

DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0376

新型劲性水泥土组合桩内界面抗剪强度试验研究

吴学震¹, 夏亚歆¹, 李大勇^{1,2}, 游先辉³, 单宁康³, 肖贞科⁴, 陈 祥⁵

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580;

3. 福建德亚新能源科技有限公司, 福建 福州 350005; 4. 福建省国筑建设工程有限公司, 福建 福州 350804;

5. 中兴华骏建设有限公司, 福建 泉州 362000)

摘 要: 传统劲性水泥土复合桩的内芯多采用预应力混凝土管桩, 其仅依靠内外芯的摩擦和黏结来传递荷载。现场调研发现, 水泥土桩与管桩界面的胶结力较小, 依据规范进行设计时, 内界面抗剪强度往往取值很低。针对此种情况, 将内芯预应力混凝土管桩替换为钢管桩, 探寻其与外芯水泥土桩间界面的抗剪强度, 同时又提出将外表面具有螺旋叶片的钢管桩作为新型内芯桩。针对内芯为无肋钢管及螺旋叶片钢管的桩段试样进行了内界面剪切试验, 分析了内界面极限剪切力的影响因素并进行了定量数据表征。获得了新型组合桩的内外芯剪切破坏模式及内界面抗剪强度参数的演化规律和计算方法, 从而对《劲性复合桩技术规程》(JG/T 023—2007) 桩体承载力计算公式中的内界面抗剪强度参数取值进行了修正。

关 键 词: 劲性水泥土复合桩; 钢管桩; 螺旋叶片; 内界面抗剪强度; 模型试验; 规范参数修正

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2025) 02—467—12

Experiment on shear strength of inner interface of a new type stiffened deep mixed pile

WU Xue-zhen¹, XIA Ya-xin¹, LI Da-yong^{1,2}, YOU Xian-hui³, SHAN Ning-kang³,
XIAO Zhen-ke⁴, CHEN Xiang⁵

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 3. Fujian Deya New Energy Technology Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350005, China;

4. Fujian Guozhu Construction Engineering Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350804, China;

5. Zhongxing Huajun Construction Co., Ltd., Quanzhou, Fujian 362000, China)

Abstract: The inner core of traditional stiffened deep mixed piles is typically a prestressed concrete cylinder, relying solely on friction and bonding between the inner and outer cores to transmit load. Field investigations reveal that the bonding force between the soil-cement pile and the tubular pile interface is minimal. When the design is carried out according to specifications, the shear strength of the inner interface is often significantly low. To address this issue, the inner core prestressed concrete cylinder is replaced with a steel pipe pile, and the shear strength of the interface between the inner core prestressed concrete pipe pile and the outer core cement-soil pile is investigated. Additionally, a steel pipe pile with spiral blades on its outer surface is proposed as a new type of inner core pile. Shear tests on the internal interface were conducted on pile section samples with inner cores of non-ribbed steel pipes and spiral blade steel pipes. The factors influencing the ultimate shear force of the internal interface were analyzed, and the quantitative data were characterized. The shear failure mode of the inner and outer cores of the new composite pile, along with the evolution law and calculation method of the shear strength parameters of the inner interface, were determined. The shear strength parameters of the inner interface in the bearing capacity calculation formula of the pile, as specified in the *Technical specification for strength composite piles* (JG/T 023—2007), were modified.

Keywords: stiffened deep mixed pile; steel pipe pile; spiral blade; shear strength of internal interface; model experiment; specification parameter correction

收稿日期: 2024-03-29

录用日期: 2024-09-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52179098, No. 41907251); 国家重点研发计划青年科学家项目 (No. 2024YFC2911000)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52179098, 41907251) and the National Key Research and Development Program Young Scientist Project (2024YFC2911000).

第一作者简介: 吴学震, 男, 1988 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程方面的科研与教学工作。E-mail: wu@fzu.edu.cn

通讯作者: 李大勇, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程方面的研究。E-mail: ldy@upc.edu.cn

1 引言

劲性水泥土复合桩是一种由内外芯两种桩体结合而成的组合桩。其兼具外芯水泥土搅拌桩较大的桩侧摩阻力及内芯桩较高的强度和刚度,在提高承载力、减小沉降的同时,还具有诸多优势,例如水泥土搅拌桩最大限度利用地基土,施工时无地基土侧向挤出,对原有建筑物、管线影响较小,可在建筑物密集区施工,可根据地基土性质灵活设计选用固化剂及配合比,施工无振动、噪音和污染,造价低廉,工期较短等^[1]。

国内外学者和工程技术人员近年来对劲性水泥土复合桩做了许多富有成效的研究及应用工作。朱锐等^[2]开展了劲性复合桩挤土效应及静力触探试验,对成桩过程中桩周土体总应力、孔隙水压力及有效应力的变化进行了研究。顾士坦等^[3]基于复合材料力学及明德林解,导出了芯桩轴向应力、水泥土桩-芯桩界面剪应力沿芯桩长度方向的分布函数。王安辉等^[4]基于现有软黏土和硬黏土中桩侧土抗力-桩身水平位移(p - y)曲线,建立了软黏土中劲性复合桩(strength composite piles, SC 桩) p - y 曲线计算方法,同时开展了性能影响因素分析。陈昌富等^[5]基于试验研究,推导了柔性基础下等芯型水泥土复合桩应力与变形计算递推公式,进而基于计算结果得到侧摩阻力和轴力分布规律。胡光阳^[6]通过模型试验对内外芯接触面的剪切特性进行了研究,采用摩尔-库仑公式对直剪试验中所测定的桩-土界面参数进行了拟合。李俊才等^[7-8]的研究表明,管桩水泥土复合桩的荷载-沉降(Q - s)曲线呈缓变型,管桩承担了上部的主要荷载,桩端阻力占桩顶荷载比例较小,其结合现场试验与有限元计算结果研究对比了芯桩为素混凝土及钢筋混凝土预制桩的劲性水泥土复合桩受力性状及承载机制。李子田^[9]对水泥土劲性复合桩模型进行了试验,同时据此比较了国家及地方规范中承载力计算公式的准确性。吴迈等^[10]通过足尺对比及模型对比试验发现,水泥土组合桩的承载力明显高于水泥土搅拌桩,芯桩承担了大约 80% 的桩顶荷载。凌光容等^[11]通过原型对比试验,证实了芯长和含芯率适当的劲性搅拌桩承载力比混凝土桩承载力平均高出 30% 以上。Voottipruex 等^[12]通过静载试验及现场监测证实了在路堤荷载下劲性水泥土复合桩在沉降与变形中较水泥土搅拌桩的优越性。宋义仲等^[13-14]依托工程实例,提出了管桩水泥土复合基桩关键技术,与同地区钻孔灌注桩相比,施工效率基本相当而造价降低了约 35%,其承载力

较相同尺寸的钻孔灌注桩提高了至少 40%,荷载传递规律兼具刚性桩与半刚性桩特性。水泥土复合管桩一般应用于软土地基或粉土地区,在砂卵石地区应用较为罕见。李欣^[15]、王猛^[16]等依托工程项目,对密实砂卵石地层中的水泥土复合管桩进行了现场加载试验与数值模拟对比分析,指出其为典型的摩擦桩工作模式,同时设计出一种桩底抗拔装置,最后对水泥土复合管桩施工技术进行了质量、经济及环境效益分析。

目前,我国出台了很多行业标准,如《劲性复合桩技术规程》(JGJ/T 327—2014)^[17],由于目前劲性水泥土组合桩内芯多采用管桩的形式,还出台了《水泥土复合管桩基础技术规程》(JGJ/T 330—2014)^[18]。各地也纷纷出台了地方规程,如河北省的《混凝土芯水泥土组合桩复合地基技术规程》(DB13(J)50—2005)^[19]、《刚性芯夯实水泥土桩复合地基技术规程》(DB13(J)/T 70—2018)^[20],天津市的《高喷插芯组合桩技术规程》(DB/T 29—160—2006)^[21]、《天津市劲性搅拌桩技术规程》(DB/T 29—102—2021)^[22],云南省的《加芯搅拌桩技术规程》(DBJ53/T—19—2007)^[23],江苏省的《SMC 劲性复合桩技术规程》(JG/T 023—2007)^[24]、《劲性复合桩技术规程》(DGJ32/TJ 151—2013)^[25]。

当前研究及工程应用中劲性水泥土组合桩的内芯多采用预应力混凝土管桩,其自重较大,工程造价较高。当其内芯采用管桩等圆柱形承载体时,劲性内芯与外芯之间仅依靠内外芯的摩擦及黏结来传递荷载,内界面抗剪强度值离散性较高。当上部荷载过大时,内界面可能先于外界面破坏,而使水泥土桩侧摩阻力的效力不能充分发挥,桩体承载力达不到设计要求。因此,为了避免上述问题,在计算内界面抗剪强度时,《劲性复合桩技术规程》^[17]取其特征值为室内相同配比水泥土试块无侧限抗压强度的 0.04~0.08 倍,《水泥土复合管桩基础技术规程》^[18]取标准值的 0.052 8 倍,其值均较小,导致需要更长的芯桩或更大的桩径才能满足设计要求,造成了材料的冗余和浪费。李欣等^[15]也指出,水泥土复合管桩的不足主要是水泥土桩与管桩界面的胶结力较小。

针对上述情况,本文将内芯预应力混凝土管桩替换为钢管桩,探寻其与外芯水泥土桩间界面的抗剪强度,同时又提出将外表面具有螺旋叶片的钢管桩作为新型内芯桩,以类似机械啮合的方式来提高内外芯桩接触面的抗剪强度。针对内芯为无肋钢管及螺旋叶片钢管的桩段试样进行内界面剪切试验,分析内界面极限剪切力的影响因素,以获得新型组

合桩的内外芯剪切破坏模式及内界面抗剪强度参数的演化规律和计算方法, 从而对《劲性复合桩技术规程》^[17]桩体承载力计算公式中的内界面抗剪强度参数取值进行修正。

2 模型试验

2.1 试验材料

试验所用土样取自福建省福州市福清市某施工现场, 为较浅层淤泥质土体, 其各项物理性质参数如表 1 所示。试验所用水泥为福州炼石水泥有限公司生产的强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥, 其主要组分及性能指标如表 2、3 所示。为贴合实际工程现场施工, 试验中所用水体均采用自来水。

表 1 试验土体各项物理性质参数

Table 1 Physical property parameters of experiment soil

土体名称	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%
淤泥质土	1.66	56.6	47.8	28.8

表 2 试验水泥主要组分的含量及烧失量

Table 2 Contents of main components and loss on ignition of experiment cement

主要组分含量/%					烧失量 /%
熟料	工业副产石膏	粉煤灰	炉渣	矿渣粉	
80	5	3	7	5	2.6

表 3 试验水泥性能指标

Table 3 Performance indices of experiment cement

比表面积 /($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	初凝时间 /min	终凝时间 /min	3 d 抗压强度 /MPa	3 d 抗压强度 /MPa
356	185	250	5.1	24.2

试验中桩段内芯桩钢管采用 Q235 级钢管, 制作无肋钢管及螺旋叶片钢管两种, 均封底。其中螺旋叶片钢管的螺旋叶片竖向投影直径根据委托方的要求按 1:5 放缩后, 有 128.0 mm 及 91.4 mm 两种, 其余参数均一致, 如表 4 所示。内芯桩构件厂制作后如图 1(a)所示。

2.2 试样制作

为尽可能模拟实际施工条件为工程服务, 取自现场的试验土体不在烘箱中进行烘干, 而直接采用湿土进行试验。试验中水及水泥用量均以湿土质量为基准进行计算及称量。试样制作步骤如下:

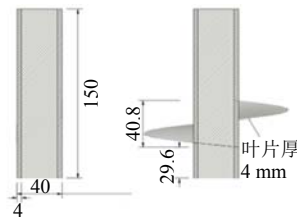
表 4 内芯桩尺寸参数

Table 4 Size parameters of core pile

全长 /mm	外径 /mm	壁厚 /mm	叶片厚 /mm	叶片螺距 /mm	叶片中心距底 /mm
150	40	4	4	40.8	50



(a) 内芯模型桩段实物图



(b) 剖面示意图 (单位: mm)



(c) 水泥土拌合物

图 1 试验材料

Fig.1 Experimental materials

(1) 水泥土拌合: 分别按水泥掺入比 15%、20%、25%及水灰比 1:1 称取水及水泥后, 依照《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)^[26]对水泥土试块的制作要求, 先手动将试验土体与水泥在拌桶内混合均匀, 中途不进行洒水, 待土体与水泥混合均匀后, 将拌合水一次性加入, 粗略翻动混合物后采用可调档的手扶式搅拌机进行拌制。按照“先低速搅拌 1 min, 再高速搅拌 30 s, 后停止 0~30 s”的步序循环反复, 直至搅拌均匀。从加拌合水起至拌合物搅拌均匀所需的时间控制在 10~20 min 之间。拌合好的水泥土如图 1(c)所示。

(2) 试样桩段浇注: 将水泥土分多次缓慢注入到以管帽为底托的定制 PVC 管中, PVC 管内径为 240 mm, 浇注高度为 100 mm。每次浇注后使用振动棒振实桩身, 减少拌合物之间的空隙, 再将钢管/螺旋叶片钢管旋入水泥土中心, 固定好上端钢管后, 再次使用振动棒振实桩身, 最后使用油灰刀抹平桩段上表面。

(3) 试样桩段养护: 由于水泥土桩多应用于淤泥土、淤泥质土、黏性土中, 工程项目预计应用于海岸滩涂、鱼塘等富水条件中, 因此, 待上述步骤完成后, 于管内覆水, 水面仿照《水泥土配合比设计规程》^[26]中对试块养护的要求, 高出桩段上表面距离不小于 20 mm, 如图 2 所示。为排除试验误差并验核螺旋叶片的添加对桩体内界面抗剪力提高效果的普遍性, 在水泥掺入比 15%时二次制作了内芯桩形式为无肋钢管及螺旋叶片竖向投影直径为

128.0 mm 的螺旋叶片钢管桩段。试样桩段按水泥掺入比 15%、20%、25% 分为 3 组，共有 11 个，图 2 中仅展示了其中 1 个。桩段共养护 28 d，养护期间定期使用卷尺检查水面高度，及时添水。



图 2 覆水桩段

Fig.2 Water-covered pile section

(4) 水泥土试块制作：试样桩段浇注同期，均制作有相应的水泥土试块。按照《水泥土配合比设计规程》^[26]，将拌合物分两层浇注入已事先进行清洁，内表面涂刷了脱膜剂的 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体模具中；每层浇注后，使用一端直径为 10 mm 的圆头形玻璃棒，按螺旋方向从边缘向中心均匀插捣 15 次，插捣底层时触及试模底部，插捣上层时插入底层 5~15 mm；浇注完成后振动 2 min 排出拌合物中的气体使之密实。振实后拌合物高出试模上沿口，用油灰刀平整地刮去试模顶部多余的水泥土，抹平后覆上保鲜膜。整个成型时间不超过 25 min，全程控制在 2 h 内完成，试块覆膜前后如图 3(a)所示。试块静置 48 h 后拆模，放入水中养护 26 d，其中试块的间隔保证不小于 10 mm，水面高出试块表面不小于 20 mm，如图 3(b)所示。试块按水泥掺入比 15%、20%、25% 共分为 3 组，图示为其中一组。

2.3 试验方案

为近似模拟桩周土的侧限条件，不拆卸作为模具的 PVC 管，在卸除管帽底托后将其与桩段一同放置在压力试验机下。于桩段底部放置内径为 135.0 mm，略大于螺旋叶片竖向投影直径 128.0 mm 的环形刚性垫块后，通过压力试验机上压板对上部预留长钢管上表面施加轴向力，按 1.5 mm/min 进行位移加载控制，将内外芯桩剪开。通过压力试验机内置数据采集系统采集试验过程中模型桩段内界面抗剪力（上压板所施加的轴向力）及位移变化数据，试验分为 3 组，共 11 个。以螺旋叶片钢管内芯桩为例，试验加载示意图如图 4 所示，各桩段参数如表 5 所示。



(a) 覆膜前后



(b) 水中养护

图 3 试块

Fig.3 Test blocks

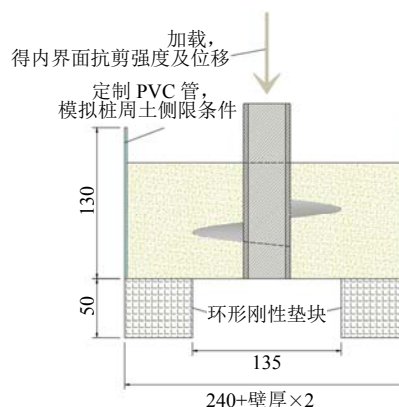


图 4 模型桩段试验加载示意图（单位：mm）

Fig.4 Diagram of model pile section experiment loading (unit: mm)

表 5 桩段参数

Table 5 Parameters of pile sections

序号	水泥掺入比 / %	螺旋叶片竖向投影直径 / mm	段长 / mm
1	15	—	100
2	15	91.4	100
3	15	128.0	100
4	20	—	100
5	20	91.4	100
6	20	128.0	100
7	25	—	100
8	25	91.4	100
9	25	128.0	100
10	15	—	100
11	15	128.0	100

水泥土试块养护完成后, 从各组的 9 块试块中随机挑选 6 块进行无侧限抗压强度试验。将试块从养护水体中取出, 擦干表面水分, 立即采用压力试验机进行试验, 按 1.0 mm/min 进行位移加载控制, 试验分为 3 组, 共 18 块。

3 试验结果与分析

3.1 试验现象

加载后的 11 个桩段如图 5 所示。由图可知, 桩段上表面, 即螺旋叶片上方水泥土均未塌陷。图中部分桩段上表面出现裂缝的原因是放置时间过久, 拍摄搬运时桩段干燥开裂, 试验过程中并未出现裂缝。对于不同水泥掺入比桩段, 在内芯无肋钢管与螺旋叶片钢管尺寸参数相同时, 内界面破坏的模式均相似, 选取其中 1 组, 如图 6 所示。无肋钢管管段桩段的内界面破坏模式见图 6(a), 沿钢管外表面向下与外芯水泥土剪开。螺旋叶片竖向投影直径为 91.4 mm 的桩段内界面破坏模式见图 6(b), 螺旋叶片钢管于桩段底部先沿环形刚性垫块内表面向下将水泥土外芯剪开一圆台薄层, 之后螺旋叶片与水泥土外芯相接触的部位 (大致为沿螺旋叶片竖向投影面所在的圆柱体外围) 与外芯水泥土剪开, 在桩段内部所剪开的位置可清楚地看到金属叶片外围。螺旋叶片竖向投影直径为 128.0 mm 的桩段内界面破坏模式见图 6(c), 螺旋叶片钢管沿螺旋叶片竖向投影面所在的圆柱体外围与外芯水泥土剪开, 在桩段所剪开的位置同样可清楚地看到螺旋叶片钢管金属叶片外围。为更清晰地展示不同内芯样式各桩段内外芯所剪开的形式, 描画各桩段内界面破坏模式示意图如图 7 所示。

3.2 测试曲线

按照水泥掺入比分别绘制各桩段荷载-位移测试曲线, 如图 8 所示。由图中可以看到, 各测试曲线在加荷过程中均经历了 3 个阶段: 荷载快速上升



图 5 试验桩段

Fig.5 Experiment pile sections



(a) 无肋钢管



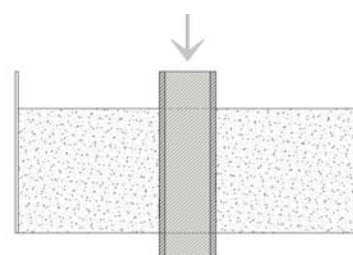
(b) 螺旋叶片竖向投影直径 91.4 mm



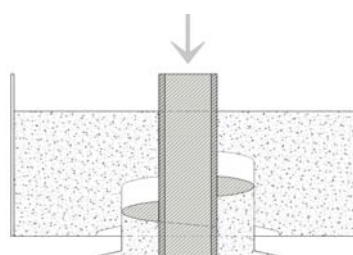
(c) 螺旋叶片竖向投影直径 128.0 mm

图 6 内界面破坏模式 (由下往上看)

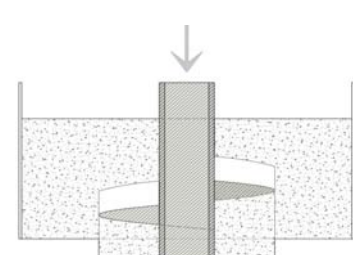
Fig.6 Internal interface failure modes (from bottom to top)



(a) 无肋钢管



(b) 螺旋叶片竖向投影直径 91.4 mm



(c) 螺旋叶片竖向投影直径 128.0 mm

图 7 内界面破坏模式示意图

Fig.7 Schematic diagrams of internal interface failure mode

阶段 I、荷载快速下降阶段 II、荷载趋于平缓阶段 III。在荷载快速上升阶段 I 中,随着加载位移的增加,桩段内界面抗剪力迅速增加,在较小的位移下快速达到极限荷载,即产生峰值。峰值过后,与土体的应变软化类似,桩段进入荷载快速下降阶段 II,内界面抗剪力迅速损失。在经过较大的加载位移后,抗剪力呈现出缓慢下降,在一定范围内即残余强度上下进行波动的现象,此时处于荷载趋于平缓阶段 III,内外芯桩剪开的程度加大。

无肋钢管、螺旋叶片桩段的荷载-位移测试曲线如图 9 所示。由图中可以看到,当螺旋叶片竖向投影直径相同时,各测试曲线之间的形状特征及走向趋势均相似。

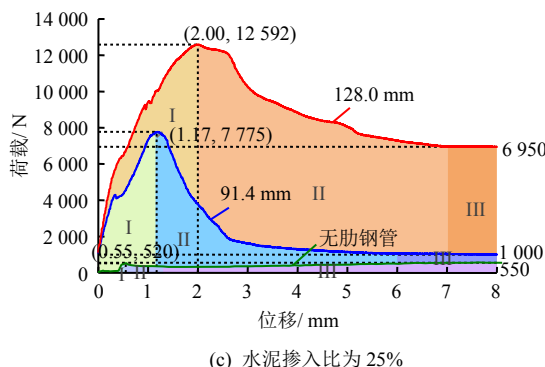
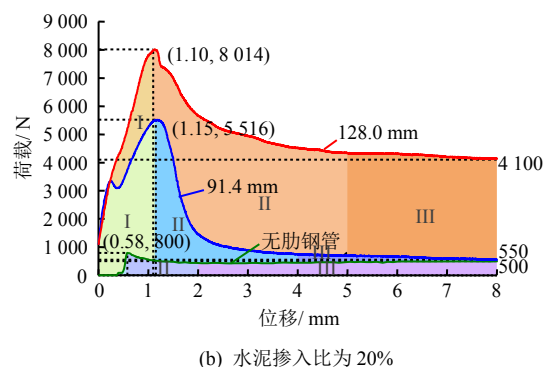
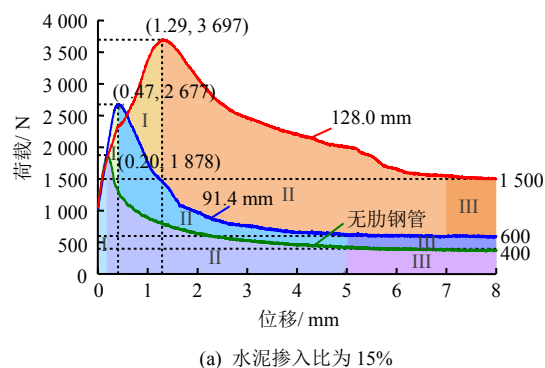


图 8 不同水泥掺入比时各桩段荷载-位移曲线
Fig.8 Load-displacement curves of pile sections under different cement mixing ratios

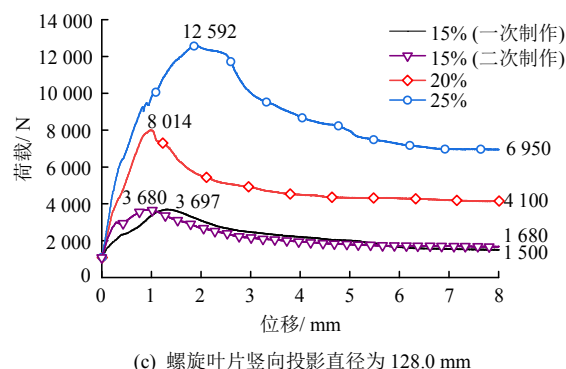
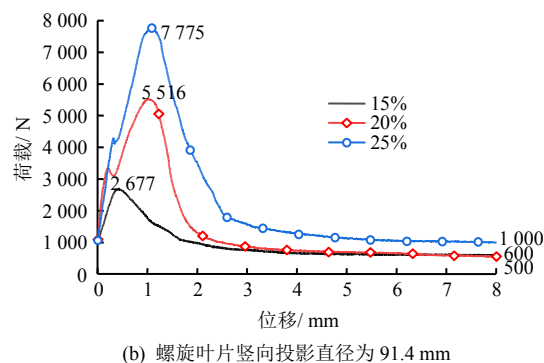
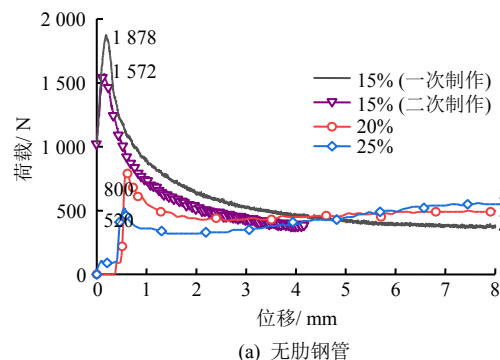


图 9 不同类型桩段荷载-位移曲线
Fig.9 Load-displacement curves of different types of pile sections

将各桩段内界面极限抗剪力汇总于表 6 中。由表中各数据可知,在水泥掺入比为 15%时,无肋钢管段桩段内界面极限抗剪力仍远远大于 20%及 25%时,该两次测试结果与平均值之差在 $\pm 8.87\%$ 范围内;螺旋叶片竖向投影直径 128.0 mm 螺旋叶片钢

表 6 桩段内界面极限抗剪力汇总表
Table 6 Summary table of ultimate shear resistance of internal interface of pile section

水泥掺入比 / %	不同螺旋叶片竖向投影直径 (mm) 时的抗剪力 / N		
	0.0	91.4	128.0
15 (一次制作)	1 878	2 677	3 697
20	800	5 516	8 014
25	520	7 775	12 592
15 (二次制作)	1 572	—	3 680
15 (平均值)	1 725	—	3 689

管桩段测试结果仍明显高于无肋钢管段桩段，该两次测试结果与平均值之差在 $\pm 0.02\%$ 范围内。若同样按照《水泥土配合比设计规程》^[26]中对试块“最大值或最小值与平均值之差不超过平均值的 20%”的限制，误差满足要求，添加螺旋叶片有利于内界面抗剪力的大幅提高。

3.3 螺旋叶片竖向投影直径的影响

极限抗剪力 S_u 与螺旋叶片竖向投影直径 A_h 之间的关系如图 10 所示。由于各桩段内界面破坏时，试验现象均为内芯处竖向圆柱体向下剪出，对于无肋钢管而言，可以将其近似看作具有螺旋叶片而其螺旋叶片竖向投影直径与其钢管外径相等的螺旋叶片钢管，因此在图 10 中对于无肋钢管，取其钢管外径值作为横坐标参数来绘制曲线。

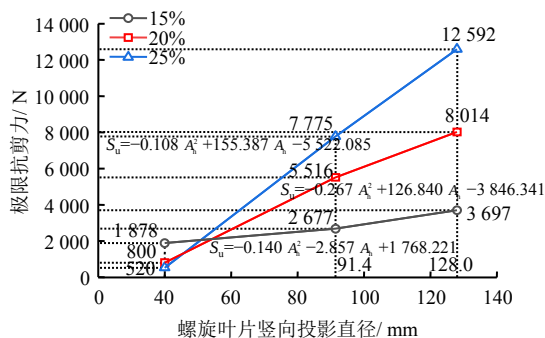


图 10 不同水泥掺入比下极限抗剪力与螺旋叶片竖向投影直径关系曲线

Fig.10 Relationship between ultimate shear resistance and vertical projection diameter of spiral blade under different cement mixing ratios

由图 10 可以看到，随着螺旋叶片竖向投影直径的增加，各水泥掺入比下桩段的极限抗剪力均不断提高。 S_u 与 A_h 之间均具有较好的线性关系，线性拟合的决定系数 R^2 在水泥掺入比为 15%、20%、25%时分别可达 0.972 43、0.993 79、0.999 63。

3.4 水泥土强度的影响

同期制作各水泥掺入比下的水泥土试块①~⑥，按照《水泥土配合比设计规程》^[26]中的公式及要求计算，无侧限抗压强度 f_{cu} 试验结果见表 7。极限抗剪力与水泥土无侧限抗压强度之间的关系如图 11 所示。由图可以看到，除无肋钢管段桩段外，各螺旋叶片钢管段桩段的极限抗剪力均随着水泥土强度的提高而不断提高。当螺旋叶片竖向投影直径为 40.0、91.4、128.0 mm 时，二次多项式拟合结果分别为

$$S_u = 2\,271.9 f_{cu}^2 - 5\,466.8 f_{cu} + 3\,737 \quad (1)$$

$$S_u = -3\,231.3 f_{cu}^2 + 11\,039.7 f_{cu} - 1\,306 \quad (2)$$

$$S_u = -2\,846.3 f_{cu}^2 + 14\,265.0 f_{cu} - 1\,673 \quad (3)$$

表 7 试块无侧限抗压强度汇总表

Table 7 Summary table of unconfined compressive strength of test blocks

水泥掺入比 / %	破坏荷载/ kN						f_{cu} / MPa
	①	②	③	④	⑤	⑥	均值
15	1.95	2.08	2.12	2.16	2.13	1.95	2.07
20	3.85	3.96	4.01	4.26	4.02	4.28	4.06
25	6.46	7.03	6.54	7.00	7.22	7.13	6.90

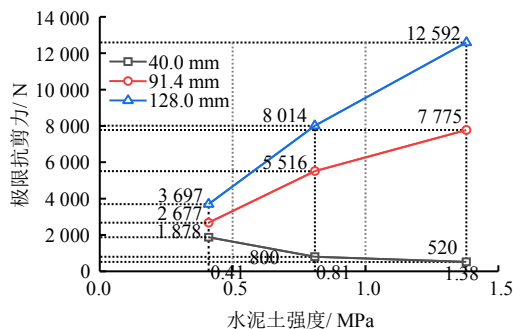


图 11 不同螺旋叶片竖向投影直径下极限抗剪力与水泥土强度关系曲线

Fig.11 Relationship between ultimate shear resistance and cement-soil strength under different vertical projection diameters of spiral blades

4 内界面抗剪强度参数

4.1 计算方法

依据《劲性复合桩技术规程》^[17]，对于短芯桩与等芯桩，当桩体的桩侧破坏面位于内、外芯界面时，劲性复合桩单桩竖向抗压承载力特征值可按下式进行估算：

$$R_a = u_c q_{sa}^c l_c + q_{pa}^c A_p^c \quad (4)$$

式中： R_a 为竖向抗压承载力特征值 (N)； u_c 为内芯桩身周长 (m)； l_c 为复合段长度 (m)； A_p^c 为内芯桩身截面积 (m^2)； q_{sa}^c 为复合段内芯侧阻力特征值 (Pa)，宜按地区经验取值，无地区经验时，宜取室内相同配比水泥土试块在标准条件下 90 d 龄期的立方体 (边长 70.7 mm) 无侧限抗压强度的 (0.04~0.08) 倍； q_{pa}^c 为内芯桩端土的端阻力特征值 (Pa)，宜按地区经验取值。

由于式(4)直接采用了特征值进行计算,与试验情形不符,因此按照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)[27]中单桩竖向承载力特征值与单桩竖向极限承载力标准值之间的关系,引入安全系数 K 。同时由于试验采用下垫环形刚性垫块的方式进行,因此没有端阻力,式(4)中等号右边第2项 $q_{pa}^c A_p^c = 0$ 。设复合段内芯侧阻力特征值 q_{sa}^c 与室内相同配比水泥土试块无侧限抗压强度 f_{cu} 的比值为 λ ,则式(4)变为

$$\frac{S_u}{K} = u_c \lambda f_{cu} l_c \quad (5)$$

K 按一般情形,取 $K=2$ 。内芯桩身周长 u_c 采用分段取值,无肋钢管段取钢管外径,螺旋叶片钢管

段取螺旋叶片竖向投影直径,同时也考虑以统一值进行全长计算,采用无肋钢管外径时 λ 改写为 γ ,采用螺旋叶片竖向投影直径时 λ 改写为 ω 。复合段长度 l_c ,考虑螺旋叶片下方无肋钢管长是否并入螺旋叶片段长的两种情形,两种情形下计算所得的内界面抗剪强度参数结果分别写为 λ 及 λ' 。需要指出的是,《劲性复合桩技术规程》[17]对复合段内芯侧阻力特征值 q_{sa}^c 的取值要求是90 d龄期,本文中的试验龄期均采取28 d,与《水泥土复合管桩基础技术规程》[18]相同。由于90 d时的水泥土试块强度会高于28 d,但同时试验测试所得的极限抗剪力也会有所提高,因此内界面抗剪强度参数反算结果与90 d时可能有出入。各参数计算结果汇总见表8。

表8 内界面抗剪强度参数汇总表
Table 8 Summary table of shear strength parameters of internal interface

掺入比 /%	无肋钢管 λ	螺旋叶片钢管											
		直径为91.4 mm						直径为128.0 mm					
		λ	λ'	γ/λ	γ	ω/λ	ω	λ	λ'	γ/λ	γ	ω/λ	ω
15(一次制作)	0.180 4	0.126 8	0.161 5	1.425 5	0.257 2	0.624 5	0.112 7	0.134 0	0.190 2	1.968 6	0.355 2	0.615 2	0.111 0
20	0.039 1	0.160 7	0.264 9	6.895 0	0.269 9	3.020 8	0.118 2	0.168 9	0.282 6	10.017 5	0.392 1	3.130 5	0.122 5
25	0.015 0	0.136 8	0.231 2	14.951 9	0.224 2	6.550 7	0.098 2	0.159 2	0.271 3	24.215 4	0.363 1	7.567 3	0.113 5
15(二次制作)	0.151 0	—	—	—	—	—	—	0.137 1	0.202 3	2.341 0	0.353 6	0.731 6	0.110 5
15(平均值)	0.165 7	—	—	—	—	—	—	0.135 5	0.196 3	2.138 3	0.354 4	0.668 2	0.110 7

4.2 参数分析

由表8中数据可知,二次制作的水泥掺入比为15%的无肋钢管段桩段,其内界面抗剪强度参数远远超过水泥掺入比为20%、25%时的相应参数。因此,可认为在水泥掺入比15%~20%的过程中,无肋钢管段桩段内界面抗剪强度经历了一个急剧下降的过程,在20%~25%之间降速逐渐趋于平缓。另外,在拌制水泥土拌合物及制作桩段的过程中,水泥掺入比为20%、25%时拌合物的流动性明显高于水泥掺入比为15%时。这可能与内界面抗剪强度存在一定的关联,拌合物流动性小时黏性大,其不易与无肋钢管剪开,流动性的明显变化可能是内界面抗剪强度参数在15%~20%间急剧下降的一项外在表征。当水泥掺入比为15%时,无肋钢管段桩段的两次内界面抗剪强度参数计算结果的变化幅度较大。原因可能是不同构件厂、不同批次的钢管外表面摩擦因子不尽相同,离散性大,并且与钢管施工工艺、厂家制作质量之间有着很大的联系。将无肋钢管作为劲性内芯的劲性水泥土组合桩,其内界面抗剪强度将不具保障性,需要添加螺旋叶片来确保

其安全性能。

对于螺旋叶片钢管段桩段,由于试验结果均近似为内芯沿螺旋叶片竖向投影面所在圆柱体的外围向下与水泥土外芯剪开,螺旋叶片上方水泥土均未塌陷,因此,在相同水泥掺入比下,其内界面抗剪强度参数值应当统一于真实值附近,即表格中每一横行下的 λ 值应近似相等。因此,摒弃 λ' 而采用 λ :当水泥掺入比为15%时,自螺旋叶片开始的向下段,其内界面抗剪强度参数 λ 在0.130 4附近;当水泥掺入比为20%时, λ 在0.164 8附近;当水泥掺入比为25%时, λ 在0.148 0附近。随着水泥掺入比的增大, λ 经历先增大而后减小的过程,如图12所示。

表8中 γ/λ 表示螺旋叶片钢管段较无肋钢管段内界面抗剪效力发挥相对比率,其值均随水泥掺入比、螺旋叶片竖向投影直径的增大而显著增大,增幅增大。在水泥掺入比由20%变化至25%的过程中,虽然内界面抗剪强度参数 λ 值有所减小,但由于水泥土强度更大,随直径的增加螺旋叶片所能剪开的外芯水泥土量增加,其总体抗剪能力上升。表8中 γ 在横向上差别较小,两组数据均经历一个先略微增

大而后略微减小的过程, 再次显示了规范[17-18]中以水泥土试块无侧限抗压强度为基准, 采用比率来进行桩体内界面抗剪强度取值的稳定性和准确性。各螺旋叶片钢管段桩段 γ/λ 及 γ 变化曲线如图 13 所示。

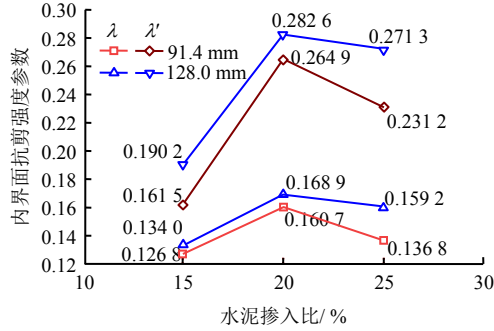


图 12 具螺旋叶片钢管段桩段 λ 及 λ' 变化曲线
Fig.12 Curves of λ and λ' of steel pipe section with spiral blades

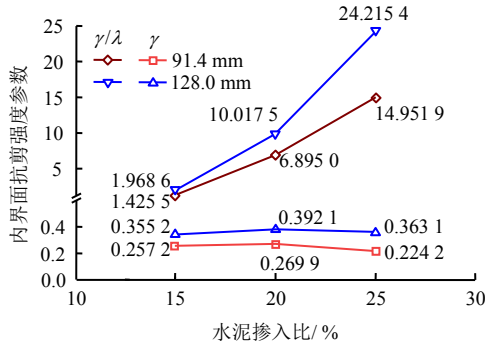


图 13 具螺旋叶片钢管段桩段 γ/λ 及 γ 变化曲线
Fig.13 Curves of γ/λ and γ of steel pipe section with spiral blades

表 8 中 ω 在横向和纵向上均差别较小, 且 6 个数据相隔较近。上述现象可理解为, 由于无肋钢管段为总体内界面抗剪所提供的效力有限, 几乎均由螺旋叶片来承担, 试验中 6 种情形的 ω 趋近于一个统一值。对于内芯桩螺旋叶片设计为由上至下遍布于外芯水泥土桩中的组合桩而言, 在水泥土强度及螺旋叶片竖向投影直径均未确定时, 可先取 6 个值的平均值, 依据内界面抗剪要求来快速反求二者之积。但需要注意的是, 由于试验中螺旋叶片上方的水泥土未塌陷, 并未形成一个由顶至底完整贯通的竖向圆柱体, 因此, 该取值方法仅用于先期的快速粗略估计, 笔者更倾向于采用 λ 来进行的逻辑清晰的分段计算。但是 ω/λ 不及 ω 使用方便, 仅作为辅助参考。各螺旋叶片钢管段桩段 ω/λ 及 ω 变化曲

线如图 14 所示。

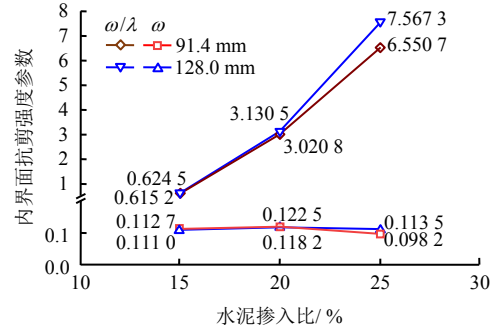


图 14 具螺旋叶片钢管段桩段 ω/λ 及 ω 变化曲线
Fig.14 Curves of ω/λ and ω of steel pipe section with spiral blades

4.3 拟合公式

为进一步简化计算步骤, 避免参数反算中繁琐的数据反复代入, 并便于工程应用中取值, 本节采用如下计算过程得出一个通过 f_{cu} 来确定 λ 的简便表达式:

令式 (1) 为 $\varphi(f_{cu})$, 式 (2) 为 $g_1(f_{cu})$, 式 (3) 为 $g_2(f_{cu})$, 将式 (1) ~ (3) 代入式 (5) 可得

$$\frac{\varphi(f_{cu})}{2} = \pi \times 0.04 \times \lambda_1 \times f_{cu} \times 10^{-6} \times 0.1 \quad (6)$$

$$\frac{g_1(f_{cu})}{2} = \pi \times 0.0914 \times \lambda_2 \times f_{cu} \times 10^{-6} \times 0.0704 + \pi \times 0.04 \times \lambda_1 \times f_{cu} \times 10^{-6} \times 0.0296 \quad (7)$$

$$\frac{g_2(f_{cu})}{2} = \pi \times 0.1280 \times \lambda'_2 \times f_{cu} \times 10^{-6} \times 0.0704 + \pi \times 0.04 \times \lambda_1 \times f_{cu} \times 10^{-6} \times 0.0296 \quad (8)$$

式中: λ_1 为无肋钢管段内界面抗剪强度参数; λ_2 及 λ'_2 为由不同拟合公式所得的螺旋叶片钢管段内界面抗剪强度参数。

联立式 (6)、(7) 以及式 (6)、(8), 解得

$$\lambda_1 = 0.090396 f_{cu} + \frac{0.148691}{f_{cu}} - 0.217517 \quad (9)$$

$$\lambda_2 = -0.096558 f_{cu} - \frac{0.059664}{f_{cu}} + 0.313085 \quad (10)$$

$$\lambda'_2 = -0.062148 f_{cu} - \frac{0.049085}{f_{cu}} + 0.280527 \quad (11)$$

式 (9) ~ (11) 均以 28 d 水泥土试块无侧限抗压强度 f_{cu} 为自变量, f_{cu} 单位为 MPa。无肋钢管段

内界面抗剪强度特征值即为

$$q_{sa}^c = \lambda_1 f_{cu} = 0.090\ 396 f_{cu}^2 - 0.217\ 517 f_{cu} + 0.148\ 691 \quad (12)$$

螺旋叶片钢管段内界面抗剪强度特征值即为

$$q_{sa}^c = \lambda_2 f_{cu} = -0.096\ 558 f_{cu}^2 + 0.313\ 085 f_{cu} - 0.059\ 664 \quad (13)$$

$$q_{sa}^c = \lambda_2' f_{cu} = -0.062\ 148 f_{cu}^2 + 0.280\ 527 f_{cu} - 0.049\ 085 \quad (14)$$

可取式(13)、(14)的平均值作为螺旋叶片钢管段内界面抗剪强度特征值,即

$$q_{sa}^c = \bar{\lambda}_{cu} = -0.079\ 35 f_{cu}^2 + 0.296\ 81 f_{cu} - 0.054\ 375 \quad (15)$$

5 结 论

本文提出了新型劲性水泥土组合桩,进行了桩段内界面剪切试验,研究了不同水泥掺入比及不同内芯桩情形下 28 d 抗剪强度特性。得出以下结论:

(1) 新型组合桩内界面剪切破坏模式:对于无肋钢管段桩段试样,为钢管沿其外表面向下与外芯水泥土剪开;对于螺旋叶片钢管段桩段试样,为螺旋叶片钢管沿螺旋叶片竖向投影面所在圆柱体的外围向下与外芯水泥土剪开。

(2) 内界面抗剪强度演化规律:各桩段的荷载-位移曲线与试块抗压测试曲线类似,均经历荷载快速上升阶段 I、荷载快速下降阶段 II、荷载趋于平缓阶段 III 共 3 个阶段。对于螺旋叶片钢管段桩段而言,随着螺旋叶片竖向投影直径、水泥掺入比、水泥土强度的增加,极限抗剪力不断增加,增幅增大;对于无肋钢管段桩段而言,随着水泥掺入比、水泥土强度的增加,极限抗剪力反而快速降低,降幅逐渐减小,推测为水泥土黏性变化所致。标志着阶段 I 结束的峰值荷载所对应的加载位移,随着螺旋叶片竖向投影直径、水泥掺入比的增加而增加,荷载峰值后曲线快速下降,内界面达破坏荷载后抗剪力即迅速损失。极限抗剪力与螺旋叶片竖向投影直径及水泥土强度之间均能呈现出较好的线性关系。

(3) 内界面抗剪强度参数分析及工程应用:对于无肋钢管段桩段,内界面抗剪强度参数离散性大,不建议将无肋钢管桩作为劲性内芯来承载。对于螺旋叶片钢管段桩段,优先采用 λ 来进行内界面抗剪强度计算;随着水泥掺入比的增大, λ 值经历先增大后减小的过程。随着水泥掺入比、螺旋叶片竖向

投影直径的增大,螺旋叶片钢管段较无肋钢管段内界面抗剪效力发挥比率显著增大。在进行内芯桩设计时,可通过式(12)~(15)拟合,或当螺旋叶片竖向投影直径及水泥土强度均未确定时,取内界面抗剪强度参数汇总表 8 中 ω 的 6 个值的平均值,依据所需的内界面抗剪强度来快速估求水泥土强度与螺旋叶片竖向投影直径之积,再以此确定螺旋叶片钢管段段长。

参 考 文 献

- [1] 陈甦, 陈国兴. 水泥土桩复合地基研究综述[J]. 中外公路, 2007, 27(3): 34-41.
CHEN Su, CHEN Guo-xing. Research summary of cement-soil pile composite foundation[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2007, 27(3): 34-41.
- [2] 朱锐, 周峰, 陈廷柱, 等. 劲性复合桩挤土效应及承载力作用机制研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3577-3586.
ZHU Rui, ZHOU Feng, CHEN Ting-zhu, et al. Soil squeezing effect and bearing mechanism of strength composite pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(12): 3577-3586.
- [3] 顾士坦, 施建勇, 王春秋, 等. 劲性搅拌桩芯桩荷载传递规律理论研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2473-2478.
GU Shi-tan, SHI Jian-yong, WANG Chun-qiu, et al. Theoretical study of core pile load transfer regularity of reinforced mixing pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(8): 2473-2478.
- [4] 王安辉, 章定文, 谢京臣. 软黏土中劲性复合桩水平承载特性 p - y 曲线研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 381-389.
WANG An-hui, ZHANG Ding-wen, XIE Jing-chen. p - y curves for lateral bearing behavior of strength composite piles in soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(2): 381-389.
- [5] 陈昌富, 陈苏淑, 朱世民, 等. 柔性基础下等芯型水泥土复合桩荷载传递特性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 152-160.
CHEN Chang-fu, CHEN Su-shu, ZHU Shi-min, et al. Analysis on load transfer behaviors of equal-core stiffened deep mixed pile under flexible foundation[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2023, 50(1): 152-160.
- [6] 胡光阳. 劲性复合桩内、外芯及桩周土接触面剪切特性试验研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2022.

- HU Guang-yang. Experimental study on shear characteristics of the contact surface of strength composite pile's inner and outer core and pile peri-pile soil[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2022.
- [7] 李俊才, 张永刚, 邓亚光, 等. 管桩水泥土复合桩荷载传递规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 3068-3076.
- LI Jun-cai, ZHANG Yong-gang, DENG Ya-guang, et al. Load transfer mechanism of composite pile composed of jet-mixing cement and PHC pile with core concrete[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Suppl.1): 3068-3076.
- [8] 李俊才, 邓亚光, 宋桂华, 等. 素混凝土劲性水泥土复合桩承载机制分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 181-185.
- LI Jun-cai, DENG Ya-guang, SONG Gui-hua, et al. Analysis of load-bearing mechanism of composite foundation of plain concrete reinforced cement-soil mixing piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 181-185.
- [9] 李子田. 水泥土劲性复合桩的竖向承载机制研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- LI Zi-tian. Study on the vertical bearing capacity of stiffened deep cement mixing (SDCM) piles[D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [10] 吴迈, 窦远明, 王恩远. 水泥土组合桩荷载传递试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 432-434.
- WU Mai, DOU Yuan-ming, WANG En-yuan. A study on load transfer mechanism of stiffened DCM pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 432-434.
- [11] 凌光容, 安海玉, 谢岱宗, 等. 劲性搅拌桩的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 92-96.
- LING Guang-rong, AN Hai-yu, XIE Dai-zong, et al. Experimental study on concrete core mixing pile[J]. **Journal of Building Structures**, 2001, 22(2): 92-96.
- [12] VOOTTIPRUEX P, BERGADO D T, SUKSAWAT T. Behavior and simulation of deep cement mixing (DCM) and stiffened deep cement mixing (SDCM) piles under full scale loading[J]. **Soils and Foundations**, 2011, 51(2): 307-320.
- [13] 宋义仲, 卜发东, 程海涛, 等. 管桩水泥土复合基桩承载性能试验研究[J]. 工程质量, 2012, 30(5): 12-16.
- SONG Yi-zhong, BU Fa-dong, CHENG Hai-tao, et al. Experimental study on bearing capacity of pipe pile cement-soil composite foundation pile[J]. **Construction Quality**, 2012, 30(5): 12-16.
- [14] 宋义仲, 程海涛, 卜发东, 等. 管桩水泥土复合基桩工程应用研究[J]. 施工技术, 2012, 41(5): 89-91, 99.
- SONG Yi-zhong, CHENG Hai-tao, BU Fa-dong, et al. Study on engineering application of composite pile made up of jet-mixing cement and PHC with core concrete[J]. **Construction Technology**, 2012, 41(5): 89-91, 99.
- [15] 李欣, 王猛, 万征, 等. 北京工人体育场密实砂卵石层水泥土复合管桩试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(6): 53-58.
- LI Xin, WANG Meng, WAN Zheng, et al. Experimental study on cement-soil composite pipe pile in dense sand pebble layer of Beijing Workers Stadium[J]. **Building Structure**, 2023, 53(6): 53-58.
- [16] 王猛, 李欣, 鞠竹, 等. 北京工人体育场密实砂卵石层水泥土复合管桩设计与施工[J]. 建筑结构, 2023, 53(6): 47-52, 5.
- WANG Meng, LI Xin, JU Zhu, et al. Design and construction on cement-soil composite pipe pile in dense sand pebble layer of Beijing Workers Stadium[J]. **Building Structure**, 2023, 53(6): 47-52, 5.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 327—2014 劲性复合桩技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ/T 327—2014 Technical specification for strength composite piles[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 330—2014 水泥土复合管桩基础技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ/T 330—2014 Technical specification for pile foundation of pipe pile embedded in cement soil[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [19] 河北省建设厅. DB13(J) 50—2005 混凝土芯水泥土组合桩复合地基技术规程[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005.
- Department of Construction of Hebei Province. DB13(J) 50—2005 Technical specification for composite foundation of SDM pile[S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2005.
- [20] 河北省住房和城乡建设厅. DB13(J)/T 70—2018 刚性芯夯实水泥土桩复合地基技术规程[S]. 石家庄: 河北

- 省建设厅, 2018.
- Department of Housing and Urban-Rural Development of Hebei Province. DB13(J)/T 70—2018 Technical specification for composite foundation of rammed soil-cement piles with rigid core[S]. Shijiazhuang: Department of Housing and Urban-Rural Development of Hebei Province, 2018.
- [21] 天津市建设管理委员会. DB/T 29—160—2006 高喷插芯组合桩技术规程[S]. 天津: 天津市建设管理委员会, 2006.
- Tianjin Housing and Urban-Rural Construction Commission. DB/T 29—160—2006 Technical code for JG soil-cement-pile strengthened pile (JPP)[S]. Tianjin: Tianjin Housing and Urban-Rural Construction Commission, 2006.
- [22] 天津市住房和城乡建设委员会. DB/T 29—102—2021 天津市劲性搅拌桩技术规程[S]. 天津: 天津市住房和城乡建设委员会, 2021.
- Tianjin Housing and Urban-Rural Construction Commission. DB/T 29—102—2021 Tianjin technical specification for reinforced cement soil mixed pile[S]. Tianjin: Tianjin Housing and Urban-Rural Construction Commission, 2021.
- [23] 云南省建设厅. DBJ53/T—19—2007 加芯搅拌桩技术规程[S]. 昆明: 云南科技出版社, 2007.
- Department of Construction of Yunnan Province. DBJ53/T—19—2007 Technical specification for concrete core mixing pile[S]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2007.
- [24] 江苏省建设厅. JG/T 023—2007 SMC 劲性复合桩技术规程[S]. 南京: 江苏省建设厅, 2007.
- Department of Housing and Urban-Rural Development of Jiangsu Province. JG/T 023—2007 Technical specification for SMC strength composite piles[S]. Nanjing: Department of Housing and Urban-Rural Development of Jiangsu Province, 2007.
- [25] 江苏省住房和城乡建设厅. DGJ32/TJ 151—2013 劲性复合桩技术规程[S]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2013.
- Department of Housing and Urban-Rural Development of Jiangsu Province. DGJ32/TJ 151—2013 Technical specification for strength composite piles[S]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2013.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 233—2011 水泥土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ/T 233—2011 Specification for mix proportion design of cement soil[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.