

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.03.018



含水率和颗粒级配对稍密碎石土抗剪性能及地基承载力的影响

卢黎¹, 王华飞¹, 胡岱文²

(1. 重庆大学 土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;
2. 重庆房地产职业学院, 重庆 401331)

摘要: 碎石土因特殊的工程特性而被科研人员关注, 但对大粒径、粉质粘土填充、稍密状态下碎石土的力学性能涉足较少。根据该类型碎石土特点及大量勘察结果配置出两种比较典型级配的稍密碎石土, 通过大型直剪试验仪测定了不同含水率状态下碎石土试样的抗剪强度, 绘制剪应力与水平位移的关系图, 通过一元回归得出稍密碎石的抗剪强度指标 c 、 φ 值, 分析了不同含水率、不同级配对稍密碎石土抗剪性能的影响。结果表明: 随着含水率的增大, 碎石土粘聚力总体呈减小趋势, 但变化趋势具有显著的阶段性且和粉质粘土的含量有关, 含水率变化对碎石土内摩擦角的影响较小。用规范推荐方法计算了该类型碎石土地基承载力, 并与地方规范经验取值和勘察工程实践取值进行了对比, 结果表明: 含水率对地基承载力影响较大, 且与碎石土填充物的粉质粘土含量有关, 粉质粘土含量越高, 承载力影响越大。

关键词: 粉质粘土碎石; 含水率; 抗剪强度; 地基承载力

中图分类号: TU472.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)03-0138-07

Influence of moisture content and grain composition on shear strength of slightly dense gravel soil and bearing capacity of foundation

Lu Li¹, Wang Huafei¹, Hu Daiwen²

(1. College of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Real Estate College, Chongqing 401331, P. R. China)

Abstract: Because of the special engineering characteristics of the gravel soil, it causes more and more attention. However, there are less research about the mechanical properties of the crushed stone soil with large particle size, silty clay and slightly dense state. According to the characteristics of this type of gravel soil and the results of statistical survey, two typical gradation of slightly dense gravel soil are determined. The shear strength of gravel soil specimen under different moisture content is measured by large direct shear apparatus, and the relationship diagram of the shear force and the horizontal displacement under different water cut rate is drawn. The shear strength indexes c , φ value are determined by univariate

收稿日期: 2016-05-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费(106112014CDJZR200010)

作者简介: 卢黎(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程研究, (E-mail)644607979@qq.com。

Received: 2016-05-10

Foundation item: the Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 106112014CDJZR200010)

Author brief: Lu Li(1977-), PhD, associate professor, main research interest: geotechnical engineering, (E-mail)644607979@qq.com.

regression and the impact of moisture content and gradation on the shear strength is analyzed. The results show that with the increase of water content, the cohesive strength of the gravel soil is decreasing, but the change trend is significant and related to the content of cohesive soil. The change of water content has little influence on the friction angle of the gravel soil. Using the specification method to calculate the bearing capacity of foundation, and comparing with the experience value, the results show that the influence on the moisture content of foundation bearing capacity, and is associated with the silty clay content of gravel soil filling.

Keywords: silty clay gravel; water content; shear strength; foundation bearing capacity

碎石土是指粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过总质量 50% 的土,在自然界分布十分广泛^[1-2]。碎石土的地基承载力与碎石土体抗剪强度的力学参数有关。碎石土边坡的剪切破坏,与滑坡岩土体的抗剪强度直接相关^[3]。因此,科学地开展土力学试验,准确地获取碎石土的抗剪强度指标,客观、全面地认识碎石土的抗剪性能,是解决工程中碎石土强度问题的基础,对碎石土地基承载力分析和碎石土边坡稳定性整治具有十分重要的作用^[4-5]。

碎石土的抗剪强度受多种因素共同控制,其大小与碎石土的粒度成分、填充物、含水率、密实程度等因素有关^[6]。Simoni 等^[7]、Mirghasemi 等^[8]的研究表明:含石量对碎石土的工程力学特性具有重要影响,碎石土的变形破坏发展特征受其内部含石量控制,进而影响着碎石土宏观的物理力学性质。刘文平等^[9]的研究表明:碎石土含水量不同,碎石引起强度变化的临界含石量也不同。碎石含量不变时,粘结力 c 值随含水量变化幅度不大,但内摩擦角 φ 值随含水量变化会有较大变化。Medley^[10]、Sonmez 等^[11-12]分别采用水泥土等作为填充材料、用块石作为骨料按照一定的含石量及定向性制作试件进行三轴剪切试验研究。时为民等^[13]对三峡库区不同碎石含量、不同含水量的碎石土剪切强度进行了试验研究。彭东黎等^[14]的研究表明:碎石土粘聚力的大小随着含石量的增加,表现出先逐渐增大后减小的趋势,内摩擦角随着含石量的增大表现出逐渐增大的趋势;粘聚力随含水量的增大有一定程度的增大,超过碎石土中细粒土塑限含水量后逐渐减小。另一方面,唐晓松等^[15]的研究表明:碎石土地基在水长期浸泡下其承载力大大降低,可达 30% 左右。聂如松等^[16]的研究表明:浸水后碎石土粘聚力幅度下降较大,离散性大;内摩擦角变化相对比较稳定,且降幅不大。上述研究对大粒径、粉质粘土填充、稍密状态下碎石

土的力学性能涉及较少,笔者主要研究该类型碎石土。此类型碎石土主要分布在重庆东北地区,对该地区勘察发现:该地区分布的碎石土中有 90% 以上为稍密状态,碎石土中填充物为粉质粘土的比例在 95% 左右,其碎石含量在 50%~70%,且碎石粒径一般在 10 mm 以上。该地区碎石土可归纳为稍密状态、大粒径、粉质粘土填充。

稍密碎石土地基承载力在地方规范中的取值范围较大,对取值相关因素的研究不多。同时,中小工程没有进行平板载荷试验的条件,工程实践中取值根据地方规范指导并结合当地经验,造成地基承载力取值不安全或过于保守,导致取值可靠性不高。为解决这一问题,笔者针对粉质粘土填充碎石土的工程特性和地基承载力进行研究,通过测定不同含水率下的 c 、 φ 值,根据建筑地基基础设计规范指导公式计算出地基承载力,并与地方规范关于稍密碎石土承载力取值对比。

1 试验方案

根据该类碎石土特点,现场配置两种不同级配的粉质粘土填充稍密碎石土,通过大型直剪试验仪测定了不同含水率状态下碎石土试样的抗剪强度。以往碎石土的研究一般是做三轴围压颗粒破碎性试验,试验尺寸效应很明显,且很少考虑不同粒径级配下颗粒破碎对抗剪强度的影响。大型直剪仪试样尺寸较大,可以在最大程度上保留土样的原始级配,弱化尺寸效应,且直剪试验操作简便、适用范围广、应用最为普遍^[17]。

1.1 试验仪器

采用 ZY50-2G 大型直接剪切试验机(见图 1),试样尺寸: $\Phi 504.6 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ (面积 2 000 cm^2),最大水平推力:700 kN(水平应力 0~3.5 MPa),最大垂直油缸行程:120 mm。轴向配备行程为 75 mm 的位移计。



图 1 直剪仪

Fig. 1 The direct shear apparatus

1.2 试件制备

1.2.1 填充物的塑液限实验 根据现场碎石土特点,采用粉质粘土作为碎石土填充物,填充物塑液限用光电式液塑限联合测定仪进行。在双对数坐标纸上绘制关系曲线如图 2 所示。

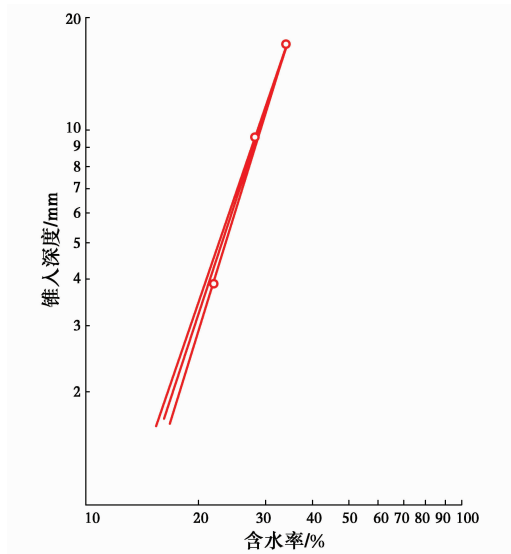


图 2 含水率与锥入深度的关系曲线
Fig. 2 Relation curves between water content and cone penetration depth

由图 2 可知,锥入深度为 2 mm 时的含水率为 17.6%,锥入深度为 17 mm 时的含水率为 33.5%。实验所用的细粒土的塑限为 17.6,液限为 33.5。故其塑性指数为 15.9,土样为粉质粘土。

1.2.2 碎石土级配设计 按勘察数据配置两种典型级配的碎石土。碎石土的级配指标见表 1,两种碎石土的颗粒曲线见图 3、图 4。

表 1 碎石土的级配指标

Table 1 Grading index of gravel soil

级配	d_{30}	d_{60}	d_{10}	c_u	c_c
一	5	25	1	25	1
二	10	30	2	15	1.67

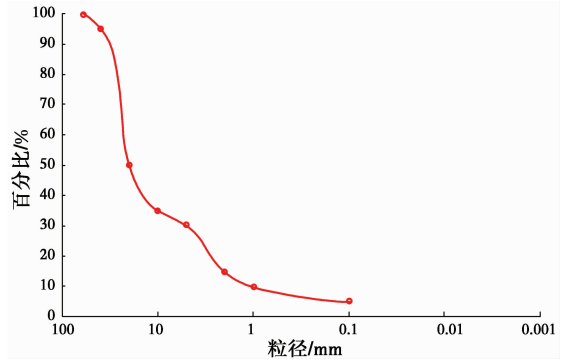


图 3 级配一的颗粒曲线

Fig. 3 Particle curve of gradation 1

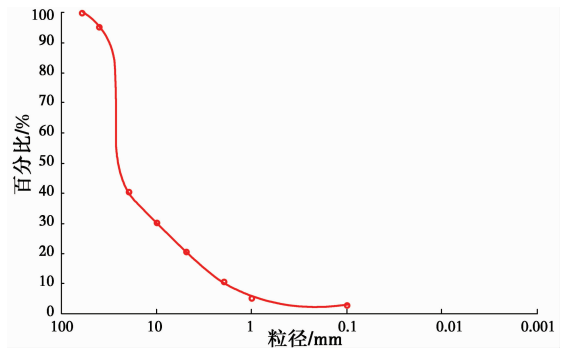


图 4 级配二的颗粒曲线

Fig. 4 Particle curve of gradation 2

1.2.3 含水率制定 根据设计含水率以及风干含水率计算出加水量。称取风干土样 160 kg,加水量按式(1)计算。

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01\omega_0} 0.01(\omega' - \omega_0) \quad (1)$$

式中: m 为风干土样总质量,kg; m_w 为土样所需加水量,kg; ω_0 为风干土样总含水率,%; ω' 为制样含水率,%。

分别配置出含水率为 6%、9%、12% 的碎石土。

1.2.4 密实度设计 由于试验为室内试验,通过相对密度对碎石土的密实性进行判别。当 $0 < D_r < 1/3$ 时,为松散;当 $1/3 < D_r < 2/3$ 时,为中密;当 $2/3 < D_r < 1$ 时,为密实。设计状态为稍密,即 $D_r = 1/3$,对应的为稍密状态。

2 试验结果及分析

2.1 碎石土剪切试验结果

对土样进行大型剪切试验,以获取原状土样的力学参数,试验垂直压力分别为 100、200、300 kPa,按照土工试验规程,在剪切实验中,剪切位移取剪切盒直径的 1/15~1/10。试验用剪切盒直径为 500 mm,剪切位移最大值应是 50 mm,但为进一步反映

土样剪切破坏后的残余强度,试验剪切位移在 60 mm 以上,试验结果如图 5 所示。

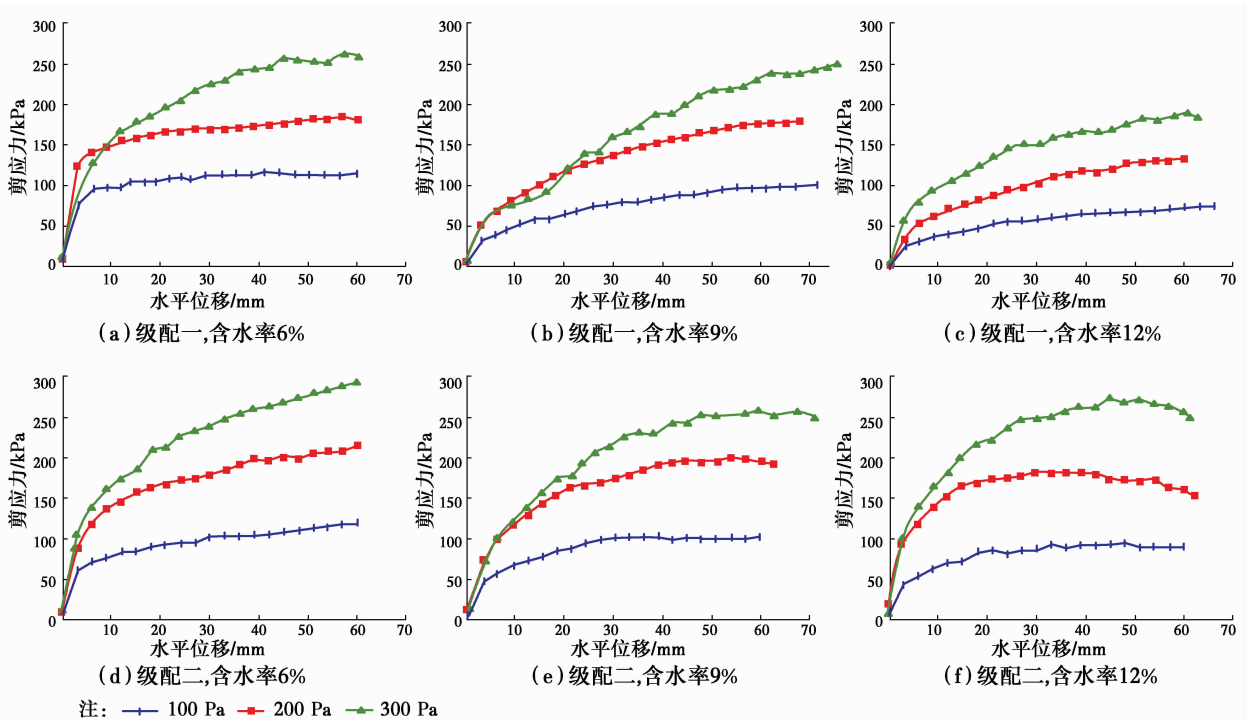


图 5 剪应力和水平位移关系

Fig. 5 Shear stress and horizontal displacement relationship

在剪应力和水平位移关系图中找出不同压力下对应的最大剪应力,绘出正应力与剪应力的一次函数表达式(见图 6)并求出函数解析式,计算出 c 、 φ 值(见表 2)。

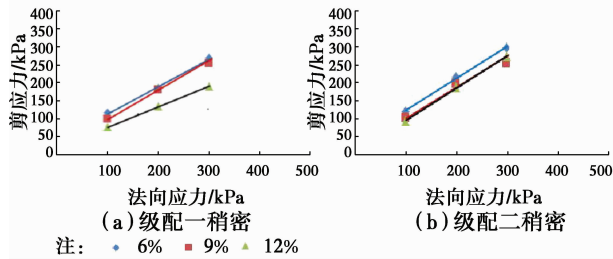


图 6 法应力与剪应力关系曲线图

Fig. 6 Normal stress and shear stress relationship diagram

表 2 法应力与剪应力拟合公式表

Table 2 Normal stress and shear stress table fitting formula

级配	含水率/%	拟合公式	c /kPa	φ /($^{\circ}$)
级配一	6	$y=0.7125x+43.3$	43.3	35.47
	9	$y=0.735x+14.5$	14.5	36.31
	12	$y=0.57x+13.8$	13.8	29.68
级配二	6	$y=0.895x+34.3$	34.3	41.83
	9	$y=0.822x+21.3$	21.3	39.42
	12	$y=0.905x+5.7$	5.7	42.15

2.2 剪切试验结果分析

2.2.1 抗剪强度变化快慢与剪切位移关系 由图 5 的剪应力与水平位移关系曲线图可知,在剪切开始到土样破坏过程中,开始阶段剪应力随位移增大而迅速增大,在剪切位移为 5 mm 左右时剪切强度已经达到了 90% 以上,而后缓慢增加到最高点,土体破坏。随位移的不断加大,剪应力缓慢减小,且没有明显的下降趋势。

2.2.2 含水率对粘聚力的影响 从表 2 可以看出,当含水率从 6% 增加到 12% 时,级配一含粉质粘性土碎石的粘聚力由 43.3 kPa 下降到 13.8 kPa,下降值达到 29.5 kPa。级配二含粉质粘性土碎石的粘聚力由 34.3 kPa 下降到 5.7 kPa,下降值达到 28.7 kPa。总体来讲,碎石土随着含水率的增大,粘聚力减小,且下降显著。粘聚力随含水率升高而下降的原因,一方面由于碎石土含水率增加,导致土体中自由水增多,结合水对土颗粒连接力下降;另一方面,土的粘聚力是土颗粒间引力和斥力综合作用的结果,粘聚力主要由碎石土中的粉质粘性土决定。土颗粒间的水膜联结和胶结作用对粘聚力的产生具有重要的作用,含水率越大,颗粒间的水膜联结力越小。随着含水率的增大,水膜联结力逐渐减小。

2.2.3 含水率对内摩擦角的影响 由表 2 可知,相

对于粘聚力,内摩擦角的变化不大。当碎石土的含水率从 6% 增加到 12%,级配一的内摩擦角仅在 36.31°~29.68° 之间变化,级配二的内摩擦角在 42.15°~39.42° 之间变化,内摩擦角的幅度较小。土的内摩擦角与土的颗粒结构、大小及密实度密切相关。由于所研究的碎石土为稍密状态下含粉质粘土碎石,粗粒含量较高,相对于细粒含量高的粘性土以及粒径小的碎石土,含水率变化不会引起其颗粒结构、大小及密实度的显著变化,故含水率变化对碎石土内摩擦角的影响较小。

2.2.4 含石量及填充物对抗剪性能的影响 级配一中粉质粘土填充物含量比级配二高,其含石量比级配二低。由表 2 可知,同种含水率下,级配一比级配二的粘聚力要大,内摩擦角要小。碎石土的粘聚力主要由粒径小的粘性土提供,内摩擦角主要由粒径较大的碎石提供,致使在碎石土中粉质粘土填充含量越高,粘聚力越大。碎石土中的碎石含量越高,内摩擦角越大。随着含水率升高,级配一碎石的粘聚力下降幅度大,内摩擦角变化幅度也比较大,表明级配一的抗剪性能受含水率影响明显。含水率对碎石土的抗剪性能影响与其物质组成有关,碎石土中含粉质粘土越多,碎石含量越少,含水率升高对其抗剪强度削弱越明显。

3 稍密碎石土地基承载力分析

建筑地基承载力是勘察设计的首要任务,也是基础选型和基础设计的重要依据。碎石土地基承载力一般需要通过勘察单位根据原位试验和土工试验的结果给出指导的地承载力。在工程实践中,中小工程一般只是通过地方规范经验取值。已知该地基碎石土体的 c, φ 值,可由式(2)计算地基承载力

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k \quad (2)$$

利用式(2)计算出该地区不同含水率下碎石土地基的承载力,并与勘察报告根据该地方规范经验在稍密下的碎石土承载力取值取进行比较,分析勘察取值的安全性。统计该地区勘察结果,部分地基承载力见表 3。根据试验得出该地区土体 c, φ 值,并取多组基础宽度 b 值、基础埋深 d 值计算承载力,计算结果见表 4。

表 3 地质勘察结果统计表

Table 3 The regional geological survey report statistical

工程项目	密实度	地基承载力特征值/kPa
项目一	稍密	210
项目二	稍密	220
项目三	稍密	230
项目四	稍密	240

表 4 地基承载力特征值表

Table 4 Characteristic value of subgrade bearing capacity table

基础宽度/m	基础埋深/m	级配一承载力特征值/kPa			级配二承载力特征值/kPa		
		6%	9%	12%	6%	9%	12%
3	0.5	720.8	465.6	261.0	826.4	660.3	490.2
2	0.5	646.8	385.3	227.2	718.7	554.4	382.5
1	0.5	609.7	345.1	210.3	664.9	501.5	328.6
3	1	796.1	543.9	311.9	927.1	758.7	590.8
2	1	722.0	463.6	278.1	819.4	652.9	483.1
1	1	685.0	423.5	261.2	765.5	599.9	429.3
3	1.5	871.4	622.2	362.9	1 027.7	857.1	691.5
2	1.5	797.3	541.9	329.1	920.0	751.3	583.8
1	1.5	760.3	501.8	312.2	866.2	698.4	529.9

从数据分析可知,级配一碎石土含水量由 6% 上升到 9% 时,土体承载力特征值下降了约 255 kPa;碎石土含水量由 9% 上升到 12% 时,土体承载力特征值下降了约 195 kPa。级配二碎石土含水量由 6% 上升到 9% 时,土体承载力特征值下降了约 165 kPa;碎石土含水量由 9% 上升到 12% 时,土体承载力特征值下降了约 165 kPa。级配一与级配二

承载力分析可知:含水率对碎石土地基承载力影响很大,同种含水率下级配二的承载力比级配一高,随含水率升高时,级配一土体承载力特征值下降幅度比级配二大。由于 φ 值对承载力的影响作用明显,级配二的含石量比级配一高,同种含水率下对应的 φ 值比级配一高。级配一碎石土中粉质粘土填充含量高,含水率升高时 c, φ 值下降幅度大,导致碎石土

地基承载力下降幅度较大。当碎石土中粉质粘土填充含量高,含水率对承载力的影响程度越明显。

该地区承载力是根据重庆地方规范关于稍密碎石土地基承载力特征值的取值,取值范围在 200~320 kPa 之间,勘察结果给出的承载力取值(见表 3)在范围内,通过 c 、 φ 值计算得到的承载力(见表 4)与重庆地方规范的经验取值比较,勘察报告关于地基承载力特征值的取值偏安全。但在表 4 中,当基层宽 1 m、埋深在 0.5 m 时,基层承载力特征值只有 210.3 kPa,已经接近重庆地方规范的经验取值的下限,所以,在地基宽度较小,埋深浅且所处位置的地基含水率比较高时,根据重庆地方规范及勘察报告中关于地基承载力特征值的经验取值时,承载力可能被高估。

4 结论

1)含水率对该地区含粉质粘性土碎石的粘聚力影响较大,随着含水率的增大,粘聚力下降明显。含水率对碎石土的内摩擦角的影响较小。

2)对比两种级配含水率变化对其抗剪强度的影响及承载力进行了分析,碎石土中含石量高,内摩擦角较大;含粉质粘土填充量高,粘聚力较大;碎石土的碎石含量越少,填充物的粉质粘土含量越高,含水率对抗剪强度削弱程度越明显。

3)通过地基规范公式计算地基承载力与勘察报告给出的碎石土承载力,以及与重庆地方规范经验取值对比可知,勘察报告给出的地基承载力特征值一般是偏安全的。但是,如果该地区含水率较高,地基宽度及埋深较小时,在根据重庆地方规范的经验取值时,承载力可能被高估,勘察报告中关于地基承载力特征值取值的可靠度较低。

参考文献:

[1] 董辉,陈玺文,傅鹤林,等.堆积碎石土剪切特性的三轴试验[J].长安大学学报(自然科学版),2015,35(2):60-66.
DONG H, CHEN X W, FU H L, et al. Three axis test on shear properties of stacked stone [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(2):60-66. (in Chinese)

[2] 张常光,赵均海,杜文超.岩石中间主应力效应及强度理论研究进展[J].建筑科学与工程学报,2014,31(2):6-9.
ZHANG C G, ZHAO J H, DU W C. Advances in rock for intermediate principal stress effect and strength

theory [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014,31(2):6-9. (in Chinese)

- [3] 李维树,丁秀丽,邬爱清,等.蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度[J].岩土力学,2007,28(7):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. (in Chinese)
- [4] HU L Q, HAO J X, WANG L B. Laboratory evaluation of cement treated aggregate containing crushed clay brick [J]. Journal of Traffic and Transportation, 2014, 1(5): 371-382.
- [5] 申存科.粗粒土的颗粒破碎特性与本构关系研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2009.
SHEN C K. Breakage behavior of coarse rain soil and research on its constitutive relation [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] 杨继红,董金玉,黄志全,等.不同含石量条件下堆积体抗剪强度特性的大型直剪试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(2):161-166.
YANG J H, DONG J Y, HUANG Z Q, et al. Large-scale direct shear tests on accumulation body with different stone contents [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 161-166. (in Chinese)
- [7] SIMONI A, HOULSBY G T. The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(3): 523-549.
- [8] MIRGHASEMI A, ROTHENBURG L, MATYAS E L. Influence of particle shape on engineering properties of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles [J]. Geotechnique, 2002, 52(3): 209-217.
- [9] 刘文平,时为民,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. The water of the Three Gorges Reservoir Area of gravel soil weakening effect [J]. Rock and Soil Mechanic, 2005, 26(11): 1857-1861. (in Chinese)
- [10] MEDLEY E W. Observation on tortuous failure surface in bimrocks [J]. Felsbau, Rock and Soil Engineering Journal for Engineering Geology Geomechanics and Tunneling, 2004,22(5): 35-43.
- [11] SONMEZ H, TUNCA Y E, GOKCEOGLU C. Models to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity for Ankara Agglomerate [J].

- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 717-729.
- [12] SONMEZ H, GOKCEOGLU C, MEDLEY E, et al. Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic bimrock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43: 554-561.
- [13] 时卫民, 郑宏录, 刘文平, 等. 三峡库区碎石土抗剪强度指标的试验研究[J]. 重庆建筑, 2005(2): 30-35.
SHI W M, ZHENG H L, LIU W P, et al. The Three Gorges Reservoir Area of gravel soil shear strength index of the experimental study [J]. Chongqing Construction, 2005(2): 30-35. (in Chinese)
- [14] 彭东黎, 李志勇. 堆积体边坡碎石土抗剪强度试验研究分析[J]. 公路工程, 2014, 39(2): 253-257.
PENG D L, LI Z Y. Deposit slope of gravel soil shear strength test research and analysis [J]. Highway Engineering, 2014, 39(2): 253-257. (in Chinese)
- [15] 唐晓松, 邓楚键, 郑颖人, 等. 三峡库区碎石土地基浸水试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 226-229.
TANG X S, DENG C J, ZHENG Y R, et al. The Three Gorges Reservoir Area of gravel soil water immersion test research [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 226-229. (in Chinese)
- [16] 聂如松, 冷伍明, 陈云峰. 碎石土地基承载力试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(5): 57-61.
NIE R S, LENG W M, CHEN Y F. Gravel soil bearing capacity test research [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(5): 57-61. (in Chinese)
- [17] 胡伟, 闵弘, 陈健, 等. 大型原位直剪试验设备改进研制与应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 905-912.
HU W, MIN H, CHEN J, et al. Improvement of a large scale in-situ direct shear test apparatus and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 905-912. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)