

不同垂直荷载与剪切速率条件下 水泥稳定风化砂直剪试验研究

杨俊^{1,2}, 杨志^{1,2}, 张国栋^{1,2}, 唐云伟³, 陈红萍⁴

(1. 三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 宜昌市交通运输局, 湖北 宜昌 443002; 4. 宜昌市公路管理局, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 以湖北宜昌三峡库区风化砂为研究对象, 在风化砂中掺入不同量的水泥, 然后改变剪切速率、改变上覆垂直荷载, 进行室内直接剪切试验, 研究了剪切速率、垂直荷载对不同掺量水泥稳定风化砂抗剪强度指标的影响。试验结果表明: 剪切速率、垂直荷载对水泥稳定风化砂抗剪强度指标有明显影响。在相同的剪切速率和垂直荷载下, 水泥稳定风化砂的黏聚力会随着水泥掺量的增加显著提高, 但内摩擦角会先增大再减小; 在相同的水泥掺量下, 增大剪切速率和垂直荷载均会显著增大水泥稳定风化砂的黏聚力而减小其内摩擦角。剪切速率较大时, 试样在剪切破坏过程中不仅要克服颗粒间的滑移, 还要克服颗粒的旋转、滚动与换位阻力, 使黏聚力增大。较大的垂直荷载会使试样产生较大的压缩固结, 粒间的孔隙减少, 孔隙间的水应力和垂向附加应力增大, 砂颗粒间的相互作用力加强, 抗剪强度提高。

关键词: 水泥; 风化砂; 剪切速率; 垂直荷载; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)03-0077-07

风化砂是一种颗粒呈棱角状、强度较弱、物理力学性质不稳定的岩石风化产物, 在我国许多地区广泛存在^[1]。根据风化程度的不同, 风化砂颗粒常伴有或多或少的裂缝, 而这些含有细微裂缝的风化砂颗粒在外力作用下容易破碎, 使风化砂的强度大大降低, 再加上风化砂为松散粒料不能产生黏聚力, 使得风化砂长期以来被视为废弃原料而未在公路建设中进行开发利用^[2]。然而风化砂具有很强的抗水性, 固结较快, 可以作为良好的透水或半透水材料, 如果采用资源丰富风化砂作为筑路原料, 掺入适当的化学物质改善其力学性能, 达到路用标准, 则具有取料方便、成本低廉、工艺合理、技术可行的特点。在湖北宜昌三峡库区广泛分布着大量的废弃风化砂。本文拟在该地区风化砂中掺入黏聚力强的水泥进行改良, 研究水泥稳定废弃风化砂的路用特性, 以期达到就地取材、变废为宝、节约成本的目的^[3-5]。

路用材料性能的关键指标之一是抗剪强度, 开展对水泥稳定废弃风化砂抗剪强度的研究具有重要意义。关于剪切速率及上覆垂直荷载对红黏土、膨胀土、粉土等的抗剪强度的影响, 在 20 世纪七八十年代就有国内外专家开展研究, 并得出了许多有益的结论。水泥稳定风化砂应用于公路路面基层, 是在近年才开始尝试的。因此, 深入开展剪切速率及垂直荷载对水泥稳定风化砂抗剪强度指标的影响, 具有重要的理论意义, 并能为工程实践提供室内试验依据。本文采用室内直接剪切试验, 通过调整上覆荷载及剪切速率, 模拟车辆行驶的作用, 研究了不同水泥掺量改良废弃风化砂在不同垂直荷载、不同剪切速率下的响应, 为水泥稳定废弃风化砂用作道路路面基层提供了理论依据。

收稿日期: 2013-10-16

基金项目: 湖北省教育厅自然科学研究重点项目(D20131304)

作者简介: 杨俊(1976-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 主要从事道路特殊土路基处理、路面新材料开发利用、建筑垃圾及工业垃圾的路用特性研究。E-mail: wangjing750301@163.com

1 试验原材料基本性质

1.1 风化砂

本试验用风化砂取自湖北省宜昌市三峡库区太平溪镇的百岁溪。该风化砂呈土黄色,粒径分布不均,有显著棱角,粒径大的砂颗粒表面有微小裂缝,容易破碎,经过室内颗粒分析试验(如图1),得到其基本物理性质指标,见表1。

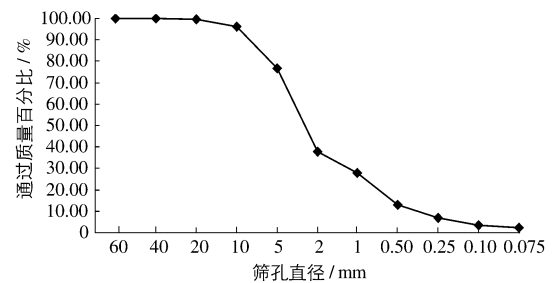


图1 风化砂颗粒分布

Fig. 1 Particle distribution of weathered sand

表1 风化砂基本物理性质指标

Tab. 1 Basic physical properties indexes of weathered sand

粒组含量/%			级配指标		天然含	含泥量/
砾粒组	砂粒组	细粒组	不均匀系数	曲率系数	水率/%	%
>2 mm	2~0.075 mm	<0.075 mm				
62.18	35.59	2.24	10.21	3.08	3.84	2.24

由表1可知:风化砂的不均匀系数 $C_u = 10.21$, 曲率系数 $C_c = 3.08 > 3$, 故该风化砂为级配不良砂。

1.2 水泥

试验所用水泥为市场上销售的普通硅酸盐水泥,具有良好的和易性、保水性、耐磨性和抗冻性,初凝时间大于45 min,终凝时间较长达6 h以上。

2 试验方案

试验参考《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)和《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009)进行。

水泥稳定风化砂试样的制作采用外掺法,首先将风化砂风干后过2 mm标准筛,并在(105~110)℃下烘干,烘干时间不小于12 h,直至恒重,然后在干燥器中冷却至恒温。其次,称取一定质量的风化砂,根据重型击实所得到的最佳含水率用喷壶喷洒所需的水,并预留2%的水,然后装入密闭容器,料闷24 h后,分别称取所需的水泥掺量,并与闷料拌合均匀,加入预留的2%水;最后根据其最佳干密度称取所需的混合料质量压样器内,采用静压制样的方法制成不同水泥掺量的水泥稳定风化砂试样,将试样置入标准养护箱内,养护7 d后将试样在四联式应变直剪仪进行试验(如图2)。每种试样做3组平行试验,取最相近的两组平均值作为最终结果。其中,水泥掺量分别为3%、5%、7%和9%;直剪仪剪切速率分别设定为0.8和2.4 mm/min;垂直荷载分为I、II、III级, I级垂直荷载为12.5、25.0、37.5和50.0 kPa, II级垂直荷载为62.5、75.0、87.5和100.0 kPa, III级垂直荷载为100.0、200.0、300.0和400.0 kPa。

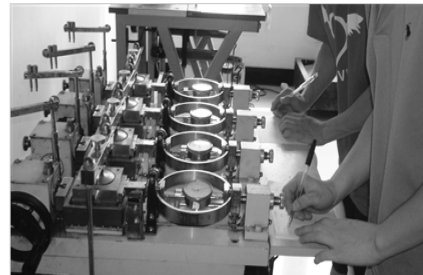


图2 直剪试验

Fig. 2 Direct shear tests

3 水泥稳定风化砂直剪试验结果及分析

3.1 不同剪切速率的影响

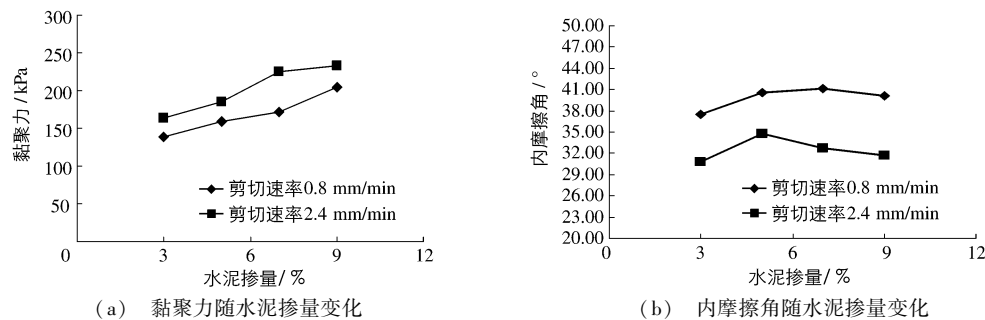
通过直剪试验,得出了在标准荷重下(III级垂直荷载),不同剪切速率对水泥稳定风化砂的黏聚力和内摩擦角影响的试验结果,见表2。

表2 标准荷载、不同剪切速率下水泥稳定风化砂的黏聚力

Tab.2 Cohesive force and internal friction angle of cement stabilized weathered sand under standard load and different shear rates

剪切速率 (mm/min)	水泥掺量							
	3%		5%		7%		9%	
	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	黏聚力/kPa	内摩擦角/°
0.8	138.26	37.51	159.37	40.59	171.15	41.14	204.19	40.09
2.4	163.6	30.85	185.44	34.82	225.22	32.76	233.44	31.73

从表2中的试验结果可以得到在标准荷载、不同剪切速率作用下,水泥稳定风化砂的黏聚力、内摩擦角与水泥掺量之间的关系曲线(图3)。



(a) 黏聚力随水泥掺量变化

(b) 内摩擦角随水泥掺量变化

图3 不同剪切速率下水泥掺量与水泥稳定风化砂黏聚力和内摩擦角关系

Fig.3 Relationships of cement dosage, cohesive force and internal friction angle of cement stabilized weathered sand under different shear rates

从表2和图3可见:

(1)在相同的剪切速率下,水泥稳定风化砂的黏聚力随着水泥掺量的增加而增大,速度先快后慢。其中,当剪切速率为0.8 mm/min时,水泥稳定风化砂的黏聚力在水泥掺量3%~5%之间增长了16.11 kPa,在5%~7%之间增长了23.78 kPa,在7%~9%之间增长了13.04 kPa;当剪切速率为2.4 mm/min时,水泥稳定风化砂的黏聚力在水泥掺量3%~5%之间增长了21.84 kPa,在5%~7%之间增长了39.78 kPa,在7%~9%之间增长了8.22 kPa。这是因为当风化砂掺入水泥时,水泥的胶结、团粒化作用和硬凝反应会使风化砂颗粒间的相互作用增强,促使水泥稳定风化砂的强度提高,黏聚力迅速增大,这种作用会伴随着水泥掺量的增加而加强,但是水泥掺量的增大也会导致试样出现干缩裂缝,致使其强度有所减小,从而导致水泥稳定风化砂的黏聚力增长变缓。

(2)在同一剪切速率下,水泥稳定风化砂的内摩擦角会随着水泥掺量的增加先增大后减小。当剪切速率为2.4 mm/min时,在水泥掺量为5%时,内摩擦角达到峰值;当剪切速率为0.8 mm/min时,在水泥掺量为7%时,内摩擦角达到峰值。产生这种现象的原因是:当在风化砂中掺入水泥时,水泥颗粒会进入风化砂颗粒之间的缝隙内,致使颗粒间联系更加紧密,以及风化砂有明显的棱角,会产生很大的摩阻力,使内摩擦角迅速增大;但是当水泥掺量超过一定量时,水泥的水化作用会造成试样的干燥收缩,裂缝数量会明显增加,从而引起内摩擦角减小。

(3)剪切速率对水泥稳定风化砂的抗剪强度指标有较大影响。在水泥掺量相同时,剪切速率为2.4 mm/min时的水泥稳定风化砂与剪切速率为0.8 mm/min的相比,前者的内摩擦角明显小于后者,而黏聚力大于后者;其中,黏聚力从剪切速率0.8~2.4 mm/min之间最大增加54.07 kPa,内摩擦角减小8.38°。说明剪切速率对水泥稳定风化砂的黏聚力和内摩擦角有较大影响。这是由于:在剪切速率较小时,试样剪切破坏的时间较长,试样会产生比较充分的水平固结,孔隙比减小,使颗粒间有效接触点增加,剪切阻力会相应增

大,并随着剪切位移的增加,剪切强度也缓慢上升,于是内摩擦角增加。当剪切速率增大时,试样会迅速剪切完毕,虽然也将产生一定的水平固结,但因为时间较短,孔隙比减少会较小,故内摩擦角较小,且在较大剪切速率时,试样在剪切破坏的过程中不仅要克服颗粒间的滑移,还要克服颗粒旋转、滚动与换位阻力,因此较大剪切速率下的黏聚力会增大^[6-8]。

3.2 不同垂直荷载的影响

依据试验规程,在标准剪切速率下(0.8 mm/min),得出了不同的垂直荷载对水泥稳定风化砂黏聚力和内摩擦角的影响结果(表3)。

表3 标准剪切速率、不同垂直荷载下水泥稳定风化砂的黏聚力和内摩擦角

Tab.3 Cohesive force and internal friction angle of cement-stabilized weathered sand under standard shear rates and different vertical loads

垂直荷载	水泥掺量							
	3%		5%		7%		9%	
	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	黏聚力/kPa	内摩擦角/°
I级	94.24	47.68	107.46	49.13	133.11	46.94	150.26	45.97
II级	115.28	44.92	137.33	47.35	152.66	46.59	188.7	44.78
III级	138.26	37.51	159.37	40.59	171.15	41.14	204.19	40.09

从表3可得不同的垂直荷载和水泥掺量下,水泥稳定风化砂的黏聚力和内摩擦角变化曲线(图4)。

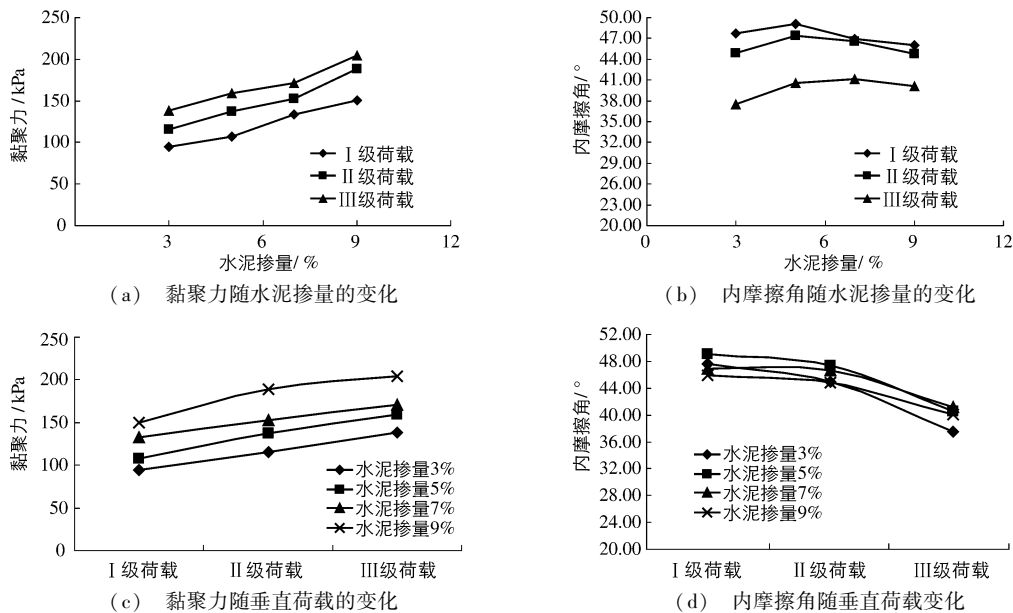


图4 不同情况下水泥稳定风化砂黏聚力和内摩擦角的变化曲线

Fig.4 Change curves of the vertical load and internal friction angle of cement-stabilized weathered sand under different conditions

从图4可见:

(1) 水泥掺量对水泥稳定风化砂的黏聚力和内摩擦角有很大影响,在相同的垂直荷载下,水泥稳定风化砂的黏聚力随着水泥掺量的增加稳步增长,而内摩擦角随着水泥掺量的增加会先增大后减小,因此要适当的控制水泥掺量才有助于提高风化砂的抗剪强度,这与有关文献^[9-10]的结果一致。

(2) 在水泥掺量一定时,水泥稳定风化砂的黏聚力随着垂直荷载的增加迅速增大;其中,水泥掺量为3%,5%,7%和9%时,III级荷载的黏聚力较I级荷载分别增加了44.02,51.91,38.04和53.93 kPa。这是因

为:当施加的垂直荷载越大时,试样在剪切破坏过程中会产生较大的压缩,使空隙比减小,颗粒间的粒间力变大,强度提高,故黏聚力越大^[11-13]。

(3)在相同的水泥掺量下,水泥稳定风化砂的内摩擦角随着垂直荷载的增加会明显减小,其速度先慢后快;其中,内摩擦角从Ⅲ级荷载到Ⅱ级荷载减小 6° 左右,从Ⅱ级荷载到Ⅰ级荷载减小 1.5° 左右,表明垂直荷载对内摩擦角影响很大。这是由于抗剪强度是在一定的垂直应力范围内用库仑方程表示的一条直线来近似代替实际上一条向下弯曲的曲线,在不同的垂直应力段内近似直线的斜率不同,且随垂直应力增大其斜率减小,也就是黏聚力和内摩擦角减小,当垂直荷载较大时,垂直应力会迅速增大,内摩擦角就会迅速减小。

3.3 不同垂直荷载对水泥稳定风化砂抗剪强度的影响

根据各个垂直荷载下的黏聚力和内摩擦角,可以按照库仑方程 $\tau = \sigma \tan \varphi + c$,得到每级垂直荷载下水泥稳定风化砂的抗剪强度,抗剪强度与垂直荷载的关系曲线如图5。

从图5可见:在相同的水泥掺量下,水泥稳定风化砂的抗剪强度随垂直荷载的增加先缓慢增大后迅速增大。其中,抗剪强度在垂直荷载 $12.5 \sim 100$ kPa之间增长较慢,在 $100 \sim 400$ kPa之间增长最快。产生这种现象的原因是:试样在较大的垂直荷载下,垂直应力越大,从开始剪切至破坏所需的水平压力就会越大,粒间的空隙得到压缩,则孔隙水应力和垂向附加应力增加也越大,砂颗粒间的相互作用力加强,强度提高,抗剪强度增大,当垂直荷载增加较快时,抗剪强度也就迅速增大。

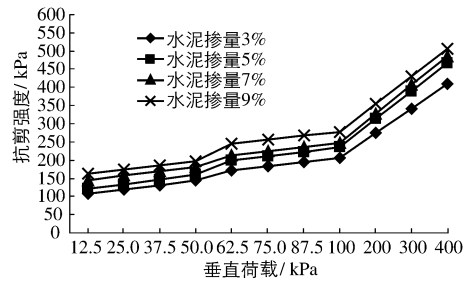


图5 不同水泥掺量的垂直荷载与水泥稳定风化砂抗剪强度关系

Fig. 5 Relationships between vertical load and shear strength of cement-stabilized weathered sand under different cement dosages

4 结 语

(1)由以上试验分析可以得到:剪切速率和垂直荷载对水泥稳定风化砂的黏聚力和内摩擦角有明显影响,增大剪切速率和垂直荷载均会增大水泥稳定风化砂的黏聚力,减小其内摩擦角。文中的试验结果与阚志明^[14]等对粉质黏土的试验结果相吻合,与刘天韵^[15]等对淤泥土的试验结果基本一致。

(2)水泥掺量的大小对水泥稳定风化砂的黏聚力和内摩擦角影响较为明显;随着水泥掺量增大,水泥稳定风化砂的黏聚力会有显著提高,但内摩擦角会先增大再减小,这是因为水泥的硬化作用将增加颗粒间的联系,提高其强度,但超过一定掺量时,易发生干燥收缩而产生裂缝,降低其强度。

(3)剪切速率较大时,试样剪切破坏的时间相应较短,在相同的垂直荷载下较剪切速率小的产生固结时间少,孔隙比减少会较小,且在试样剪切破坏过程中不仅要克服颗粒间的滑移,还要克服颗粒的旋转、滚动与换位阻力,使内摩擦角减小,黏聚力增大。

(4)较大的垂直荷载,会使试样产生较大的压缩固结;粒间的空隙减少,孔隙间的水应力和垂向附加应力增大,砂颗粒间的相互作用力加强,抗剪强度提高,同时使用库仑方程表示的莫尔圆直线斜率减小,导致黏聚力增大,内摩擦角减小。

参 考 文 献:

- [1] 陈忠达, 安彦卿, 李明杰. 预处理对水泥稳定风化砂路用性能的影响[J]. 中外公路, 2005, 25(3): 40-42. (CHEN Zhong-da, AN Yan-qing, LI Ming-jie. The influence of pretreatment on the performance of cement stabilized weathered sand[J]. China & Foreign Highway, 2005, 25(3): 40-42. (in Chinese))
- [2] 郭应杰, 安彦卿, 刘根昌. 水泥稳定风化砂路用性能研究[J]. 中外公路, 2005, 25(3): 52-55. (GUO Ying-jie, AN Yan-qing, LIU Geng-chang. Research on road use performance of cement stabilized weathered sand[J]. China & Foreign Highway,

- 2005, 25(3): 52-55. (in Chinese))
- [3] 于洪臣, 温建祥. 水泥稳定风化砂底基层施工工艺[J]. 施工技术, 2008, 37(增1): 121-124. (YU Hong-chen, WEN Jian-xiang. Construction technology of subbase with cement stabilized weathered sand[J]. Construction Technology, 2008, 37(Suppl): 121-124. (in Chinese))
- [4] 陈亮亮, 赵银, 冯德成. 水泥稳定砂砾击实特性与击实方法[J]. 公路, 2011(12): 147-150. (CHEN Liang-liang, ZHAO Yin, FENG De-cheng. The compaction characteristics and compaction method of cement stabilized weathered sand[J]. Highway, 2011(12): 147-150. (in Chinese))
- [5] 安彦卿. 稳定风化砂在高速公路中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2005. (AN Yan-qing. Application of cement stabilized weathered sand to highway construction[D]. Xian: Chang'an University, 2005. (in Chinese))
- [6] 渠风英. 土的直接剪切试验与影响因素分析[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(24): 190-192. (QU Feng-ying. Analysis of the direct shear test of soil and the influencing factors[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2010, 20(24): 190-192. (in Chinese))
- [7] 徐肖峰, 魏厚振, 孟庆山, 等. 直剪剪切速率对粗粒土强度与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 728-733. (XU Xiao-feng, WEI Hou-zhen, MENG Qing-shan, et al. Effects of shear rate on shear strength and deformation characteristics of coarse-grained soils in large-scale direct shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 728-733. (in Chinese))
- [8] 党进谦, 蒋仓兰, 吉中亮. 剪切速率对结构性黄土力学性状的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 459-462. (DANG Jin-qian, JIANG Cang-lan, JI Zhong-liang. Effects of shear rate on mechanical behavior of structured loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 459-462. (in Chinese))
- [9] 朱启银, 尹振宇, 朱俊高, 等. 软粘土加载速率效应特性试验研究: 进展与趋势[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 7-24. (ZHU Qi-yin, YIN Zheng-yu, ZHU Jun-gao, et al. Progress and trend of experimental investigation on rate-dependent behavior of soft clays[J]. Rock and Soils Mechanics, 2014, 35(1): 7-24. (in Chinese))
- [10] 郭长宝, 张永双, 孟庆伟, 等. 重塑硅藻土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 109-114. (GUO Chang-bao, ZHANG Yong-shuang, MENG Qing-wei, et al. Research on shear strength of remolding diatomite by ring shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 109-114. (in Chinese))
- [11] 李涛, 刘波, 杨伟红, 等. 基质吸力对重塑红粘土抗剪强度影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 375-381. (LI Tao, LIU Bo, YANG Wei-hong, et al. Experimental research on the influence of matric suction on the shear strength of remolded red clay[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(3): 375-381. (in Chinese))
- [12] 胡伟娜, 潘璇, 寇明珠, 等. 剪切速率对饱和粉质粘土快剪指标影响分析[J]. 水运工程, 2013(8): 173-177. (HU Wei-na, PAN Xuan, KOU Ming-zhu, et al. On shear rate on saturated silty clay test results in direct shear test[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(8): 173-177. (in Chinese))
- [13] 员康锋, 宿钟鸣, 孙志杰. 非饱和黄土吸力与抗剪强度的试验研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2013, 32(5): 974-978. (YUAN Kang-feng, SU Zhong-ming, SUN Zhi-jie. Suction of unsaturated loess and its shear strength[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(5): 974-978. (in Chinese))
- [14] 阚卫明, 刘爱民. 剪切速率对粉质粘土抗剪强度的影响[J]. 中国港湾建设, 2008(2): 23-26. (KAN Wei-ming, LIU Ai-ming. Influence of shear rate upon shear strength of silty clay[J]. China Harbour Engineering, 2008(2): 23-26. (in Chinese))
- [15] 刘天韵. 直剪试验固结快剪强度指标影响因素探讨[J]. 中国港湾建设, 2009(6): 32-34. (LIU Tian-yun. Approaching of factors influencing strength indexes for the consolidation quick direct test[J]. China Harbour Engineering, 2009(6): 32-34. (in Chinese))

Direct shear test analysis of cement-stabilized weathered sand under different vertical loads and shear rates

YANG Jun^{1,2}, YANG Zhi^{1,2}, ZHANG Guo-dong^{1,2}, TANG Yun-wei³, CHEN Hong-ping⁴

(1. Collaborative Innovation Center of Geological Hazards and Ecological Environment in Three Gorges Area in Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Civil and Architectural Institute, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Yichang Transport Bureau, Yichang 443002, China; 4. Yichang Highway Administration, Yichang 443002, China)

Abstract: Taking the weathered sand situated in the Three Gorges reservoir area as the research object, mixing different amounts of cement with the weathered sand, and then changing the shear rates, changing the overlying vertical load, indoor direct shear tests have been carried out. This study has analyzed the impacts of the shear rates, the vertical load on the shear strength index of the cement-stabilized weathered sand having different cement contents. Experimental analysis results show that the shear rate and the vertical load have a significant effect upon the shear strength index of the cement-stabilized weathered sand. By the same action of the shear rates and the vertical load, the cohesive force of the cement-stabilized weathered sand will significantly increase with increase in the cement content, but the internal friction angle will first become great and then small; when the cement content is the same, increasing the shear rates and the vertical load will significantly increase the cohesive force of the cement-stabilized weathered sand and reduce its internal friction angle. When the shear rates are large, the sample in the process of shear failure not only overcomes the slip among the particles, but also overcomes the rotation of the particles and the transposition rolling resistance to increase the cohesive force. Larger vertical load will make the specimen have greater compression consolidation, reduce intergranular porosity, increase the water stress and the vertical additional stress within pores, and finally enhance the intergranular interaction force as well as the shear strength of the weathered sand.

Key words: cement; weathered sand; shear rate; vertical load; shear strength; cohesive force; internal friction angle