

DOI: 10.11779/CJGE2021S2014

# 静荷载下水泥土桩复合单元体大型三轴试验研究

叶观宝<sup>1,2</sup>, 黄弋娃<sup>1,2</sup>, 张振<sup>\*1,2</sup>, 陈勇<sup>1,2</sup>, 郑文强<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 水泥土桩法作为一种常用的软土加固方法, 可有效提高地基承载力、减小沉降。国内外众多学者对水泥土桩复合地基进行了相关研究, 但由于现场试验和模型研究中其应力状态不够明确, 无法正确分析其力学特性。采用大型三轴试验研究静荷载下水泥土桩复合单元体的力学特性, 获得了置换率和围压对其峰值强度与残余强度的影响。最后提出了改进的水泥土桩复合体等效黏聚力经验公式, 可为水泥土桩复合地基的设计提供参考。

**关键词:** 水泥土桩; 复合地基; 力学特性; 等效抗剪强度; 大型三轴试验

**中图分类号:** TU431

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2021)S2-0060-04

**作者简介:** 叶观宝(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事地基处理等方面的教学和科研。E-mail: ygb1030@126.com。

## Large-scale triaxial tests on unit cell of composite soil with cement-soil columns under static loading

YE Guan-bao<sup>1,2</sup>, HUANG Yi-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhen<sup>\*1,2</sup>, CHEN Yong<sup>1,2</sup>, ZHENG Wen-qiang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory

of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The cement-soil column, as one of the commonly-used ground improvement methods, can effectively improve the bearing capacity of foundation and reduce settlement. There have been many researches focused on this topic. However, the stress state of the composite soil is not clear in field and model tests, therefore, its real mechanical behavior is difficult to be obtained. A series of large-scale triaxial tests are conducted to investigate the unit cell of the composite soil with cement-soil columns under static loading. The influences of replacement ratio and confining stress on the peak and residual strengths are gained. An empirical method for calculating the equivalent cohesion of the composite soil is proposed, providing a reference for the design of composite foundation with cement-soil columns.

**Key words:** cement-soil pile; composite foundation; mechanical behavior; equivalent shear strength; large-scale triaxial test

## 0 引言

水泥土桩法(搅拌桩、旋喷桩)因其适用性强、工艺成熟以及经济效益好, 被广泛应用于软土地基处理中。水泥土桩法可显著提高软土地基的承载力, 减小地基沉降。

国内外众多学者采用模型试验、现场试验、数值模拟等手段研究了水泥土桩复合地基的承载力和变形规律<sup>[1-4]</sup>。需要指出的是, 水泥土和土一样, 均属于应力相关材料<sup>[5]</sup>。而模型试验和现场试验中水泥土所受的应力状态并不明确。

本文采用大型三轴试验研究静荷载下水泥土桩复合单元体的力学特性, 探究置换率和围压对其峰值强度与残余强度的影响。基于试验结果, 提出改进的水泥土桩复合体等效黏聚力经验公式, 为水泥土桩复合地基的设计提供参考<sup>[6]</sup>。

## 1 模型试验

### 1.1 试验材料

试验用土取自苏州高新区第③层饱和淤泥质粉质黏土, 水泥采用 P.C 32.5R 早强型复合硅酸盐水泥, 水采用自来水。土体基本物理力学参数如下: 天然密度为 1.66 g/cm<sup>3</sup>, 含水率为 25.0%, 液限为 36.3%, 塑限为 21.2%。固结不排水三轴试验得土的黏聚力为 7.1 kPa, 内摩擦角为 15°。水泥土桩采用的水灰比为 1.0, 水泥掺入量为 10%。养护 60 d 后进行无侧限抗压试验, 得到水泥土的峰值强度为 0.93 MPa, 对应的应变为 1.6%, 残余强度为 0.38 MPa, 均在工程实际中的水泥土参数范围内<sup>[7]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41972272, 41772281); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(22120190220)

**收稿日期:** 2021-08-16

**\*通信作者:** (E-mail: dyzhangzhen@126.com)

1.2 试样制作

水泥土桩复合单元体试样为直径 300 mm、高 600 mm 的圆柱体。图 1 为试样示意图，置换率分别为 11.1%，16.0%和 21.7%。试样制作过程如下：①在大三轴三瓣模内固定好橡胶模；②模具内底层放置一层滤纸，再放置水泥土桩，确保桩体垂直居中；③桩周土采用天然含水率的重塑土，按软土天然密度分批次填入模具内，并进行压实，重复操作至模具内填满软土；④将试样顶面刮平，在顶部铺上一层滤纸后放置加载顶盖，注意顶盖与试样保持同轴。图 2 为制作好的水泥土桩复合单元体试样。

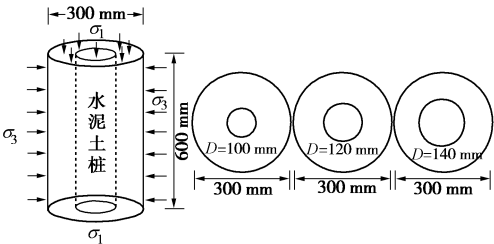


图 1 水泥土桩复合单元体示意图

Fig. 1 Schematic of unit cell of composite soil

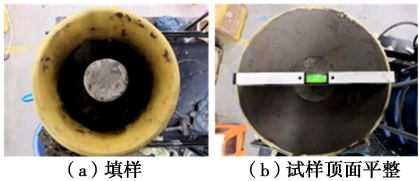


图 2 水泥土桩复合单元体试样

Fig. 2 Preparation of specimen

1.3 试验方案与加载过程

试验采用 GCTS 大型静动三轴仪，主要考虑围压和置换率对水泥土桩复合单元体静力特性的影响。试验方案见表 1。

表 1 试验方案  
Table 1 Test program

编号	置换率/%	围压/kPa
S1	11.1	40
S2	11.1	60
S3	11.1	80
S4	16.0	80
S5	21.7	80

试样推入大型三轴仪后，在相应围压下进行固结，待体积变化稳定后（本文试验为 12 h）施加轴向压力。轴向压力采用应变控制法施加，加载速率为 0.1 mm/min。研究表明<sup>[8]</sup>，水泥土的峰值应变一般在 1%~2%，但为了获得其后续残余强度的规律，以轴向应变达到 4%作为试验终止条件。

2 试验结果与分析

2.1 围压的影响

图 3 为不同围压下置换率为 11.1%的水泥土桩复合单元体应力 - 应变曲线。随着围压增加，水泥土桩复合单元体的峰值偏应力逐渐增加，而峰值偏应力对应的应变基本在 0.35%~0.53%之间变化。当轴向应变大于 3%时，水泥土桩复合单元体残余偏应力趋于稳定。

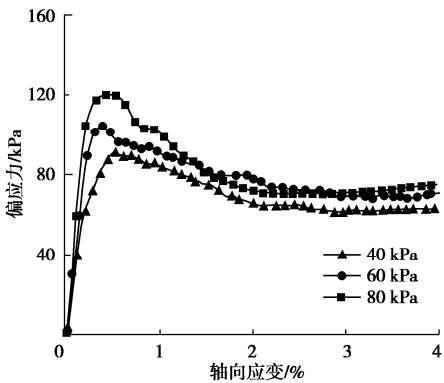


图 3 不同围压下水泥土桩复合单元体应力 - 应变关系

Fig. 3 Stress-strain curves of specimens under different confining stresses

2.2 置换率的影响

图 4 为围压 80 kPa 时不同置换率条件下水泥土桩复合单元体的应力 - 应变关系曲线。试样在本试验所采用的置换率下均表现出应变软化特征。随着置换率的增加，水泥土桩复合单元体的峰值偏应力从 120.0 kPa 增加至 199.2 kPa，残余偏应力从 74.6 kPa 增加至 160.0 kPa。图 5 为试验后水泥土桩破坏形态。水泥土桩桩端与桩身均出现了破坏，并呈现出剪切破坏。

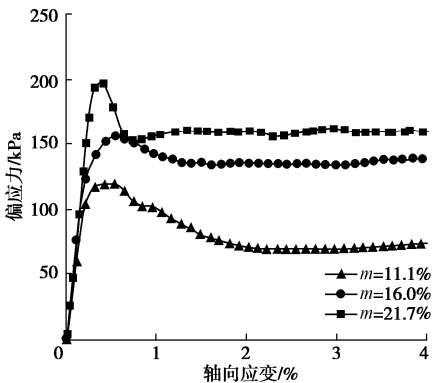


图 4 不同置换率下水泥土桩复合单元体应力 - 应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of specimens with different replacement ratio

2.3 水泥土桩复合单元体力学参数

图 6 为置换率为 11.1%时水泥土桩复合单元体的峰值抗剪强度与残余抗剪强度随围压变化的关系曲线。峰值抗剪强度与残余抗剪强度取峰值偏应力和残余偏应力的一半。



图5 水泥土桩破坏形态

Fig. 5 Failure modes of cement-soil columns

随着围压增大,其峰值抗剪强度与残余抗剪强度基本呈线性增大。当围压由 40 kPa 增加至 80 kPa 时,其峰值抗剪强度提高了 31.4%,而残余抗剪强度仅提高了 18.4%。由此可见,围压对水泥土桩复合单元体峰值抗剪强度的影响较明显。

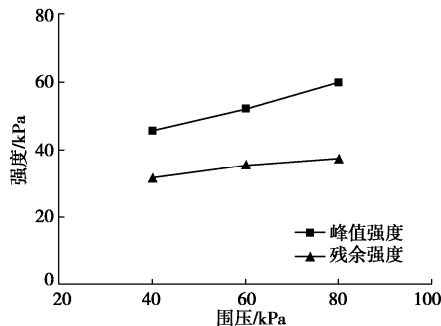


图6 水泥土桩复合单元体强度随围压的变化

Fig. 6 Variation of strength of unit cell with confining stress

图7为围压为 80 kPa 时水泥土桩复合单元体的峰值抗剪强度与残余抗剪强度随置换率变化的关系曲线。图中置换率为零表示未加固的软土。随着置换率增加,水泥土桩复合单元体的峰值抗剪强度逐渐增加。当置换率为 11.1% 时,水泥土桩复合单元体的残余抗剪强度与未加固软土的强度基本一致;当置换率大于 11.1% 后,残余抗剪强度出现明显增加。这可能由于置换率较小时,桩体的残余强度对水泥土桩复合单元体的影响较小。

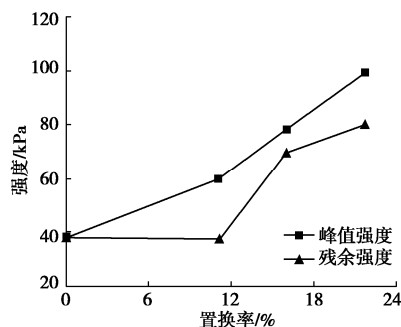


图7 水泥土桩复合单元体强度随置换率的变化

Fig. 7 Variation of strength of unit cell with replacement ratio

### 3 复合体强度计算方法

#### 3.1 复合体抗剪强度

由图8绘制得不同围压下水泥土桩复合单元体的莫尔应力圆,可得水泥土桩复合单元体的总应力抗剪强度指标:等效黏聚力  $c=22.8$  kPa,等效内摩擦角  $\varphi=14.8^\circ$ 。对比软土的抗剪强度指标 ( $c=7.1$  kPa,  $\varphi=15^\circ$ ) 可知,由于水泥土的存在,水泥土桩复合单元体的等效黏聚力相比软土明显增大,而其等效摩擦角与桩间土基本一致。Ahnberg 等<sup>[9]</sup>通过试验也指出水泥土的内摩擦角与被加固的天然土接近。

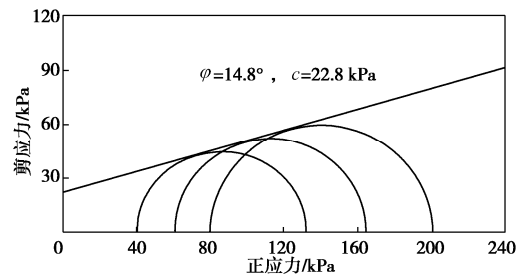


图8 水泥土桩复合单元体莫尔圆

Fig. 8 Mohr's circle of unit cell

莫尔-库仑强度准则可用大主应力  $\sigma_1$  和小主应力  $\sigma_3$  表示:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (1)$$

式中,  $\sigma_1$  为大主应力,  $\sigma_3$  为小主应力,  $c$  为黏聚力,  $\varphi$  为内摩擦角。假设各组试验水泥土桩复合单元体的等效内摩擦角基本不变,即  $\varphi=14.8^\circ$ 。由式(1)可反算出试样 S4 和 S5 的等效黏聚力,分别为 39.0 kPa 和 55.3 kPa。

表2 等效黏聚力计算结果

Table 2 Calculated results of equivalent cohesion

置换率 /%	试验结 果/kPa	式(2) /kPa	式(5) /kPa	偏差	
				式(2)	式(5)
11.1	25.0	57.9	25.3	0.43	0.99
16.0	39.0	80.4	38.2	0.49	1.02
21.7	55.3	106.5	55.8	0.52	0.99
平均值				0.48	1.00

实际工程中,常采用等效抗剪强度来评估加固体的力学性能提升,如下式:

$$c = c_p m + c_s (1 - m), \quad (2)$$

式中,  $c_p$  和  $c_s$  分别为水泥土桩和桩间土的黏聚力,  $c_p$  可取  $1/2q_u$  ( $q_u$  为水泥土的无侧限抗压强度);  $m$  为水泥土桩的置换率。该公式概念清晰,形式简单<sup>[6]</sup>。表2列出了采用式(2)计算得到的3种置换率下水泥土桩复合体等效黏聚力。由表可知,采用式(2)所得复合体的等效黏聚力大于试验结果。因此,下文对式(2)进行改进。

#### 3.2 水泥土桩复合体抗剪强度经验方法

式(2)亦可写成如下形式:

$$c = c_s + m(c_p - c_s). \quad (3)$$

式(3)表明,水泥土桩复合体的等效黏聚力公式可理解为桩间土的黏聚力与由水泥土桩产生的黏聚力增量

$(c_p - c_s)$  和权重系数  $m$  乘积之和。现将式 (3) 写成如下泛化形式:

$$c = c_s + g(m)(c_p - c_s) \quad (4)$$

式中,  $g(m)$  为以置换率  $m$  为自变量的权重函数。将试验反算得到的复合体等效黏聚力代入上式, 可计算得  $g(0.111)=0.039$ ,  $g(0.16)=0.070$ ,  $g(0.217)=0.105$ 。同时,  $g(m)$  需满足边界条件:  $g(0)=0$ ,  $g(1)=1$ 。图 9 为 5 组数据  $(m, g(m))$  的散点图。通过数学拟合, 得到  $g(m)=m^{1.47}$ , 相关系数  $R^2=0.99$ 。因此, 复合体的等效黏聚力  $c$  的经验公式为

$$c = c_s + m^{1.47}(c_p - c_s) \quad (5)$$

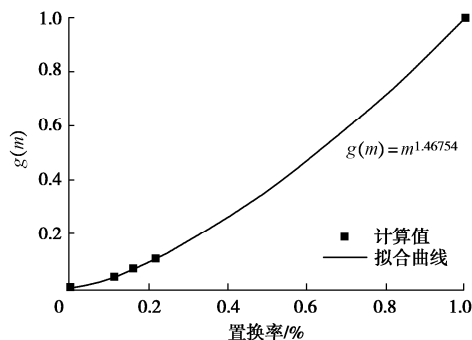


图 9  $g(m)$  公式拟合

Fig. 9 Fitting curve of  $g(m)$

表 2 列出了采用不同方法计算的水泥土桩复合体等效黏聚力。偏差为试验结果与计算结果之比, 偏差值越远离 1, 表明计算结果与试验结果差距越大。由表可知, 改进后的式 (5) 偏差平均值为 1.0, 而式 (2) 的偏差平均值为 0.48。改进后的方法能够较好地预测水泥土桩复合体的等效黏聚力, 为设计提供适用的水泥土桩复合地基等效抗剪强度计算方法。但需要指出的是, 本方法可用于水泥土桩复合地基的承载力和变形计算, 而非稳定性验算。

## 4 结 论

(1) 三轴应力状态下, 随着轴向压力的增加, 水泥土桩复合单元体表现应变软化特性, 桩体呈现为剪切破坏。围压对水泥土桩复合单元体峰值抗剪强度的影响较残余抗剪强度要更为明显。水泥土桩复合单元体的峰值强度随置换率的增加而增大, 而当置换率大于 11.1% 后, 残余强度出现明显增加。

(2) 水泥土桩复合单元体峰值抗剪强度对应的应变基本在 0.35%~0.53% 之间变化, 当轴向应变大于 3% 时, 水泥土桩复合单元体残余抗剪强度趋于稳定。

(3) 相比于未加固软土的抗剪强度指标, 水泥土桩复合单元体的等效黏聚力明显提高, 而内摩擦角变化不大。传统等效黏聚力计算方法易高估水泥土桩复

合体的等效黏聚力。基于试验结果, 提出了改进的等效黏聚力经验公式。

## 参考文献:

- [1] 刘慧芬, 郑伟锋, 程春香, 等. 水泥土搅拌桩加固软土地基施工质量控制[J]. 地基处理, 2020, 2(6): 527 - 532. (LIU Hui-fen, ZHENG Wei-feng, CHENG Chun-xiang, et al. Construction quality control of cement mixing pile for soft ground treatment[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(6): 527 - 532. (in Chinese))
- [2] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96 - 115. (LIU Han-long, ZHAO Ming-hua. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96 - 115. (in Chinese))
- [3] 章定文, 范礼彬, 刘松玉, 等. 水泥土搅拌桩复合地基固结机理室内模型试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(12): 1 - 9. (ZHANG Ding-wen, FAN Li-bin, LIU Song-yu, et al. Laboratory model tests on consolidation mechanism of soft clay improved by deep mixing cement columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(12): 1 - 9. (in Chinese))
- [4] 马洪友, 刘 林. 水泥搅拌桩复合地基承载力研究[J]. 公路, 2013(2): 50 - 53. (MA Hong-you, LIU Lin. Study on bearing capacity of cement mixing pile composite foundation[J]. Highway, 2013(2): 50 - 53. (in Chinese))
- [5] LIU F, ZHU K, HU X, et al. Experimental simple shear study of composite soil with cemented soil core[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2019, 37(8): 960 - 971.
- [6] ZHANG Z, XIAO Y, HAN J, et al. Modified equivalent area method for calculating factors of safety against deep-seated failure of embankments over deep-mixed foundations[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(3): 1 - 16.
- [7] 水泥土配合比设计规程: JGJ/T 233—2011[S]. 2011. (Specification for Mix Proportion Design of Cement Soil: JGJ/T 233—2011[S]. 2011. (in Chinese))
- [8] OMINE K, OCHIAI H, YASUFUKU N. Evaluation of scale effect on strength of cement-treated soils based on a probabilistic failure model[J]. Soils and Foundations, 2005, 45(3): 125 - 34.
- [9] AHNBERG H, JOHANSSON S E. Increase in strength with time in soils stabilised with different types of binder in relation to the type and amount of reaction products[C]// International Conference on Deep Mixing, 2005-Best Practice and Recent Advances, 2005, Stockholm.