300 m级超高堆石坝心墙砾石土力学特性试验研究

孟敏强^{1,2}, 杨星^{3*}, 余挺³, 金伟³, 刘汉龙^{2,4}

1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100;

2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072;

4. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045

* E-mail: yangxing032515@126.com

收稿日期: 2021-08-04; 接受日期: 2021-10-12; 网络版发表日期: 2022-04-08

国家自然科学基金优秀青年基金项目(批准号: 51922024)、国家自然科学基金青年基金项目(批准号: 52108343)、中国博士后面上项目(编号: 2021M702689)、山地城镇建设与新技术教育部重点实验室开放基金项目(编号: LNTCCMA-20210105)和重庆市自然科学基金(杰出青年基金)项目(编号: cstc2019jcyjqqX0014)资助

摘要 坝体的变形协调控制一直是高堆石坝设计和施工中的核心问题之一。对于300 m级超高堆石坝, 由于国内外设计和施工经验较少, 且用于300 m级超高堆石坝心墙防渗料的砾石土与一般砾石土力学特性存在较大差异, 已有的研究成果尚不能有效指导工程实践。基于此, 本文以两河口超高堆石坝心墙砾石土为研究对象, 结合室内试验和现场试验结果, 研究300 m级超高堆石坝心墙砾石土相关力学特性。结果表明, 两河口超高堆石坝心墙砾石土具有较高压实度, 其自身抗渗性能较好, 可满足工程设计技术要求; 通过压缩系数及压缩模量可知, 所研究的心墙砾石土为低压缩性土; 心墙砾石土峰值强度随围压的增大而增大, 峰值摩擦角随围压的增大而减小, 所得到的邓肯模型参数可为后续两河口超高堆石坝数值计算提供参考; 现场试验表明两河口超高堆石坝心墙砾石土具有较高的承载力和抗剪强度, 其渗透系数满足设计技术要求。本文通过相关室内试验及现场试验验证了砾石土作为300 m级超高堆石坝心墙防渗料的可行性及可靠性, 研究成果可为300 m级超高堆石坝设计和工程建设提供相关试验及理论依据。

关键词 超高堆石坝, 心墙砾石土, 渗透, 压缩, 强度, 试验研究

1 引言

国家“十四五”规划和2035年远景目标纲要要求, 我国要加快水电基地建设, 同时要求构建现代能源体系, 建设大型清洁能源基地^[1]。堆石坝作为水电基地建设的主要坝型之一, 具有就地取材方便、工程造价

低、结构明确简单以及地基适用性强等特点, 已在我国水能资源分布丰富的西部地区广泛应用^[2-5], 尤其是目前兴建的多个300 m级超高堆石坝, 在水电基地建设中发挥着重要的作用。

Ma和Cao^[6]通过分析100 m级和200 m级堆石坝所存在的主要问题, 提出了300 m级超高堆石坝在建设过

引用格式: 孟敏强, 杨星, 余挺, 等. 300 m级超高堆石坝心墙砾石土力学特性试验研究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52

Meng M Q, Yang X, Yu T, et al. Experimental study on mechanical properties of core wall gravel soil of 300-m super high rockfill dam (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52, doi: 10.1360/SST-2021-0351

程中所需要研究的关键技术问题; 随后通过实际堆石坝工程对300 m级超高堆石坝的变形控制、渗流控制、边坡稳定及大坝建设的安全和质量控制等重大技术问题进行了探讨^[4]. Luo等人^[7]提出一个新的土-结构接触剪切参数, 研究了在200~300 m级高堆石坝工程中高应力、高水力梯度及大剪切变形条件下高塑性黏土与混凝土防渗墙界面的水-力耦合特性. Chen等人^[8]通过有限元软件模拟300 m级超高堆石坝施工顺序, 讨论了施工顺序对双江口超高堆石坝沉降变形的影响. 王观琪等人^[9]采用试验和数值相结合的方法, 以双江口超高堆石坝为背景依托, 研究了300 m级超高堆石坝的流变特性. 刘健等人^[10]通过对两河口超高堆石坝试验、监测及施工等资料分析, 研究了300 m级超高堆石坝的沉降特性, 提出了施工期的沉降监测模型. 杨星等人^[11]对两河口超高堆石坝进行了三维非线性地震反应分析, 提出了300 m级超高堆石坝的抗震加固范围. 尽管目前国内外针对300 m级超高堆石坝已有相关研究成果, 但是现有的规范规程只适用200 m级及以下的堆石坝, 300 m级超高堆石坝已超出现行堆石坝的规范要求, 当前的研究成果尚不能有效指导工程实践, 在工程实践中还存在大量的科学问题亟待解决.

目前在土质心墙超高堆石坝的设计中, 心墙防渗土料的选择和适宜性对工程安全至关重要, 严重影响超高堆石坝的安全稳定. 砾石土作为堆石坝心墙常用防渗料, 其强度和变形模量较高, 变形协调能力较好, 有利于改善堆石坝应力变形问题^[12,13]. 因此, 为提高心墙的变形模量, 减少因心墙与坝壳料变形不协调导致

的拱效应, 国内外许多高堆石坝均采用砾石土作为心墙防渗料. 但是用于心墙防渗料的砾石土与一般砾石料(如堆石料)或细粒土的力学性质及工程应用存在较大差异性. 我国在建和拟建的两河口、双江口、如美、古水和其宗等300 m级超高堆石坝均采用了砾石土作为其心墙防渗土料. 对于300 m级超高堆石坝, 要求心墙防渗土料具有抗剪强度高、压缩性低以及渗透系数小等特点. 因此, 为了满足300 m级超高堆石坝的建设和后期运行安全要求, 亟需开展300 m级超高堆石坝心墙砾石土力学特性相关室内试验及现场试验研究, 验证砾石土作为300 m级超高堆石坝心墙防渗土料的可行性及可靠性. 目前, 国内外针对砾石土作为300 m级超高堆石坝心墙防渗料的适应性研究较为少见.

两河口水电站作为目前我国四川省境内雅砻江干流上的“龙头”水库, 坝顶高程2875.00 m, 坝底高程2580.00 m, 最大坝高295 m, 属于300 m级坝高范畴, 为一等大(1)型工程^[11]. 大坝结构主要分为大坝心墙区、反滤层、过渡层及堆石区(又分为堆石I区、堆石II区和堆石III区), 主要分区如图1所示.

本文以两河口超高堆石坝心墙区掺合砾石土(土石掺比6:4)为研究对象, 分别开展击实试验、渗透试验、固结试验、大型三轴剪切试验等相关室内试验以及现场相关力学试验(包括载荷试验、原位渗透试验及现场直剪试验), 研究300 m级超高堆石坝心墙区砾石土相关力学特性^[14], 验证砾石土作为300 m级超高堆石坝心墙防渗料的可行性及可靠性, 研究成果可为300 m级超高堆石坝设计和工程建设提供相关试验及理论依据.

图1 两河口大坝分区示意图

Figure 1 Schematic diagram of Lianghekou rockfill dam.

2 击实试验结果分析

2.1 心墙砾石土全料压实度分析

根据两河口超高堆石坝心墙砾石土物性试验检测资料^[14]结果分析可知, 心墙砾石土可分为黏土质砾(GC)和砾质低液限黏土(CLG)两类. 随后在此物性基础上, 进行了全料压实度试验, 所采用的试验仪器为重型击实仪, 击实锤重4.5 kg, 落锤高度450 mm. 试验中分别选取4个高程的试样, 共进行4组试验, 试样直径均为300 mm, 最大颗粒粒径为60~100 mm, 试验编号分别为YaJ1 ($P_5=39.1\%$), YaJ3 ($P_5=42.8\%$), YaJ5 ($P_5=38.2\%$)和YaJ7 ($P_5=45.2\%$), 击实功均为2740 kJ/m³, 击实曲线如图2所示.

由图2可知, 两河口超高堆石坝心墙砾石土全料击

实曲线均存在一个峰值点, 该峰值点所对应的横坐标即为最优含水率 w_{op} , 纵坐标为最大干密度 ρ_{dmax} , 该点表明心墙砾石土在最优含水率时其压实效果最好. 最大干密度一般可通过含水率和干密度关系曲线获得. 心墙砾石土全料压实效果可由压实度来表示, 其具体表达式如下^[15]:

$$\lambda = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}}, \quad (1)$$

其中, λ 为压实系数, 或称为压实度; ρ_d 为实际干密度或检测干密度, 一般可通过现场压实填土获得, 本文中所对应的4个试验编号(即4个高程)得到的检测干密度分别为2.20 g/cm³ (YaJ1), 2.16 g/cm³ (YaJ3), 2.16 g/cm³ (YaJ5)和2.20 g/cm³ (YaJ7), 根据式(1)及图2得到的两

图2 (网络版彩图)心墙砾石土全料击实曲线. (a) YaJ1; (b) YaJ3; (c) YaJ5; (d) YaJ7

Figure 2 (Color online) Compacted curves of sample of dam core wall gravel soil. (a) YaJ1; (b) YaJ3; (c) YaJ5; (d) YaJ7.

河口超高堆石坝心墙砾石土全料压实度分别为100.09%, 98.0%, 98.5%和98.4%, 符合工程设计要求(要求 $\geq 97\%$)。根据工程设计要求, 含水率偏差范围为 $-1.5\%\sim 2.5\%$ (含水率偏差=检测含水率-最优含水率), 两河口超高堆石坝心墙砾石土全料检测含水率分别为8.1% (YaJ1), 8.6% (YaJ3), 9.1% (YaJ5)和7.5% (YaJ7), 含水率偏差范围为 $0.1\%\sim 1.1\%$, 符合工程设计要求。

2.2 超大击实试验结果分析

在两河口超高堆石坝心墙砾石土全料击实试验的基础上, 继续进行了3组试样直径为500 mm的全料超大击实试验(试验中可控制最大粒径为100 mm), 级配

曲线如图3(a)所示, 试验编号分别为YaJ-上($P_5=36.4\%$), YaJ-平($P_5=40.3\%$)和YaJ-下($P_5=44.5\%$), 击实功为 2740 kJ/m^3 , 两河口超高堆石坝心墙砾石土超大击实曲线如图3(b)~(d)所示。

对比图3(b)~(d), 对于试验编号为YaJ-上、YaJ-平和YaJ-下的试样, 即便小于5 mm的颗粒粒径的含量(P_5 含量)不同, 但当 P_5 含量在一定范围内时, 试样的最大干密度随 P_5 含量增大而增大, 而最优含水率随 P_5 含量增大而减小^[16]。两河口超高堆石坝心墙砾石土超大击实试验中, 得到的检测干密度分别为 2.11 g/cm^3 (YaJ-上), 2.18 g/cm^3 (YaJ-平)和 2.24 g/cm^3 (YaJ-下), 各试验编号的最大干密度 ρ_{dmax} 数值如图3(b)~(d)。根据式(1)可

图3 (网络版彩图)心墙砾石土全料超大击实曲线。(a)级配曲线; (b) YaJ-上; (c) YaJ-平; (d) YaJ-下

Figure 3 (Color online) The compacted curves of large sample of dam core wall gravel soil. (a) Particle size distribution curves; (b) YaJ-up; (c) YaJ-medium; (d) YaJ-below.

得两河口超高堆石坝心墙砾石土压实度分别为97.9% (YaJ-上), 98.8% (YaJ-平)和100.6% (YaJ-下), 符合工程设计要求. 两河口超高堆石坝心墙砾石土检测含水率分别为10.5% (YaJ-上), 8.6% (YaJ-平)和6.8% (YaJ-下), 含水率偏差范围为-0.9%~2.3%, 符合工程设计要求.

3 渗透及固结试验结果分析

3.1 渗透试验结果分析

土体的渗透特性与大坝工程安全密切相关, 是否渗透稳定以及抗渗能力是否达到工程设计标准, 直接关系到大坝运行期的安全^[17]. 针对两河口超高堆石坝心墙砾石土渗透特性, 分别选取不同高程的试样进行7大组(14小组)的渗透试验, 试验编号如表1所示, 每一大组分别对应竖直和水平两个渗流方向.

由表1可知, 在14个小组试验中, 发生渗透破坏的试验组数共5组, 且均为流土破坏; 在渗透破坏试验中, 试验编号YaJ4和YaJ7两组的竖直和水平渗流方向均发生破坏, 且破坏水力梯度值水平方向均小于竖直方向; 试验编号为YaJ2组的渗透破坏发生在水平方向, 竖直方向未发生破坏. 这是由于心墙砾石土料在受到水平方向的渗流压力时, 渗透系数是由水平方向的透水层厚度和渗透性决定的; 而在竖直方向时, 由于试样存

在自重作用, 使心墙砾石土会压密, 从而使得其渗透系数均小于水平方向的渗透系数, 在心墙砾石土发生破坏时, 其破坏水力梯度大于水平方向的破坏水力梯度^[18].

工程设计要求: 碾压后的心墙砾石土渗透系数应不大于 1×10^{-5} cm/s, 心墙砾石土自身抗渗透变形的破坏水力梯度应大于9, 其渗透破坏形式应为流土破坏. 根据表1所示结果, 两河口超高堆石坝心墙砾石土渗透系数在 $1.80\times 10^{-7}\sim 9.03\times 10^{-6}$ cm/s, 属于极微透水到微透水性材料; 自身抗渗变形的破坏水力梯度均大于9, 破坏类型均为流土破坏, 符合工程设计要求.

3.2 固结试验结果分析

针对两河口超高堆石坝心墙砾石土固结压缩特性, 开展了7组固结试验, 试验装置是WGL-1500微机控制全自动固结仪, 试验编号为YaJ1~YaJ7, 试验及试样具体参数如表2. 根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)^[19], 两河口超高堆石坝心墙砾石土均为饱和试样. 为了与击实试验相对应, 本小节选取试验编号为YaJ1, YaJ3, YaJ5和YaJ7四组固结试验结果进行分析, 如图4所示.

图4(a)为试验编号YaJ1, YaJ3, YaJ5和YaJ7四组试样的 e - $\lg p$ 曲线. 由图4(a)可知, 随着法向荷载的增大,

表 1 不同方向心墙砾石土渗透变形试验结果汇总

Table 1 Summary of seepage deformation tests of dam core wall gravel soil under different seepage directions

试验编号	渗流方向	破坏水力梯度 <i>i</i>	渗透系数 (cm/s)	破坏类型
YaJ1	竖直	>11.20	1.79×10^{-6}	未破坏
	水平	>10.50	4.74×10^{-6}	未破坏
YaJ2	竖直	>13.22	2.90×10^{-7}	未破坏
	水平	10.85	1.29×10^{-6}	流土破坏
YaJ3	竖直	>14.14	3.01×10^{-6}	未破坏
	水平	>12.68	9.03×10^{-6}	未破坏
YaJ4	竖直	12.60	1.25×10^{-6}	流土破坏
	水平	11.20	4.60×10^{-6}	流土破坏
YaJ5	竖直	>10.89	1.71×10^{-6}	未破坏
	水平	>11.80	1.80×10^{-7}	未破坏
YaJ6	竖直	>10.04	6.12×10^{-6}	未破坏
	水平	>11.00	8.17×10^{-6}	未破坏
YaJ7	竖直	13.60	2.80×10^{-6}	流土破坏
	水平	11.80	3.40×10^{-6}	流土破坏

表 2 固结试验具体参数

Table 2 The parameters of consolidation test

试验编号	饱和状态	比重 G_s	初始孔隙比 e	法向荷载 (kPa)
YaJ1	饱和	2.75	0.250	50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200
YaJ2		2.76	0.255	
YaJ3		2.73	0.264	
YaJ4		2.74	0.299	
YaJ5		2.72	0.259	
YaJ6		2.73	0.264	
YaJ7		2.72	0.236	

试样的孔隙比在持续减小^[20]。在法向荷载较小时 (≤ 400 kPa), 孔隙比减小速率较慢, 主要是由于在加载初始阶段, 试样内部的颗粒大多是发生翻转、移动等重排行为, 颗粒之间相互挤压; 在法向荷载较大时, 试样孔隙比减小速率增大, 颗粒之间重排行为基本结束, 此时主要是颗粒之间的相互作用力, 试样密实同时大颗粒伴随着颗粒破碎的发生。

图4(b)~(d)为试验编号YaJ1, YaJ3, YaJ5和YaJ7四组试样的压缩系数、压缩模量和单位沉降量随法向荷载变化曲线图。由图4(b)可知, 当法向荷载在50~400 kPa之间时, 压缩系数下降幅度明显, 当法向荷载

图 4 (网络版彩图)心墙砾石土固结试验结果. (a) e - $\lg p$ 曲线; (b) 压缩系数与法向荷载关系曲线; (c) 压缩模量与法向荷载关系曲线; (d) 单位沉降量与法向荷载关系曲线

Figure 4 (Color online) Results of consolidation test of dam core wall gravel soil. (a) e - $\lg p$ curves; (b) relationship between compression coefficient and vertical pressure; (c) relationship between compression modulus and vertical pressure; (d) relationship between unit settlement and vertical pressure.

超过400 kPa时, 压缩系数基本趋向于稳定; 压缩模量与压缩系数成反比, 对比图4(c)中压缩模量在法向荷载为400 kPa前后变化, 发现其变化较为明显, 在法向荷载为400 kPa之后, 压缩模量趋于稳定状态. 由图4(d)可知, 随着法向荷载的增大, 单位沉降量随之增大. 综上所述可知, 在后续对两河口超高堆石坝心墙砾石土进行压实处理时, 可采用大于400 kPa的法向荷载. 对比压缩系数和压缩模量, 除在法向荷载较小时, 属于中压缩性土(YaJ1的法向荷载为50和100 kPa以及YaJ5的法向荷载为50 kPa时), 其余均属于低压缩性土, 符合工程设计要求.

4 大型三轴固结排水剪切试验结果分析

4.1 应力-应变特性分析

针对两河口超高堆石坝心墙砾石土三轴剪切强度特性, 开展了7组大型三轴固结排水剪切试验, 试验编号仍为YaJ1~YaJ7. 大型三轴试验装置最大围压为5 MPa, 轴向最大荷载为1500 kN, 试验中试样尺寸为300 mm(试样直径)×600 mm(试样高度), 最大颗粒粒

径为60 mm, 当试样剪切轴向应变为15%时, 试验停止. 试样所施加围压分别为1.0, 2.0和3.0 MPa三个等级. 本节选取试验编号为YaJ3, YaJ5和YaJ7三组大型三轴固结排水剪切试验结果进行分析, 其应力-应变及体变-应变关系如图5所示, 其中偏应力表达式如下:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (2)$$

其中, q 为偏应力; σ_1 和 σ_3 分别为最大最小主应力.

由图5(a)~(c)可知, 当为同一试验编号时, 偏应力和体积应变在三个不同的围压作用下, 均随轴向应变的增大而增大; 当同一试验编号的试样轴向应变相同时, 偏应力和体积应变均随围压的增大而增大^[21]. 对于图5(a), 试验编号为YaJ3, 在围压为1.0和2.0 MPa时, 其偏应力随着轴向应变的增大在增大, 但是当轴向应变大约为10%时, 偏应力趋于稳定, 而对于围压为3.0 MPa的试样, 偏应力则持续增大; 体积应变随轴向应变的增大而持续增大, 试样一直处于应变硬化状态, 在试验过程中则表现为试样一直处于排水状态. 由图5(b)可得(试验编号为YaJ5), 在围压为1.0 MPa, 其偏应力随着轴向应变的增大而增大, 但是当轴向应变大约为8%

图5 (网络版彩图)心墙砾石土应力-应变和体变-应变变化曲线. (a) YaJ3; (b) YaJ5; (c) YaJ7

Figure 5 (Color online) Relationship between stress-axial strain and volumetric strain-axial strain curves of dam core wall gravel soil. (a) YaJ3; (b) YaJ5; (c) YaJ7.

时, 偏应力趋于稳定, 而对于围压为2.0和3.0 MPa的试样, 偏应力则持续增大; 三个围压条件下的体积应变随轴向应变的增大而持续增大, 表明试样一直处于应变硬化状态. 在图5(c)中, 试验编号为YaJ7, 在三个围压条件下, 偏应力随着轴向应变的增大在增大, 但是当轴向应变大约为10%时, 偏应力均趋于稳定; 体积应变随轴向应变的增大而持续增大, 但是与其他两个试样不同点在于: 虽然试样一直处于应变硬化状态, 但是在轴向应变为10%左右时, 体积应变有稳定的趋势, 说明该试验编号的试样随着试验的继续, 有可能会达到临界状态^[22]. 在大型三轴固结排水剪切试验过程中, 试样中的砾石颗粒会发生颗粒破碎, 而颗粒破碎会导致心墙砾石土的三轴剪切强度特性和临界状态特性发生变化^[23~25], 其对砾石土力学特性的影响将成为300 m级超高堆石坝后续研究的重难点问题之一.

4.2 峰值强度及峰值摩擦角变化规律分析

一般情况下认为若试样在应力-应变曲线中出现峰值点, 则该峰值点所对应的峰值偏应力即为峰值强度; 如若试样在应力-应变曲线中未出现峰值点, 则认为终止轴向应变所对应的偏应力为峰值强度^[26]. 对于峰值摩擦角, 则采用如下公式进行计算^[21]:

$$\sin \varphi_p = \frac{3\eta_p}{6 + \eta_p}, \quad (3)$$

其中, φ_p 为峰值摩擦角, η_p 为峰值应力比. 应力比具体

表达式为

$$\eta = \frac{q}{p}, \quad (4)$$

其中, p 为平均有效应力(在三轴固结排水试验中, p' 的上标可省略), 计算公式为

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}. \quad (5)$$

图6为两河口超高堆石坝心墙砾石土的峰值强度和峰值摩擦角随围压的变化曲线图. 由图6(a)可知, 峰值强度随围压的增大而增大. 例如试验编号为YaJ3的试样, 当围压为1.0 MPa时, 其峰值强度约为1.25 MPa; 当围压为3.0 MPa时, 峰值强度约为3.0 MPa, 围压增大了2倍, 峰值强度增大了1.4倍. 峰值摩擦角随围压的变化与峰值强度表现出相反的规律, 如图6(b)所示, 其随着围压的增大而减小, 该规律与文献^[21]类似. 例如试验编号为YaJ7的试样, 当围压为1.0 MPa时, 其峰值摩擦角约为24°; 当围压为3.0 MPa时, 峰值摩擦角减小至约20°, 围压增大了2倍, 峰值摩擦角减小了16.7%. 值得注意的是, 通过大型三轴固结排水剪切试验所得到的心墙砾石土的峰值摩擦角均在20°左右, 与一般砾石土存在较大差距(一般砾石土在35°~40°之间), 这是由于两河口超高堆石坝心墙砾石土的土石比为6:4, 通过物性试验及《土工试验方法标准》^[27]划分为黏土质砾和砾质低液限黏土, 与一般砾石土的细粒含量差别明显(两河口超高堆石坝心墙砾石土颗粒粒径<0.075 mm

图6 (网络版彩图) (a) 心墙砾石土峰值强度随围压变化规律; (b) 心墙砾石土峰值摩擦角随围压变化规律

Figure 6 (Color online) (a) Relationship between peak strength and confining pressure of dam core wall gravel soil; (b) relationship between peak friction angle and confining pressure of dam core wall gravel soil.

的含量基本在40%~55%之间).

4.3 $E-\mu$ 和 $E-B$ 模型参数分析

邓肯 $E-\mu$ 和 $E-B$ 双曲线模型是在广义胡克弹性理论的基础上所建立的, 可直接反映土体变形的非线性特征, 且包含的模型参数较少, 物理含义明确, 广泛被工程界所接受. 邓肯 $E-\mu$ 和 $E-B$ 双曲线模型一共包含10个模型参数, 基本计算公式如下^[28].

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right), \tag{6}$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}, \tag{7}$$

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n, \tag{8}$$

$$-\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} = f - D\varepsilon_3, \tag{9}$$

$$\mu = f = G - F \lg\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right), \tag{10}$$

$$B = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{70\%}}{3(\varepsilon_v)_{70\%}} = k_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^m, \tag{11}$$

其中, p_a 为一个标准大气压力值, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为当轴向应变为15%时所对应的偏应力, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为极限偏差应力值, E_i 为初始模量, μ 为泊松比, ε_1 和 ε_3 分别为轴向应变和侧向应变, ε_v 为体积应变. 以上参数均可通过常规三轴剪切试验直接或间接获得, 从而可通过式(6)~(11)获得邓肯 $E-\mu$ 和 $E-B$ 双曲线模型参数, 以便后续进行两河口超高堆石坝沉降变形的数值计算. 具体模型参数取值如表3所示.

5 现场力学试验结果分析

由于风化等原因, 两河口超高堆石坝施工现场的心墙砾石土现场土料级配及工程性质会发生变化, 与室内试验所得到力学性质有所差别. 因此, 为真实反映现场心墙砾石土相关力学性质, 开展了相关现场力学试验, 主要包括现场载荷试验(试验装置为千斤顶型式载荷架, 其构造一般由加荷稳压装置、反力装置及观测装置三部分组成)、原位渗透试验(试验装置为便携式原位渗透仪, 内环直径为22.6 cm, 高15 cm; 外环直径为45.2 cm, 直径15 cm; 供水瓶容量1000~5000 mL)以及原位直剪试验(试验装置为现场剪切试验仪).

5.1 现场载荷试验及原位渗透试验结果分析

图7为两河口超高堆石坝心墙砾石土现场载荷试验竖向荷载与沉降量关系曲线图. 主要选取高程为2623~2626 m心墙砾石土EYaJ5试样进行试验, 共进行4组. 由图7可知, 高程2623~2626 m中试验编号EYaJ5的两河口超高堆石坝心墙砾石土的承载力比例界限值 f_0 在260~350 kPa之间, 变形模量 E_0 在15.3~22.5 MPa之间. 由图7(c)可知, 其承载力比例界限值和变形模量相比于图7(a), (b), (d)偏低, 其主要原因可能是图7(c)所选取的测点位置处于下游且偏向于反滤层出, 含水较多, 压实度相对偏低, 砾石含量相对偏少.

表4为两河口超高堆石坝心墙砾石土现场原位渗透试验结果, 高程为2623~2624 m, 试验编号为SYaJ5, 共进行3组. 由表4可知, 通过现场原位渗透试验所测得的两河口超高堆石坝心墙砾石土渗透系数为 3.08×10^{-6} ~

表 3 心墙砾石土大型三轴固结排水剪切试验 $E-\mu$ 和 $E-B$ 模型参数

Table 3 Parameters of $E-\mu$ and $E-B$ of dam core wall gravel soil under the large-scale triaxial consolidation drained shear test condition

试验编号	线性抗剪强度指标		φ_0	$\Delta\varphi$	K	n	R_f	D	G	F	k_b	m
	c_d (kPa)	φ_d (°)										
YaJ1	124.0	24.9	36.7	7.2	378	0.44	0.89	1.30	0.43	0.039	331	0.35
YaJ2	53.0	20.5	32.3	8.1	385	0.43	0.90	0.60	0.45	0.023	353	0.39
YaJ3	58.0	18.9	29.4	7.1	355	0.40	0.91	0.60	0.45	0.024	276	0.38
YaJ4	124.0	16.2	27.0	6.3	290	0.41	0.90	1.30	0.44	0.039	256	0.38
YaJ5	50.0	18.5	28.0	6.6	340	0.39	0.89	0.90	0.45	0.035	281	0.38
YaJ6	82.0	17.7	29.5	7.8	360	0.41	0.90	0.86	0.41	0.040	235	0.34
YaJ7	118.0	19.9	32.0	7.9	415	0.42	0.86	0.90	0.42	0.035	315	0.39

图 7 (网络版彩图)心墙砾石土载荷试验竖向荷载与沉降量关系曲线。(a) EYaJ5-1; (b) EYaJ5-2; (c) EYaJ5-3; (d) EYaJ5-4
Figure 7 (Color online) Relationship between vertical pressure and settlement in the loading test of dam core wall gravel soil. (a) EYaJ5-1; (b) EYaJ5-2; (c) EYaJ5-3; (d) EYaJ5-4.

表 4 心墙砾石土原位渗透试验结果

Table 4 In-situ percolation test results of dam core wall gravel soil

试验编号	高程 (m)	渗透系数 (cm/s)
SYaJ5-1	2623.07	5.88×10^{-6}
SYaJ5-2	2623.98	3.08×10^{-6}
SYaJ5-3	2624.02	9.20×10^{-6}

9.20×10^{-6} cm/s, 满足设计技术要求. 注意到YaJ5-3的渗透系数相对于其他两组偏大, 其主要原因与图7(c)类似.

5.2 原位直剪试验结果分析

图8为两河口超高堆石坝心墙砾石土抗剪强度变化规律, 所施加的垂直应力分别为64, 128, 192和256 kPa四个等级, 主要采用的是试验编号为YaJ5-2, 高程为2623.98 m的试样. 图8(a)为土样进行现场原位直剪试验时剪应力随剪切位移变化曲线图. 由图8(a)可知, 在给定垂直应力 σ 作用下, 随剪切位移的增大, 剪应力随之增大; 在给定剪切位移时, 随垂直应力的增大, 剪应力增大. 将最大剪应力作为该等级垂直应力作用下的抗剪强度 τ_f , 即可得到垂直应力与抗剪强

图8 (网络版彩图)心墙砾石土料抗剪强度变化规律。(a) 剪应力与剪切位移关系曲线; (b) 抗剪强度与垂直应力变化曲线

Figure 8 (Color online) Rule of shear strength of dam core wall gravel soil. (a) Relationship between shear stress and shear displacement; (b) relationship between the shear strength and vertical stress.

度之间的函数关系, 如图8(b)所示。根据库仑定理, 抗剪强度和垂直应力间的函数关系如式(12)所示:

$$\tau_f = 0.56\sigma + 80. \quad (12)$$

通过该公式可得两河口超高堆石坝心墙砾石土的黏聚力 $c=80$ kPa, 内摩擦角为 $\phi=29.1^\circ$, 表明两河口超高堆石坝心墙砾石土具有较高的抗剪强度。

6 结论

本文主要针对300 m级两河口超高堆石坝中心墙砾石土相关力学特性展开了击实试验、固结试验、渗透试验、大型三轴剪切试验等室内试验以及现场试验(包括现场载荷试验、原位渗透试验以及原位直剪试验), 分析了两河口超高堆石坝心墙砾石土的压实度、压缩、渗透、应力变形及抗剪强度等特性。主要得到的结论如下。

(1) 通过击实曲线可获得两河口超高堆石坝心墙砾石土最大干密度及最优含水率。通过压实度分析, 不同试验编号心墙砾石土压实度均大于97%, 含水率偏差分别为0.1%~1.1%(普通击实试验)和-0.9%~2.3%(超大击实试验), 满足设计技术要求。

(2) 两河口超高堆石坝心墙砾石土渗透破坏类型均为流土破坏, 且水力梯度值水平方向小于竖直方向。渗透系数均小于 1×10^{-5} cm/s, 自身抗渗透变形的破坏

水力梯度均大于9, 满足两河口超高堆石坝心墙砾石土设计技术指标要求。

(3) 当法向荷载较小时(≤ 400 kPa), 两河口超高堆石坝心墙砾石土的压缩系数及压缩模量减小速率较快, 当其超过400 kPa时, 压缩系数基本稳定, 表明在后续对两河口超高堆石坝心墙砾石土进行压实处理时, 可采用大于400 kPa的法向荷载。两河口超高堆石坝心墙砾石土大多均为低压缩性土, 符合设计技术要求。

(4) 随着轴向应变增大, 两河口超高堆石坝心墙砾石土的偏应力和体积应变也随之增大, 最后偏应力趋于稳定, 而体积应变持续增大, 试样处于应变硬化状态。峰值强度随围压的增大而增大, 峰值摩擦角随围压的增大而减小。通过大型三轴剪切试验可获得两河口超高堆石坝心墙砾石土心墙砾石土邓肯 $E-\mu$ 和 $E-B$ 模型参数, 可为后续两河口超高堆石坝数值计算提供参考。

(5) 现场力学试验表明两河口超高堆石坝心墙砾石土具有较高的承载力, 其渗透系数也满足设计技术要求。随着剪切位移的增大, 剪应力也在增大, 垂直应力与抗剪强度呈现较好的线性关系, 两河口超高堆石坝心墙砾石土具有较高的抗剪强度。

本文主要是根据300 m级超高堆石坝心墙砾石土相关试验结果进行分析, 并未考虑颗粒破碎对心墙砾石土强度、变形和渗透性的影响, 这将成为300 m级超高堆石坝后续研究的重难点问题之一。

参考文献

- 1 National Energy Administration. Notice of the comprehensive department of the National Energy Administration on matters related to the preparation of the 14th Five-Year Plan for renewable energy development. 2020, http://zfxxgk.nea.gov.cn/2020-2004/2009/c_138978661.htm [国家能源局. 国家能源局综合司关于做好可再生能源发展“十四五”规划编制工作有关事项的通知. 2020, http://zfxxgk.nea.gov.cn/2020-2004/2009/c_138978661.htm]
- 2 Yang X, Liu H L, Yu T, et al. Review on seismic disasters and aseismatic measures of high earth and rockfill dams (in Chinese). J Disaster Prevent Mitigat Eng, 2009, 29: 583–590 [杨星, 刘汉龙, 余挺, 等. 高土石坝震害与抗震措施评述. 防灾减灾工程学报, 2009, 29: 583–590]
- 3 Feng T G, Yang G, Hua J L, et al. Review of key technical problems in construction of high earth-rockfill dams (in Chinese). J Hohai Univ (Nat Sci), 2010, 38: 392–401 [丰土根, 杨贵, 花剑岚, 等. 高土石坝建设关键技术问题述评. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38: 392–401]
- 4 Ma H, Chi F. Major technologies for safe construction of high earth-rockfill dams. Engineering, 2016, 2: 498–509
- 5 Liu P, Meng M Q, Xiao Y, et al. Dynamic properties of polyurethane foam adhesive-reinforced gravels. Sci China Tech Sci, 2021, 64: 535–547
- 6 Ma H Q, Cao K M. Key technical problems of extra-high concrete faced rock-fill dam. Sci China Ser E-Tech Sci, 2007, 50: 20–33
- 7 Luo Y L, Zhan M L, Sheng J C, et al. Research on hydro-mechanical coupling characteristics on soil-structure interface in high earth rock-fill dams. Disaster Adv, 2012, 5: 139–143
- 8 Chen Q, Zou Y H, Tang M, et al. Modelling the construction of a high embankment dam. KSCE J Civ Eng, 2014, 18: 93–102
- 9 Wang G Q, Yu T, Li Y H, et al. Creep deformation of 300 m-high earth core rockfill dam (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2014, 36: 140–145 [王观琪, 余挺, 李永红, 等. 300 m级高土石心墙坝流变特性研究. 岩土工程学报, 2014, 36: 140–145]
- 10 Liu J, Wang J M, Zhang C. Study on monitoring model of core wall settlement of 300 m-level super high earth-rock dam during construction period (in Chinese). Water Power, 2021, 47: 82–89 [刘健, 王继敏, 张晨. 300 m级特高土石坝施工期心墙沉降监控模型研究. 水力发电, 2021, 47: 82–89]
- 11 Yang X, Yu T, Jin W, et al. Three dimensional nonlinear seismic response analysis of Lianghekou super high core rockfill dam (in Chinese). J Civil Environ Eng, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210607.1504.010.html> [杨星, 余挺, 金伟, 等. 两河口超高心墙堆石坝三维非线性地震反应分析. 土木与环境工程学报(中英文), <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210607.1504.010.html>]
- 12 Yan W. The properties of spreading gradation gravelly soil as core of high earth rock-fill dam and numerical simulation (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: Sichuan University, 2006 [严伟. 高土石坝宽级配砾石土心墙料特性研究及数值模拟. 硕士学位论文. 成都: 四川大学, 2006]
- 13 Yu T. The application of gravel soil anti-seepage material on high earth-rock dam (in Chinese). Design Hydroelect Power Station, 2003, 19: 15–17 [余挺. 砾质土防渗料在高土石坝上的应用. 水电站设计, 2003, 19: 15–17]
- 14 The report on phase results of fixed section inspection of Lianghekou hydropower station in Sichuan Yalong river. Technical Report. Chengdu: Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, 2020 [四川雅砻江两河口水电站固定断面检测项目阶段成果备查报告. 技术报告. 成都: 中国电建成都勘测设计研究院有限公司, 2020]
- 15 Dang J Q, Li F H. Soil Mechanics (in Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 2019 [党进谦, 李法虎. 土力学. 北京: 中国水利水电出版社, 2019]
- 16 Ma J, Han W X, Liu Z X, et al. The study on the effect of P5 content on the compression properties of coarse grained soil (in Chinese). Yangtze River, 2019, 50: 179–184 [马捷, 韩文喜, 刘忠璇, 等. P5含量对粗颗粒土压缩性质影响研究. 人民长江, 2019, 50: 179–184]
- 17 Yang Y X, Gong X N, Zhou C P, et al. Experimental study of seepage failure of Qiantang River alluvial silts (in Chinese). Rock Soil Mech, 2016, 37: 243–249 [杨迎晓, 龚晓南, 周春平, 等. 钱塘江冲海积粉土渗透破坏试验研究. 岩土力学, 2016, 37: 243–249]
- 18 Zhang C H, Qian Y J, Zhong Q M, et al. Permeability characteristics of silty sand under vertical and horizontal seepages (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2020, 42: 163–167 [张灿虹, 钱亚俊, 钟启明, 等. 竖向及水平向渗流作用下粉砂渗透特性研究. 岩土工程学报, 2020, 42: 163–167]
- 19 Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123-2019. Standard for geotechnical testing method (in Chinese). Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation [中华人民共和国水利部. GB/T 50123-2019. 土工试验方法标准. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局]
- 20 Lei X W, Ding H, Wang X Z, et al. Experimental study of consolidation properties of calcareous silt (in Chinese). Rock Soil Mech, 2021, 42:

- 909–920 [雷学文, 丁豪, 王新志, 等. 钙质粉土的固结特性试验研究. 岩土力学, 2021, 42: 909–920]
- 21 Xiao Y, Liu H, Chen Y, et al. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests. I: Influences of density and pressure. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2014, 140: 04014070
 - 22 Xiao Y, Liu H. Elastoplastic constitutive model for rockfill materials considering particle breakage. *Int J Geomech*, 2017, 17: 04016041
 - 23 Xiao Y, Liu H, Chen Y, et al. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests. II: Influence of particle breakage. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2014, 140: 04014071
 - 24 Jia Y, Xu B, Chi S, et al. Research on the particle breakage of rockfill materials during triaxial tests. *Int J Geomech*, 2017, 17: 04017085
 - 25 Ning F, Liu J, Kong X, et al. Critical state and grading evolution of rockfill material under different triaxial compression tests. *Int J Geomech*, 2020, 20: 04019154
 - 26 Xiao Y, Liu H, Ding X, et al. Influence of particle breakage on critical state line of rockfill material. *Int J Geomech*, 2016, 16: 04015031
 - 27 GB/T50145-2007. Standard for engineering classification of soil (in Chinese). [GB/T50145-2007. 土的工程分类标准.]
 - 28 Li G X. Advanced Soil Mechanics (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2012 [李广信. 高等土力学. 北京: 清华大学出版社, 2012]

Experimental study on mechanical properties of core wall gravel soil of 300-m super high rockfill dam

MENG MinQiang^{1,2}, YANG Xing³, YU Ting³, JIN Wei³ & LIU HanLong^{2,4}

¹ College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

² Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

³ Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China;

⁴ School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

The coordinated deformation control of dams has always been one of the key issues in the design and construction of high rockfill dams. Design and construction experiences for 300-m super high rockfill dams are limited both at home and abroad. The mechanical properties of gravel soil used as core wall impermeable material of 300-m super high rockfill dams are different from the general gravel soils. Existing studies cannot guide the engineering practice effectively. This study conducted laboratory and field tests on the core wall gravel soils of the Lianghekou super high rockfill dam to study relevant mechanical characteristics of core wall gravel soil of 300-m super high rockfill dams. The results show that the core wall gravel soils of the Lianghekou super high rockfill dam have a high compaction degree and good impermeability, which can satisfy the technical requirements of engineering design. The core wall gravel soil being studied has low compressibility according to the compression coefficient and compression modulus. The peak strength of core wall gravel soil increases with an increase in the confining pressure, and the peak friction angle decreases with increasing confining pressure. The obtained parameters of the Duncan model can serve as a reference for the numerical analysis of the Lianghekou super high rockfill dam. The field test results also show that the core wall gravel soil of the Lianghekou super high rockfill dam has a higher bearing capacity and shearing strength. Its permeability coefficient meets technical design requirements. This study verifies the feasibility and reliability of gravel soil as an impermeable material for the core wall of 300-m super high rockfill dams through laboratory and field tests. This study's findings can provide a relevant experimental and theoretical basis for the design and engineering construction of 300-m super high rockfill dams.

super high rockfill dam, core wall gravel soil, permeability, compression, strength, experimental study

doi: [10.1360/SST-2021-0351](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0351)