

风干与饱和堆石料强度与变形特性试验研究

陈 鸽^{1,2}, 朱俊高^{1,2}, 袁荣宏³, 王 龙^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 张家港市金厦房地产开发公司, 江苏 张家港 215600)

摘要: 风干和饱和状态下粗粒土的强度和变形特性有显著差异。为研究此差异, 对两河口心墙坝堆石料风干样及饱和样进行了三轴固结排水试验, 对比分析了其风干样及饱和样的强度特性、变形特性差异。试验结果表明: 风干样与饱和样的峰值偏应力与围压呈显著的幂函数关系, 且随着围压的增大, 两者差值逐渐增大; 同一围压下, 风干样的内摩擦角大于饱和样, 但两者的差值随着围压的增大而减小, 内摩擦角差值与围压的关系可以用幂函数来描述; 在相同围压下, 同一轴变对应的风干样体应变及侧向应变均小于饱和样, 且风干样的颗粒破碎率小于饱和样, 两者的颗粒破碎率均随着围压的增大而线性增加。

关键词: 粗粒土; 风干样; 饱和样; 强度特性; 变形特性; 颗粒破碎

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0853-06

Experimental study on strength and deformation characteristics of dry and saturated coarse-grained soils

CHEN Ge^{1,2}, ZHU Jungao^{1,2}, YUAN Ronghong³, WANG Long^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geotechnics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Zhangjiagang Jinsha Real Estate Co., Ltd, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: The strength and deformation characteristics of coarse-grained soil under air-dried and saturated conditions are significantly different. The triaxial consolidation tests were carried out to study the difference between air-dried samples and saturated samples of rockfill materials in the core wall dam of the two estuary. The strength and deformation characteristics of them were compared and analyzed. The results show that there is a significant power function relationship between peak deflection stress and confining pressure of them, and the difference between them increases gradually with the increase of confining pressure. The internal friction angle of air-dried sample is large than that of saturated sample, but the difference between them decreases with the increase of confining pressure. The relationship between the difference of internal friction angle and confining pressure can be described by power function. Under the same confining pressure and axial strain, the volume strain and lateral strain of the air-dried samples are smaller than those of the saturated samples. Under the same confining pressure, the particle breakage rate of air-dried samples is less than that of saturated samples, while the particle breakage rate of them increase linearly with the increasing confining pressure.

Key words: coarse-grained soil; air-dried sample; saturated sample; strength characteristics; deformation characteristics; particle breakage

已有研究表明, 土体的力学性质随其含水量变化较大^[1-2], 风干及饱和状态是其两个极限状态^[3], 而且, 很多情况下, 土工构筑物的土体是接近这两个极限状态的。比如, 运行期的心墙堆石坝的上游坝壳基本处于饱和状态, 而下游坝壳

则可以认为处于风干状态; 混凝土面板堆石坝的堆石体、山区机场的高填方体则基本处于风干状态。

理论上, 要准确估计堆石体的强度或变形, 必须进行相应状态(即干态或饱和态)土料的试验。

收稿日期: 2019-03-14 修改稿日期: 2019-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479052)

第一作者: 陈 鸽(1994—), 女, 博士生, 主要从事土体基本性质及本构关系研究, E-mail: 834267597@qq.com

通信作者: 朱俊高(1964—), 男, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事土体基本性质及本构关系、土石坝工程研究, E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn.

但实际上目前对大型三轴试验,一般多为饱和料的试验^[4-6],而对大型直剪试验,则多对风干料进行试验。因此,在不少情况下,试验土料的含水状态与工程结构土体的实际状态不同,这种差异可能导致设计对结构工作性状预测的误差,从而引起结构的安全问题。因此,有必要弄清堆石料等粗粒土在风干或饱和状态下变形及强度特性的差异,为科学合理地设计堆石填方工程结构提供依据。

近年来,已有学者研究得出,在相同的孔隙比下,砂土风干样的摩擦角一般比饱和样测得的高 2° 左右^[7-8],且饱和样的初始模量较风干态有所下降^[9]。另外张智、屈智炯^[10]、保华富^[3]以及左永振等人^[8]的研究表明处于风干态的粗粒土变形量较饱和态小,虽然两者的应力应变曲线具有相同的变化趋势,但是风干态土体的极值强度要高于饱和态。因此可看出,采用饱和状态的强度指标对非饱和区(主要是风干区)进行设计^[9],趋于保守。

上述研究得到的结论大多是定性的,堆石料风干样和饱和样的力学性质差别究竟有多大,尚无定量的结论。因此,定量研究堆石料风干和饱和状态下的力学特性不仅对于更好的了解堆石料的受力变形特性是有必要的,而且对于土石坝的设计具有一定的指导意义,有必要进行研究。此外,颗粒破碎是堆石料的显著特征,颗粒破碎能够进一步影响粗粒土的强度和变形性质,风干态及饱和态粗粒土的颗粒破碎规律有何差别,相关研究有待开展。

基于此,本文以两河口堆石料为例,对风干样和饱和样进行了三轴固结排水剪切试验,定性和定量地对比分析了风干样和饱和样在不同围压下的强度特性、变形特性以及颗粒破碎情况。

1 试验简介

本试验采用中型三轴仪,中三轴试样的直径为 101 mm,高为 200 mm,最大允许粒径为 20 mm。试验采用的土料来自两河口堆石料,最大粒径为 600 mm。采用混合法^[11]进行缩尺:先用相似级配法控制小于 5 mm 粒径含量为 30%,然后再用等量替代法对超粒径的颗粒进行处理。缩尺前后的级配曲线如图 1 所示。试样的制样干密度为 2.10 g/cm^3 。

试样制备采用分层击实法,即先将风干土料按照所需质量称量并分为五份,分 5 次填入制样

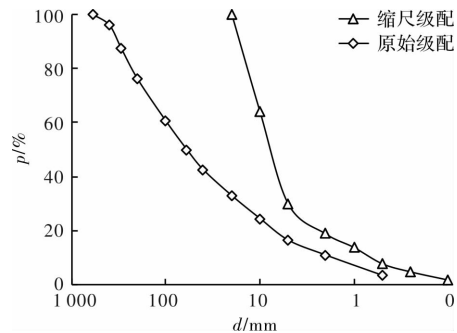


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of the soil

筒,分层击实至试验控制高度,每次击实后需要对堆石料表面进行刮毛,以防出现分层。为防止堆石料由于击实产生离析,制样时每层还需预留少量细土撒于顶面。

本试验的目的是对比分析堆石料风干样和饱和样在相同受力条件下的强度及变形特性。因此试验共分为 2 组,分别对应于风干样和饱和样。所谓的风干样,是指试样在制备时采用风干土料,而且在固结和剪切过程中始终保持干燥状态;所谓饱和样,是利用风干土料制备成试样后对试样采用水头饱和法进行饱和,然后在固结和剪切过程中都保持为饱和状态。每组 4 个试样,分别在围压为 200、500、1 000、1 500 kPa 下进行固结排水(气)剪切试验,剪切速率取 0.3 mm/min ,剪切至轴向应变为 15% 时试验终止。

2 试验结果与分析

2.1 强度特性对比分析

根据试验数据整理出不同围压下风干样和饱和样的三轴固结排水(气)剪切试验偏应力与轴向应变的关系曲线,如图 2 所示。

图 2 可以看出,风干样和饱和样的应力应变关系有明显的差异。相同围压,相同轴向应变下风干样的偏应力大于饱和样,且两者的偏应力差值基本随着轴向应变的增大先增大后减小。为了定量比较二者的差异,图 3 绘制出了风干样及饱和样峰值偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随围压的变化曲线。

由图 3 可知,相同围压下,风干样峰值偏应力大于饱和样,这与左元明^[9]得到的结论一致,这是由于试样浸水后粗颗粒土的物理性质发生了变化,水起到了润滑作用,使土颗粒间的摩擦力减小,导致试样的强度降低。在围压分别为 200、500、1 000 及 1 500 kPa 时,前者比后者高出 423.5、721.5、1 078.6、1 139.9 kPa,浸水使峰值强度降低 17%~26%,这与左元明所得到 14%~42% 的

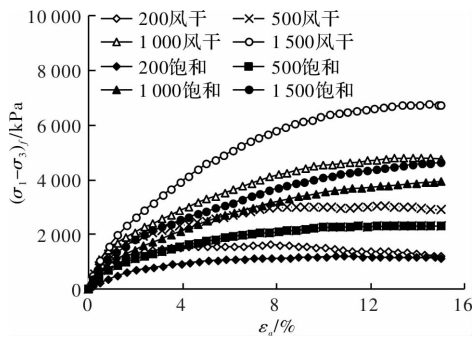


图 2 三轴试验应力应变关系曲线

Fig. 2 Triaxial test stress-strain curve

结论^[9]稍有差异, 分析原因可能是由于试样的物理性质及浸水时间有所不同. 同时可以看出随着围压的增大, 峰值偏应力的差值逐渐增大.

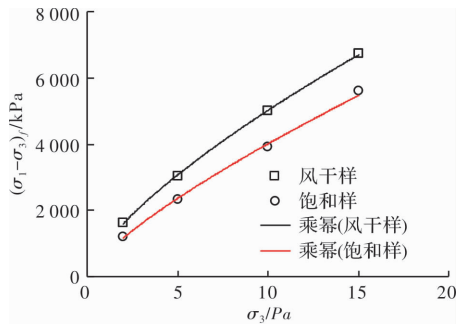


图 3 不同围压下风干样和饱和样的峰值偏应力

Fig. 3 Peak deviations of dry and saturated samples under different confining pressures

另外值得注意的是两条曲线的斜率随着围压的增大是逐渐减小的, 这主要是由于高围压下颗粒破碎加剧, 影响了试样的级配进而影响到其力学性质. 可用公式(1)来描述峰值偏应力与围压的关系.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = a (\sigma_3 / p_a)^n \times p_a \tag{1}$$

式中, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为峰值偏应力, p_a 表示一个大气压, a, n 为拟合参数, 两种试样经拟合所得的参数结果列于表 1.

表 1 式(1)拟合参数

Tab. 1 Formula (1) fitting parameter

试样	R^2	a	n
风干样	0.999 9	9.643	0.718
饱和样	0.998 6	6.486	0.793

由表 1 可知, 用幂函数对峰值偏应力与围压的关系进行拟合, R^2 可达到 0.99 以上, 说明拟合效果很好. 由拟合公式可知, 若已知三轴试验的围压、试样的拟合参数 a, n , 便可估算出峰值偏应力值.

为了验证此结论, 对文献[12]中的峰值偏应力与围压的关系进行了整理, 如表 2. 使用公式(1)进行拟合, 计算所得参数 a, n 值分别为 6.331、0.847, R^2 达到 0.99 以上, 说明拟合效果良好.

表 2 文献[12]数据

Tab. 2 Literature [12] data

围压 /kPa	峰值偏应力 /MPa	围压 /kPa	峰值偏应力 /MPa
0.2	1.41	2.5	9.58
0.45	2.78	3	10.82
0.8	3.55	3.3	12.06
1.4	5.90	3.5	13.65
2	7.83		

另外, 依据试验结果, 整理出风干样和饱和样 CD 试验的抗剪强度指标, 如表 3 所示. 在围压较低时, 强度包线近似直线, 随着围压的增大, 强度包线呈现非线性特征^[7].

表 3 抗剪强度指标

Tab. 3 Shear strength index

试样	线性		非线性	
	c/kPa	$\varphi/^\circ$	$\varphi_0/^\circ$	$\Delta\varphi/^\circ$
风干样	228.82	41.76	56.49	10.84
饱和样	136.87	39.04	51.03	9.16

表 3 可以看出线性的抗剪强度指标中, 风干样的粘聚力比饱和样高出 91.95 kPa, 且前者的内摩擦角高出后者 2.72°, 说明土体浸水饱和后强度有所降低. 非线性抗剪强度指标中, 风干样的 φ_0 值同样比饱和样高, $\Delta\varphi$ 为一参数, 反映了 φ 随 σ_3 的增大而降低的程度.

为了更直观地对比风干样及饱和样的强度指标, 进一步计算出两者在不同围压下对应的内摩擦角, 如表 4.

由表 4 可得随着围压的增大, 试样的内摩擦角逐渐减小. 相同围压下, 风干样的内摩擦角比饱和样大 3~5°. 在文献[9]中可以得到饱和样的内摩擦角为 45°, 风干样的内摩擦角为 47.5°, 两者相差 2.5°, 本文差值相对较大, 这是由于文献[9]所采用的试样为砂土, 与文献[7-8]所用材料相似, 因此结论一致, 而本文使用的是粒径更大的粗粒土.

表4 不同围压下的内摩擦角
Tab. 4 Internal friction angles under different confining pressures

围压/kPa	$\varphi/^\circ$		
	风干样	饱和样	差值
200	53.23	48.27	4.96
500	48.91	44.63	4.28
1 000	45.65	41.87	3.78
1 500	43.74	40.26	3.48

另外随着围压的增大,饱和样和风干样的内摩擦角差值逐渐减小,说明在高围压下,土样的干湿状态对土体内摩擦角的影响逐渐减小,围压的影响作用逐渐增大.该差值与围压的关系可用式(2)来描述,拟合曲线如图4,相关系数 R^2 达到0.99以上,拟合效果良好.

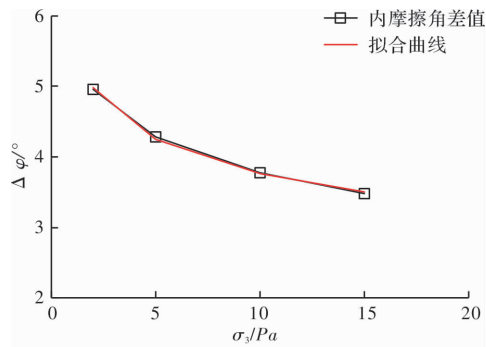


图4 内摩擦角差值与围压的关系

Fig. 4 The relationship between the difference of internal friction angle and confining pressure

$$\Delta\varphi' = b \times (\sigma_3/p_a)^m \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi'$ 表示风干样与饱和样的内摩擦角差值, b 和 m 是拟合参数,分别为2.527、-0.173,且 b 的量纲与内摩擦角一致.

2.2 变形特性对比分析

由于饱和样的颗粒之间被水润滑以及颗粒矿物浸水软化而使颗粒发生相互滑移、破碎和重新排列,从而产生变形,并使土体中的应力发生重分布,因此饱和样的变形特性与风干样有所差异.

根据试验数据绘制出风干样和饱和样的三轴剪切试验试样的体积应变和轴向应变的关系曲线,如图5.

由图5可得:几组曲线在轴向应变较小时出现剪缩现象.随着轴向应变的增大,低围压(200 kPa)下的试样开始出现剪胀,高围压下的试样则一直保持剪缩状态.这可能是由于高围压使土颗粒破碎,细粒增多,从而填充孔隙,使试样体积

减小.

试样剪胀剪缩的拐点随着围压的增加而增加.比较图2和图5可得:体变曲线和偏应力曲线的拐点对应的应变是不同的,体变的拐点要先于偏应力,如当围压为500 kPa时,体变曲线在轴向应变为5%左右开始出现拐点,而偏应力曲线则在轴向应变大概为8%时出现拐点.这说明在颗粒翻滚出现体积变化的最初阶段,土体强度因颗粒咬合作用的存在仍继续发展,继而达到峰值.

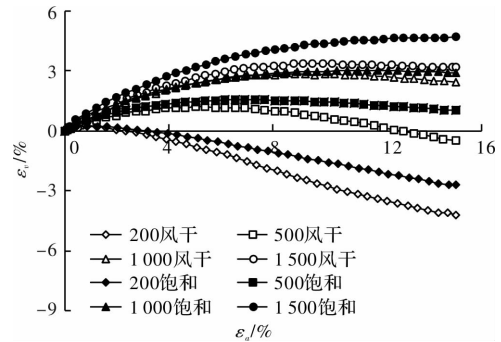


图5 体积应变与轴向应变关系曲线

Fig. 5 Volume strain and axial strain curve

同时由图5可以得出,相同围压下,随着轴向应变的增大,风干样的剪胀剪缩拐点都先于饱和样出现,例如在围压为500 kPa时,风干样的剪缩曲线拐点在轴向应变为4%时出现,而饱和样则在轴向应变为7%时出现拐点,其它围压下亦有此现象出现,此处不再赘述.且同一轴向应变对应的风干样体积应变要小于饱和样,说明土体浸水饱和后结构更易破坏,颗粒更易变形.

图6为风干样和饱和样的侧向应变和轴向应变的关系曲线.

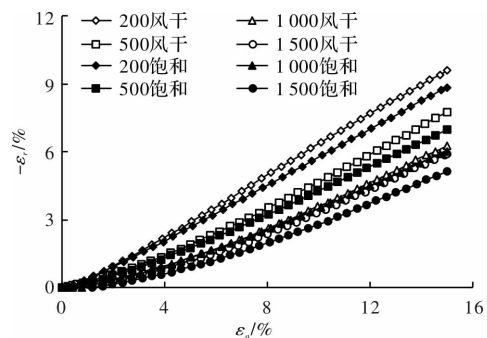


图6 侧向应变与轴向应变关系曲线

Fig. 6 Lateral strain and axial strain curve

由图6可得:几组曲线在初始阶段呈现出较明显的非线性状态,随后逐渐呈现出较好的线性关系.低围压下泊松比大于0.5,土体处于剪胀状态.围压越大,同一轴向应变对应的侧向应变越小,如在轴向应变为12%时,200 kPa的围压对应

的风干样侧向应变大概为 8%，500 kPa 的围压对应的风干样侧向应变大概为 6%，这是由于高围压限制了土体的侧向应变，使土体强度提高。

在应变的初始阶段，同一轴向应变对应的风干样和饱和样的侧向应变相差不大，说明此时干湿状态对变形的影响较小，随着轴向应变的增加，风干样和饱和样的侧向应变出现分化现象，且风干样的侧向应变比饱和样的低，这与两者体积应变的变化规律一致。

2.3 颗粒破碎对比分析

研究表明，在高围压状态下，堆石料发生较大程度的颗粒破碎，颗粒破碎进而又对堆石料的强度变形特性产生影响。比如变形方面，颗粒破碎和重排列所产生的体缩抵消了部分甚至是全部的体胀，使得总体变呈现出弱剪胀甚至是无剪胀的规律。基于此，本节将重点关注风干样和饱和样在颗粒破碎性质方面的异同点。

根据试验数据，绘制出风干样和饱和样的颗粒破碎级配曲线，分别如图 7 和图 8 所示。

一般采用描述破碎的量化指标来反映颗粒破碎的真实情况，本文采用了 Marsal^[14] 的破碎率 B_g 方法来进行颗粒破碎的量化研究。若用 ΔW_{ok} 和 ΔW_k 分别表示试验前后某个粒组的含量，则该粒组含量的变化量为 $(\Delta W_k - \Delta W_{ok})$ ，Marsal 对 B_g 的原

始定义为所有 $(\Delta W_k - \Delta W_{ok})$ 的正值之和。风干态和饱和态粗粒土在不同围压下的颗粒破碎量及破碎指标 B_g 如表 5 所示。

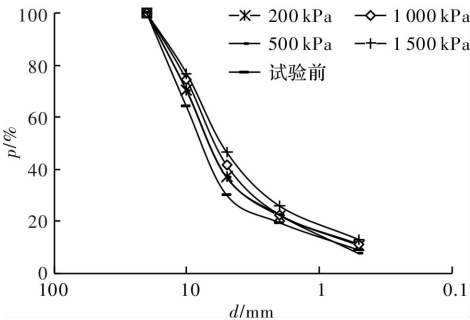


图 7 风干样的颗粒破碎级配曲线

Fig. 7 Particle breaking gradation curve of dry sample

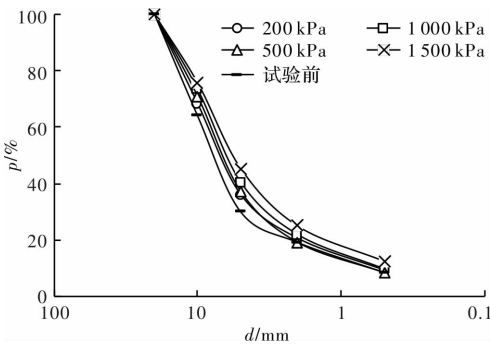


图 8 饱和样的颗粒破碎级配曲线

Fig. 8 Particle breaking gradation curve of saturated sample

表 5 颗粒破碎量及破碎率 B_g

Tab. 5 Particle breakage and breakage rate B_g

试样	围压/kPa	颗粒破碎量/%					$B_g/\%$
		20~10	10~5	5~2	2~0.5	<0.5	
饱和样	200	-6.436	-0.571	4.342	0.837	1.828	14.014
	500	-6.180	-0.571	3.851	4.228	-1.329	16.158
	1 000	-10.451	-1.193	8.403	0.820	2.421	23.288
	1 500	-12.931	-3.753	10.038	2.380	4.266	33.369
风干样	200	-4.342	-1.636	4.705	0.629	0.643	11.956
	500	-7.000	-0.242	7.282	-0.005	-0.035	14.565
	1 000	-9.398	-0.919	7.799	1.484	1.033	20.634
	1 500	-11.777	-3.575	9.602	1.784	3.966	30.704

根据表 5，对风干样和饱和样在不同围压下的颗粒破碎指标 B_g 进行拟合可得图 9。

由图 9 可知：试样颗粒破碎率与围压具有良好的线性相关性，颗粒破碎指标与围压的关系采用下列式(3)进行拟合：

$$B_g = C(\sigma_3/p_a) + D \tag{3}$$

式中： σ_3 、 p_a 分别表示试验围压和大气压， C 、 D 为拟合参数， C 表示直线的斜率，也就是颗粒破碎指标的增长趋势， D 表示纵坐标的截距，理论意义是围压为 0 时的颗粒破碎值。对于风干样， C 、 D 值分别为 1.436 和 7.974， R^2 可达 0.972，对于饱和样， C 、 D 值分别为 1.506 和 9.658， R^2 可达

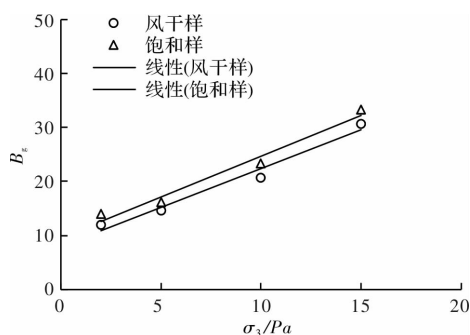


图9 不同围压下风干样和饱和样的颗粒破碎率

Fig. 9 Particle breaking rate of dry and saturated samples under different confining pressures

0.973。公式(3)表明随着围压的增大,颗粒破碎率不断增大,这显然是不可能的,在颗粒破碎到一定程度后便不再破碎^[15],本文对此并未做深入研究。

从表5和图9中都可得出在同一围压下,风干样的颗粒破碎率比饱和样的平均低2.24%,这与姚世恩^[16]所得相同应力水平下干样颗粒破碎率小于湿样颗粒破碎率的结论相似。表明在饱和过程中,粗粒土被水浸润,会使粗粒土强度降低,尤其对于大粒径的颗粒本身颗粒就存在爆破缺陷,水的进入会导致缺陷进一步扩展,导致强度下降很多,在试样剪切过程中就更容易发生破碎。

3 结论

对两河口堆石料进行了中三轴固结排水剪切试验,对比分析了风干样和饱和样的力学特性,得到如下结论:

(1)风干样峰值偏应力大于饱和样,围压越高,两者差值越明显,且峰值偏应力与围压呈幂函数关系。同一围压下,风干样的 φ_0 值比饱和样高 $3\sim 5^\circ$,但两者内摩擦角差值以幂函数关系随围压的增大呈下降趋势。

(2)在同一围压下,同一轴变对应的风干样品体应变和侧向应变要小于饱和样。

(3)试样颗粒破碎率随着围压的增加而线性增大。同一围压下,风干样的颗粒破碎率比饱和样平均低2.24%左右。

参考文献 References

[1] 黄斌,傅旭东,谭凡,等.含水率对滑带土强度及变形影响试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2613-2618.
HUANG Bin, FU Xudong, TAN Fan, et al. Experimental study of relationship between water content and strength or deformation of slip soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9):2613-2618.

[2] 陈东霞,龚晓南,马亢.厦门地区非饱和残积土的强度随含水量变化规律[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3484-3490.
CHEN Dongxia, GONG Xiaonan, MA Kang. Variation of the shear strength of Xiamen unsaturated residual soils with water content [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S1): 3484-3490.

[3] 保华富,屈智炯.粗粒料的湿化特性研究[J].成都科技大学学报,1989(1):23-30.
BAO Huaifu, QU Zhijiong. The study of wetting properties for coarse materials [J]. Journal of University of Science and Technology of Chengdu, 1989(1):23-30.

[4] 李鹏,李振,刘金禹.粗粒料的大型高压三轴湿化试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004(2):231-234.
LI Peng, LI Zhen, LIU Jinyu. Slaking test study of coarse aggregate under high triaxial stress condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(2): 231-234.

[5] 陶庆东,何兆益,贾颖.基于大三轴试验的土石混体强度特性与影响因素[J].科学技术与工程,2019,19(26):310-318.
TAO Qingdong, HE Zhaoyi, JIA Ying. Strength characteristics and influencing factors of soil-rock mixture based on large triaxial test [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(26):310-318.

[6] 汪良峰,汪斌,陈生水,等.尾矿库筑坝土石料大型三轴试验与力学模型研究[J].岩土工程学报,2018,40(S2):157-161.
WANG Liangfeng, WANG Bin, CHEN Shengshui, et al. Large-scale triaxial tests and modelling mechanical behaviors of soilrock fill materials for a mine tailings dam [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2):157-161.

[7] 卢廷浩.土力学[M].第二版.南京:河海大学出版社,2005.
LU Tinghao. Soil mechanics [M]. 2nd ed. Nanjing: Hohai University Press, 2005.

[8] 左永振,程展林,姜景山,等.粗粒料湿化变形后的抗剪强度分析[J].岩土力学,2008,29(S1):559-562.
ZUO Yongzhen, CHENG Zhanlin, JIANG Jingshan, et al. Analysis of shearing strength after wetting deformation of coarse-grained materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1):559-562.

[9] 左元明,张文茜,沈珠江.小浪底坝石料浸水变形特性研究[C]//第一届华东岩土工程学术大会论文集:无锡:[S.1].1990:8.
ZUO Yuanming, ZHANG Wenqian, Shen Zhujiang. Study on deformation characteristics of Xiaolangdi rockfill materials in Water [C]//Proceedings of the First East China Geotechnical Engineering Conference: Wuxi: [S.1]. 1990:8.