

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202311202024061989

文章编号:1674-599X(2024)03-0065-09

引用格式:戴玉明,贺佐跃.基于三轴试验的水泥土抗剪强度参数分析[J].交通科学与工程,2024,40(3):65-73.

Citation: DAI Yuming, HE Zuoyue. Analysis of shear strength parameters of soil-cement based on triaxial test[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 65-73.

## 基于三轴试验的水泥土抗剪强度参数分析

戴玉明<sup>1</sup>,贺佐跃<sup>2</sup>

(1.广州开发区财政投资建设项目管理中心,广东 广州 510663;  
2.广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司,广东 广州 510507)

**摘要:**针对现有文献中关于水泥土三轴抗剪强度参数的研究总体上较少,而黏聚力和内摩擦角对水泥土边坡稳定分析至关重要这一问题,采用室内三轴剪切试验,对胶凝材料的总掺量、龄期、围压和粉煤灰掺量等因素及其对三轴抗剪强度参数的影响进行分析。研究表明:黏聚力随着龄期的增加而增加,且二者之间大致为线性关系;总掺量越大,相同龄期下的黏聚力也越大。内摩擦角总体上随着龄期的增大而减小,且龄期越小,内摩擦角减小得越快;总体上总掺量越大,相同龄期下的内摩擦角越小。黏聚力随着粉煤灰掺量的增加而增加,内摩擦角与粉煤灰掺量之间无明显关系。黏聚力增量、内摩擦角增量与龄期之间均无明显关系。当总掺量较小时,黏聚力增量随着粉煤灰掺量的增大而增大;当总掺量较大时,黏聚力增量随着粉煤灰掺量的增加先增大再减小。该研究成果可为珠三角软土区水泥土的设计与施工提供试验依据。

**关键词:**三轴试验;黏聚力;内摩擦角;龄期;粉煤灰掺量

中图分类号:TU447

文献标志码:A

## Analysis of shear strength parameters of soil-cement based on triaxial test

DAI Yuming<sup>1</sup>, HE Zuoyue<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Development Zone Financial Investment Construction Project Management Center, Guangzhou 510663, China; 2. Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, China)

**Abstract:** In view of the fact that there are few researches on the triaxial shear strength parameters of soil-cement in the existing literature, as well as the cohesion and internal friction angle are crucial to the stability analysis of soil-cement slope, the indoor triaxial shear test is used to analyze the total content, age, confining pressure, fly ash content and their effects on the triaxial shear strength parameters. The results show that the cohesion increases with the increase of age, and the increasing trend is roughly linear. The cohesion at the same age increases with the increase of the total content. In general, the internal friction angle decreases with the increase of age, and the smaller the age, the faster the reduction of the internal friction angle. In general, the greater the total content, the smaller the internal friction angle at the same age. The cohesion increases with the increase of fly ash content, but there is no obvious relationship between internal friction angle and fly ash content. The increment

收稿日期:2023-11-20

基金项目:广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司科技项目(粤交院[2019]研发 YF-006)

通信作者:贺佐跃(1989—),男,高级工程师,主要从事岩土工程、地下工程等方面的研究工作。E-mail:hzykakaxi@126.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

of cohesion and the increment of internal friction angle have less correlation with age. When the total content is small, the increment of cohesion increases with the increase of fly ash content. By contrast, at relatively high total content, the increment of cohesion first increases and then decreases with the increase of fly ash content. The research results of this paper can provide experimental basis for the design and construction of soil-cement in the Pearl River Delta soft soil area.

**Key words:** triaxial test; cohesion force; internal friction angle; age; fly ash content

水泥作为胶凝材料广泛应用于土体的力学性质改良上,尤其是在地基处理领域,水泥可与软土形成柔性桩复合地基,对控制路基工后沉降效果显著<sup>[1-3]</sup>。无侧限抗压强度是水泥土的重要设计参数,可通过无侧限抗压强度试验得到。然而,土体实际上受到周围土体施加的围压约束作用而处于三维应力状态下<sup>[4]</sup>。这表明采用三轴剪切试验描述土体的应力、应变关系更合理。

有些学者已对水泥土的三轴抗剪强度参数如黏聚力、内摩擦角等进行了初步研究。孙宇雁等<sup>[5]</sup>以长沙红黏土为对象,研究了水泥土的黏聚力和内摩擦角及其影响因素,但该研究未涉及水泥土的抗剪强度参数。阮波等<sup>[6]</sup>基于黔张常铁路某段软土,发现相较于原状土,水泥土的黏聚力显著增加,但内摩擦角的增加幅度较小。陈四利等<sup>[7]</sup>也得到了类似结果,且海水环境下水泥土的黏聚力和内摩擦角均较清水环境下的小。陈文昭等<sup>[8]</sup>对水泥土的拌合用水量及其对黏聚力和内摩擦角的影响进行了试验研究,并得到了最优拌合用水量,但该研究采用了直剪而非三轴剪切试验。刘鑫等<sup>[9]</sup>发现掺砂时含水率增加,进而导致水泥土的黏聚力线性减小,而内摩擦角的变化可忽略不计。王启云等<sup>[10]</sup>在滨海淤泥的直剪试验中发现,强度参数的增长率随着水泥掺量的增加呈现先增加再逐渐降低的趋势,并在水泥掺量为18%时达到临界点。赵春彦等<sup>[11]</sup>对多因素下的抗剪强度参数进行了试验研究,并建立了强度评估模型,但该研究结果是基于低液限黏土得到的,并不适用于软土。上述研究尽管存在不足,但丰富了水泥土的抗剪强度参数研究,为实际工程提供了一定参考。

此外,相较于刚性桩,柔性桩与土体之间的刚度差异并不显著,柔性桩复合地基能较好地发挥桩与桩间土的作用,通常出现的是剪切破坏<sup>[12-14]</sup>。因此,黏聚力 $c$ 、内摩擦角 $\varphi$ 对柔性桩的边坡稳定性非

常重要。然而,现有文献关于水泥土三轴抗剪强度参数的研究总体上较少,且软土具有显著的地域性,不同地区的软土在物理、力学性质上差异较大<sup>[15]</sup>。例如,珠三角地区的软土矿物具有包菜状结构和晶体矿物结构,含水率较大,但软土的结构性相对较低,且软土的厚度整体上要比长三角地区的小,这导致某一地区的水泥土强度参数在其他地区的适用性受到了限制<sup>[16-17]</sup>。

本文基于三轴剪切试验,对胶凝材料的总掺量、水泥土试样的龄期和粉煤灰掺量等因素及其对三轴抗剪强度参数的影响进行分析,揭示各因素对水泥土试样的黏聚力、内摩擦角的影响规律(为简洁起见,后文在龄期、黏聚力、内摩擦角前均省略定语“水泥土试样的”),为珠三角软土区水泥土的设计与施工提供试验依据。

## 1 试验

软土取自中山市某路基,其级配曲线如图1所示,土体的基本参数见表1。试验仪器为全自动应变控制式三轴仪,剪切速率为0.640 mm/min。均在不固结、不排水状态下对水泥土试样进行试验,水泥土试样的轴向应变不大于15%。保持胶凝材料的总掺量不变,改变粉煤灰的掺量。三轴剪切试验方案见表2。其中,胶凝材料的总掺量分别为10.6%、13.6%、16.6%,表2中序号1、2、3的总掺量为10.6%,序号4、5、6的总掺量为13.6%,序号7、8、9的总掺量为16.6%。粉煤灰掺量共有4个等级,分别为5.0%、10.6%、13.6%、16.6%。试验围压共有4个等级,分别为100、200、300、400 kPa。水泥土试样高80.0 mm,直径39.1 mm。在标准条件下对水泥土试样进行养护,通过控制养护时间,分别得到龄期为14、28、90 d的三轴抗剪强度。

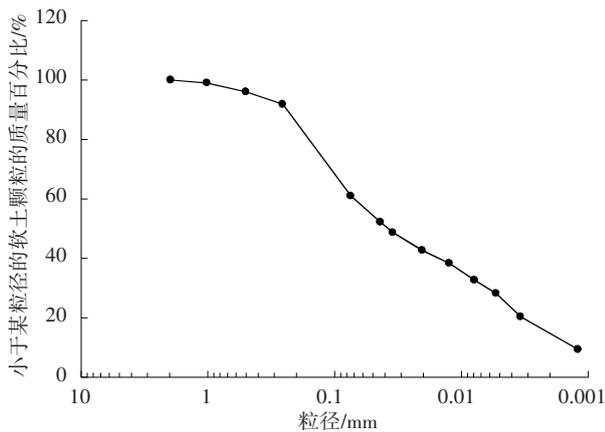


图1 软土级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of soft soil

表1 软土的基本参数

Table 1 Basic parameters of soft soil

重度/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	比重	天然含水 率/%	孔隙比	饱和度/%
16	2.65	58.9	1.855	95.2
液限/%	塑限/%	液性指数	塑性指数	有机质的质 量分数/%
53.3	32.9	1.27	20.4	1.5

表2 三轴剪切试验方案

Table 2 The triaxial shear test scheme

序号	水泥掺量/%	粉煤灰掺量/%	龄期/d	试验围压/ kPa
1	5.6	5.0	14	100, 200, 300, 400
	0.0	10.6		
2	5.6	5.0	28	100, 200, 300, 400
	0.0	10.6		
3	5.6	5.0	90	100, 200, 300, 400
	0.0	10.6		
4	8.6	5.0	14	100, 200, 300, 400
	3.0	10.6		
	0.0	13.6		
5	8.6	5.0	28	100, 200, 300, 400
	3.0	10.6		
	0.0	13.6		
6	8.6	5.0	90	100, 200, 300, 400
	3.0	10.6		
	0.0	13.6		
7	11.6	5.0	14	100, 200, 300, 400
	6.0	10.6		
	3.0	13.6		
	0.0	16.6		

表2 (续)

Table 2 (Continued)

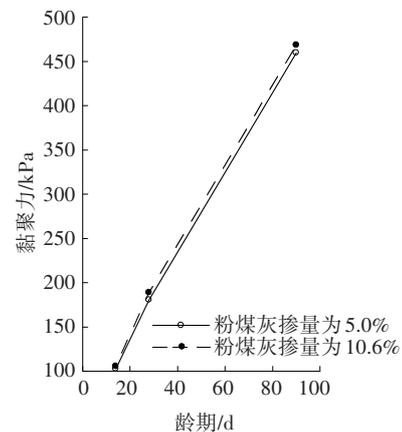
序号	水泥掺量/%	粉煤灰掺量/%	龄期/d	试验围压/ kPa
8	11.6	5.0	28	100, 200, 300, 400
	6.0	10.6		
	3.0	13.6		
	0.0	16.6		
9	11.6	5.0	90	100, 200, 300, 400
	6.0	10.6		
	3.0	13.6		
	0.0	16.6		

## 2 抗剪强度参数

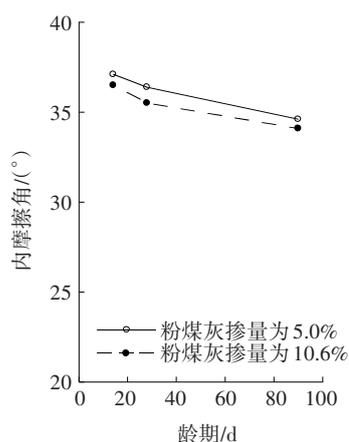
### 2.1 龄期的影响

龄期对黏聚力、内摩擦角的影响规律如图2~4所示。由图2~4可以看出,在不同的胶凝材料总掺量下,黏聚力均随着龄期的增加而增加,且二者之间大致为线性关系;在相同龄期下,总掺量越大,黏聚力也越大。此外,内摩擦角总体上随着龄期的增大而减小,且龄期越小,内摩擦角减小得越快,当龄期足够大时,内摩擦角的变化大多趋于平缓;在相同龄期下,总体上总掺量越大,内摩擦角越小。说明当龄期较小时,总掺量对内摩擦角的影响较大,在图中表现为曲线斜率较大。

粉煤灰的掺入会改变内摩擦角随龄期的变化趋势。在未掺入粉煤灰时,内摩擦角与龄期总体上呈较好的线性关系。然而,在掺入一定量的粉煤灰后,即使胶凝材料总掺量保持不变,内摩擦角与龄期之间也未呈现出明显的线性关系。



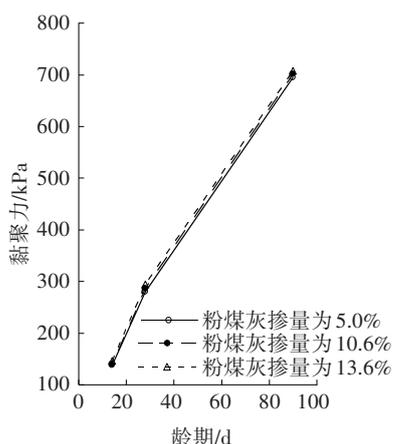
(a) 黏聚力



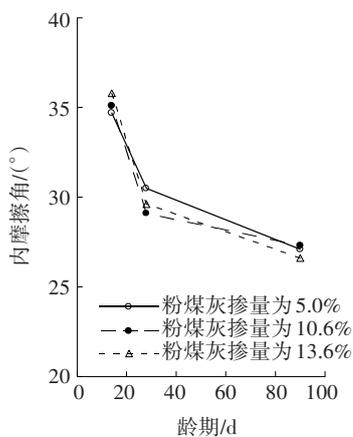
(b) 内摩擦角

图2 总掺量为10.6%时水泥土试样抗剪强度参数随龄期的变化

Fig. 2 The change of shear strength parameters of soil-cement sample with age when total content is 10.6%



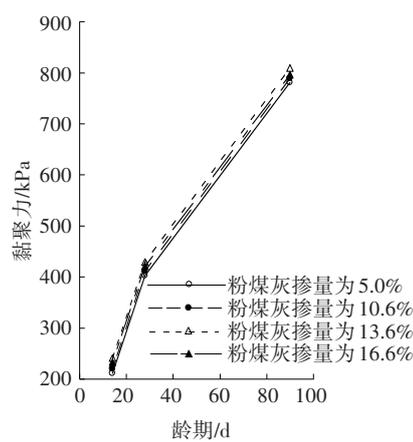
(a) 黏聚力



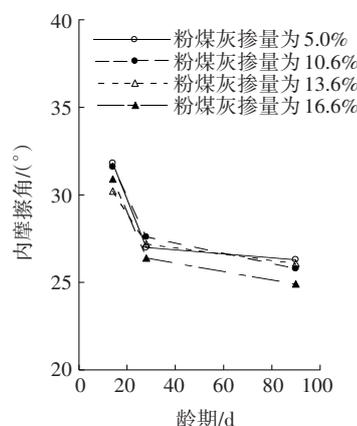
(b) 内摩擦角

图3 总掺量为13.6%时水泥土试样抗剪强度参数随龄期的变化

Fig. 3 The change of shear strength parameters of soil-cement sample with age when total content is 13.6%



(a) 黏聚力



(b) 内摩擦角

图4 总掺量为16.6%时水泥土试样抗剪强度参数随龄期的变化

Fig. 4 The change of shear strength parameters of soil-cement sample with age when total content is 16.6%

## 2.2 粉煤灰掺量的影响

粉煤灰掺量对黏聚力、内摩擦角的影响如图5~7所示。由图5~7可以看出,在不同的总掺量下,黏聚力均随着粉煤灰掺量的增加而增加,且二者之间基本上为线性关系,但黏聚力的增加幅度非常小;当龄期保持不变时,总掺量越大,黏聚力也越大。在分析不同的总掺量下内摩擦角与粉煤灰掺量之间的关系后发现,二者之间无明显变化规律。对于同一龄期,内摩擦角总体上随着总掺量的增加而减小。

## 3 抗剪强度参数增量

### 3.1 龄期的影响

在掺入粉煤灰后,龄期对黏聚力增量、内摩擦角增量的影响如图8~10所示。由图8~10可以看出,对于不同的总掺量,黏聚力增量、内摩擦角增量

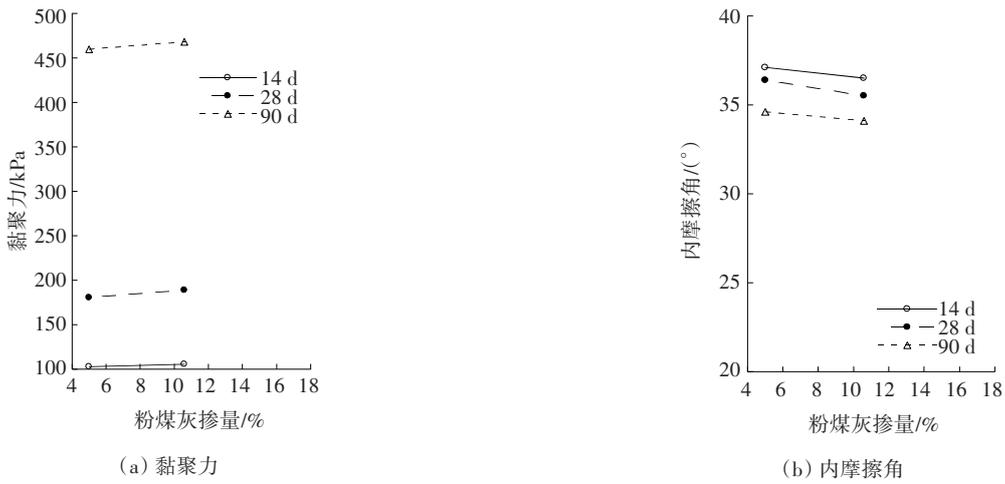


图5 总掺量为10.6%时水泥土试样抗剪强度参数随粉煤灰掺量的变化

Fig. 5 The change of shear strength parameters of soil-cement sample with fly ash content when total content is 10.6%

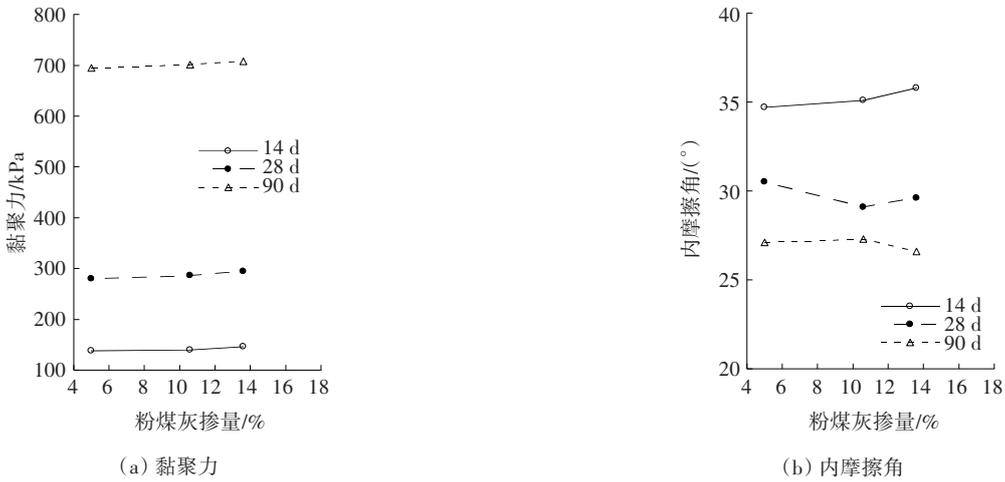


图6 总掺量为13.6%时水泥土试样抗剪强度参数随粉煤灰掺量的变化

Fig. 6 The change of shear strength parameters of soil-cement sample with fly ash content when total content is 13.6%

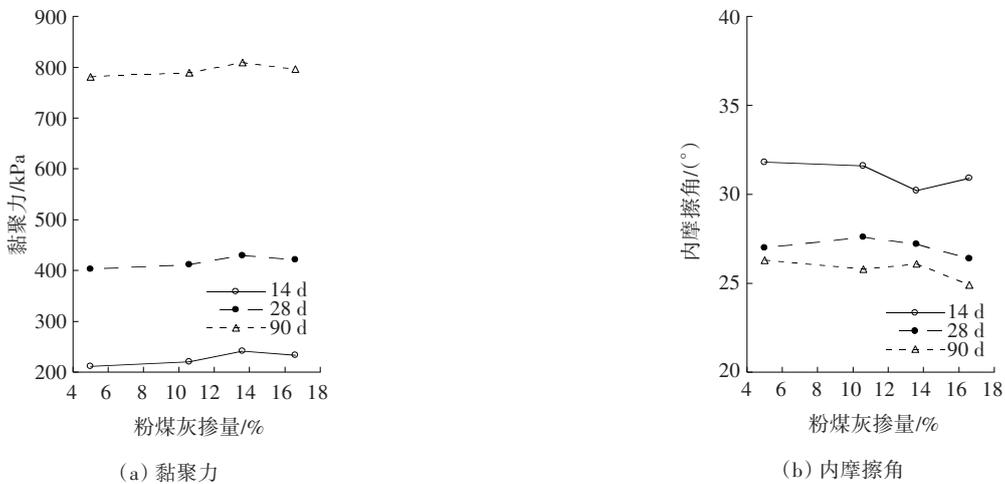


图7 总掺量为16.6%时水泥土试样抗剪强度参数随粉煤灰掺量的变化

Fig. 7 The change of shear strength parameters of soil-cement sample with fly ash content when total content is 16.6%

与龄期之间均无明显的关系,曲线的波动没有明显的规律可循。此外,黏聚力增量都小于 35 kPa,当粉煤灰掺量保持不变时,相同龄期下基本上总掺量越大,黏聚力增量也越大。对于不同的总掺量,内摩擦角增量的变化区间都较小,为 $-1.5^{\circ} \sim 0.5^{\circ}$ 。总掺量对内摩擦角增量的影响基本上没有明显的规律。

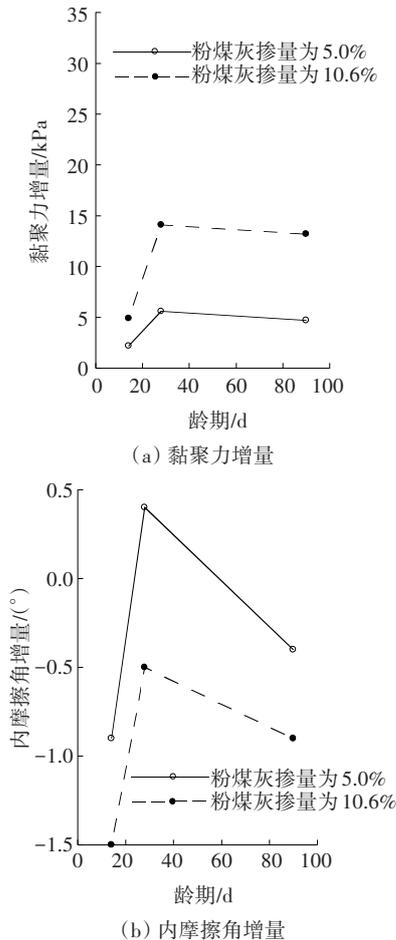


图8 总掺量为 10.6% 时水泥土试样抗剪强度参数增量随龄期的变化

Fig. 8 Changes of increment in shear strength parameters of soil-cement sample with age when total content is 10.6%

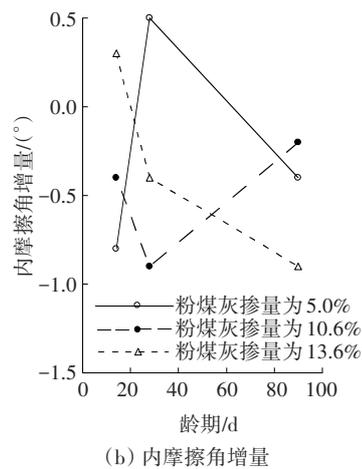
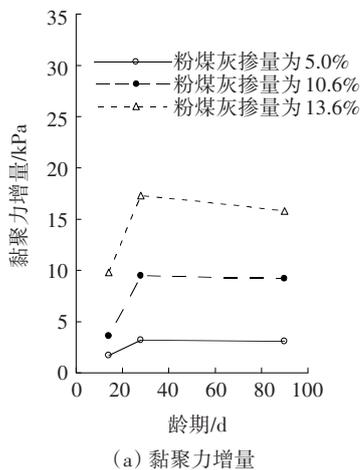


图9 总掺量为 13.6% 时水泥土试样抗剪强度参数增量随龄期的变化

Fig. 9 Changes of increment in shear strength parameters of soil-cement sample with age when total content is 13.6%

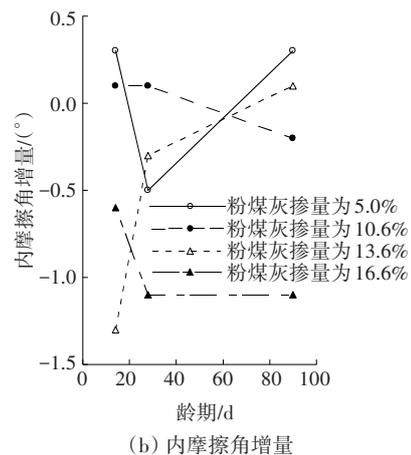
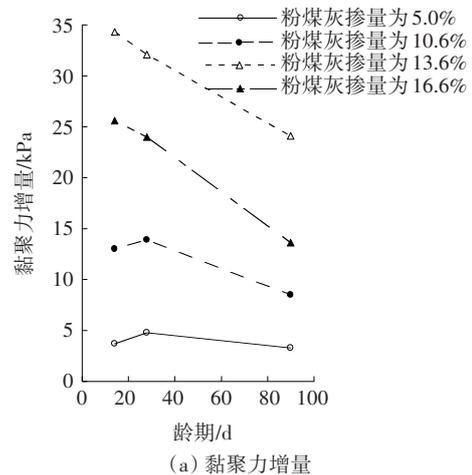


图10 总掺量为 16.6% 时水泥土试样抗剪强度参数增量随龄期的变化

Fig. 10 Changes of increment in shear strength parameters of soil-cement sample with age when total content is 16.6%

### 3.2 粉煤灰掺量的影响

粉煤灰掺量对黏聚力增量、内摩擦角增量的影响如图 11 ~ 13 所示。由图 11 ~ 13 可以看出,当总

掺量较小时(10.6%、13.6%),黏聚力增量随着粉煤灰掺量的增加而增加;当总掺量较大时(16.6%),黏聚力增量随着粉煤灰掺量的增加先增大再减小,也就是说存在一个总掺量峰值,在该峰值时黏聚力增量达到最大。此外,与龄期对内摩擦角增量的影响

类似,在不同的总掺量下,粉煤灰掺量对内摩擦角增量的影响也没有明显的规律,曲线的波动起伏较大。内摩擦角增量总体上较小,说明掺入粉煤灰对内摩擦角增量的影响较小,而这种较小的增量也有可能由试验误差造成的。

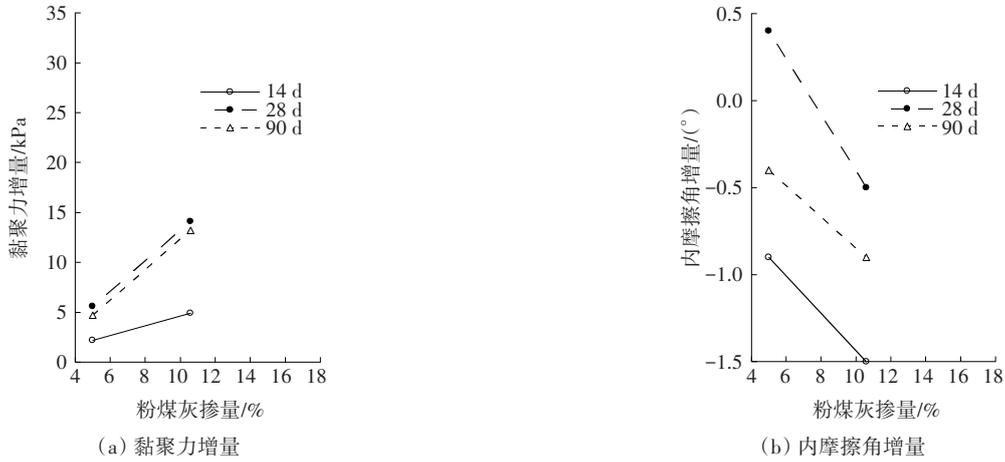


图 11 总掺量为 10.6% 时水泥土试样抗剪强度参数增量随粉煤灰掺量的变化

Fig. 11 Changes of increment in shear strength parameters of soil-cement sample with fly ash content when total content is 10.6%

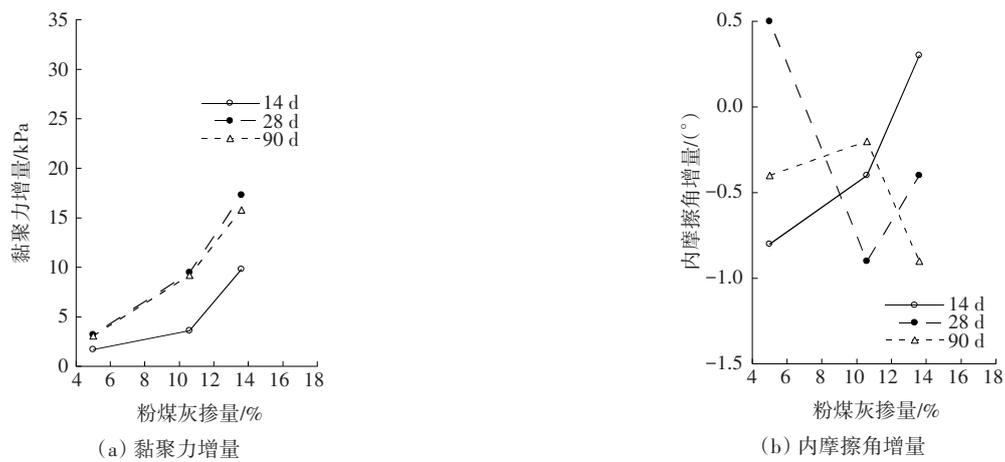


图 12 总掺量为 13.6% 时水泥土试样抗剪强度参数增量随粉煤灰掺量的变化

Fig. 12 Changes of increment in shear strength parameters of soil-cement sample with fly ash content when total content is 13.6%

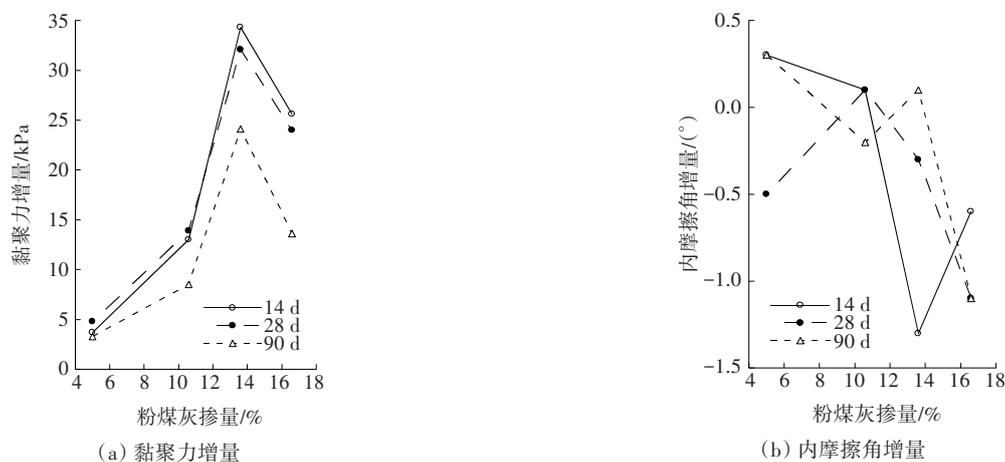


图 13 总掺量为 16.6% 时水泥土试样抗剪强度参数增量随粉煤灰掺量的变化

Fig. 13 Changes of increment in shear strength parameters of soil-cement sample with fly ash content when total content is 16.6%

## 4 结论

本文通过三轴试验,揭示了胶凝材料总掺量、龄期和粉煤灰掺量对三轴抗剪强度参数的影响规律,研究结果将为珠三角软土区水泥土处理的设计与施工提供试验依据。主要结论如下:

1) 黏聚力随着龄期的增加而增加,且二者之间大致为线性关系;总体上总掺量越大,黏聚力也越大。内摩擦角总体上随着其龄期的增大而减小,且龄期越小,内摩擦角减小得越快;在相同龄期下,总体上总掺量越大,内摩擦角越小。当龄期较小时,总掺量对内摩擦角的影响较大。黏聚力随着粉煤灰掺量的增加而增加,内摩擦角与粉煤灰掺量之间无明显的关系。

2) 黏聚力增量、内摩擦角增量与龄期之间均无明显的关系。黏聚力增量均小于 35 kPa,内摩擦角增量的变化区间为 $-1.5^{\circ} \sim 0.5^{\circ}$ 。当总掺量较小时(10.6%、13.6%),黏聚力增量随着粉煤灰掺量的增加而增加;当总掺量较大时(16.6%),黏聚力增量随着粉煤灰掺量的增加先增大再减小,也就是说存在一个总掺量峰值,在该峰值黏聚力增量达到最大。粉煤灰掺量对内摩擦角增量的影响也没有明显的规律。

### 参考文献(References):

- [1] 姚云龙,李积泉,刘鑫,等.基于相似理论的复合地基弹性垫层模型试验研究[J].公路工程,2023,48(6): 84-93.  
YAO Yunlong, LI Jiquan, LIU Xin, et al. Similarity theory-based model experimental study on elastic cushion layer of composite foundation [J]. Highway Engineering, 2023, 48(6): 84-93.
- [2] 麻凤海,杨天宇.某深基坑支护结构变形影响参数研究[J].公路工程,2021,46(4): 66-72, 83. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2021.04.010.  
MA Fenghai, YANG Tianyu. Study on deformation affecting parameters of the deep foundation pit supporting structure[J]. Highway Engineering, 2021, 46(4): 66-72, 83. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2021.04.010.
- [3] 郟禄文,任泉,张佳强,等.考虑路堤填筑过程的CFG桩网复合地基受力变形特性敏感性分析[J].公路工程,2022,47(3): 89-96. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2022.03.014.  
QIE Luwen, REN Quan, ZHANG Jiaqiang, et al. Sensitivity analysis of stress and deformation characteristics of CFG pile net composite foundation considering embankment filling process [J]. Highway Engineering, 2022, 47(3): 89-96. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2022.03.014.
- [4] 姚仰平,武孝天,崔文杰.三维化方法对土的平面应变强度和变形的影响分析[J].岩土工程学报,2023,45(3): 459-467. DOI: 10.11779/CJGE20211389.  
YAO Yangping, WU Xiaotian, CUI Wenjie. Influences of 3D model generalization approach on calculation of stress and strain of soils under plane strain [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 459-467. DOI: 10.11779/CJGE20211389.
- [5] 孙宇雁,王子国.水泥土抗剪强度试验研究[J].岩土工程界,2009,12(1): 68-70. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7801.2009.01.022.  
SUN Yuyan, WANG Zigu. Experimental study on shear strength of cement-soil [J]. Mineral Exploration, 2009, 12(1): 68-70. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7801.2009.01.022.
- [6] 阮波,彭学先,邓林飞.水泥土抗剪强度参数试验研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(4): 662-668. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7029.2016.04.011.  
RUAN Bo, PENG Xuexian, DENG Linfei. Experimental study on shear strength parameters of cement-soil [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(4): 662-668. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7029.2016.04.011.
- [7] 陈四利,侯芮,倪春雷,等.基于三轴压缩试验的水泥土力学特性研究[J].硅酸盐通报,2018,37(12): 4012-4017.  
CHEN Sili, HOU Rui, NI Chunlei, et al. Research on the mechanical properties of cemented soil based on triaxial compression tests [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(12): 4012-4017.
- [8] 陈文昭,高全臣.水泥土力学性能最优拌合水量的试验研究[J].建筑科学,2010,26(5): 10-13. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2010.05.015.  
CHEN Wenzhao, GAO Quanchen. Experimental study on the optimal mixing-water amount related to the mechanical properties of cement-soil [J]. Building Science, 2010, 26(5): 10-13. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2010.05.015.
- [9] 刘鑫,范晓秋,洪宝宁.水泥砂浆固化土三轴试验研究[J].岩土力学,2011,32(6): 1676-1682. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.06.050.  
LIU Xin, FAN Xiaoqiu, HONG Baoning. Experimental study of triaxial test of soils stabilized by cement mortar

- [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(6): 1676-1682. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.06.050.
- [10] 王启云, 卓祖磊, 项玉龙, 等. 厦门市海积淤泥水泥土力学性能试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(6): 1942-1948.  
WANG Qiyun, ZHUO Zulei, XIANG Yulong, et al. Experimental study on mechanical properties of cemented marine silt in Xiamen [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(6): 1942-1948.
- [11] 赵春彦, 黄启友, 郎锋, 等. 单因素和多因素作用下的水泥土强度评估模型试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(11): 2788-2795. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2018.11.009.  
ZHAO Chunyan, HUANG Qiyu, LANG Feng, et al. Experimental study on strength evaluation model of cement soil under single factor and multi factors [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(11): 2788-2795. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2018.11.009.
- [12] 陈盛原, 叶华洋, 张伟锋, 等. 路堤荷载作用下柔性桩复合地基的沉降分析[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 3077-3086. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1902.  
CHEN Shengyuan, YE Huayang, ZHANG Weifeng, et al. Settlement analysis of flexible pile composite foundation under embankment load [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 3077-3086. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1902.
- [13] 章定文, 刘松玉. 路堤荷载下柔性桩复合地基沉降实用计算方法[J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1133-1138. DOI: 10.16285/j.rsm.2007.06.013.  
ZHANG Dingwen, LIU Songyu. Practical method for settlement calculation of flexible columns composite foundation under embankment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1133-1138. DOI: 10.16285/j.rsm.2007.06.013.
- [14] 白顺果, 侯永峰, 张鸿儒. 循环荷载下柔性桩复合地基永久沉降影响因素的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(8): 1309-1313.  
BAI Shunguo, HOU Yongfeng, ZHANG Hongru. Experimental study on influence factors for permanent settlement of composite ground with flexible piles under cyclic loadings [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(8): 1309-1313.
- [15] 张先伟, 王常明, 李忠生, 等. 不同地区结构性软土基本性质的对比研究[J]. *工程勘察*, 2010, 38(5): 6-10, 93.  
ZHANG Xianwei, WANG Changming, LI Zhongsheng, et al. Contrasting study on fundamental properties of structural soft clay in different areas [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2010, 38(5): 6-10, 93.
- [16] 陈海雄, 刘龙武, 张健, 等. 固化技术在软土地基中的应用研究[J]. *公路与汽运*, 2022(2): 71-73, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.02.018.  
CHEN Haixiong, LIU Longwu, ZHANG Jian, et al. Study on application of solidification technology in soft soil foundation [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2022(2): 71-73, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.02.018.
- [17] 贺炜, 胡彬, 王晓佳, 等. 塑料排水板处理近海软土地基的沉降量分析[J]. *交通科学与工程*, 2023, 39(5): 64-73. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021112023101982.  
HE Wei, HU Bin, WANG Xiaojia, et al. Settlement analysis of offshore soft soil foundation treated by PVD [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2023, 39(5): 64-73. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021112023101982.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:焦登武)