

白鹤滩水电站高填方工程砾石填料的物理力学特性

顾晓强^{1,2}, 梁玉珍^{1,2}, 周奇辉³, 刘尊景³, 荆子菁³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 白鹤滩水电站是全球单机容量最大、在建规模最大的水电站。为避免水库蓄水后巧家县城区中的移民安置区被淹, 需进行高填方工程, 填筑材料以当地砾石土料为主。依托白鹤滩水电站高填方工程, 对砾石填料进行颗粒分析、击实试验、压缩试验和三轴剪切试验等室内土工试验以及现场碾压试验。研究表明: 填料的压实特性与砾石质量分数有关, 粒径大于 5mm 的砾石质量分数在 40%~70% 时, 填料较易形成密实骨架结构, 表现出较好的可压实性和力学性能。在现场碾压过程中, 需从填料的砾石质量分数及现有设备等因素来综合控制压实含水率。压实度为 0.95 和 0.97 的砾石填料的压缩特性及抗剪强度有明显差异。同时, 根据填料试样的应力、应变关系确定了邓肯-张双曲线模型的参数。试验结果为白鹤滩移民区高填方工程的填料配比设计、力学与施工参数的选取提供参考。

关键词: 白鹤滩水电站; 高填方工程; 砾石填料; 击实特性; 现场碾压试验; 抗剪强度

中图分类号: TU41

文献标志码: A

Physical and Mechanical Properties of Gravelly Soils Used in High Fill Project of Baihetan Hydropower Station

GU Xiaoliang^{1,2}, LIANG Yuzheng^{1,2}, ZHOU Qihui³, LIU Zunjing³, JING Zijong³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: Baihetan Hydropower Station is the largest hydropower station under construction and has the world's largest single-unit capacity. In order to avoid the flooding of the resettlement area of Qiaojia County when the reservoir is impounded, a high filling project is

required. The filling material is the locally obtained gravelly soil. In this study, the particle size analysis test, the compaction test, the compression test, and the triaxial test as well as the onsite rolling test are conducted on the gravelly soils. The results show that the compaction characteristics of the soils depend on the gravel content. When the gravel (i. e., particle size larger than 5 mm) content is 40%~70%, the soils will form a dense skeleton structure and show better compactability and mechanical properties. During the onsite rolling compaction process, it is necessary to control the moisture content based on the gravel content of the soils and the rolling equipment adopted. Gravelly soils with compaction degrees of 0.95 and 0.97 show significant differences in their compression properties and shear strength. Meanwhile, according to the stress-strain relationships of the soils, the parameters of the Duncan-Chang hyperbolic model are determined. The test results provide an important reference for the gradation and compaction design of the filler as well as the parameters of the filler for the Baihetan high fill project.

Key words: Baihetan Hydropower Station; high fill project; gravelly soils; compaction property; onsite rolling test; shear strength

随着我国基础设施建设的蓬勃发展, 公路、机场、甚至新城等越来越多建设在山区, 如四川九寨沟机场、延安新城等, 这些工程遇到大量填方问题。因运输条件等限制, 填方工程大都采用就近取材原则, 即一般以开山砾石作为填料进行填筑。无疑, 填筑体的稳定性和变形是填方工程最关注的 2 个方面, 而填料的强度与变形特性是最关键因素之一。

既有研究表明, 影响填筑体变形的主要因素是

收稿日期: 2021-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(51822809)

第一作者: 顾晓强(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土动力学及宏微观土力学。

E-mail: guxiaoqiang@tongji. edu. cn



论文
拓展
介绍

填筑的高度和压实度,在工程中通常通过增大填料的砾石质量分数和提高压实度的方法来减小土石混料自重应力引起的压缩变形^[1]。针对粒径大的粗粒土不易压实的特性,刘丽萍等^[2]研发了大型击实仪,分析了含石量对土石混填体压实性能的影响。张淑宝^[3]通过室内快速压缩试验,研究了含水率和压实度对砂性土填料压缩特性的影响,结果表明砂性土填料的压缩模量随压实度的增大而显著增大,随含水率的增大呈先减小后增大的规律。石熊等^[4]研究了粗粒土填料力学特性与粗料质量分数、外荷载及降雨入渗的关系。孟莉敏等^[5]研究了碎石土在刚性侧限条件下的压缩蠕变性质,结果表明加载后的单位压缩量与荷载呈对数函数关系。黄金林等^[6]进行了现场碾压试验,分析了碾压施工参数与压实质量的关系。秦红玉等^[7]通过大型三轴试验分析了高低围压下粗粒料的剪胀性、破碎性及应力应变关系。Feda^[8]、Simoni 和 Houlsby^[9]通过三轴试验研究了粗粒土的应力应变关系,分析了粗粒土剪胀性的原因。柴贺军等^[10]、李翀等^[11]、Yang 等^[12]分析了粗粒土颗粒粒径对强度、变形、内摩擦角的影响。砾石填料的应用越来越广泛,但由于不同工程中砾石填料的来源、级配、颗粒形状等差别很大,因此需对填料进行试验研究来确定其物理力学特性。

本文依托全球在建规模最大的白鹤滩水电站移民区高填方工程,开展击实试验、大型一维压缩试验、三轴试验等室内土工试验及现场碾压试验,系统研究回填砾砂料的压缩与剪切特性,并确定填料基于广义邓肯—张模型的整套参数,为填料级配、含水量、铺层厚度、碾压遍数等关键施工参数的确定和后续高填方体的变形分析提供科学依据和技术支撑。

1 工程概况

白鹤滩水电站位于四川省宁南县和云南省巧家县境内,坝址距离上游巧家县城 45 km,距离下游溪洛渡水电站 195 km。白鹤滩水电站作为全球单机容量最大、在建规模最大的水电站,是开发治理长江的重要水电工程,也是国家能源战略布局“西电东送”的骨干电源点。为避免白鹤滩水电站建成后蓄水导致部分巧家县移民安置区被淹,需实施高填方工程作为建设用地以解决移民安置问题。

该工程场地西侧紧邻拟建呈近南北向分布的巧家防护堤,场地内高程低于堤顶设计高程 826 m 的区域将采用土石料分层碾压回填,最大回填高度约

30 m。本文主要研究该场地填筑工程材料的压缩变形特性和强度特性。工程范围及地理地貌如图 1 所示。填筑场区以石灰窑沟为界,分为南北两区块,北块场地呈不规则三角形分布,南块场地呈狭长四边形。场区地层按成因和物质组成从上往下依次为坡积含砾黏土、泥石流堆积碎石混合土、冲积细粒土质砂、冲积黏土夹粉土和粉砂及洪积含砾黏土。



图1 工程范围及地形地貌

Fig. 1 Project scope and topographical map

2 填料来源及级配

高填方工程填筑材料主要包括块石料和砂砾石料,由水碾河料场开采。该料场砾石土料分布范围广,物质组成变化大,主要为冲洪积(泥石流堆积)碎石混合土,夹层少、含泥量较高,且厚度不大,是理想的填料料源。

水碾河料场代表性填料的级配曲线如图 2。其实际存在粒径 60~200 mm 之间的块石,质量分数为 16.1%,室内试验时由于试验仪器尺寸限制级配最大粒径仅为 60 mm。粒径在 0.075~60 mm 间的颗粒称为粗粒,从图 2 可知,填料中粗粒质量分数为 86.3%,其中砾粒质量分数为 68.6%,砂粒质量分数为 17.7%。根据《土的工程分类标准》^[13],该填料为含细粒土砾。表 1 中: G_s 为土粒比重; D_{10} 、 D_{50} 、 D_{60} 分别为累计质量分数为 10%、50% 和 60% 的粒径; C_u 为不均匀系数; C_c 为曲率系数。根据前人研究^[14],当填料中大于 5 mm 的颗粒质量分数控制在 40%~70%、填料中小于 0.075 mm 颗粒质量分数小于总土质量的 10% 且填料的不均匀系数大于 10 时,填料是易于压实的良好填料。天然级配下,填料中粒径大于 5 mm 的砾石质量分数为 46.5%,填料中小于 0.075 mm 颗粒质量分数为 13.7%,由此可初步判定填料在天然级配下比较容易压实。

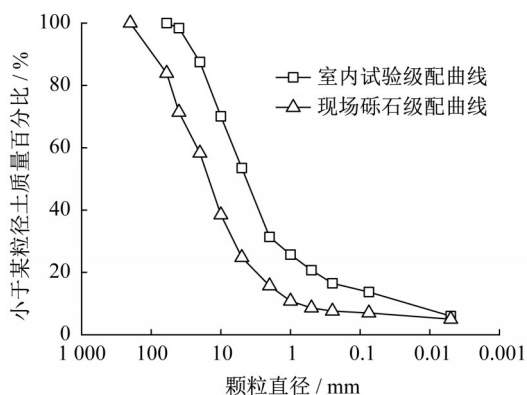


图2 试验砾石填料级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of gravelly soils tested

表1 室内试验中填料的物理性质参数

Tab. 1 Physical properties of gravelly soils used in laboratory tests

| G_s | D_{10}/mm | D_{50}/mm | D_{60}/mm | C_u | C_c |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|
| 2.72 | 0.06 | 4.35 | 6.65 | 117 | 0.029 |

3 不同砾石质量分数下重型击实试验

将天然级配下砾石土填料按2%的间距调整含水率,制备试样进行重型击实试验。击实仪锤重35.2kg,击实筒内径300mm,击实功能为2 684.9 KJ·m⁻³。试验结果如图3所示,当含水率较低时,击实后的干密度随含水率的增大而增大,当干密度增大到某一值后,干密度随着含水率的增加而减小,干密度的最大值即为该击数下的最大干密度,与其对应的含水率为最优含水率。试验得天然级配下砾石土最大干密度为2.3 g·cm⁻³,最优含水率为6.2%。

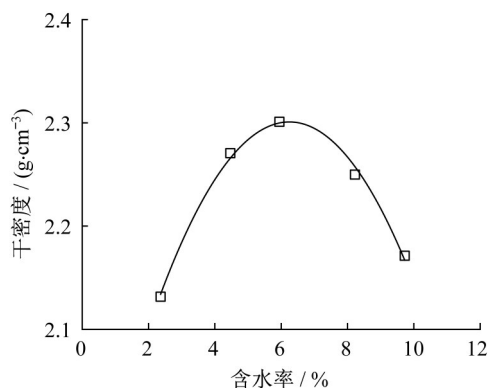


图3 砾石填料天然级配击实曲线

Fig. 3 Compaction of gravelly soils with natural gradation

杨斌^[14]研究结果表明粗颗粒填料中大于5 mm的颗粒质量分数对其压实度有重要影响。因此,本

次试验以填料天然级配各级质量分数为基数,按粒径大于5 mm的砾石质量分数分别为0、20.0%、40.0%、46.5%(天然级配)和70.0%共进行5组不同砾石质量分数的重型击实试验,详细分析砾石质量分数对填料击实度的影响规律,结果如图4、图5。

由图4、图5可知,粒径大于5 mm的砾石质量分数在70.0%范围内时最大干密度及最优含水率与砾石质量分数呈二次多项式关系,且相关系数均大于0.96。当砾石质量分数小于40.0%时,最大干密度随砾石质量分数的增大迅速增大;但随着砾石质量分数的进一步增大,土的最大干密度增长趋势逐渐变缓。这是因为相较于粗颗粒,细颗粒的比表面积大而密度较小。因此当砾石质量分数较小时,随着砾石逐渐取代细颗粒,致使干密度逐渐增大;随着砾石质量分数继续增大,较大的粗颗粒在土体中逐渐形成连续的骨架结构,细颗粒填充于粗颗粒之间的孔隙内,由于粗颗粒的骨架作用而较难压缩,填料的干密度增长趋势逐渐不明显。在料源相同条件下,利用此关系可合理控制现场填筑质量。

此外,当砾石质量分数小于40.0%时,随着砾石质量分数的增加,最优含水率迅速减小,当砾石质量分数继续增大,最优含水率减小趋势变缓。这是因为粗颗粒比表面积小,其质量分数增大会降低试样的黏性,增大颗粒之间的摩擦力,同时减小土样的吸水能力,使颗粒相互移动至最佳密实状态仅需要较小的含水率,即最优含水率逐渐减小。当砾石质量分数进一步增大时,粗颗粒形成的骨架结构使土样的吸水性能改善,最优含水率的减小趋势逐渐变缓。对比图4、图5还可知,相对于最优含水率,填料中砾石质量分数对最大干密度的影响更为显著,可见良好的颗粒级配有助于提高最大干密度。在实际工程中,使用天然级配下的填料能够获得较大的干密度,且对应的最优含水率较低,约为6%左右。

图6给出了基于室内试验粗颗粒质量分数对土体峰值内摩擦角的影响。图中 $\varphi_p - \varphi_{p0}$ 为峰值内摩擦角差值,其中 φ_p 为某一粗颗粒质量分数下试样的峰值内摩擦角, φ_{p0} 为粗颗粒质量分数为零时试样的峰值内摩擦角, $\varphi_p - \varphi_{p0}$ 反映了粗颗粒质量分数 W 对土体峰值抗剪强度的影响。由图6可知,不同混合体的峰值内摩擦角随粗颗粒质量分数的变化趋势大体一致,且存在2个较为明显的界限值 W_l 和 W_c 。当 $W < W_l$ 或者 $W > W_c$ 时,土体的峰值内摩擦角受粗颗粒质量分数的影响较小;当 $W_l < W < W_c$ 时,土体的峰值内摩擦角随着粗颗粒质量分数的增大而逐渐

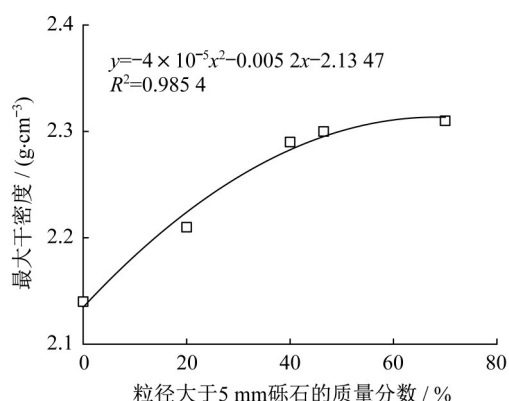


图4 不同砾石质量分数下填料的最大干密度

Fig. 4 Effect of gravel content on maximum dry density of gravelly soils

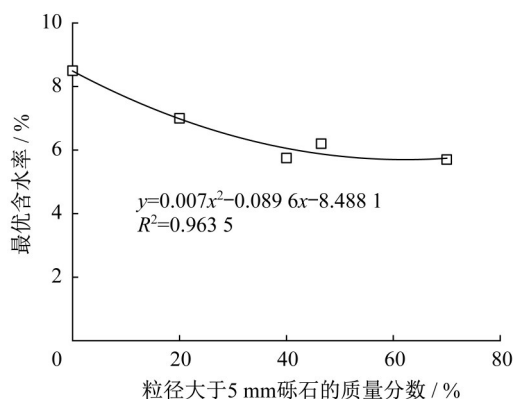


图5 不同砾石质量分数下填料的最优含水率

Fig. 5 Effect of gravel content on optimal water content of gravelly soils

增大。值得注意的是,不同学者^[15-18]的研究结果均表明, W_f 约为 30%~40%, W_c 约为 70%~80%。

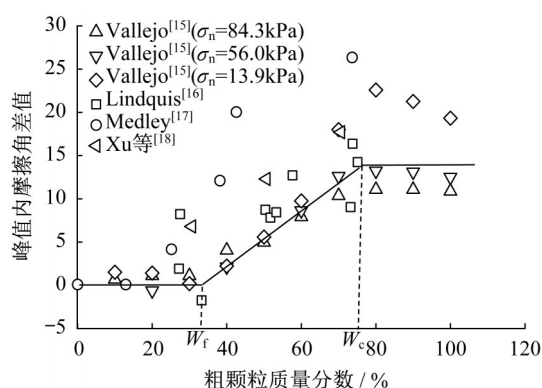
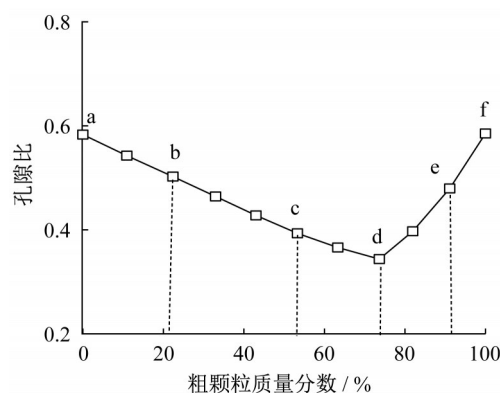


图6 不同粗颗粒质量分数下材料的峰值内摩擦角与粗颗粒质量分数的关系

Fig. 6 Relationship between peak friction angle and content of coarse particles

本试验砾石土填料属于二元混合物,粗颗粒质量分数的变化会明显导致不同的密实度,如图7。由图7知,随着粗颗粒质量分数的增加,二元混合物孔隙比先减小至最小值然后逐渐增加,反映了土体结构的变化。图8a-8f表示砾石填料不同粗颗粒质量分数下的孔隙特征,与图7中点a-f相对应。如图8a、8b所示,粗颗粒质量分数 W 为 0~20% 时,粗颗粒质量分数较低且悬浮于细颗粒中,此时土体的峰值抗剪强度主要受细颗粒控制,粗颗粒的影响可以忽略不计。如图8c、8d所示,当粗颗粒质量分数 W 为 40%~70% 时,粗颗粒间彼此接触形成了主要承担外部荷载的骨架结构,细颗粒充填于骨架结构的相应孔隙中,此时粗、细颗粒共同支配土体的力学特性,土体孔隙比可达到最小值。当粗颗粒质量分数 W 进一步增加至 70% 及以上时,粗颗粒间的接触数明显增多,填充于骨架结构相应孔隙中的细颗粒质量分数逐渐减少,此时孔隙比开始增加,土体的峰值强度与纯粗颗粒的峰值强度相近,如图8e、8f所示。这也定性说明了大于 5 mm 的粗颗粒质量分数为 40%~70% 时,粗颗粒间形成的骨架结构使得砾石填料较密实,与本文击实试验成果相一致。

图7 二元混合体孔隙比与粗颗粒质量分数的关系示意^[19]Fig. 7 Relationship between porosity of binary mixture and content of coarse particles^[19]

4 填料现场碾压试验

为进一步研究填料的现场碾压密实特性,采用 22 t (二驱驱动) 和 32 t (四驱驱动) 自行式振动平碾压路机分别对填料进行了现场碾压试验。在碾压试验中,砾石填料的松铺厚度按 40 cm、50 cm、60 cm 布置,填料含水率按 4%、6%、8% 调配。

砾石填料采用 22 t 压路机进行碾压时碾压遍数与压实度的关系曲线如图9所示,填料碾前含水率

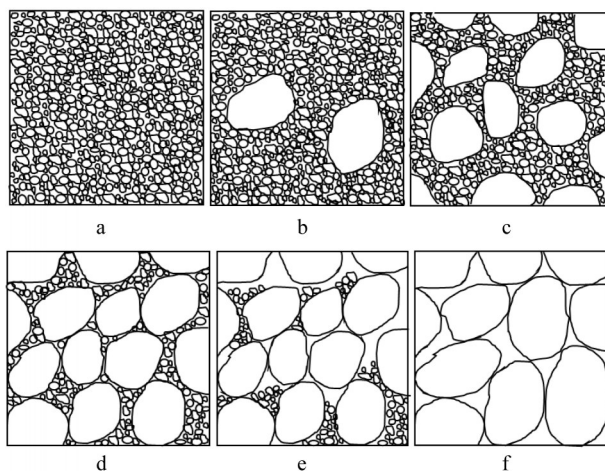


图8 砾石填料随粗颗粒质量分数逐渐增加时的内部结构示意图^[19]

Fig. 8 Schematic diagrams of packing structures at different coarse particle contents^[19]

为6%。从图9可知,压实度随着碾压遍数的增加而增大,且碾压遍数越多压实度差异越大。当碾压遍数超过8遍后,压实度增加很小,沉降逐渐趋于平缓,再增加碾压遍数对沉降变化影响不大。

碾压过程中,填料的含水率对于压实效果的影响比较突出。填料含水率小于最优含水率时,随着含水率的增大,颗粒之间的摩擦变小,有利于压实度的提高。砾石填料采用22 t和32 t的压路机进行碾压时碾前含水率与压实度关系曲线如图10。由图10可知,碾压前含水率为6%时,填料的压实度最高,填料含水率过低时颗粒间填充不密实,会造成碾压效果不好,含水率偏高时会降低颗粒的密度、剪切模量及泊松比,进而影响碾压质量^[20]。因此,在填料含水率为6%附近时进行碾压施工最为经济合理。

另外,填料的松铺厚度对压实度有较大的影响。在碾压过程中,当松铺厚度过薄时,振动压实效果明显,但会影响施工的进度,增加施工费用。松铺厚度过厚时,因碾压机的振动压实作用深度有限,上部堆石体压实较好,而下部的堆石体没有充分压实,造成碾压效果不好。由图10可知,当填料碾前含水率为6%、采用22 t压路机进行碾压时,随着填料松铺厚度的增大,压实度明显减小,采用32 t压路机时,压实度随着松铺厚度的增大变化不明显。

根据试验结果,填筑现场施工参数为填料的碾前含水率控制在约6%,22 t的压路机适用松铺厚度40 cm的场平回填碾压,32 t的压路机适用松铺厚度60 cm的场平回填碾压,当碾压遍数大于8时,二者压实度都达到98%,满足压实度97%的设计要求。

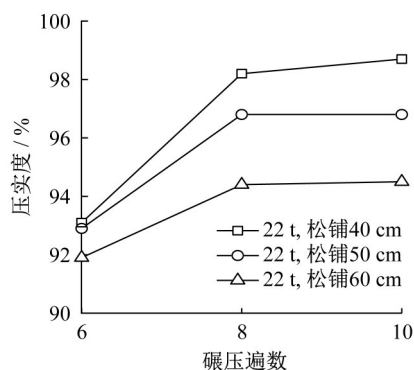


图9 砾石填料碾压遍数与压实度关系

Fig. 9 Relationship between times of grind and compaction degree of gravelly soils

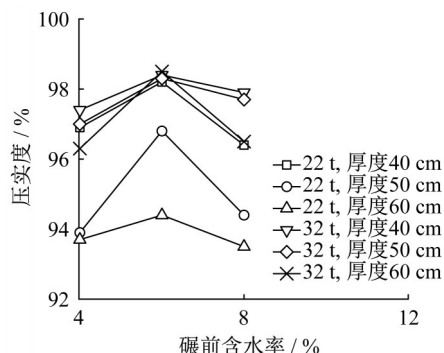


图10 砾石填料碾前含水率与压实度关系

Fig. 10 Relationship between moisture content and compaction degree of gravelly soils

5 室内压缩特性

为研究压实填料的压缩变形特性,采用浮环式大型固结仪进行了填料的压缩试验。试样直径50.1 cm,高23.4 cm,分别进行了最优含水率下不同压实度的填料浸水饱和及非饱和2种状态的压缩试验。试验表明,压实度为0.95和0.97这2种情况下,试样的压缩系数均小于 0.1 MPa^{-1} ,填料属于低压缩性土。由图11可知,压实度相同时,试样浸水饱和后填料压缩模量略有降低,但差异不大,当填料压实度为0.97时,浸水饱和对砾石土的压缩性几乎没有影响。可见,提高压实度,可以明显改善填料的水稳定性。值得注意的是,由于水库蓄水和泄洪的影响,填筑体地下水位发生周期性大幅波动,水位动态变化对填筑体的变形影响需进一步研究。

6 大型三轴剪切试验

为了研究不同压实度下砾石填料的强度和变形

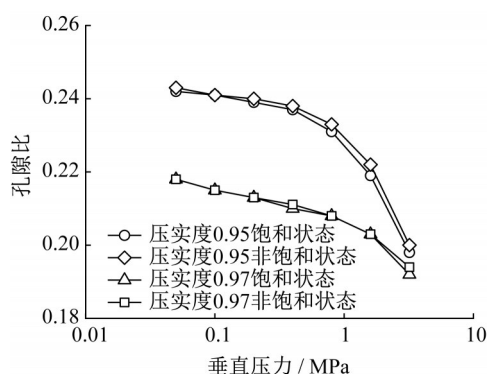


图11 砾石填料压缩试验孔隙比与垂直压力关系

Fig. 11 e - P curves of filler in one-dimensional consolidation tests

特性,采用大型三轴剪切仪对填料进行了一系列三轴排水剪切试验,试验时控制填料的含水率为击实最优含水率。考虑到砾石土料在实际工程中的排水性质,每组试样分别在4个围压条件下进行固结排水三轴剪切试验(CD),试验围压分别取为100 kPa、200 kPa、300 kPa和500 kPa。

6.1 应力应变影响因素分析

图12给出了填料2种压实度下的偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)、体积应变(ϵ_v)和轴向应变(ϵ_1)的关系曲线。由图12a可知,随着轴向应变的增加,4组试样的偏应力呈非线性增长,表现为应变硬化。由于相同压实度下围压越大,对试样的侧向变形约束力也越大,从而导致在剪切变形过程中试样产生相同轴向应变时所需要的轴向应力也越大^[21],因此围压越大应变硬化现象越明显,图12b也有类似规律。对比图12a和12b可知,在相同围压下,峰值剪切强度随压实度的增大而增大,其增幅(6.4%~14.6%)随着围压增大而减小,这是因为随着压实度的增加,填料中颗粒之间的咬合作用增强,由此形成的颗粒间作用力增加,从而导致峰值强度增加。

由图12还可知,试样在不同围压下体变整体上表现为剪缩,且体缩率随着轴向应变增大逐渐发展直至趋于稳定。Roscoe等^[22]研究表明土体在受到剪切力作用时,最后都会趋向于同一个稳定的状态,即临界状态。土体的临界状态不仅与土体的疏密状态有关,还与土体当前的应力状态有关。低围压时,不同压实度下的试样在剪切初期都表现出轻微的剪胀现象,可能原因是围压较低时填料在受剪时颗粒容易出现翻滚和转动,使得体积增大。同时,同一压实度下,围压越高,相对剪胀性越弱。

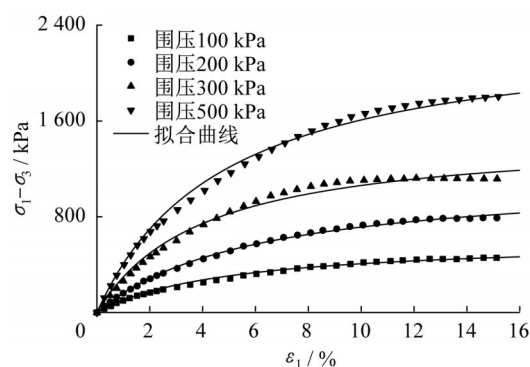
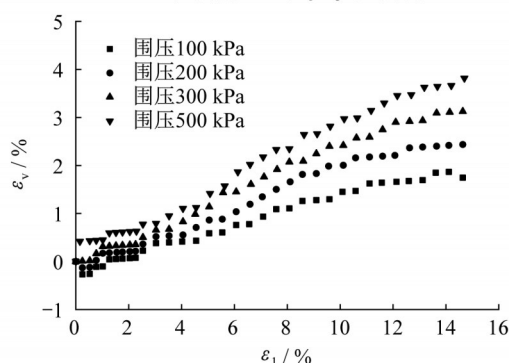
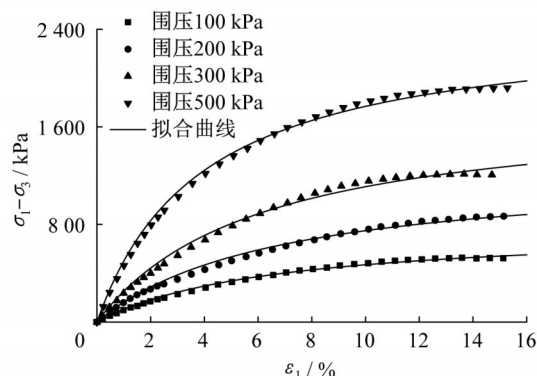
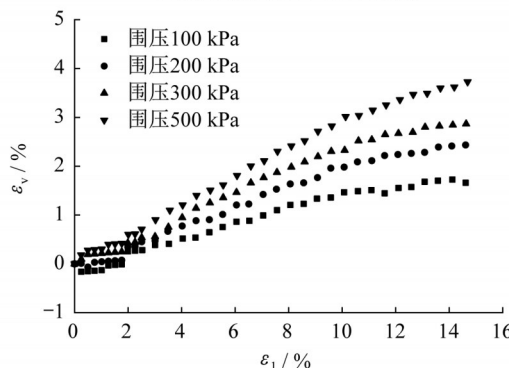
a 压实度0.95时 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与 ϵ_1 曲线b 压实度0.95时 ϵ_v 与 ϵ_1 曲线c 压实度0.97时 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与 ϵ_1 关系d 压实度0.97时 ϵ_v 与 ϵ_1 关系图12 砾石土料的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 以及 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 关系曲线

Fig. 12 Stress-strain curves at different confining pressures

6.2 基于邓肯-张模型的应力应变关系描述

邓肯-张(Duncan-Chang)模型^[23-24]是一种形式简

单、参数少且实用的非线性弹性模型。该模型采用双曲线函数描述应力应变关系:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (1)$$

其中

$$a = \frac{1}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_1}} = \frac{1}{E_i} (\varepsilon_1 \rightarrow 0)$$

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}} (\varepsilon_1 \rightarrow \infty)$$

式中: E_i 为初始切线模量; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}$ 为偏应力的极限值; a 和 b 的大小随着应力状态变化而变化。

填料的切线模量 E_i 计算如式(2):

$$E_i = \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \varepsilon_1} = \frac{a}{(a + b\varepsilon_1)^2} = \frac{1}{a} [1 - b(\sigma_1 - \sigma_3)]^2 \quad (2)$$

土体的初始切线模量 E_i 可由式(3)计算:

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n = \frac{1}{a} \quad (3)$$

式中: K 和 n 为初始切线模量的拟合常数; p_a 为大气压力, 取 101.3 kPa; σ_3 为三轴试验中的围压。

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}} = \frac{R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (4)$$

其中, $R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}}$, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为土体的破坏强度,

R_f 的值一般介于 0.5~1.0。根据摩尔库伦强度准则, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的表达式为

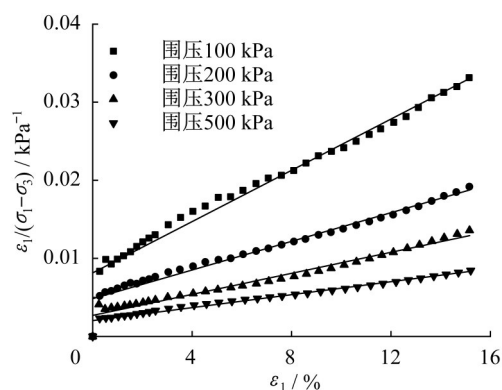
$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5)$$

式中: c 为土体黏聚力; φ 为土体内摩擦角。将式(3)、式(5)代入式(2)中, 可得填料的切线模量计算公式如式(6):

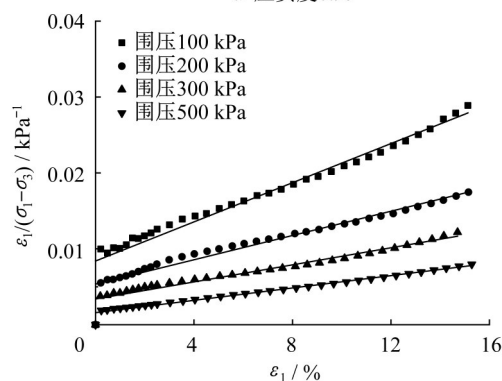
$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (6)$$

图 13 给出了不同围压下的 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 和轴向应变 (ε_1) 的关系曲线。由图可见, 在不同围压下, $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 (ε_1) 近似呈线性关系, 拟合相关系数 R^2 最小值为 0.941, 表明邓肯-张双曲线模型可较好地描述填料的偏应力与轴向应变关系。图 12 对比了不同围压下的试验曲线和邓肯-张模型模拟曲线。由此可知, 邓肯-张模型描述的应力应变关系与三轴试验数据一致, 曲线拟合效果良好。

由式(3)可得到不同围压下的初始切线模量 E_i ,



a 压实度0.95



b 压实度0.97

图 13 砾石填料的应力应变关系

Fig. 13 Stress-strain hyperbolic relationship

两边取对数绘制 $\lg(E_i/p_a) - \lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线, 如图 14 所示。由图可知, $\lg(E_i/p_a) - \lg(\sigma_3/p_a)$ 之间的线性关系良好, 体现了土体初始模量的应力相关特性^[25]。直线的斜率即为 n , 截距为 $\lg K$ 。

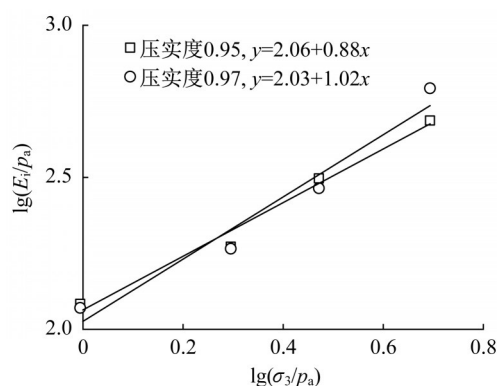


图 14 $\lg(E_i/p_a) - \lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线

Fig. 14 Relationship between initial shear modulus and confining pressure

图 15 给出了不同压实度下试样在不同围压下的应力摩尔圆。根据摩尔库伦准则, 取 4 个应力圆的公切线即可确定砾石土料的 c 、 φ 值。需要说明的

是,该填料为无黏性土,理论上 c 值为零,但是试验得到的 c 值不为零,此 c 值视为表观凝聚力^[26]。其值主要与颗粒间的咬合力等因素有关,其大小与矿物成分、颗粒形状和级配等因素有关。郭庆国^[27]认为砾石土虽无黏聚力,但由于剪切破坏过程中要克服摩擦力和颗粒之间的相互咬合嵌挂,反映到强度参数上即强度包络线不过原点,即 c 值不为零。表2给出了不同压实度条件下砾石填料邓肯-张模型的5个参数(c, φ, K, n 和 R_f)。

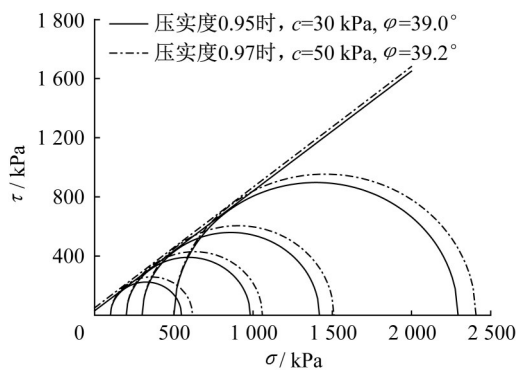


图 15 砾石填料破坏时的应力摩尔圆

Fig. 15 Mohr stress circles in failure

表 2 砾石填料三轴试验结果

Tab. 2 Triaxial test results of gravelly soils

| 压实度 | c/kPa | $\varphi/^\circ$ | K | n | R_f |
|------|----------------|------------------|-------|------|-------|
| 0.95 | 30.0 | 39.0 | 115.8 | 0.88 | 0.73 |
| 0.97 | 50.0 | 39.2 | 106.2 | 1.02 | 0.70 |

7 结论

以白鹤滩水电站移民区高填方工程为背景,对砾石填料开展击实试验和现场碾压试验,确定填料的配比设计及填筑现场的施工参数,通过大型压缩试验和三轴剪切试验研究填料在不同压实度、不同含水状态下的强度与变形特性。主要结论如下:

(1)水碾河砾石填料在天然级配状态下较易于压实,使用天然级配下的填料能够获得较大的干密度,其最优含水率在6.2%左右。当大于5 mm的砾石质量分数在40%~70%时,填料表现出较好的可压实性。同时,现场碾压试验表明,在最优含水率条件下,22 t和32 t的压路机对应的最优松铺厚度分别为40 cm和60 cm,当碾压遍数大于8遍时,能够满足压实度97%的设计要求。

(2)不论是饱和还是非饱和状态,砾石填料均属于低压缩性土。但是填料中有大量的水存在时(尤其处于饱和状态时),其压缩模量会稍微降低。在实

际工程中的砾石填料选择方面,要针对压实性和强度综合分析比选,以获得最优的填料配比。

(3)填料在压实度为0.95和0.97时均可获得较高的强度指标。在三轴剪切试验中,不同压实度、不同围压下试样的应力-应变曲线都表现为应变硬化。在剪切初期,试样的体应变在低围压时出现了轻微剪胀现象,但试样整体上表现为剪缩。此外,填料不同围压下的应力应变关系可用邓肯-张双曲线模型较好地描述,并确定了相关的参数。

作者贡献声明:

顾晓强:提出研究选题,获取研究经费,设计研究方案,指导课题研究,修改论文。

梁玉珍:实施研究过程,收集整理分析数据,设计论文框架,撰写论文。

周奇辉:工作支持,获取研究经费,参与试验结果分析。

刘尊景:工作、技术、材料支持,参与试验结果分析。

荆子菁:指导现场试验,整理试验数据。

参考文献:

- [1] 何兆益,周虎鑫.高填方路堤填筑体沉降的三维有限元分析[J].重庆交通学院学报,2000,19(3):58. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2000.03.015.
HE Zhaoyi, ZHOU Huxin. 3-D finite element analysis of subsidence on high embankment [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2000, 19(3): 58. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2000.03.015.
- [2] 刘丽萍,折学森.土石混合料压实特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):206.
LIU Liping, ZHE Xuesen. Study on compaction property of earth-rock mixture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 206.
- [3] 张淑宝.砂性土填料压缩特性试验研究[J].路基工程,2018(5):115. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2018.05.23.
ZHANG Shubao. Experimental study on the compression property of sandy filling [J]. Subgrade Engineering, 2018(5): 115. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2018.05.23.
- [4] 石熊,张家生,刘蓓,等.高速铁路粗粒土填料级配改良试验[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(11):3964. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2014.11.3964.
SHI Xiong, ZHANG Jiasheng, LIU Bei, et al. Test of high-speed railway coarse grained filler of improved particle size distribution [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(11): 3964. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2014.11.3964.
- [5] 孟莉敏,周宏益,刘宏.山区机场工程高填方碎石土压缩蠕变试验研究[J].铁道勘察,2008,34(5):46.
MENG Limin, ZHOU Hongyi, LIU Hong. A study on compression creep tests of high embankment crushed stones for

- construction of airports in mountainous areas [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2008, 34(5): 46.
- [6] 黄金林, 鞠海燕, 王贵杰. 惠州抽水蓄能电站黏土心墙坝黏土碾压试验研究[J]. *铁道建筑*, 2011(6): 111.
HUANG Jinlin, JU Haiyan, WANG Guijie. Rolling test study on clay as core wall material of dam used in Huizhou reservoir power station[J]. *Railway Engineering*, 2011(6): 111.
- [7] 秦红玉, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2004, 25(10): 1575.
Qin Hongyu, Liu Hanlong, Gao Yufeng, *et al.* Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large-scale triaxial tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(10): 1575.
- [8] FEDA J. Notes on the effect of grain crushing on the granular soil behaviour [J]. *Engineering Geology*, 2002, 63(1): 93. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00072-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00072-2).
- [9] SIMONI A, HOULSBY G T. The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 3(24): 523. DOI: 10.1007/s10706-004-5832-6.
- [10] 柴贺军, 阎宗岭, 贾学明. 土石混填路基修筑技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
CHAI Hejun, YAN Zongling, JIA Xueming. Construction technology of earth-stone roadbed [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [11] 李翀, 何昌荣, 王琛, 等. 粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(Z1): 567. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.z1.114.
LI Chong, HE Changrong, WANG Chen, *et al.* Study of scale effect of large-scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(Z1): 567. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.z1.114.
- [12] YANG B, JIAO Y, LEI S. A study on the effects of microparameters on macroproperties for specimens created by bonded particles[J]. *Engineering Computations*, 2006, 23(6): 607. <https://doi.org/10.1108/02644400610680333>.
- [13] 中华人民共和国水利部. 土的工程分类标准: GBT 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of soils: GBT 50145—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [14] 杨斌. 浅析戈壁粗颗粒填料工程特性及路用性能[J]. *甘肃科技*, 2018, 34(16): 77.
YANG Bin. Analysis on engineering characteristics and road performance of Gobi coarse particle filler [J]. *Gansu Science and Technology*, 2018, 34(16): 77.
- [15] VALLEJO L E. Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 14(1): 34.
- [16] LINDQUIST E S. The strength and deformation properties of mélange[D]. Berkeley: University of California, 1994.
- [17] MEDLEY E. Systematic characterization of mélange bimrocks and other chaotic soil/rock mixtures [J]. *Felsbau Rock Soil Engineering*, 1999, 17(3): 152.
- [18] XU W, XU Q, HU R. Study on the shear strength of soil - rock mixture by large scale direct shear test [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(8): 1235.
- [19] 龚健. 土石混合体的细观力学特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
GONG Jian. Study on the microscopic mechanical characteristic of soil-rock mixture [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [20] 李晓柱, 刘洋, 吴顺川. 堆石坝现场碾压试验与离散元数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013(22): 3123. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.z2.019.
LI Xiaozhu, LIU Yang, WU Shunchuan. Field roller compaction test and discrete element analysis of rockfill dam [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013(22): 3123. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.z2.019.
- [21] WICHTMAN T, RONDON H, NIEMUNIS A, *et al.* Prediction of permanent deformations in pavements using a high-cycle accumulation model [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2010, 136(5): 728.
- [22] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, WROTH C P. On the yielding of soils[J]. *Geotechnique*, 1958, 8(1): 22.
- [23] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1970, 96(5): 1629. DOI: 10.1061/JSFEAQ.0001458.
- [24] 张先伟, 安然, 孔令伟. 残积土孔内剪切试验的强度特性及广义邓肯-张模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(9): 1723. DOI: 10.11779/CJGE202009017.
ZHANG Xianwei, AN Ran, KONG Lingwei. Mechanical properties and generalized Duncan-Chang model for granite residual soils using borehole shear tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(9): 1723. DOI: 10.11779/CJGE202009017.
- [25] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 833.
GU Xiaoqiang, WU Ruituo, LIANG Fayun, *et al.* On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 833.
- [26] 赵健, 凌立鑫. 山区公路路基填料大型三轴试验研究[J]. *现代交通技术*, 2013, 10(3): 4.
ZHAO Jian, LING Lixin. Large-scale triaxial test for highway subgrade filling in mountainous area [J]. *Modern Transportation Technology*, 2013, 10(3): 4.
- [27] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
GUO Qingguo. Engineering properties of coarse soil and its application [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1999.