

DOI: 10.11779/CJGE202101003

宽围压加卸荷条件下特高坝填筑料强度变形研究

凌 华^{1, 2}, 陈生水^{1, 2}, 翟迎春³, 傅 华^{1, 2}, 石北啸^{1, 2}, 王 芳^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024;
3. 中国电建集团西北勘测设计院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 开展大型三轴试验, 系统研究了特高坝堆石料和砂砾石填筑料在宽围压加卸荷条件下的强度变形特性。结果表明: 相比堆石料, 砂砾石料在低应力条件下的强度低, 采用砂砾石填筑的大坝应防止坝坡浅层失稳。围压对强度指标和邓肯模型变形参数均具有重要影响, 对于特高土石坝, 宜根据应力分布情况分段采用不同的强度指标和变形参数, 以提升坝体结构应力变形计算精度和提高工程安全性。卸荷—再加载循环内, 均产生了正值的轴向变形和体积变形, 循环结束后, 应力—应变、应变—应变曲线均回归至原有的正常加载形态; 在卸载段, 低围压、低应力水平条件下往往表现为体胀, 随围压和应力水平的提高, 主要表现为卸荷体缩; 在再加载段, 无论围压大小还是应力水平高低, 均主要表现为体缩。随围压的提高, 回弹模量与初始切线模量之比增大; 同一围压下, 随应力水平的提高, 回弹模量变化不大, 略有降低的趋势; 大石峡工程高填筑标准砂砾石料和堆石料 K_{ur}/K 约 1.98~2.22, 但指数 n_{ur} 要远大于 n ; 对于那些特高坝和高坝而言, 有限元计算时假定 $n_{ur} = n$ 是不太适宜的, 应开展回弹模量试验研究。

关键词: 特高坝; 围压; 强度; 变形; 回弹模量

中图分类号: TV16; TU458 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)01-0027-07

作者简介: 凌 华(1977—), 男, 江苏盐城人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事土石坝筑坝材料试验技术及基础理论研究工作。E-mail: hling@nhri.cn。

Experimental study on strength and deformation of filling materials of super-high dams with wide confining pressures under loading and unloading conditions

LING Hua^{1, 2}, CHEN Sheng-shui^{1, 2}, ZHAI Ying-chun³, FU hua^{1, 2}, SHI Bei-xiao^{1, 2}, WANG Fang^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China;
3. Hydro-China Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: The triaxial tests with wide confining pressures under loading and unloading conditions are carried out to study the strength and deformation of filling materials of super-high dams. It is found that the strength under low confining pressure of sand gravel is lower than that of rockfill materials, so the slope of dams filled with sand gravel should be gentler to prevent instability. The range of confining pressure has great effects on the strength indexes and deformation parameters. The change of nonlinear strength index is not as significant as that of linear strength index, and the change of nonlinear strength index of sand gravel is not as significant as that of rockfill. For a super-high dam, different strength indexes and deformation parameters should be adopted according to the stress distribution of dam crest, dam slope and dam body. The axial and volume deformations occur during unloading-reloading cycle, and after the cycle the curves of stress-strain and volumetric strain-axial deformation return to normal shape. During unloading, the volume of samples mainly seems to expand under low confining pressures and stress level, and contracts under high confining pressures. During the reloading stage, the volume deformation mainly shows shear shrinkage regardless of the confining pressure or stress level. The ratio of resilient modulus to initial tangent modulus increases with the confining pressure, and the resilient modulus seems to decrease with the stress level. The the ratio of K_{ur}/K is about 1.98~2.22, but the resilient modulus index n_{ur} is larger than the initial tangent one n .

Key words: super-high dam; confining pressure; strength; deformation; resilient modulus

基金项目: 国家重点研发计划项目(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项目(Y318006, Y320005, Y320004)
收稿日期: 2020-02-28

0 引言

中国正在建和拟建一批 300 m 级和 250 m 级特高土石坝^[1-2],如最大坝高 315 m 如美心墙堆石坝和最大坝高 247 m 的大石峡面板砂砾石坝。高坝坝体内应力大且分布复杂,对工程建设、设计施工、长期安全运行带来了严峻挑战。从已建的几座高土石坝的运行状况看,变形问题及其导致的防渗体裂缝和大坝渗漏等是影响高土石坝安全运行的最重要因素^[1]。堆石料的工程力学特性是关键性的前期基础研究,已针对堆石料的强度和变形特性开展了大量的研究工作,取得了重要进展,如分析粗粒土应力应变及体应变的变化规律及剪胀性、颗粒剪碎性等特征的影响,阐明咬合力的作用、强度包线的类型及其参数关系式^[3];近似模拟大坝填筑、水库蓄水和库水位下降时的应力路径,研究变形特性^[4];采用非线性关系描述模拟堆石料的级配、破碎指标以及应力-应变-体变响应变化规律^[5];基于等应力比路径下的偏压试验和复杂应力路径下的剪切试验,提出了应力路径增量非线性弹性模型^[6]等。但目前尚未能考虑高坝低应力—高应力全应力状态,开展低围压至高围压加卸荷三轴试验,系统研究宽围压范围内高坝填筑料的强度变形及回弹变形特性。

本文以大石峡特高面板坝砂砾石填筑料和堆石爆破料为对象,开展大型三轴加卸荷试验,研究了这两种材料在低围压、中围压和高围压范围内的强度指标和变形参数的变化规律,同时分析了常规三轴静力加载与回弹变形特性的差异,并提出了坝体应力变形及

稳定分析时参数取值的建议。

1 三轴试验

1.1 基本物理性质

根据大石峡工程 3BA 区砂砾石料、3BC 区堆石料的设计级配,采用等量替代法和混合法进行超粒径处理,得到了试验模拟级配;根据分区料设计填筑标准,确定了试验干密度。各试验材料级配及干密度见表 1。

3BA 区砂砾石料颗粒较为浑圆,部分颗粒有胶结现象。根据现场相对密度试验结果,以相对密度 0.90 控制试验干密度。需说明的是,由于现场碾压机具功率大,本工程砂砾石料现场最大干密度比室内最大干密度约大 0.03~0.08 g/cm³。

3BC 区堆石料为微晶灰岩夹灰质砾岩混合料,相对质量密度为 2.73,饱和单轴抗压强度平均达到 61 MPa。由于部分颗粒棱角不太尖锐,堆石料具有较好的压实性能,在室内击实功能的条件下,也能满足孔隙率 18%的要求。

1.2 试验方法

三轴试验试样尺寸为 Φ300 mm×700 mm。采用表面振动法分 5 层击实试样,采用水头饱和法进行饱和。为研究超高面板坝宽围压范围内的强度和变形特性,试验围压设置 8 级,分别为 50, 100, 200, 300, 600, 1200, 2000, 3000 kPa。为分析试样在加载阶段与回弹阶段变形的差异,剪切过程中进行了 4 次加卸荷循环。

表 1 试验级配与试验干密度
Table 1 Gradations and densities for tests

坝体分区	级配		小于某粒径颗粒质量百分含量/%														密度 控制标准	试验 干密度 /(g·cm ⁻³)
	级配 特性	类型	800 mm	600 mm	400 mm	200 mm	150 mm	100 mm	60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm	0.075 mm		
3BA 区 砂砾石料	上包线	设计级配					100	90	76	67	54	45.5	36	28	25	10	相对密度 0.90	2.31
		试验模拟							100	85.6	64.8	51.2	36	28	25	10		
	平均线	设计级配			100	86	82.5	73	60.7	52.3	40.8	32.8	24.5	18.5	16.5	6	相对密度 0.90	2.38
		试验模拟							100	82.4	58.4	41.7	24.5	18.5	16.5	6		
	下包线	设计级配	100	90	72	65	56	45.4	37.5	27.5	20	13	9	8	2		相对密度 0.90	2.29
		试验模拟						100	78.8	51.9	31.8	13	9	8	2			
3BC 区 堆石料	上包线	设计级配			100	75	67.4	58	48	42	32	25	20	13.5	10	5	孔隙率 18%	2.24
		试验模拟							100	82.9	54.3	34.3	20	13.5	10	5		
	平均线	设计级配		100	86	63.5	56.2	47.5	37.5	31	21.5	16	12.5	8	5.75	2.5	孔隙率 18%	2.24
		试验模拟							100	81.2	53.5	31.4	15.8	10	8	3.8		
	下包线	设计级配	100	86	72	52	45	37	27	20	11	7	5	2.5	1.5	0	孔隙率 18%	2.24
		试验模拟							100	78.5	52.6	29.4	11.5	6.8	4.5	0.5		

1.3 试验结果

典型的 3BA 区砂砾石料平均线试样和 3BC 区堆石料平均线试样三轴试验曲线见图 1, 2。

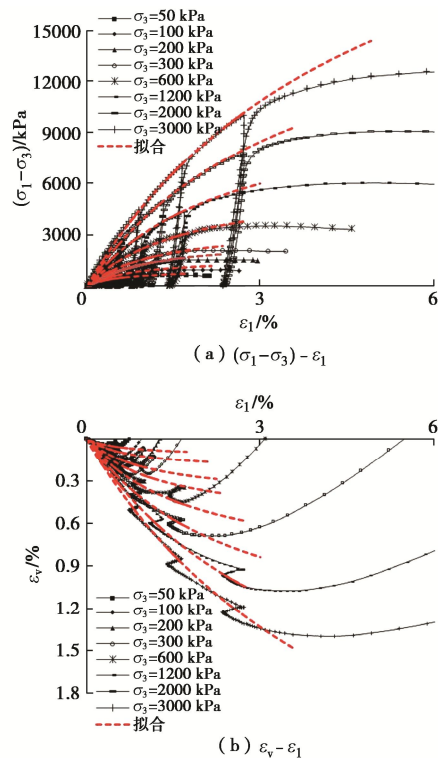


图 1 3BA 区砂砾石料平均线试样三轴试验曲线

Fig. 1 Triaxial test curves of sandy gravel samples with mean line in 3BA zone

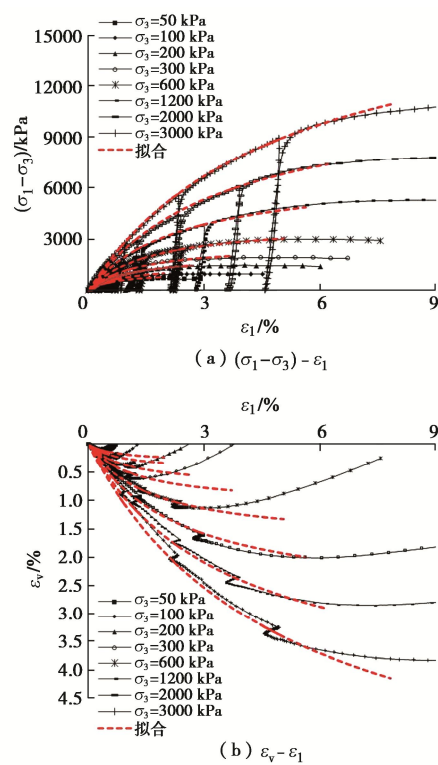


图 2 3BC 区堆石料平均线试样三轴试验曲线

Fig. 2 Triaxial test curves of rockfill samples with mean line in 3BC zone

2 围压对强度指标的影响

各级配料在围压下的剪切峰值见表 2。对于 3BA 区砂砾石料，各级配试样的相对密度均为 0.9，但由于平均线小于 5 mm 粒径颗粒含量接近 30%^[7]，细颗粒能密实充填于粗颗粒骨架内的孔隙，协同分担外部荷载，砂砾石料的级配最为优良，现场试验得到的最大干密度及试验干密度最大，因此在低围压—高围压全应力范围内强度最高。

3BC 区堆石料各包线试样采用了相同的孔隙率，由于下包线试样形成骨架的粗颗粒含量最高，因此在低围压条件下强度峰值最大；随围压提高，上包线试样细颗粒密实填充于骨架孔隙，不但能分担荷载还能减缓了大颗粒的破碎，上包线试样的级配优良特性得到了充分发挥，其强度峰值要高于下包线试样。

表 2 剪切峰值

		Table 1 Peak values of shear stress (kPa)							
试样编号		围压/kPa							
		50	100	200	300	600	1200	2000	3000
3BA 区砂砾石料	上包线	511	819	1354	1846	3171	5555	8382	11690
	平均线	619	964	1550	2071	3516	6031	9119	12587
	下包线	478	776	1288	1768	3064	5289	8022	11325
3BC 区堆石料	上包线	599	902	1396	1854	2958	5335	7953	11214
	平均线	670	966	1450	1901	2993	5270	7789	10945
	下包线	753	1033	1501	1949	3021	5210	7607	10666

该超高面板坝 3BA 区砂砾石料和 3BC 区堆石料均采用了高填筑设计标准，通过对比可发现：3BA 区砂砾石料在低围压下的强度峰值要低于 3BC 区堆石料，但在高围压条件下又反之。主要是由于砂砾石料颗粒浑圆咬合力低、高压下颗粒不易破碎等原因引起的。相比堆石料，对于采用砂砾石填筑的大坝，由于低应力条件下强度低，应适当放缓坝坡并采取合理的抗震措施，以防止坝坡浅层滑动。

不同围压范围内 3BA 区砂砾石料和 3BC 区堆石料平均线试样的线性强度指标和非线性强度指标见表 3，强度包线图见图 3。

表 3 强度指标

		Table 3 Strength indexes							
围压范围 /kPa		3BA 区砂砾石料平均线试样				3BC 区堆石料平均线试样			
		c /kPa	φ / (°)	φ ₀ / (°)	Δφ / (°)	c /kPa	φ / (°)	φ ₀ / (°)	Δφ / (°)
50~300		69.2	48.0	56.0	11.0	93.2	45.2	56.1	14.2
50~600		88.3	46.3	56.0	10.5	120.7	42.6	56.1	13.8
50~1200		116.2	44.4	56.0	10.0	135.5	41.5	56.0	12.6
50~2000		141.2	43.2	55.9	9.6	160.2	40.2	55.9	11.9
50~3000		171.0	42.1	55.9	9.3	180.8	39.4	55.7	11.3
100~3000		196.0	41.9	55.4	8.9	200.9	39.2	54.9	10.5
200~3000		226.0	41.6	55.0	8.4	223.3	39.0	54.0	9.7
300~3000		259.7	41.3	54.6	8.2	246.9	38.7	53.3	9.1
600~3000		319.7	40.8	54.3	7.9	280.7	38.4	51.6	7.8

由表 3 可知，当第 1 级起始围压 50 kPa 不变、最

大围压由 300 kPa 提高至 3000 kPa, 堆石料和砂砾石料的线性强度指标 c 值都逐渐增大, φ 值均逐渐降低, 非线性强度指标 φ_0 与 $\Delta\varphi$ 均降低。最大围压 3000 kPa 不变, 随第 1 级起始围压由 50 kPa 提高至 600 kPa, 强度指标 c 值也逐渐增大, φ 值逐渐降低, φ_0 与 $\Delta\varphi$ 均降低。表明围压对堆石料和砂砾石料的强度指标产生了重要的影响, 主要是因为低应力状态下材料的颗粒破碎不明显, 强度指标较高, 而高围压条件下颗粒破碎加剧, 强度指标降低导致的。

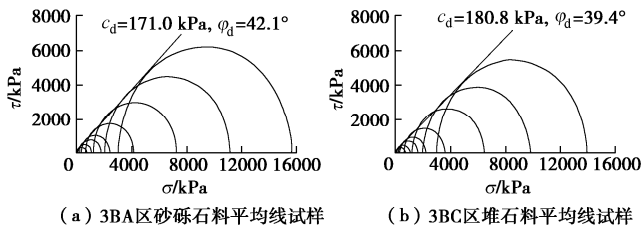


图3 强度包线

Fig. 3 Strength envelopes

由表 3 可以看出, 不管是堆石料还是砂砾石料, 相比而言非线性强度指标数值变化不如线性强度指标显著。另外, 由于砂砾石料颗粒浑圆, 颗粒破碎程度低, 非线性强度指标 φ_0 与 $\Delta\varphi$ 的变化相对也不如堆石料显著。因此坝体填筑料特别是特高坝堆石料宜用非线性强度公式描述其强度特性。

3 围压对变形特性的影响

由图 1, 2 可以看出, 随围压逐级增大, 堆石料和砂砾石料应力 - 应变曲线、体变 - 应变曲线形态变化类似。以堆石为例: 在 50 kPa 低围压时, 由于试样干密度较大, 制样击实功影响较为显著, 因此在很小的应变 (2.1%) 时就出现剪切峰值, 其后轴向应力有所降低, 应力 - 应变呈显著的应变软化特性; 对于体变, 在轴向应变 0.46% 时即出现峰值 (0.12%), 其后强烈剪胀。随围压的提高, 由于高应力条件下的颗粒重组及颗粒破碎等作用, 应力 - 应变逐渐由应变软化趋向于应变硬化, 出现剪切峰值时的轴向应变增大, 体变峰值提高且剪胀减弱、剪缩增强。

点绘堆石料平均线试样和砂砾石料平均线试样的 $E_i/p_a - \sigma_3/p_a$, $B_i/p_a - \sigma_3/p_a$ 关系曲线见图 4, 其中 E_i , B_i , p_a 分别为初始切线模量、体积模量和标准大气压。由此得到的 3BA 区砂砾石料和 3BC 区堆石料的平均线试样邓肯模型主要变形参数见表 4。

由于材料在上述高、低围压下表现出的力学行为差异, 特别是高围压和大剪切应力条件下的颗粒破碎作用, 堆石料和砂砾石料的 $E_i/p_a - \sigma_3/p_a$ 曲线随围压增大沿幂函数曲线有向下偏移的现象, 因此随围压

的提高, 邓肯模型参数 K 值有增大, n 值有降低的趋势。对于 $B_i/p_a - \sigma_3/p_a$ 曲线, 由于低围压条件下剪胀现象非常显著且产生的体积变形小, 围压 50 kPa 条件下 B_i 值较大, 其后在低围压范围内, E_i/p_a 先有所降低, 再由于压硬性随围压而又有所增长。这也是导致包含低围压时参数 K_b 数值较大, m 值出现负值的主要原因。

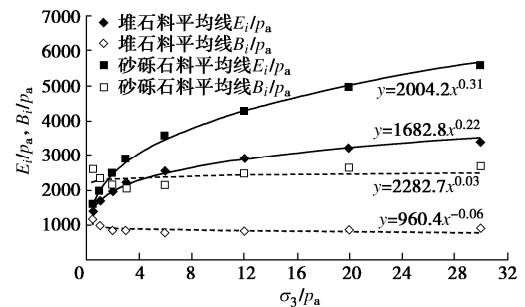
图4 E_i/p_a 和 B_i/p_a 随围压的变化Fig. 4 Change of E_i/p_a and B_i/p_a with confining pressure

表 4 邓肯模型变形参数

Table 4 Deformation parameters of Duncan model

围压范围 /kPa	3BA 区砂砾石料平均线试样				3BC 区堆石料平均线试样			
	K	n	K_b	m	K	n	K_b	m
50~300	1991.7	0.33	2353.5	-0.14	1668.8	0.25	991.6	-0.18
50~600	1991.3	0.33	2357.3	-0.09	1668.3	0.24	992.3	-0.15
50~1200	1995.5	0.32	2329.4	-0.02	1672.2	0.23	985.4	-0.12
50~2000	2000.6	0.31	2301.6	0.01	1676.9	0.22	973.0	-0.08
50~3000	2004.2	0.31	2282.7	0.03	1682.8	0.22	960.4	-0.06
100~3000	2029.9	0.30	2087.2	0.06	1719.0	0.21	886.4	-0.02
200~3000	2076.9	0.29	1882.0	0.10	1755.2	0.20	811.0	0.01
300~3000	2124.6	0.28	1740.7	0.13	1820.8	0.19	765.7	0.04
600~3000	2150.8	0.28	1691.7	0.14	1849.6	0.18	647.9	0.09

由于 E_i , B_i 随围压的变化规律, 导致: 第 1 级起始围压 50 kPa 不变、最大围压由 300 kPa 提高至 3000 kPa, 还是最大围压 3000 kPa 不变、起始围压由 50 kPa 提高至 600 kPa, 这两种情况下模型参数 K 值略有增长, K_b 值略有减小, n 值略有降低, m 值增长。但相对而言, 后一种情况各参数变化相对较大。这是由于: K 与 K_b 的物理意义为围压 100 kPa 时的初始切线模量和体积模量与标准大气压的比值, 具体数值在参数整理时受低围压, 特别是 100 kPa 条件下的试验结果影响较大, 因此当整理围压范围包含低围压时, K 与 K_b 变化不显著。

围压均超过 100 kPa 后, 变化相对明显。上述分析表明, 围压范围选取的不同也会导致变形参数的变化。

围压对强度指标和变形参数的具体数值均有影响, 因此对于坝体内应力分布差异巨大的特高土石坝, 在坝体分区设计、坝体结构应力变形和稳定计算分析时, 条件允许时宜根据坝顶、坝坡及坝体内部应力分

布情况, 采用不同的强度指标和变形参数。

根据文献[8]的方法, 取围压 50~300 kPa 和 600~3000 kPa 邓肯 *E-B* 模型参数, 进行了试验曲线的反演, 见图 1, 2。可知, 在破坏峰值点前应力-应变曲线几乎重合, 在剪缩段体变-应变曲线基本一致, 验证了模型参数取值的准确性和合理性。对于体变-应变剪胀段, 拟合效果不理想, 这是由于邓肯 *E-B* 模型本身不能反映剪胀引起的。

4 卸荷变形特性

三轴试验时均进行了 4 级加卸荷试验, 卸荷速率与加载速率相同, 均为 2 mm/min。绘制堆石料平均线试样在围压 100, 3000 kPa 加卸荷循环内的应力-应变曲线, 如图 5, 6 所示。卸荷—再加荷过程中, 应力恢复至初始卸荷应力, 均产生了正值的轴向变形和体积变形。

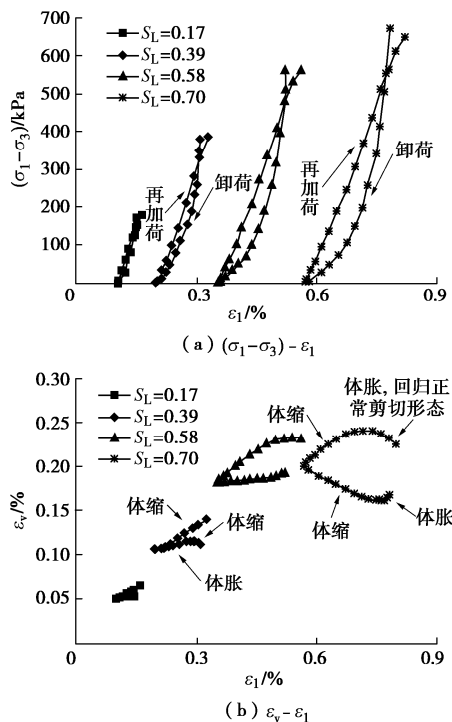


图 5 加卸荷试验曲线 ($\sigma_3 = 100$ kPa)

Fig. 5 Triaxial test curves under loading and unloading conditions ($\sigma_3 = 100$ kPa)

对于轴向变形, 初始卸荷时, 产生的回弹变形很小, 甚至由于滞后因素, 卸荷初期变形仍微有增长; 其后随卸荷的深入, 回弹变形逐渐增大。在再加载段, 应力随应变增长迅速, 当接近或达到初始卸荷应力时, 又有所放缓, 再回归至原有正常加载的应力-应变曲线形态, 见图 1, 5, 6。

卸荷阶段, 不同围压及应力水平的体变-应变特性并不相同。以堆石为例, 当围压 100 kPa, 应力水平

为 0.17 和 0.39 时, 前期正常剪切时试样排水, 可能由于体变滞后的原因, 卸荷段初期试样排水、体积收缩; 其后由于随应力降低, 体积恢复发生膨胀。围压 100 kPa, 应力水平 0.58 时, 卸荷前正常剪切时的体变接近峰值, 卸荷段整体表现为体积恢复, 体积膨胀; 应力水平 0.70 时, 试样正常剪切时已剪胀, 同样可能由于体变滞后, 初始卸荷段仍表现为体胀, 随卸载持续再表现为体缩。围压 3000 kPa 时, 各应力水平正常加载剪切时试样均处于排水状态, 卸荷时均表现为试样排水, 体变始终增大, 即发生了卸荷体缩。卸荷体缩是土料三轴试验中普遍存在的一种现象, 非常复杂, 无法用经典弹性和塑性理论进行解释^[9]。目前主要认为可能是由于剪胀变形的可恢复性^[10]、各向异性^[11]、加载剪胀^[12]所导致的。

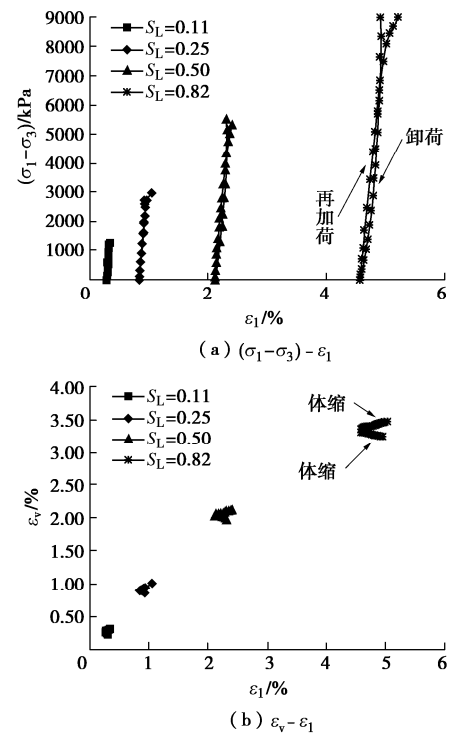


图 6 加卸荷试验曲线 ($\sigma_3 = 3000$ kPa)

Fig. 6 Triaxial test curves under loading and unloading conditions ($\sigma_3 = 3000$ kPa)

在再加载阶段, 所有围压及应力水平条件下试样均主要表现为体缩, 当达到或接近初始卸荷应力时, 仍回归原有正常加载体变曲线形态。

综上所述, 围压及应力水平, 特别是围压, 是影响卸荷体积变形特性的关键因素, 低围压、低应力水平条件下卸荷时往往表现为体胀, 随围压和应力水平的提高, 主要表现为卸荷体缩。

5 回弹模量

取卸荷荷载与卸荷应变之比为回弹 (卸荷) 模量

E_{ur} 。试验结果表明,砂砾石料和堆石料的回弹模量随围压和应力水平的变化规律类似,其中主堆石区平均线试样在各围压条件下的回弹模量与大气压之比 E_{ur}/p_a 、回弹模量与初始切线模量之比 E_{ur}/E_i 随应力水平 S_L 的变化见图 7。图 7 表明,同一围压条件下,随应力水平的提高卸荷模量变化有限,略有降低的趋势;随围压的增加,卸荷模量增加,且 E_{ur}/E_i 随围压的增大而提高,围压 50~200 kPa 时约 1.8~2.6,围压 2000~3000 kPa 时达到了 6~8。这是由于围压越高,剪应力越大,应力作用下的试样越密实,颗粒之间咬合及嵌入越紧密,卸荷(回弹)变形所受约束也越大。

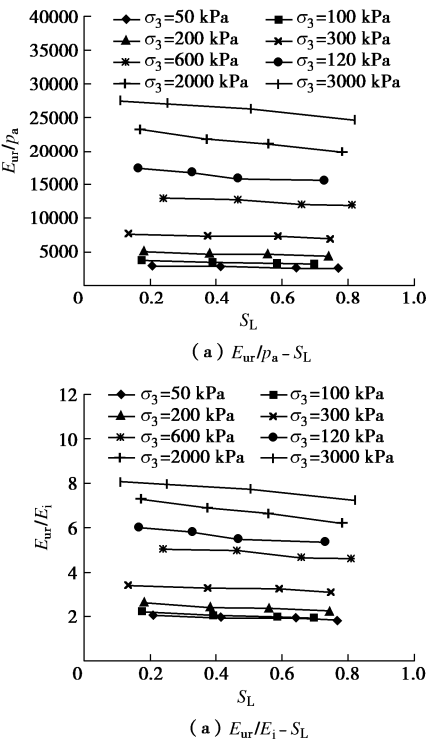


图 7 E_{ur}/p_a 和 E_{ur}/E_i 随应力水平 S_L 的变化

Fig. 7 Change of E_{ur}/p_a and E_{ur}/E_i with stress level

根据 $\lg(E_{ur}/p_a) - \lg(\sigma_3/p_a)$ 呈线性关系的假定,得到的回弹变形参数 K_{ur} 和指数 n_{ur} 见表 5。

表 5 回弹模量与初始切线模量参数

Table 5 Parameters of resilient and initial tangent moduli

坝体 分区	级配 特征	K	n	K_{ur}	n_{ur}	K_{ur}/K
3BA 区 砂砾石料	上包线	1469.3	0.34	2957.3	0.61	2.01
	平均线	2004.2	0.31	4110.5	0.57	2.05
	下包线	1428.5	0.32	2832.8	0.60	1.98
3BC 区 堆石料	上包线	1511.3	0.24	3354.1	0.61	2.22
	平均线	1682.8	0.22	3678.8	0.59	2.19
	下包线	1874.4	0.19	4081	0.57	2.18

3BA 区砂砾石料和 3BC 区堆石料回弹模量参数 K_{ur} 约为邓肯模型参数 K 值的 1.98~2.22 倍,符合一般认知;回弹指数 n_{ur} 达到了 0.57~0.61,均明显高于邓肯模型参数 n 值。

陈愈炯^[13]的研究表明,对于最大干密度的黏土料, K_{ur}/K 为 1.1~1.3, n_{ur}/n 达到了 1.3~1.6。刘国彬等^[14]的灰色淤泥质粉质黏土和灰色黏土卸荷试验结果表明:应力路径对卸荷(回弹)模量具有重要影响,不同应力路径条件下的卸荷模量相差约 2 倍,但均可认为卸荷模量与平均应力呈线性关系,这实际隐含了 n_{ur} 始终为 1.0,且 n_{ur} 与应力路径无关。褚福永等^[15]的研究表明, K_{ur}/K 为 2.64~4.60, n_{ur}/n 为 0.540~0.885,且材料母岩越硬, K_{ur}/K 越大。可见, K_{ur}/K , n_{ur}/n 的比例是个复杂的问题,应与土料类型,母岩性质,密度、围压和应力水平等初始应力状态,应力路径,加卸荷方式,加卸荷速率和排水条件等有关。

仅从本次试验而言,坝体应力变形计算时假定 $n_{ur}=n$ 是不太适宜的。对于那些特高坝和高坝而言,应开展坝体填筑料的回弹模量特性研究。

6 结 论

(1) 围压对堆石料和砂砾石料的强度指标具有重要影响,但相对而言,对非线性强度指标数值影响不如线性强度指标显著,且砂砾石料非线性强度指标变化不如堆石料显著。另外,由于低应力条件下砂砾石料比堆石料的强度低,采用砂砾石填筑的大坝应适当放缓坝坡或采取工程措施,防止坝坡浅层失稳。

(2) 围压也影响了邓肯模型变形参数。当第 1 级起始围压不变、提高最后 1 级最大围压,或最大围压不变、提高起始围压,参数 K 值均略有增长, K_b 值略有减小, n 值略有降低, m 值有所提高。

(3) 对于特高土石坝,由于坝体内应力分布差异巨大,在坝体应力变形计算和稳定分析时,条件允许时建议根据坝顶、坝坡及坝体内部应力分布情况,采用不同的强度指标和变形参数,以提升坝体结构应力变形计算精度和提高工程安全性。

(4) 卸荷再加载循环后,均产生了正值的轴向变形和体积变形,循环结束后,应力-应变和体变-应变曲线均回归至原有正常剪切加载形态;卸载段,低围压、低应力水平条件下往往表现为体胀,随围压和应力水平的提高,主要表现为卸荷体缩;在再加载段,无论围压大小还是应力水平高低,均主要表现为体缩。

(5) 随围压的提高,回弹模量增加,且回弹模量与初始切线模量之比增大;对于本文高填筑标准砂砾石料和堆石料 K_{ur}/K 约 1.98~2.22,但指数 n_{ur} 要远大

于 n 。对于那些特高坝和高坝而言, 有限元计算时假定 $n_{ur} = n$ 是不太适宜的, 应开展回弹模量试验研究。

参考文献:

- [1] MA Hong-qi, CHI Fu-dong. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams[J]. Engineering, 2016, **2**(3): 332 - 339.
- [2] 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. ((CHEN Sheng-shui, YAN Zhi-kun, FU Zhong-zhi, et al. Evaluation of safety performance of extremely high slab-faced gravel dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(11): 1949 - 1958. (in Chinese))
- [3] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水利学报, 1987(5): 59 - 65. (GUO Qing-guo. Study on characters of the shear strength of rockfill materials[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(5): 59 - 65. (in Chinese))
- [4] 柏树田, 周晓光, 晁华怡. 应力路径对堆石变形特性的影响[J]. 水力发电学报, 1994(4): 76 - 80. (BAI Shu-tian, ZHOU Xiao-guang, CHAO Hua-yi. Effects of stress path on the deformation of rockfill materials[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1994(4): 76 - 80. (in Chinese))
- [5] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 模拟堆石料颗粒破碎对强度变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(11): 1691 - 1699. ((LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Effect of particle breakage on strength and deformation of modeled rockfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(11): 1691 - 1699. (in Chinese))
- [6] 相 彪, 张宗亮, 迟世春, 等. 复杂应力路径下堆石料本构关系研究[J]. 岩土力学, 2010, **36**(6): 1716 - 1722. ((XIANG Biao, ZHANG Zong-liang, CHI Shi-chun, et al. Study of constitutive relations of rockfill under complex stress path[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **36**(6): 1716 - 1722. (in Chinese))
- [7] 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. (CHEN Sheng-shui, LING Hua, MI Zhan-kuan, et al. Experimental study on permeability and its influencing factors for sandy gravel of Dashixia dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 26 - 31. (in Chinese))
- [8] 傅 华, 陈生水, 凌 华, 等. 高应力状态下堆石料工程特性试验研究[J]. 水利学报, 2014(增刊 2): 83 - 89. (FU Hua, CHEN Sheng-shui, LING Hua, et al. Experimental study on engineering properties of rockfill under high stress state[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014(S2): 83 - 89. (in Chinese))
- [9] 迟明杰, 李小军, 赵成刚, 等. 砂土卸载体缩细观机理研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, **18**(增刊): 181 - 188. (CHI Ming-jie, LI Xiao-jun, ZHAO Cheng-gang, et al. Meso-scale study on volume-contraction of sand during unloading process[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, **18**(S0): 181 - 188. (in Chinese))
- [10] 李广信, 武世峰. 土的卸载体缩的试验研究及其机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(1): 47 - 50. (LI Guang-xin, WU Shi-feng. Experimental research on volume-contraction of soil under unloading and examination of its mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(1): 47 - 50. (in Chinese))
- [11] 矫德全, 陈愈炯. 土的各向异性和卸荷体缩[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(4): 9 - 16. (JIAO De-quan, CHEN Yu-jiong. Anisotropy and volume-contraction of soil due to axial unloading in CD test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(4): 9 - 16. (in Chinese))
- [12] 孔 亮, 段建立, 郑颖人. 慢速往复荷载下饱和砂土变形特性试验研究[J]. 工程勘察, 2001(5): 1 - 4. (KONG Liang, DUAN Jian-li, ZHENG Ying-ren. Study on deformation behaviors of soil under slow reciprocating loading[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2001(5): 1 - 4. (in Chinese))
- [13] 陈愈炯. 土的卸荷弹性模量[J]. 工程勘察, 1988(2): 6 - 9. (CHEN Yu-jiong. Unloading modulus of soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1988(2): 6 - 9. (in Chinese))
- [14] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(6): 18 - 23. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(6): 18 - 23. (in Chinese))
- [15] 褚福永, 朱俊高, 贾 华, 等. 粗粒土卸载一再加载力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(4): 1061 - 1064. (CHU Fu-yong, ZHU Jun-gao, JIA Hua, et al. Experimental study of mechanical behaviour of coarse-grained soil in unloading and reloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(4): 1061 - 1064. (in Chinese))