	25.50	13.00	9.00	7.00	5.00	1.81	2.28	2.22
排水区	平均线	设计及试验级配	—	—	—	—	100.00	83.75	50.00	28.50	12.25	0.00	—	—	1.73	2.21	2.15

1.2　三轴强度变形试验

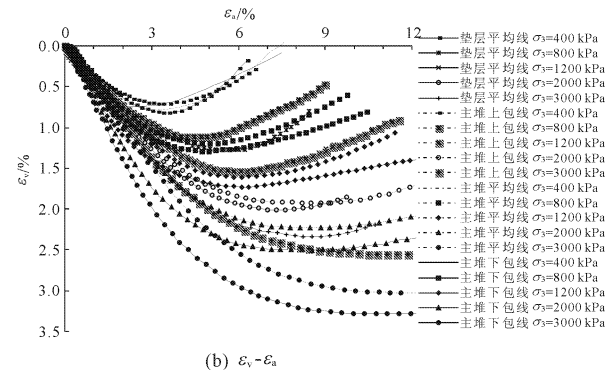
取相对密度 0.90,采用大型三轴仪开展了垫层区平均线、主堆石区上包线、平均线和下包线试样的大型静力三轴试验。为避免制样击实功能对强度和变形特性的影响,试验时以相对密度 0.90 为控制标准,各试验试样干密度见表 1。

试验试样尺寸为 Φ300 mm×700 mm,采用表面振动法分 5 层制样,水头法进行试样饱和,剪切速率为 2 mm/min。试验围压 5 级,分别为 400 kPa、800 kPa、1 200 kPa、2 000 kPa 和 3 000 kPa。试验严格按照《土工试验规程》[17](SL 237—1999)进行。

三轴试验曲线见图 1,各砂砾石料的线性强度指标、非线性强度指标以及不同围压下的破坏峰值见表 2,整理得到的邓肯模型主要变形参数见表 3。



(a) $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_a$



(b) $\varepsilon_v-\varepsilon_a$

图 1 三轴试验曲线

由图 1,各区筑坝材料应力应变曲线具有非线性、压硬性和弹塑性等一般规律。各砂砾料的应力-应变关系多呈应变软化特性,随围压的增长,应变软化特性逐渐趋向于应变硬化,但即使围压高达 3 MPa,出现应力峰值时的轴向应变也仅为 12% 左右。

由体变-应变关系,当围压较小时,由于砂砾料不易破碎和颗粒间的架越作用,剪胀现象明显。随围压的进一步提升,体变曲线的剪胀性逐渐降低。但对于文中砂砾石料,由于相对密度高达 0.90,围压 3 MPa 条件下仍或多或少的产生了剪胀现象。

三轴试验结果表明,当采用 0.90 相对密度时,该工程砂砾石料强度指标 φ 达到了 39.2°~40.3°,邓肯模型参数 K 值达到了 1 110.2~1 344.0。压实后的砂砾料具有较为优越的力学性能,是较为理想的高土石坝填筑料。

1.3 渗透系数测试

采用常水头法开展了各区料的垂直渗透试验,渗流方向为从下向上,试样尺寸为 Φ300×300 mm,试验结果见表 4。

表 2 强度指标

坝体分区	级配特性	ρ_d/(g·cm^{-3})	C/kPa	φ/(°)	φ_0/(°)	$\Delta\varphi$/(°)	不同围压下的剪切破坏峰值/kPa				
							400	800	1200	2000	3000
垫层区	平均线	2.26	169.1	40.3	48.7	5.1	1980.0	3800.5	5181.0	8157.5	11566.4
	上包线	2.28	205.4	39.9	50.2	6.2	2104.6	3805.7	5346.0	8175.5	11480.9
主堆石区	平均线	2.27	201.1	39.7	50.1	6.3	2090.7	3751.9	5216.3	8095.6	11332.3
	下包线	2.22	207.0	39.2	49.9	6.4	2049.6	3663.7	5125.7	7923.4	10997.7

表 3 邓肯模型变形参数

坝体分区	级配特性	ρ_d/(g·cm^{-3})	相对密度	K	n	R_f	G	F	D	K_b	m
垫层区	平均线	2.26	0.90	1110.2	0.34	0.67	0.37	0.09	4.62	522.1	0.33
	上包线	2.28	0.90	1344.0	0.33	0.74	0.37	0.09	4.54	624.4	0.28
主堆石区	平均线	2.27	0.90	1294.1	0.32	0.74	0.36	0.09	4.76	545.9	0.26
	下包线	2.22	0.90	1191.3	0.30	0.74	0.35	0.09	5.16	497.2	0.21

2 砂砾石料的工程特性

2.1 砂砾料室内压实性能

点绘各区料最小干密度、最大干密度随小于 5 mm 粒径颗粒含量($P_{<5}$)的变化关系,见图 2。由图 2 可知起始随 $P_{<5}$ 的提高,细颗粒能逐渐填充至粗颗粒骨架形成的孔隙内,因此最小干密度和最大干密度均有所增加;当 $P_{<5}$ 增加至某一范围后,由于细颗粒已较充分的填充孔隙,最小干密度和最大干密度虽有一定的增长,但增长较为缓慢,逐渐达到某一临界值。超过该临界值后,细颗粒的继续增加有阻碍或隔离骨架的趋势,最小干密度和最大干密度反而会有所降低。

对于文中砂砾料,$P_{<5}$ 临界值略超过 30%,与文献[16]结论类似。需说明的是,对于堆石料,特别是硬岩堆石料,该值往往达到 40%~50% 以上,这表明颗粒形状也会影响粗粒土材料的压实性能。

当然,分析砂砾石料压实性能随级配的变化,不能仅依靠 $P_{<5}$,也要考察级配是否优良,如不均匀系

数、曲率系数、级配是否连续性等。文中排水区料 $P_{<5}$ 为 12.25%,与主堆石区下包线砂砾料 13% 接近,但由于排水区料缺失 2 mm 以下颗粒,相比下包线试样,最小干密度降低了 0.08 g/cm^3、最大干密度降低了 0.07 g/cm^3。

表 4　渗透系数试验结果

坝体分区	级配特性	干密度 /(g·cm^{-3})	水温 20℃时渗透系数 /(cm·s^{-1})
垫层区	上包线	2.24	9.37×10^{-5}
	平均线	2.26	1.92×10^{-4}
	下包线	2.27	3.86×10^{-4}
垫层小区	平均线	2.20	9.18×10^{-5}
主堆石区	上包线	2.28	2.50×10^{-4}
	平均线	2.27	6.01×10^{-3}
	下包线	2.22	7.73×10^{-2}
反滤过渡区	平均线	2.15	3.39×10^{-1}

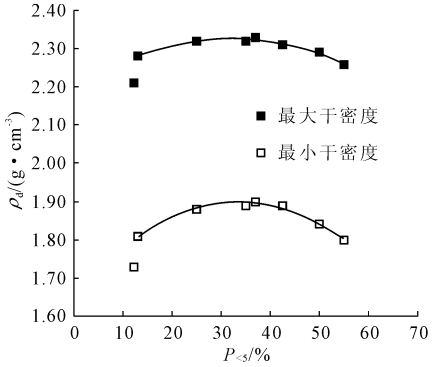


图 2　最小干密度和最大干密度随 $P_{<5}$ 的变化

2.2　砂砾石料强度指标

由表 2,对于主堆石区料,由于随 $P_{<5}$ 含量的提高,细颗粒能逐渐密实填充于粗颗粒形成的骨架孔隙内,并与骨架协调作用以共同分担荷载,因此在全围压范围内主堆石区上包线试样的破坏峰值最大,强度指标最高,线性强度指标 φ 达到了 39.9°,φ_0 达到了 50.2°;主堆石区下包线试样的破坏峰值最小,强度指标最低,φ 为 39.2°,φ_0 达到了 49.9°;平均线试样居中。

随 $P_{<5}$ 含量进一步的提高,相比主堆石区料上包线试样,含量为 42.5% 的垫层区平均线试样的破坏峰值整体有所降低。特别是当围压较小时,由于骨架被细颗粒有阻断的趋势,因此剪切破坏峰值降低较为显著。当围压超过 2 MPa 后,由于垫层区料平均线试样的干密度接近主堆石区料上包线试样,且砂砾石料颗粒的不易破碎,其强度峰值与主堆石区上包线试样的剪切破坏峰值接近。对于强度指标,当 $P_{<5}$ 含量进一步提高后,砂砾石料的强度指标 C 值降低较为显著,φ 值略有增加,但 φ_0、$\Delta\varphi$ 均降低较为明显。

综上,随 $P_{<5}$ 含量的增加,压实后的砂砾石料强度逐渐增加,但超过临界值后,又有降低的趋势。

2.3　砂砾石料的变形特性

点绘垫层区料平均线试样、主堆石砂砾料上包线、平均线和下包线的 E_i/P_a、B_t/P_a 随 σ_3/P_a 的变化关系汇于图 3,其中 E_i 为初始切线弹性模量,B_t 为切线体积模量,σ_3 为试验围压,P_a 为标准大气压。

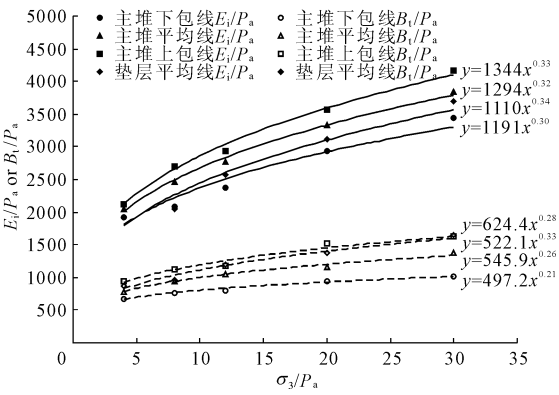


图 3　$E_i/P_a(B_t/P_a)-\sigma_3/P_a$ 关系曲线

对于主堆石区砂砾料上包线、平均线和下包线试样,尽管相对密度相同,由于上包线试样粗细颗粒咬合紧密,细颗粒能协同分担荷载,因此在各围压范围内初始切线弹性模量、切线体积模量均要高于平均线和下包线试样;且随围压的提高,级配优良的特性得到进一步发挥,差异越显著。如图 3 所示,在围压较低时上包线试样与下包线试样的峰值相差不大,出现峰值时的轴向应变也较近,两者的体变曲线也相差不大,甚至由于下包线试样形成骨架的粗颗粒含量较高,在剪应力作用下的剪胀现象更显著。但随围压的提高,如围压达到 3 MPa 时,上包线试样剪切峰值不但高于下包线试样,出现峰值时的轴向应变约为 10%,也要小于下包线试样的 12%;对于体积变形,由于上包线试样的级配更为优良,骨架形成的孔隙小,在高围压条件下产生的体积变形小,剪胀趋势更为明显。反映在邓肯模型参数上,上包线试样的 K、K_b 值最大,弹性模量系数 n 和体积模量系数 m 值也最大,下包线数值最小,平均线居中。

随 $P_{<5}$ 含量的进一步增加,即为 42.5 的垫层料,由于此时的细颗粒含量较高,已有隔断粗颗粒骨架的趋势,相同压实功能条件下得到的密度也开始逐渐降低,因此当围压较低时,其峰值要低于主堆石区砂砾料上包线试样,且在剪应力作用下产生的体积变形量要大。当围压进一步提高后,特别是高围

压条件下,由于 $P_{<5}$ 含量增加量不大,应力 - 应变曲线及体变 - 应变曲线整体变化不大。反映在邓肯模型参数上,相比主堆石砂砾料上包线试样,垫层区料平均线试样邓肯模型参数 K、K_b 值要有所降低,弹性模量系数 n 和体积模量系数 m 值略有增加,整体略有降低。

2.4 砂砾石料的渗透性能

点绘各区料试样渗透系数随 $P_{<5}$ 含量的变化关系,见图 4。相同的相对密度条件下,各试验材料渗透系数与 $P_{<5}$ 含量关系密切,随 $P_{<5}$ 含量的提高,渗透系数降低。考虑到 $P_{<5}$ 含量对渗透系数的重要影响,试验人员开展渗透系数试验时,宜优先采用等量替代法进行超粒径处理。另外,相比主堆石区砂砾料下包线试样,反滤过渡区 $P_{<5}$ 含量与之相近,但由于缺失了 2 mm 以下细颗粒,其渗透系数要显著增加。

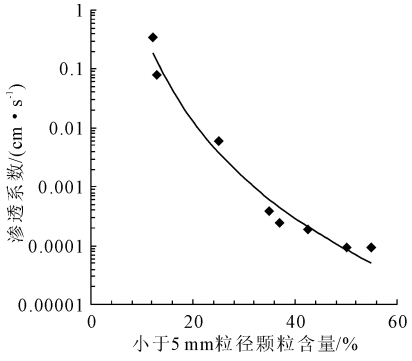


图 4 渗透系数随 $P_{<5}$ 含量的变化

需要指出的是,相比堆石料,砂砾料的渗透系数一般要低,如主堆石区砂砾料上包线试样,小于 5 mm 粒径颗粒含量为 37%,渗透系数为 2.50×10^{-4} cm/s,平均线试样小于 5 mm 粒径颗粒含量为 25%,渗透系数为 6.01×10^{-3} cm/s,均不满足堆石区料渗透系数大于 10^{-2} cm/s 的常规要求,因此对于采用砂砾石料填筑的高土石坝,应重视坝体排水设计。

3 结 论

(1) $P_{<5}$ 含量是影响砂砾石料压实性能的重要因素,起始随 $P_{<5}$ 含量的提高,最小干密度和最大干密度增加较快;达到某一定范围后,增长趋缓,且超过某临界值后又有所降低,对于文中砂砾石料该临界值略大于 30%。

(2) 起始随 $P_{<5}$ 含量的提高,相同相对密度的砂砾料强度提高,但超过该临界值后,又有降低的趋势。

(3) 起始随 $P_{<5}$ 含量的提高,相同相对密度的砂砾料初始切线弹性模量、切线体积模量增大,但超过该临界值后,又有降低的趋势。

(4) $P_{<5}$ 含量是影响渗透性能的重要因素,室内模拟试验时宜采用等量替代法进行超粒径处理。

(5) 压实后的砂砾石料力学指标较优,是高土石坝较为理想的填筑料,但由于砂砾石料渗透系数低,抗冲刷能力差,采用砂砾石料填筑的高土石坝应重视坝体防渗排水和反滤设计。

参考文献:

[1] 陈生水,凤家骥,袁 辉. 砂砾石面板坝关键技术研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(1):16-20.
[2] 傅 华,凌 华,蔡正银. 砂砾石料渗透特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(4):69-71.
[3] 郭诚谦. 沟后水库溃坝原因分析[J]. 水力发电,1998(11):40-45,65.
[4] 邓铭江,吴六一,汪 洋,等. 阿尔塔什水利枢纽坝基深厚覆盖层防渗及坝体结构设计[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(2):149-155.
[5] 彭卫军,罗松涛. 吉林台一级水电站混凝土面板砂砾 - 堆石坝设计与施工[J]. 水力发电,2006,32(6):23-25,43.
[6] 汪 洋,曲 苓. 乌鲁瓦提砂砾石面板高坝渗流控制的设计[J]. 水利水电技术,2000,30(1):66-70.
[7] 邓铭江. 严寒、高震、深覆盖层混凝土面板坝关键技术研究综述[J]. 岩土工程学报,2012,34(6):985-996.
[8] 马洪琪,迟福东. 高面板堆石坝安全性研究技术进展[J]. Engineering,2016,2(3):148-163.
[9] 陈生水,阎志坤,傅中志,等. 特高面板砂砾石坝结构安全性论证[J]. 岩土工程学报,2017,39(11):1949-1958.
[10] 董承山,杨正权,王 龙,等. 大石峡高面板坝筑坝砂砾料现场大型相对密度试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2018,48(5):1603-1608.
[11] 王红刚. 砂砾石原级配现场相对密度试验[J]. 四川水力发电,2019,38(3):41-44,48.
[12] 孟宪麒,史彦文. 石头河土石坝砂卵石抗剪强度[J]. 岩土工程学报,1983,5(1):90-101.
[13] 李 振,邢义川. 干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J]. 岩土力学,2006,27(12):2255-2260.
[14] 褚福永,朱俊高. 砂卵砾石料强度及变形大型三轴试验研究[J]. 水力发电学报,2014,33(6):209-214.
[15] 黄浩然,朱俊高,方智荣,等. 砂卵砾石料变形与强度特性三轴试验研究[J]. 水电能源科学,2012,30(7):87-89.
[16] 陈生水,凌 华,米占宽,等. 大石峡砂砾石坝料渗透特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(1):26-31.
[17] 土工试验规程:SL 237—1999[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.