

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.015

水对库区路基不同密实度碎石土的弱化试验分析

刘东燕¹, 夏毓超^{1,2}, 侯 龙³, 黄 伟¹, 蒋海飞¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆交通大学 应用技术学院, 重庆 400074;
3. 重庆市万州区城乡建委, 重庆 万州 404100)

摘 要:准确测定不同含水率不同密实度下的碎石土抗剪强度参数是碎石土路基稳定分析的重要前提,选取受库水影响的公路路基碎石土土样,进行了不同试验条件下的碎石土室内直剪试验。结果表明:碎石土粘聚力随碎石土中细粒土含水量的增加呈先增加后减小的现象,而内摩擦角则随细粒土含水量的增大呈现初始缓慢降低,而后急剧减小的趋势。若制备土样时的预压力值不同,特别是该预压力值小于直剪试验时对土样施加的正应力值时,试验拟合所得的抗剪强度参数值会受到其影响,表现有所差异。

关键词:碎石土;抗剪强度参数;含水率;密实度

中图分类号:TU411 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2013)04-0094-07

Experimental Analysis of the Water Weaken Effect on Gravel Soil Roadbed Locating in the Reservoir Region with Different Compactedness

Liu Dongyan¹, Xia Yuchao^{1,2}, Hou Long³, Huang Wei¹, Jiang Haifei¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;
2. School of Applied Technology, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China;
3. Wanzhou District Commission of Urban-Rural Development, Wanzhou 404100 Chongqing, P. R. China)

Abstract: It is vital to get the accurate data of the shear strength parameters of gravel soil with different water content and compactedness before they conduct the stability analysis for gravel soil roadbed. Under several test conditions, a series of direct shear tests were performed by using some gravel soil samples obtained from a selected roadbed which is under the influence of water level fluctuation. The corresponding results show that the gravel soil cohesion increased as the water content of fine soil increases till it meets its peak value, then it will decrease as the water content keeps increase. However, the internal friction angle will decrease slowly with the increase of water content of fine soil in the initial phase, and then it will decrease rapidly as the water content keeps increase. And on the other hand, the fitted shear strength parameters calculated from the test data has been influenced by the pre-load values that used to prepare soil samples, especially for the condition that the pre-load value less than the normal stress value applied in the direct shear test. All in all, the fitted shear parameters will be controlled by the relationship among water content, pre-load value and normal stress.

Key words: gravel soil; shear strength parameter; water content; compactedness

收稿日期:2013-02-03

基金项目:三峡库区极端气候衍生公路灾害监测预警技术研究(2009318000001)

作者简介:刘东燕(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程、地质灾害等研究,(E-mail)liudy@cqu.edu.cn。

土-石混合物是一种常见的地质体,也是第四系堆积物的重要组成成分。现有的《工程地质手册》、岩土工程勘察规范以及其它规范中,该类地质体被称为碎石土^[1-2]。碎石土在中国也分布广泛,但区域性较为明显。重庆、四川、云南等省市所处的西南地区,由于其特殊的地形(山地)、地物(根系发达的植被较为发育)以及气候特征(雨水丰富),碎石土的分布就更为广泛一些。由于这些地质体具有量大、来源极其方便,工程实践又证明其经压实后具有高强度、低压缩性和良好渗透性等特点,故历来是路基施工的首选原材料。

通常情况下,碎石土是一种物理力学性质介于土体和岩体之间的一种特殊地质体,其性质与单纯的土体或者岩体有着显著地不同,其本身由于碎石与土之间的分布比例、胶结形式、碎石的粒径大小、排列方式、密实程度等因素对其抗剪强度参数的影响较土体和岩体更为复杂^[3-4],水库库区内的路基碎石土还会受到水位变动的影 响。当含石量较少时,其性质类似于土体,但随着含石量的逐渐增长,碎石土又会逐渐显现出岩体的一些性质。如何深入探究碎石土的性质特点,进而将研究结果用到工程实践之中,业已成为相关领域研究人员所关注的热点。如文献^[5]从大量的原位直剪试验结果统计说明,进行碎石土直剪试验时应充分考虑诸多影响因素;刘文平等^[6]通过对三峡库区不同含水量和不同含石量碎石土的剪切强度及参数的研究,确定了不同条件下(含石量、含水量)水对三峡库区碎石土强度的弱化作用;同样的,李维树等人也从不同含水量和不同含石量碎石土的剪切强度方面展开研究,提出了不同碎石含量下抗剪强度参数值随着含水率变化的经验型弱化公式^[3-7]。这些研究成果带来的积极效应,也逐渐在各个方面得到了印证^[8-9]。但对于工程施工人员来讲,大家更为关注的是碎石土在不同含水量条件下的密实程度以及相应的抗剪性能,因为该指标直接与路基土体的稳定性能相联系。为此,笔者将从不同土体密实度条件下,水对碎石土强度产生的弱化影响方面展开研究,以期所得结果能对已有成果进行有益的补充。

1 试验背景及设计

1.1 试验背景

对位于三峡库区内的公路而言,其碎石土路基将受到库区水位周期性变动(145~175 m)的影响,路基边坡的稳定性能也会随着碎石土内进(出)水量的不同而产生变动,水库蓄水后,很多路段还会产生

碎石土湿化沉降的现象。因而,含水量、密实度不同时碎石土的强度性能将是路基夯筑时的重要依据。基于此,依据本文的研究目的,在受库水影响的G318 巫同某路段随机取 6 组土样进行前期试验,原状碎石土见图 1,前期筛分试验所得结果及土样相应的级配曲线如图 2 所示。



图 1 原状碎石土

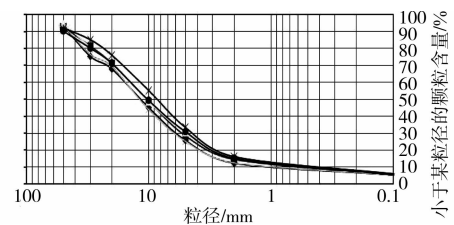


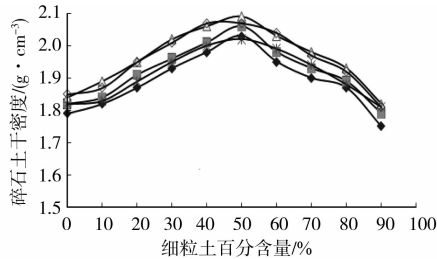
图 2 土样颗粒级配曲线图

1.2 试验设计

室内试验用碎石土来自原碎石土的级配筛分,其中碎石以风化碎裂的灰岩和砂岩为主,细粒土主要是粉质粘土。碎石土室内试验试件制作时,先将碎石及粘性土烘干,按试验设计级配进行配料。试验用级配采用 6 组土样自然级配的平均值,用等量替代法将粒径超大(>40 mm)的碎石用 5~40 mm 的颗粒进行替代,得到试验用的替代级配。用替代级配设计不同细粒土(粒径 <5 mm 的颗粒)含量的碎石土试样。由于碎石土中碎石具有吸水特性,替代级配碎石土中 5 mm 以上碎石部分按其质量的 5%加水以使其充分浸润,5 mm 以下细粒土按其质量的 5%、10%、15%、20%和 25%加水搅拌均匀,因此以细粒土的含水量来表征碎石土的整体含水量。再施加 200 kPa 的垂直压力持续至变形稳定后,量测试样高度,确定试样密度。将在三级法向应力条件下对试样进行直剪试验,依据试验结果可拟合得到碎石土样在不同含水量和密实度条件下的抗剪强度参数。

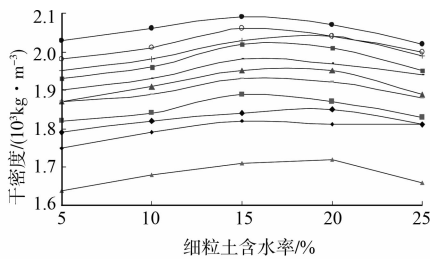
不同含水量、细粒土含量下的碎石土密度试验结果见图 3、图 4。从图 3 试验结果可以看出,在含水量不变时,碎石土密度会随着细粒土的含量增加而逐渐增加,当达到最大值时,又随着细粒土含量的

增加而逐渐减小。产生这种现象的原因在于:在垂直压力不变时(200 kPa),含量较少的细粒土无法填满碎石土中的碎石与碎石之间构建的碎石土骨架孔隙;随着细粒土含量增加,碎石土骨架之间的孔隙逐渐被填满,此时的碎石土密度达到最大值。



注: $w=5\%$ $w=10\%$ $w=15\%$ $w=20\%$ $w=25\%$

图 3 细粒土百分含量与干密度的关系曲线



注: $d5=5\%$ $d5=10\%$ $d5=15\%$ $d5=20\%$ $d5=25\%$
 $d5=30\%$ $d5=40\%$ $d5=50\%$ $d5=60\%$ $d5=80\%$
 $d5=100\%$

图 4 细粒土含水量与干密度的关系曲线

当细粒土含量进一步增加时,碎石被细粒土包裹后无法形成骨架。在 200 kPa 压力下制作成的碎石土样中,大部分碎石孔隙被密度较小的细粒土取

代,因而整个碎石土的密度会开始产生下降。由图 4 试验结果可知,在碎石土中细粒土含水量较小时,随着细粒土含水率的增加,碎石土密度也随之增加并达到最大值。在达到最大值之后,碎石土干密度则随细粒土含水率的增加而减小。碎石土最大干密度所对应的细粒土含水率即为碎石土的最优含水率(通常在细粒土的塑限左右),不同级配试验碎石土最大干密度对应于碎石土中细粒土的含水率有所不同,但均在 15%~20%之间。

2 不同含水量下的碎石土直剪试验

根据碎石土密度试验结果,不同级配碎石土最大干密度对应其细粒土的最优含水率在 15%~20%之间,因此在设计不同含水率下碎石土直剪试验时确定细粒土含水量为 10%、15%、20%及 25%。试验采用应变控制式直剪仪^[6],试件配料同前,尺寸为 250 mm×250 mm×250 mm。制作完成后装入剪切盒中并施加 200 kPa 的垂直压力预压至变形稳定后卸载。试验时分别施加 100、200、300 kPa 的法向应力,为了使试验进行中所产生的土样超孔隙水压力能够得以充分消散,待固结变形稳定后以 0.025 4 mm/min 的剪切速率进行试验。应控制剪切变形达到试样直径的 1/10 时方可停止试验。抗剪强度取值时,当剪应力 τ 与水平位移 ΔL 关系曲线上存在峰值或稳定值时,取峰值或稳定值作为抗剪强度。如无明显峰值,则取水平位移达到试件直径 1/15~1/10 处的剪应力作为抗剪强度。

表 1 碎石土室内直剪试验结果(细粒土含量为 20%)

| 细粒土含水量/% | 正应力对应的剪应力值/kPa | | | 粘聚力 c / kPa | 内摩擦角 φ (°) |
|----------|----------------|-------|-------|---------------|--------------------|
| | 100 | 200 | 300 | | |
| 10 | 84.3 | 168.6 | 221.0 | 21.3 | 34.4 |
| 15 | 84.3 | 153.6 | 219.1 | 17.5 | 34.0 |
| 20 | 58.1 | 101.2 | 138.6 | 18.8 | 21.9 |
| 25 | 48.7 | 78.7 | 108.6 | 18.8 | 16.7 |

表 2 碎石土室内直剪试验结果(细粒土含量为 40%)

| 细粒土含水量/% | 正应力对应的剪应力值/kPa | | | 粘聚力 c / kPa | 内摩擦角 φ (°) |
|----------|----------------|-------|-------|---------------|--------------------|
| | 100 | 200 | 300 | | |
| 10 | 84.3 | 163.0 | 224.8 | 16.9 | 35.1 |
| 15 | 80.5 | 151.7 | 209.8 | 18.1 | 32.9 |
| 20 | 60.0 | 95.5 | 134.9 | 21.9 | 20.5 |
| 25 | 45.0 | 67.4 | 93.6 | 20.1 | 13.7 |

表3 碎石土室内直剪试验结果(细粒土含量为60%)

| 细粒土含水量/% | 正应力对应的剪应力值/kPa | | | 粘聚力 c/ kPa | 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ |
|----------|----------------|-------|-------|------------|-------------------------|
| | 100 | 200 | 300 | | |
| 10 | 82.4 | 134.9 | 196.7 | 23.7 | 29.7 |
| 15 | 78.7 | 129.2 | 183.6 | 25.6 | 27.7 |
| 20 | 56.2 | 84.3 | 112.4 | 28.1 | 15.7 |
| 25 | 40.3 | 54.7 | 78.7 | 21.2 | 10.0 |

表4 碎石土室内直剪试验结果(细粒土含量为80%)

| 细粒土含水量/% | 正应力对应的剪应力值/kPa | | | 粘聚力 c/ kPa | 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ |
|----------|----------------|-------|-------|------------|-------------------------|
| | 100 | 200 | 300 | | |
| 10 | 78.7 | 116.1 | 168.6 | 31.2 | 24.2 |
| 15 | 74.9 | 111.3 | 157.3 | 32.1 | 22.4 |
| 20 | 48.7 | 63.7 | 80.5 | 32.5 | 9.0 |
| 25 | 39.3 | 51.0 | 64.1 | 26.7 | 7.0 |

表5 碎石土室内直剪试验结果(细粒土含量为90%)

| 细粒土含水量/% | 正应力对应的剪应力值/kPa | | | 粘聚力 c/ kPa | 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ |
|----------|----------------|-------|-------|------------|-------------------------|
| | 100 | 200 | 300 | | |
| 10 | 73.1 | 114.3 | 161.1 | 28.2 | 23.7 |
| 15 | 71.3 | 110.5 | 149.8 | 32.0 | 21.5 |
| 20 | 46.8 | 61.8 | 74.9 | 33.1 | 8.0 |
| 25 | 30.0 | 39.3 | 48.7 | 20.6 | 5.3 |

细粒土含量不同的碎石土中细粒土含水量与粘聚力、内摩擦角这2个强度参数的变化趋势见表1~表5和图5。

总体来看,细粒土的含水量对碎石土粘聚力的影响可分为两个阶段:在细粒土的含水量小于20%时,随细粒土含水量的增加,碎石土粘聚力呈缓慢增加的趋势。当细粒土的含水量大于20%时,再增加细粒土的含水量,碎石土粘聚力就呈现出较为明显的降低趋势。其原因在于,在同一预压力下,在细粒土含水量较小时随细粒土含水量的增加,碎石土体稳定时能达到的密实度也增加,当达到最优含水量时,碎石土密度达到最大值,此时粘聚力也达到峰值。当超过最优含水量时,随细粒土含水量的增加,碎石土密实度降低,密度也随之下降低,粘聚力相应减少,从而呈现出粘聚力随含水量的增加先增加后减小的现象。而细粒土含水量与内摩擦角之间会呈现出不同的发展趋势:当细粒土含水量较小时,碎石土内摩擦角随细粒土含水量的变化而降低的趋势并不明显。当细粒土含水量超过15%之后,随碎石土含水量增加,内摩擦角急剧降低。这主要是由于土粒

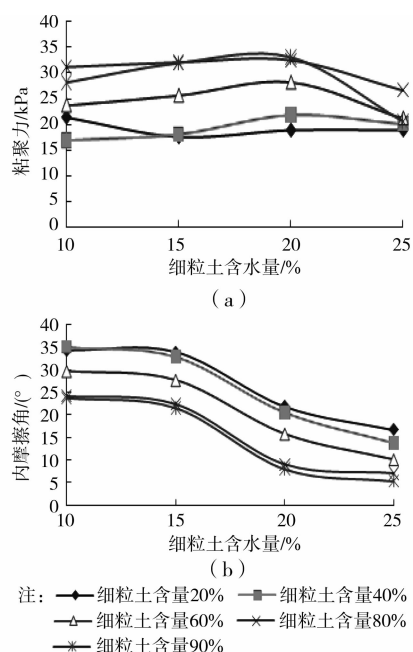


图5 细粒土含水量与抗剪强度参数之间的关系曲线

遇水软化,本身力学性质下降,同时土体状态发生改变,由硬塑进入可塑状态,降低了不同粒径土(石)体

颗粒之间的摩阻力,从而进一步导致碎石土内摩擦角的降低。由此,可认为碎石土中的细粒土含量及相应的细粒土含水量是决定整个碎石土强度和宏观变形性能的关键因素。

碎石土这样的性质特征得到了一些学者的试验验证^[10-13],其也被认为是碎石土所特有的性质。如对处于一定含水量范围内的粘质土体而言,随着含水量的逐渐增加,土体粘聚力会逐渐降低,而土体内摩擦角却变化不大,也即土体强度的变化主要是通过其粘聚力的变化来体现的^[14-16]。这说明水对碎石土和土体的强度产生弱化效应的机理是不同的。但 2 种地质体之间还是存在共同的力学特性的,也即在密实度保持不变的情况下,碎石土强度值与粘质土体

强度值均会与含水量存在非线性的反比例关系。

3 不同密实度下碎石土直剪试验

路基碎石土密实度与其抗剪强度参数有着密切的关系,为考虑不同密实度对碎石土路基的抗剪强度的影响,分别采用 300、400 kPa 的预压(应)力制备试验试件,测定细粒土含水量为 10%、15%、20% 及 25% 时的抗剪强度指标,并与 200 kPa 预压力预压试件的抗剪强度试验数据进行对比。考虑到工程实际中碎石土土石比多在 30%~70% 之间,因此选择了细粒土含量 40% 和 60% 的上述试件试验级配,其它试验设计及试验方案同上。试验所得结果见表 6~9 和图 6、7。

表 6 碎石土室内直剪试验结果 (300 kPa 预压,细粒土含量为 40%)

| 细粒土含水量/% | 正应力对应的剪应力值/kPa | | | 粘聚力 c /kPa | 内摩擦角 φ (°) |
|----------|----------------|-------|-------|--------------|--------------------|
| | 100 | 200 | 300 | | |
| 10 | 90.6 | 166.0 | 222.4 | 27.9 | 30.2 |
| 15 | 88.5 | 156.1 | 211.9 | 28.8 | 28.9 |
| 20 | 68.0 | 102.5 | 136.6 | 33.8 | 18.3 |
| 25 | 52.6 | 71.2 | 91.1 | 33.1 | 10.8 |

表 7 碎石土室内直剪试验结果 (300 kPa 预压,细粒土含量为 60%)

| 细粒土含水量/% | 正应力对应的剪应力值/kPa | | | 粘聚力 c /kPa | 内摩擦角 φ (°) |
|----------|----------------|-------|-------|--------------|--------------------|
| | 100 | 200 | 300 | | |
| 10 | 91.8 | 142.2 | 200.3 | 36.3 | 26.4 |
| 15 | 86.6 | 134.4 | 181.0 | 39.6 | 23.8 |
| 20 | 60.7 | 85.6 | 110.5 | 35.8 | 13.7 |
| 25 | 48.6 | 60.2 | 75.3 | 34.7 | 7.6 |

表 8 碎石土室内直剪试验结果 (400 kPa 预压,细粒土含量为 40%)

| 细粒土含水量/% | 正应力对应的剪应力值/kPa | | | 粘聚力 c /kPa | 内摩擦角 φ (°) |
|----------|----------------|-------|-------|--------------|--------------------|
| | 100 | 200 | 300 | | |
| 10 | 94.1 | 167.6 | 227.0 | 30.0 | 30.4 |
| 15 | 91.2 | 159.6 | 216.8 | 30.3 | 29.3 |
| 20 | 71.4 | 105.2 | 141.1 | 36.2 | 18.5 |
| 25 | 55.9 | 74.8 | 95.4 | 35.9 | 11.0 |

表 9 碎石土室内直剪试验结果 (400 kPa 预压,细粒土含量为 60%)

| 细粒土含水量/% | 正应力对应的剪应力值/kPa | | | 粘聚力 c /kPa | 内摩擦角 φ (°) |
|----------|----------------|-------|-------|--------------|--------------------|
| | 100 | 200 | 300 | | |
| 10 | 94.8 | 145.3 | 206.7 | 37.0 | 27.0 |
| 15 | 89.1 | 138.5 | 187.4 | 40.0 | 24.6 |
| 20 | 63.4 | 88.7 | 116.8 | 39.4 | 14.0 |
| 25 | 49.2 | 55.3 | 60.5 | 37.7 | 7.7 |

从 300、400 kPa 预压力下所制备试件在各含水率时的抗剪强度值可以看出,随着制备试件预压力的增加,抗剪强度值相应增加。但需要注意的是,当试验正应力达到 300 kPa 时,采用 300 kPa 预压试件的抗剪强度值与 200 kPa 预压试件的抗剪强度值基本相等。原因在于,采用 300 kPa 预压的压力值与此时采用 200 kPa 预压制备试件的试验正应力值相等,试验时 2 种试件均承受了同等正应力并且达到固结稳定,试件密实度及密度都基本相等,从而表现出剪应力试验值差异较小。

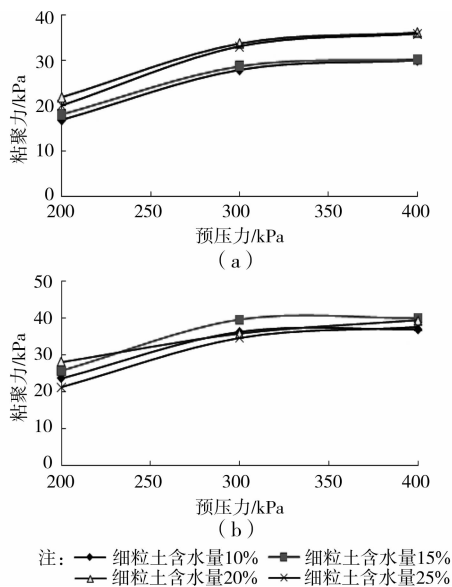


图 6 预压力与粘聚力关系曲线

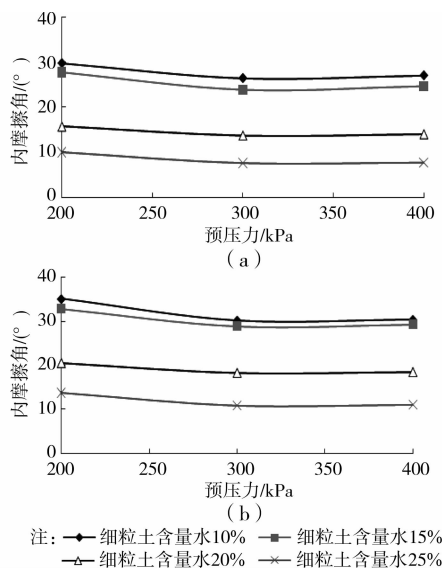


图 7 预压力与内摩擦角关系曲线

从不同含水率及密实度下的抗剪强度参数随压力值的变化趋势看出,当制备试件时的预压力由 200 kPa 增大到 300 kPa 时,不同含水量下的碎石土

粘聚力明显增大,但内摩擦角有所降低。当制备试件时的预压力由 300 kPa 增大到 400 kPa 时,不同含水量下的粘聚力继续缓慢增加,但此时内摩擦角不再降低,还稍有增加。其原因在于,采用 300 kPa 对试件预压时,相对 200 kPa 预压,在试验正应力为 100 及 200 kPa 时,试件的密实度高,密度大,

在试验中表现出剪应力增加。但当试验正应力达到 300 kPa 时,采用 300 kPa 预压试件的正应力值与此时 200 kPa 预压试件时的试验正应力值相等,此时对于两试件来讲,其在试验开始时的密实度就基本相同,从而表现出剪应力试验值基本相同。而在所得试验结果基础上对采用 300 kPa 预压试件的粘聚力和内摩擦角进行拟合计算时,导致拟合出的粘聚力大幅增加,内摩擦角却有所降低。当进一步提高试件的预压力至 400 kPa,试验施加的各正应力值均小于预压正应力值,400 kPa 预压的试件的密实度在各试验正应力下相对 300 kPa 预压的试件密实度均大,从而表现出粘聚力和内摩擦角都有所增加。

4 结论

以三峡库区路基现场的碎石土为分析对象,对碎石土在不同含水率和不同密实度的剪切强度及强度参数变化规律进行研究,得到如下结论:

1) 在同一级配细粒土含量中,碎石土内细粒土的含水量在到达最优含水量之前,碎石土粘聚力会随着含水量的增加逐渐增大,当含水量到达最优含水量之后,碎石土粘聚力随着含水量的增加开始呈现减小的现象。当细粒土含水量超过 15% 之后,碎石土遇水软化效应明显,内摩擦角会急剧降低。

2) 不同细粒土含量对碎石土路基的密实度有重要影响,当细粒土含量达 50% 左右时,碎石土达到最大干密度。在同一细粒土含水量中,碎石土抗剪强度随着其密实度的增加而增强。

3) 不同密实度下的碎石土室内直剪试验结果表明,室内直剪试验制备试件时的预压力值不同,特别是制备试件时预压力值小于试验正应力值时,试验拟合得到的抗剪强度参数会受到其影响,表现有所差异。

参考文献:

- [1] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

- [3] 李维树, 丁秀丽, 邹爱清, 等. 蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(07):1338-1342.
Li W S, Ding X L, Wu A Q, et al. Shear strength degeneration of soil and rock mixture in Three Gorges Reservoir bank slopes under influence of impounding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1338-1342.
- [4] 苏爱军, 王建锋. 三峡工程重庆库区巫山新城区破碎岩体与滑坡群成因机制和治理利用[R]. 水利部长江勘测技术研究所、中国科学院力学研究所, 2005.
- [5] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6):1270-1277.
Xu W J, Hu R L, Tan R J, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of longpan in Tiger-leaping Gorge area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6):1270-1277.
- [6] 刘文平, 时卫民, 孔位学, 等. 水对三峡库区碎石土的弱化作用[J]. 岩土力学, 2005, 26(11):1857-1861.
Liu W P, Shi W M, Kong W X, et al. Weakening effect of water on gravel-soil in Three Gorges Reservoir area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1857-1861.
- [7] 李维树, 夏晔, 乐俊义. 水对三峡库区滑带(体)土直剪强度参数的弱化规律研究[J]. 岩土力学, 2006(Sup2): 1170-1174.
Li W S, Xia Y, Le J Y. Research on softening rule of direct shear parameters of soil of slide zone in Three-Gorge Reservoir region caused by water [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(Sup2):1170-1174.
- [8] Hsieh C W, Chen G H, Wu J H. The shear behavior obtained from the direct shear and pullout tests for different poor graded soil-geosynthetic systems [J]. Journal of Geoenvironment, 2011, 6(1):15-26.
- [9] 许建聪, 尚岳全. 降雨作用下碎石土滑坡解体变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1):106-112.
Xu J C, Shang Y Q. Study on mechanism of disintegration deformation and failure of debris landslide under rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1):106-112.
- [10] 欧阳振华, 李世海, 戴志胜. 块石对土石混合体力学性能的影响研究[J]. 实验力学, 2010, 25(1):61-67.
Ouyang Z H, Li S H, Dai Z S. On the influence factors of mechanical properties for soil rock mixture [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1): 61-67.
- [11] 廖秋林, 李晓, 李守定. 土石混合体重塑样制备及其压实特征与力学特性分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 385-391.
Liao Q L, Li X, Li S D. Sample remodeling, compactness characteristic and mechanical behaviors of rock-soil mixtures [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3):385-391.
- [12] 武明. 土石混合非均质填料力学特性试验研究[J]. 公路, 1997(1): 40-49.
Wu M. Experimental study of mechanical features on the heterogeneous filling of rock and soil aggregate [J]. Highway, 1997(1): 40-49.
- [13] Likos W J, Wayllace A, Godt J, et al. Modified direct shear apparatus for unsaturated sands at low suction and stress [J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 33(5):1-13.
- [14] 申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347-1351.
Shen C N, Fang X W, Wang H W, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5):1347-1351.
- [15] Godt J W, Baum R L, Lu N. Landsliding in partially saturated materials [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36: 2403-2408.
- [16] 周宏益, 孟莉敏, 刘桂琴, 等. 山区机场高填方碎石土压实性状研究[J]. 铁道勘察, 2009(1):66-70.
Zhou H Y, Meng L M, Liu G Q, et al. Study on compaction properties of high embankment crushed stones at mountainous airport [J]. Railway Surveying, 2009(1):66-70.

(编辑 王秀玲)