

引用本文:肖成志,司雨,王子寒,等. 注浆微型钢管桩体抗弯力学性能[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(4):87-96.

XIAO Cheng-zhi, SI Yu, WANG Zi-han, et al. Flexural Mechanical Properties of Grouted Micro-steel-pipe-piles[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 87-96.

DOI:10.19815/j.jace.2019.11028

注浆微型钢管桩体抗弯力学性能

肖成志¹, 司雨¹, 王子寒¹, 李立书²

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 承德市公路工程管理处, 河北 承德 067000)

摘要:基于 15 根注浆微型钢管桩体的抗弯荷载试验, 综合分析钢管直径 d 和壁厚 t 、浆体水灰比 W 、钢管表面布孔直径 r 和间距 s 等因素对注浆微型钢管桩体抗弯承载特性、变形和破坏特点的影响。结果表明:相同桩径时, 钢管直径和壁厚对微型钢管桩体抗弯承载特性影响显著, 桩体极限抗弯荷载值随钢管直径和壁厚的增加近似呈线性增加; 当 $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ (D 为桩径), 浆体水灰比在 $0.45 \sim 0.75$ 之间时对桩体极限抗弯荷载的影响较小, 钢管表面布孔形式对桩体极限抗弯荷载的影响较小; 基于注浆微型钢管桩外包浆体和钢管的荷载-应变曲线分析可知, 注浆微型钢管桩体抗弯破坏标准可以以外包浆体的破坏为准; 当 $0.28 \leq d/D < 0.59$ 时, 钢管屈服和受压区外包浆体开裂所对应的抗弯荷载与极限抗弯荷载基本相同, 而当 $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ 时, 荷载加至极限抗弯荷载 80% 时钢管屈服, 注浆微型钢管桩体呈现出明显的延性特征, 钢管及内核注浆体自身强度发挥充分且抗弯承载作用明显, 建议实践中微型钢管桩体钢管设计时以 $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ 为宜。

关键词:微型钢管桩; 注浆; 抗弯极限荷载; 钢管; 抗弯试验

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)04-0087-10

Flexural Mechanical Properties of Grouted Micro-steel-pipe-piles

XIAO Cheng-zhi¹, SI Yu¹, WANG Zi-han¹, LI Li-shu²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Department of Administration of Chengde Road Engineering, Chengde 067000, Hebei, China)

Abstract: On the basis of flexural loading test for 15 micro-steel-pipe-piles, the effect of diameter d and wall thickness t of steel pipe, water cement ratio of slurry, diameter r and spacing s of steel pipe surface grouting holes on the flexural bearing capacity, deformation and failure properties of micro-steel-pipe-piles were comprehensively analyzed. The results show that with the same diameter of pile body, the diameter and wall thickness of the steel pipe have a significant influence on the flexural bearing capacity of the micro-steel-pipe-piles. With the increase of the diameter and wall thickness of steel pipe, the ultimate flexural load of micro-piles increases approximately linearly. When $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ (D is pile diameter), the water cement ratio of the slurry changes between 0.45 and 0.75, the influence on the ultimate flexural load of the pile is small, and the influence of hole arrangement on the ultimate flexural load of piles is small. Based on the analysis of the load-strain curves of the grouted micro-steel-pipe pile and the surrounding slurry,

收稿日期: 2019-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877255); 河北省自然科学基金项目(E2018202108); 承德市科技支撑计划项目(201706A075)

作者简介: 肖成志(1976-), 男, 湖北荆州人, 教授, 工学博士, E-mail: chengzhixiao@hotmail.com。

the standard of the flexural failure of the piles is based on the damage of the surrounding slurry. When $0.28 \leq d/D < 0.59$, the flexural loads corresponding to steel pipe yielding and outside slurry cracking almost equal to the ultimate flexural load. When $0.59 \leq d/D \leq 0.72$, the steel pipe at midspan begins to yield when the applied load is about 80% of the ultimate load, and the micro-steel-pipe-piles exhibit well extensible performance. The strengths of steel pipes and slurry inside pipes have been utilized fully and they can play main role against flexural performance of micro-piles. It is suggested that $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ should be used in the design of micro-steel-pipe-pile.

Key words: micro-steel-pipe-pile; grouting; flexural ultimate load; steel pipe; flexural test

0 引言

自 20 世纪 50 年代 Kraft 等^[1-2]提出微型桩的概念以来,这种直径小于 300 mm 的微型桩因施工便捷、造价低廉和噪声小等优异的工程特性,在国内外被广泛用于道路边坡和地基等岩土加固工程中^[3-5],而注浆微型钢管桩作为微型桩的一种,通过钻机成孔并下放钢管,在钢管内部压力注浆并借助钢管表面布孔向管外喷射浆体,最终形成由钢管外包浆体、钢管和钢管内部注浆体组成的桩体。

目前,国内外学者在微型钢管桩抗弯性能方面取得了一些研究成果。唐咸远等^[6]研究了截面尺寸和外包浆体对微型钢管桩抗弯能力的影响,指出抗弯能力随截面尺寸的增大而增大,外包浆体对相同截面构件的强度影响不大;吉伯海等^[7-9]指出含钢率是影响钢管桩抗弯承载力的主要因素,钢管与混凝土的有机结合使构件具有较好抗弯特性和延性;Varma 等^[10]通过方钢管高强混凝土的抗弯试验,得出构件使用阶段的刚度为极限抗弯弯矩的 60%;王少杰等^[11]提出桩体水泥浆对提高微型桩抗弯能力有显著效果;邓朗妮等^[12-13]研究了混凝土强度等级、钢管直径等参数对微型钢管桩抗弯承载力的影响,结果表明钢管外径的增大对承载力提高影响最大,外包混凝土影响最小;武斌等^[14]对 4 个圆钢管混凝土受弯构件进行研究,得出构件经历弹性变形、弹塑性变形及塑性变形 3 个阶段;乐腾胜等^[15-16]通过对钢管管壁上注浆孔的研究,得出开孔位置及尺寸对钢管桩稳定有较大影响;梁忠勇等^[17-19]指出通过配筋可有效提高桩体抗弯极限承载力;陈龙等^[20]通过有限元分析了预制高强混凝土薄壁钢管桩的抗弯承载力。

综上所述,当前针对注浆微型钢管桩的研究主要集中在承载特性,影响因素分析相对单一,缺乏整体性和全面性,对钢管与桩径相互关系及对抗弯承

载特性与变形影响的综合分析较少。因此,本文基于抗弯承载特性试验,综合分析钢管直径 d 与壁厚 t 、浆体水灰比、钢管表面注浆孔布设方式等对微型钢管桩承载特性与变形的影响,研究微型钢管桩抗弯承载特性及破坏特性,并在合理发挥桩体抗弯承载特性时明确钢管尺寸与桩径的相互关系。

1 抗弯承载特性试验

1.1 试验概况

为了分析注浆微型钢管桩桩体抗弯承载特性,试验选取直径 $D=150$ mm 的注浆微型钢管桩,改变钢管直径 d 与壁厚 t 、注浆体水灰比 W 、钢管表面注浆孔径 r 和间距 s ,分析各因素对微型钢管桩桩体轴向承载特性的影响,试验方案如表 1 所示。

注浆微型钢管桩体采用自制模具制成,如图 1 所示。钢管外包浆体由 PVC 圆形管道模具支撑,PVC 圆筒内径和壁厚分别为 150 mm 和 4 mm,通过模具底部卡槽和上部限位螺栓以适应钢管直径变化,并确保钢管中心与 PVC 圆筒中心一致。固定好钢管后,通过模具顶部卡板预留孔压力注浆并养护后,最终形成总长为 1 100 mm 的钢管桩体试件。

1.2 试验材料

选取 7 种标准规格的 Q235 钢管用于微型钢管桩体试件制作,钢管直径 d 分别为 42, 60, 76, 89, 89, 89, 108 mm,壁厚 t 分别为 3.5, 4, 6, 4, 5, 6, 6 mm,依据规范获得屈服强度和极限抗拉强度分别为 267.4 MPa 和 325.7 MPa,弹性模量为 200.5 MPa,泊松比为 0.32,并根据表 1 中试验方案在钢管表面布设不同孔径 r 和间距 s 的注浆孔,如图 2 所示。

试验中桩体试件的注浆体采用水泥净浆,参照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[21]灌注桩基构造规定,桩身混凝土强度等级不得小于 C25,因此,选用普通硅酸盐水泥 P.O42.5,分别采用水灰

表 1 注浆微型钢管桩抗弯承载特性试验方案

Tab. 1 Test Scheme for Flexural Mechanical Properties of Grouted Micro-steel-pipe-pile

影响因素	试件编号	钢管直径 d/mm	壁厚 t/mm	试件高度 H/mm	浆液水灰 比 W	钢管注浆孔 径 r/mm	注浆孔间 距 s/mm	d/D	桩体直径 D/mm
钢管直径	B1100-42/3.5-0.45-8/75	42	3.5	1 100	0.45	8	75.0	0.28	150
	B1100-60/4-0.45-8/75	60	4.0					0.40	
	B1100-76/6-0.45-8/75	76	6.0					0.50	
	B1100-89/6-0.45-8/75	89	6.0					0.59	
	B1100-108/6-0.45-8/75	108	6.0					0.72	
钢管壁厚	B1100-89/4-0.45-8/75	89	4.0		0.45	8	75.0	0.59	
	B1100-89/5-0.45-8/75	89	5.0					0.59	
	B1100-89/6-0.45-8/75	89	6.0					0.59	
浆液水灰比	B1100-89/6-0.45-8/75	89	6.0		0.45	8	75.0	0.59	
	B1100-89/6-0.60-8/75				0.60				
	B1100-89/6-0.75-8/75				0.75				
	B1100-108/6-0.45-8/75	108	6.0		0.45			0.72	
	B1100-108/6-0.60-8/75				0.60				
	B1100-108/6-0.75-8/75				0.75				
钢管注浆孔 径和间距	B1100-89/6-0.45-8/75	89	6.0		0.45	8	75.0	0.59	
	B1100-89/6-0.45-8/37.5					8	37.5		
	B1100-89/6-0.45-12/75					12	75.0		
	B1100-108/6-0.45-8/75	108	6.0			8	75.0	0.72	
	B1100-108/6-0.45-8/37.5					8	37.5		
	B1100-108/6-0.45-12/75					12	75.0		

注:试件编号 B1100-42/3.5-0.45-8/75 中 B 表示试件抗弯承载,1100 表示试件高度 H 为 1 100 mm,42/3.5 表示钢管直径 d 和壁厚 t 分别为 42 mm 和 3.5 mm;0.45 表示注浆浆液水灰比 W 为 0.45;8/75 表示钢管布设孔径 r 和间距 s 分别为 8 mm 和 75 mm。

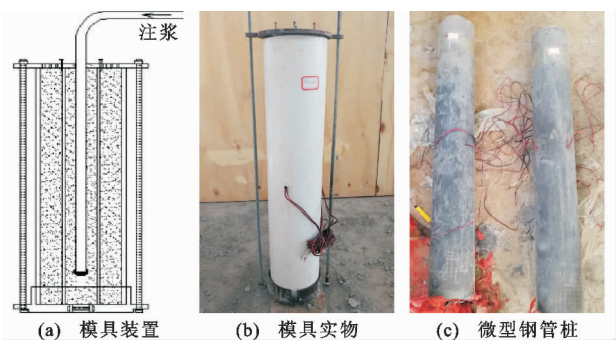


图 1 微型注浆钢管桩模具及试件

Fig. 1 Mould Device and Specimen of Grouted Micro-steel-pipe-pile

比为 0.45,0.60,0.75 的水泥浆注浆形成钢管桩。为了确定不同水灰比时水泥浆的抗压强度,试制微型钢管桩体时,水泥净浆取样制成 $70.7\text{ mm}\times70.7\text{ mm}\times70.7\text{ mm}$ 的标准试块,静置 24 h 并拆模养护 28 d,标准水泥浆试块如图 3 所示。抗压试验测得水灰比为 0.45,0.60,0.75 时相应试块的平均抗压强度分别为 36.4,30.0,25.1 MPa。

1.3 抗弯加载试验

微型钢管桩桩体抗弯加载试验采用 1 000 kN

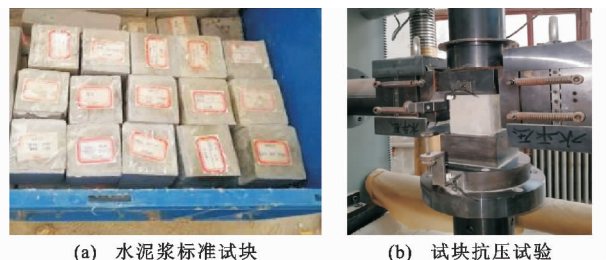


图 2 试验钢管及其注浆布孔形式

Fig. 2 Steel Pipe of Test and Layout of Hole for Grouting

液压千斤顶进行三分点加载(图 4),试验监测桩体跨中位置挠度,并在桩体两端安装位移计监测位移变化。另外,为了研究桩体应变,在桩体跨中截面处钢管外表面均匀粘贴 4 个纵向应变片和 4 个环向应变片,桩体外包浆上、下表面粘贴 2 对应变片,以监测外包浆体纵向和环向应变变化。

微型钢管桩桩体抗弯试验采用分级加载模式,每级荷载为 5 kN,加载至挠度稳定后加下级荷载,

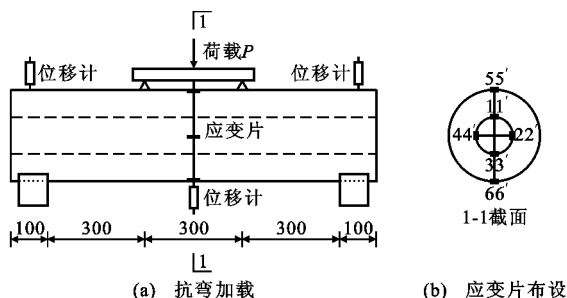


(a) 水泥浆标准试块

(b) 试块抗压试验

图3 水泥浆标准试块及抗压试验

Fig. 3 Standard Test Specimen of Cement Paste and Compression Test



(a) 抗弯加载

(b) 应变片布设

图4 微型钢管桩体抗弯加载示意图(单位:mm)

Fig. 4 Diagram of Flexural Loading Test for Micro-steel-pipe-piles (Unit:mm)

接近破坏时采用连续慢速加载,直至桩体达到极限抗弯荷载 P_u ,桩体破坏并停止加载。

2 试验结果分析

2.1 抗弯加载过程及现象

为了直观分析微型钢管桩桩体抗弯性能,针对不同直径钢管注浆形成的桩体抗弯加载试验过程及现象进行了详细记录归纳,总体上逐级加载过程中微型钢管桩桩体的宏观现象大致相同,本文基于桩体破坏现象及对应荷载将抗弯加载过程分为4个主要阶段:

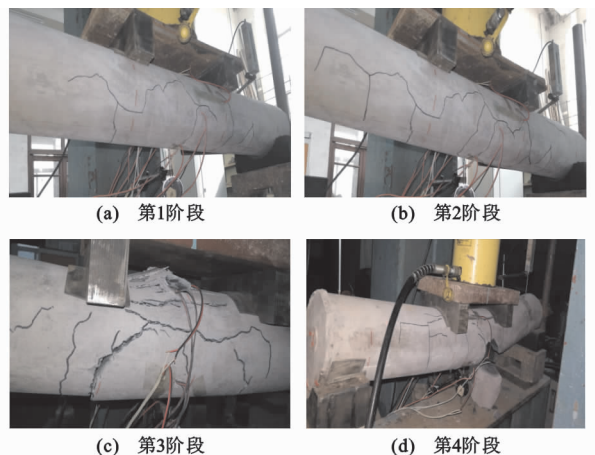
(1)第1阶段:当荷载加至 $(0.2 \sim 0.3)P_u$ 时,微型钢管桩桩体跨中下表面外包浆体开始出现与轴向垂直的微裂缝,如图5(a)所示,并伴随有轻微响声。该阶段跨中挠度变形和桩体两端变形甚小。

(2)第2阶段:当荷载加至 $(0.4 \sim 0.5)P_u$ 时,微型钢管桩桩体跨中下表面裂缝增多且开裂明显,并伴随有斜裂缝产生且向两端延伸,如图5(b)所示。该阶段跨中挠度变形增加。

(3)第3阶段:当荷载加至 $(0.6 \sim 0.8)P_u$ 时,微型钢管桩桩体跨中下表面裂缝逐步向桩体两端延伸,跨中下表面外包浆体开始出现部分脱落,并伴随明显的响声,跨中上表面外包浆体出现裂缝,如图

5(c)所示。该阶段跨中挠度较大,两端略有上翘。

(4)第4阶段:当荷载加至 $(0.9 \sim 1.0)P_u$ 时,微型钢管桩桩体斜裂缝向两端扩大延伸,跨中下表面外包浆体脱落,上表面鼓胀崩裂,如图5(d)所示。该阶段跨中挠度显著增加且两端上翘明显,桩体破坏并失去抗弯承载能力,当卸载后,相同情况下桩体中钢管直径越大,桩体试件跨中挠度回弹现象越明显。



(a) 第1阶段

(b) 第2阶段

(c) 第3阶段

(d) 第4阶段

图5 试件破坏现象

Fig. 5 Failure Modes of Specimens

2.2 抗弯承载特性分析

2.2.1 钢管桩径和壁厚对桩体抗弯承载特性影响

针对桩径 $D=150$ mm,桩体长 $H=1\ 100$ mm,水灰比 $W=0.45$,钢管表面布孔直径 $r=8$ mm 和间距 $s=75$ mm,通过桩体抗弯荷载-跨中挠度曲线来分析微型钢管桩桩体抗弯承载特性,图6为钢管直径和壁厚变化对抗弯承载特性的影响。由图6可知,桩体抗弯荷载-跨中挠度曲线具有相同的变化趋势,大致可分为4个阶段,即初始加载过程试件与加载设备的咬合阶段、近似线性增长的弹性阶段、桩体屈服的弹塑性阶段和桩体略显强化阶段。不同钢管直径和壁厚时桩体抗弯荷载-跨中挠度曲线拐点明显,桩体破坏前跨中挠度持续增加,表明微型钢管桩体因钢管存在使其具有良好延性,桩体以延性破坏模式为主。

由图6(a)可知,其他因素相同的情况下,随着钢管直径的增加,桩体抗弯承载特性明显增强,桩体极限抗弯荷载相应增加,钢管直径 d 由76 mm增至89 mm和108 mm时,其对应的抗弯极限承载力由60.35 kN提高到93.35 kN和129.01 kN,分别增加了1.5倍和2.1倍。由图6(b)可知,当钢管直径相同时,增加壁厚有助于增强桩体的抗弯承载特性,钢管壁厚 $t=4$ mm时极限抗弯承载力为71.35 kN,

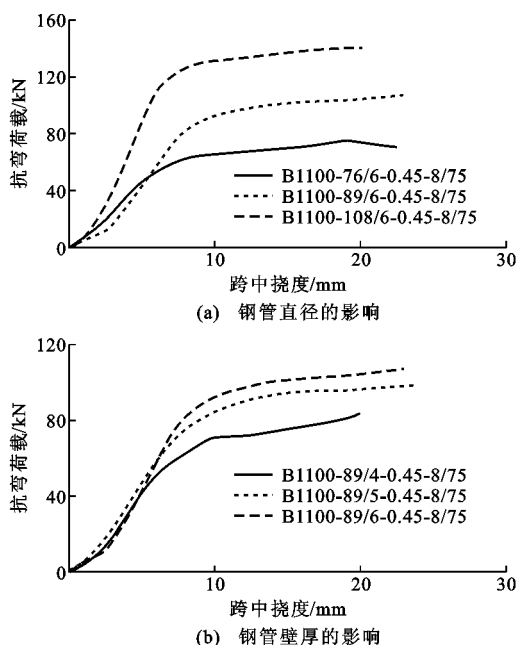


图 6 钢管直径和壁厚对桩体荷载-跨中挠度曲线影响
Fig. 6 Influence of Diameter and Wall Thickness of Steel Pipe on Load-mid Span Deflection Curves of Pile

当钢管壁厚 t 增至 5 mm 和 6 mm 时,桩体极限抗弯承载力分别增加了 1.19 倍和 1.31 倍。此外,桩体抗弯荷载-跨中挠度曲线达到拐点附近时,试件跨中部位挠度变化明显,桩体受压区跨中外包浆出现挤压裂缝,受拉区外包浆裂缝增多且宽度明显增大,持续加载时外包层脱离钢管,抗弯荷载仍缓慢上升,荷载值增幅较小,桩体略微呈现强化特性,表明增加钢管直径或壁厚,增强了钢管对管内核心水泥浆体的约束作用,由此既增加了微型钢管桩抗弯承载力,也增强了微型钢管桩的延性。

2.2.2 d/D 对微型钢管桩抗弯承载特性影响

不同 d/D 对微型钢管桩抗弯荷载-跨中挠度曲线变化的影响如图 7 所示。由图 7 可知,随着 d/D 的增加,桩体抗弯极限荷载显著增加,同等条件下跨中挠度增幅减小。当 $d/D=0.28$ 时,抗弯荷载-跨中挠度曲线表现的桩体弹性和弹塑性阶段不明显,结合加载试验破坏现象且卸载后变形最大可知,此时钢管作用不明显,抗弯荷载主要由外包浆体承担;当 $d/D \geq 0.40$ 时桩体抗弯荷载-跨中挠度曲线呈现明显的弹性、弹塑性和强化阶段,表明随 d/D 增加,钢管和管内核心水泥浆体逐渐承担起荷载,且承担荷载的比例明显增加。

图 8 给出了极限抗弯荷载下不同 d/D 时桩体试件沿整跨的挠度曲线。由图 8 可知:当 $d/D=0.28$ 时,桩体跨中挠度很小时即达到极限抗弯承载,且加

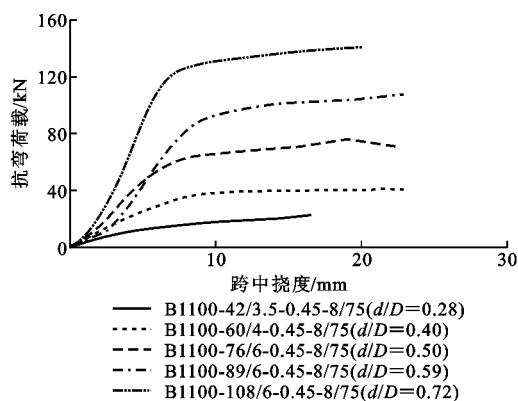


图 7 不同 d/D 时微型钢管桩荷载-跨中挠度曲线
Fig. 7 Load-mid Span Deflection Curves with Different d/D for Micro-steel-pipe-pile

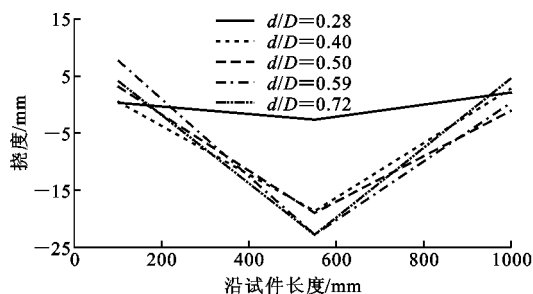


图 8 极限抗弯荷载下不同 d/D 时微型钢管桩沿整跨挠度曲线

Fig. 8 Deflection Curves with Different d/D Along Whole Span Under Ultimate Flexural Loading for Micro-steel-pipe-pile

载后期钢管外包水泥浆体大块脱落,桩体破坏后卸载,跨中无明显回弹现象,表明当 $d/D \leq 0.28$ 时桩体内钢管直径较小且作用不明显,此时桩体以钢管外包浆体抗弯承载为主,属于脆性破坏;当 $0.40 \leq d/D \leq 0.50$ 时,桩体在极限抗弯荷载下,跨中挠度明显增加,微型钢管桩延性特征明显,表明钢管在承载过程中作用增强,这一点在图 6 中也得到了很好体现;当 $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ 时,桩体在极限抗弯荷载下,最终跨中挠度更大,且桩体外包浆不易脱落,表明钢管抗弯承载占比更大,且卸荷之后观察到试件跨中挠度回弹明显。因此, d/D 越大,极限抗弯荷载增大的同时,跨中挠度增大,钢管及钢管内核心注浆体在微型钢管桩中抗弯承载占比显著增加,桩体延性破坏特征越加明显。

针对桩径 $D=150$ mm,桩体长 $H=1100$ mm,水灰比 $W=0.45$,布孔直径 $r=8$ mm 和间距 $s=75$ mm,图 9 给出了桩体试件加载过程中出现不同现象节点对应的抗弯荷载值与 d/D 的关系,选取跨中下表面最初出现裂缝(伴随第 1 声崩裂响声)、跨中

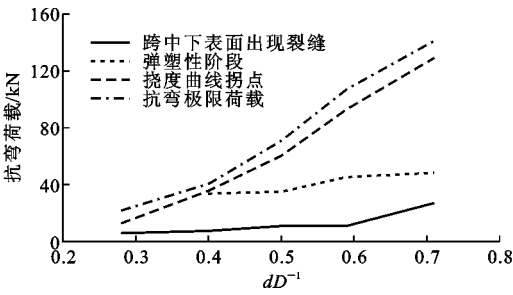


图9 微型钢管桩体不同阶段抗弯荷载随 d/D 变化

Fig. 9 Changes of Flexural Load with d/D at Different Stages for Micro-steel-pipe-pile

挠度曲线处于弹塑性阶段、拐点和抗弯极限荷载时所应对的荷载进行分析。

结合图 8,9 综合分析可知,当 $0.28 \leq d/D < 0.40$ 时从桩体跨中下表面出现裂缝到极限抗弯荷载值过程中,抗弯荷载无明显增加,较短时间内即达到极限破坏,抗弯承载力主要由试件外包浆承担,钢管及核心水泥浆抗弯作用不明显;当 $0.40 \leq d/D < 0.59$ 时,跨中下表面出现裂缝时所对应荷载近似呈线性增加,达到弹塑性阶段所对应荷载缓慢增加,钢管屈服和极限抗弯承载力随 d/D 增长幅度较大,钢管进入屈服阶段,表明在加载过程中,承载力逐渐由外包浆承载转移到钢管和核心注浆体共同承担,且 4 个阶段区分越来越明显;当 $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ 时,钢管与注浆体黏结面积较大,外包层厚度减小,跨中下表面出现裂缝时所对应荷载随 d/D 明显增大,钢管及管内核心注浆体加载变形导致外包浆破损,钢管约束作用显著,致使钢管屈服荷载和抗弯极限荷载仍保持快速增加,且钢管开始进入承担荷载状态时对应的荷载与极限抗弯承载力的比值减小,表明此加载过程中桩体抗弯承载力主要由钢管和核心注浆体承担。

2.2.3 注浆体水灰比对桩体抗弯承载特性的影响

通过改变注浆体水灰比 W 来分析其对微型钢管桩桩体抗弯承载特性的影响。基于立方体标准试块的抗压试验,测得水灰比 W 为 0.45,0.60,0.75 的 3 种配置下试块平均抗压强度分别为 36.4,30.0,25.1 MPa,相比于 $W=0.45$,当 W 增至 0.60 和 0.75 时,平均抗压强度分别降低了 17.6% 和 31.0%。

针对 $H=1\ 100\text{ mm}$,钢管表面布孔直径 $r=8\text{ mm}$ 和间距 $s=75\text{ mm}$,以及钢管壁厚 $t=6\text{ mm}$ 时,分析 d 为 89 mm 和 108 mm 两种钢管直径时注浆体水灰比对桩体抗弯承载特性的影响,结果如图 10 所示。2 种直径对应的 d/D 分别为 0.59 和 0.72

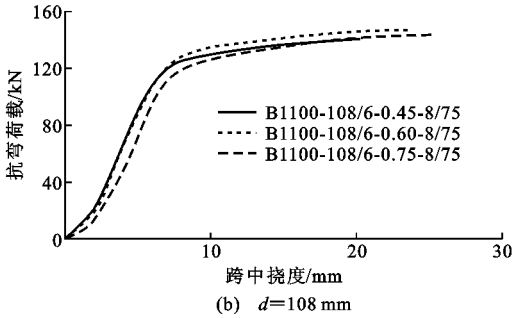
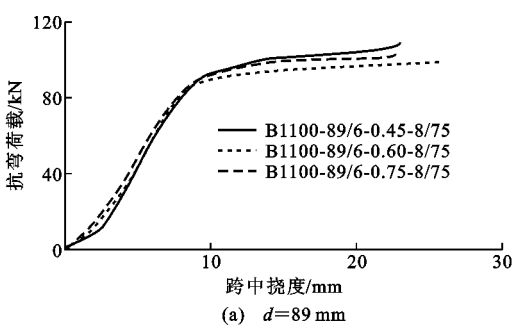


图 10 W 对微型钢管桩抗弯荷载-跨中挠度曲线影响

Fig. 10 Influence of W on Flexural Load-mid Span Deflection Curves for Micro-steel-pipe-pile

时,由前文分析可知桩体抗弯主要由钢管和管内注浆体共同承担。由图 10 可知,提高注浆体水灰比即降低注浆体抗压强度时,微型钢管桩桩体极限抗弯承载力略微降低,因此当桩体中钢管约束作用明显,且由钢管和管内注浆体共同承载时,适当降低浆体强度或提高注浆体水灰比对微型钢管桩抗弯极限承载力影响较小。

2.2.4 布孔形式对桩体抗弯承载特性的影响

注浆微型钢管桩成桩过程通常是通过钢管内部压力注浆,注浆体通过钢管表面布孔外泄形成包裹体。鉴于此,基于桩长 $H=1\ 100\text{ mm}$,水灰比 $W=0.45$ 和钢管壁厚 $t=6\text{ mm}$,取 d 为 89 mm 和 108 mm 两种钢管直径,研究钢管表面 3 种布孔形式对桩体抗弯承载特性的影响,结果如图 11 所示。由图 11 可知,改变钢管表面孔径大小($r=8,12\text{ mm}$)和间距($s=37.5,75\text{ mm}$)对桩体抗弯荷载-跨中挠度曲线的影响很小,适当增加钢管表面孔径和间距对微型钢管桩桩体的极限抗弯荷载影响很小。

2.3 桩体抗弯荷载-跨中钢管纵向应变曲线分析

为了分析桩体抗弯加载过程中钢管的受力与变形特点,试验对跨中钢管截面应变进行监测,其测点布置如图 4(b)所示。重点分析钢管跨中上、下表面处纵向(沿轴方向)应变,以 3 种直径和 3 种壁厚的钢管注浆形成的微型钢管桩为例进行分析,其桩体抗弯荷载-跨中钢管应变曲线如图 12 所示。

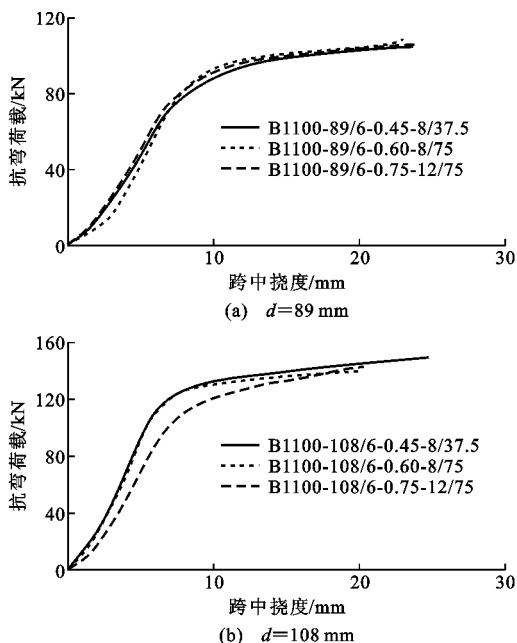


图 11 布孔形式对桩体抗弯荷载-跨中挠度曲线影响

Fig. 11 Influence of Layout of Holes on Variation of Flexural Load-mid Span Deflection Curves for Micro-steel-pipe-pile

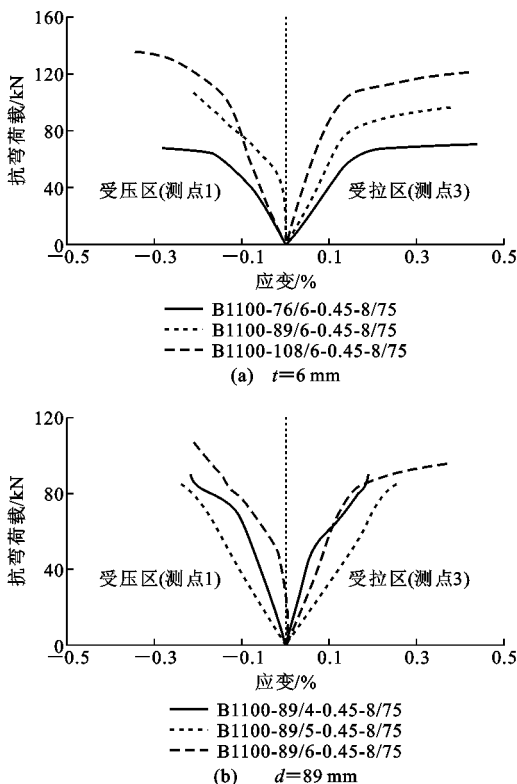


图 12 微型钢管桩抗弯荷载-跨中钢管应变曲线

Fig. 12 Curves of Flexural Load-mid Span Strain of Steel Pipe for Micro-steel-pipe-pile

由图 12 可知:采用不同直径和壁厚的钢管注浆形成的微型钢管桩体,其抗弯荷载-跨中钢管应变曲

线具有相同变化趋势,跨中钢管上表面受压,而下表面受拉,且在达到屈服拐点之前,抗弯荷载-钢管应变曲线近似呈线性增加;增加钢管直径,跨中钢管达到屈服点所对应的桩体抗弯荷载不同,钢管直径越大,跨中钢管达到屈服所对应的抗弯荷载越大;桩体承受相同抗弯荷载时,总体上受拉区纵向应变比受压区略大。另外,结合图 12(a)和图 6(a)可知,桩体抗弯荷载-跨中挠度曲线出现拐点的时间要比抗弯荷载-跨中钢管应变曲线出现拐点的时间滞后,以钢管直径 $d=89$ mm 和 $t=6$ mm 为例,桩体抗弯极限荷载 P_u 约为 93 kN,而加载过程中当抗弯荷载加至约 75 kN 或 $0.8P_u$ 时,钢管受拉区屈服,表明钢管由跨中屈服向两端发展,因钢管对内核注浆体的紧箍作用,使得桩体抗弯承载力仍有所提升,而且随着钢管直径和壁厚增加,桩体抗弯性能也得到增强。

针对注浆微型钢管桩注浆体水灰比为 0.45, 0.60, 0.75 三种配置,研究桩体抗弯荷载与跨中截面钢管应变变化,结果如图 13 所示。由图 13 可知:相同桩径下,当钢管直径 $d=89, 108$ mm 时,注浆体水灰比总体上对跨中截面钢管应变变化规律的影响较小,抗弯荷载-应变曲线出现拐点即钢管屈服之前,跨中钢管荷载-应变曲线近似呈线性变化,钢管基本处于弹性阶段;相同直径钢管,不同注浆体时荷载-应变曲线拐点对应的抗弯荷载基本相同,达到屈服前,注浆体水灰比越小即浆体强度越大,相同荷载下跨中钢管纵向应变相对越小,桩体抗弯性能更好;钢管直径越大,注浆体水灰比对跨中截面钢管应变的影响越不明显。

2.4 微型钢管桩外包浆体及钢管受力分析

针对桩径 $D=150$ mm, 桩身高度 $H=1\ 100$ mm, 水灰比 $W=0.45$, 以及钢管表面布孔直径 $r=8$ mm 和间距 $s=75$ mm 对应的微型钢管桩体, 研究分析抗弯加载不同阶段钢管与外包浆体受力特点。针对钢管直径 d 与壁厚 t 分别为 42 mm 和 3.5 mm, 60 mm 和 4 mm, 76 mm 和 6 mm, 89 mm 和 6 mm, 108 mm 和 6 mm 的 5 种工况进行分析, 选取外包浆体和钢管的上表面受压区(测点 5, 1)和下表面受拉区(测点 6, 3)纵向应变随抗弯荷载变化曲线发生突变或拐点(分别对应钢管屈服和外包浆体开裂)时的抗弯荷载, 与桩体抗弯极限荷载进行对比分析, 结果如图 14 所示。图 14(b)中钢管直径 $d=60$ mm ($d/D=0.4$) 时桩体跨中受拉区混凝土下表面测点 6 因仪器接触问题, 导致外包浆体开裂时所测荷载近乎为 0。

由图 14 可知, 除图 14(b)中问题测点外, 对于

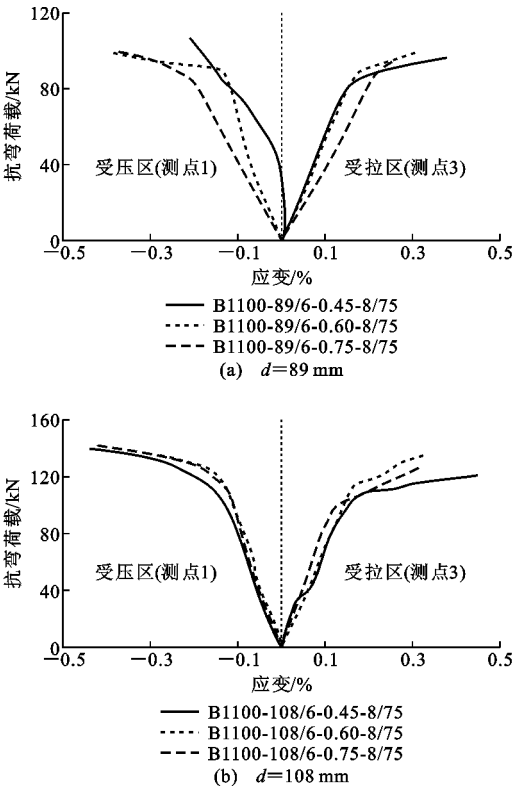


图 13 注浆体水灰比对桩体内钢管应变变化的影响

Fig. 13 Influence of Water Cement Ratio of Grouting on Strain of Steel Pipe in Pile

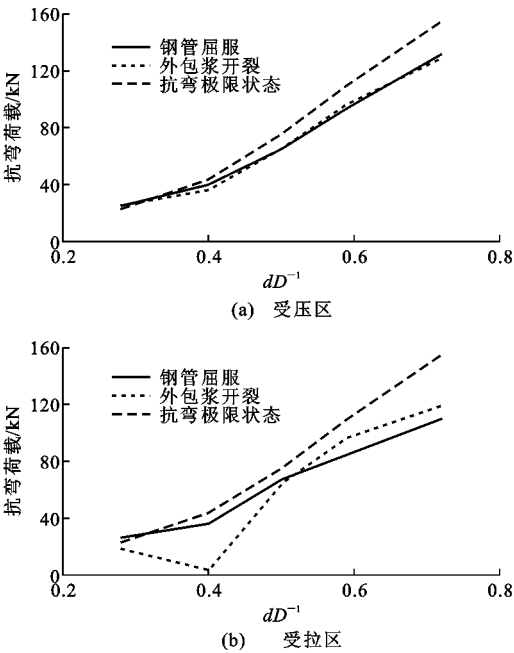


图 14 不同 d/D 时微型钢管桩体不同加载阶段抗弯荷载变化

Fig. 14 Variation of Flexural Load with d/D at Different Stages for Micro-steel-pipe-pile

相同桩径,随着钢管直径的增加,跨中钢管屈服、外包浆体开裂时对应的抗弯荷载和桩体极限荷载均呈

增加趋势,钢管屈服和外包浆体开裂时对应的抗弯荷载相差不大,但二者与抗弯极限荷载的差值随着 d 的增加而增加。当 $0.28 \leq d/D \leq 0.40$ 时,在受压区和受拉区,试验发现当桩体外包浆体发生开裂破坏时,钢管几乎同时屈服且随后桩达到抗弯极限荷载,表明钢管直径在该范围内时,钢管及内核浆体在桩体抗弯承载中作用有限,可依据钢管外包浆体破损判别微型钢管桩体达到抗弯极限;当 $0.5 \leq d/D \leq 0.72$ 时,跨中截面钢管屈服和外包浆体开裂所对应的抗弯荷载明显要小于桩体极限抗弯荷载,而对于跨中下表面的受拉区,钢管屈服对应的抗弯荷载明显小于外包浆体开裂时的抗弯荷载,表明受拉区钢管先达到屈服,随后持续加载使外包浆体开裂,主要原因是 d/D 增加,外包浆体作用减弱且主要起保护层作用,钢管及钢管对内核的紧箍作用明显,在钢管出现明显受力变形后,导致外包浆体开裂破损。因此,钢管直径在该范围内时,微型钢管桩体抗弯承载主要由钢管与核心水泥浆共同作用。

针对桩径 $D=150\text{ mm}$,钢管直径 d 和壁厚 t 分别为 89 mm 和 6 mm ,钢管表面布孔直径 $r=8\text{ mm}$ 和间距 $s=75\text{ mm}$ 时形成的微型钢管桩,研究分析注浆体水灰比为 $0.45, 0.60, 0.75$ 时微型钢管桩加载各阶段抗弯荷载变化情况,结果如图 15 所示。由图 15 可知,注浆微型钢管桩随注浆体水灰比升高或注浆体强度降低,抗弯极限承载力呈下降趋势, $d=89, 108\text{ mm}$ 时对应桩体抗弯极限荷载分别下降了约 9% 和 7% ,受拉区钢管屈服时所对应的抗弯荷载也基本呈下降趋势,而外包浆体开裂所对应的抗弯荷载受钢管的影响较明显,如钢管直径 $d=89\text{ mm}$ 时,降低水灰比后钢管屈服与外包浆体开裂几乎同时出现,而极限抗弯荷载比二者对应的抗弯荷载要高 $10\% \sim 15\%$;钢管直径 $d=108\text{ mm}$ 时,外包浆体开裂时所对应抗弯荷载呈增加趋势,表明注浆体强度降低后,同等荷载下桩体抗弯挠度增加,钢管受力明显且先达到屈服,钢管与核心注浆体共同作用抵抗变形。

3 结 语

(1)注浆微型钢管桩体抗弯加载破坏过程主要表现为:跨中受拉区微裂缝呈现;受拉区裂缝增多并向两端微扩;受拉区裂缝宽度增加且斜裂缝持续向两端扩展,受压区开始呈现裂缝,跨中挠度显著增加;跨中受压区鼓胀崩裂,受拉区浆体脱落,桩体破坏。

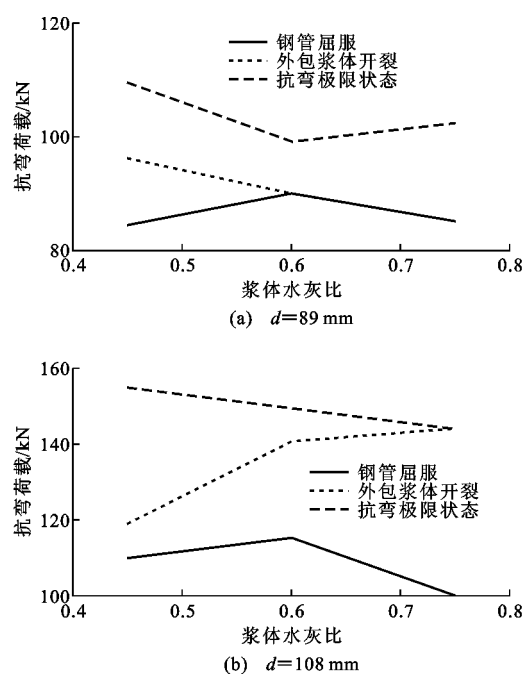


图 15 不同水灰比微型钢管桩加载各阶段抗弯荷载的变化

Fig. 15 Variation of Flexural Load with Water-cement Ratio at Different Stages for Micro-steel-pipe-pile

(2)在相同桩径下,钢管直径和壁厚是影响微型钢管桩抗弯承载特性的主要因素,随着钢管直径和壁厚增加,桩体极限抗弯承载力显著提高;当 $d/D\geq 0.59$,水灰比在 0.45~0.75 之间变化时,其对桩体抗弯承载能力影响不明显;钢管表面布孔孔径和间距对桩体抗弯承载能力的影响较小。

(3)基于跨中钢管应变和桩体破坏特征分析可知,当 $0.28\leq d/D\leq 0.40$ 时,注浆微型钢管桩以外包浆体承担荷载为主,表现为脆性破坏,钢管屈服和外包浆体开裂所对应的抗弯荷载与桩体抗弯极限荷载基本相同;当 $0.50\leq d/D\leq 0.72$ 时,钢管与核心注浆体承担主要抗弯荷载,外包浆体破坏基本上发生在钢管屈服后,且跨中钢管屈服与外包浆体开裂破坏后,桩体抗弯承载仍能增加;注浆微型钢管桩体达到极限抗弯承载的标志都可以以外包浆破坏为准。

参考文献:

References:

[1] KRAFT L M, RAY R P, KAGAWA T, et al. Theoretical t-z Curves [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1981, 107(11): 1543-1561.

[2] MEYERHOF G G, SASTRY V V R N, YALCIN A S. Lateral Deflection of Flexible Piles [J]. Canadian

Geotechnical Journal, 1988, 25(3): 511-522.

[3] SUN S, ZHU B, WANG J. Design Method for Stabilization of Earth Slopes with Micropiles [J]. Soils and Foundations, 2013, 53(4): 487-497.

[4] ZHANG X D. Research and Application of Mini-sized Steel Pipe Pile Technology in Limited Space [J]. Procedia Engineering, 2014, 73: 16-22.

[5] 白晨光, 贾立宏, 马金普, 等. 抗弯功能微型桩在基坑支护中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增): 1656-1658.

BAI Chen-guang, JIA Li-hong, MA Jin-pu, et al. Application of Micropiles with Anti-bending Function to Retaining and Protection of Foundation Excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S): 1656-1658.

[6] 唐咸远, 杨和平, 肖 杰, 等. 注浆微型钢管桩抗弯承载力及抗弯刚度研究 [J]. 工业建筑, 2016, 46(10): 89-94.

TANG Xian-yuan, YANG He-ping, XIAO Jie, et al. Experimental Study of Flexural Behavior of Grouted Micro Steel Pipe Piles [J]. Industrial Construction, 2016, 46(10): 89-94.

[7] 吉伯海, 胡正清, 陈甲树, 等. 圆钢管轻集料混凝土构件抗弯性能的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(8): 35-40.

JI Bo-hai, HU Zheng-qing, CHEN Jia-shu, et al. An Experimental Study on the Behavior of Lightweight Aggregate Concrete Filled Circular Steel Tubes Under Pure Bending Load [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(8): 35-40.

[8] 丁发兴, 余志武. 圆钢管自密实混凝土纯弯力学性能 [J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 63-68, 79.

DING Fa-xing, YU Zhi-wu. Pure Bending Properties of Self Compacting Concrete Filled Circular Steel Tube [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 63-68, 79.

[9] 卓 杨, 曹进捷, 邱 松. 大直径离心钢管混凝土管桩抗弯承载力研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增 2): 135-138.

ZHUO Yang, CAO Jin-jie, QIU Song. Flexural Capacity of Large-diameter Thin-wall Steel and Spun Concrete Composite Piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 135-138.

[10] VARMA A H, RICLES J M, SAUSE R, et al. Seismic Behavior and Modeling of High-strength Composite Concrete-filled Steel Tube (CFT) Beam-columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(5/6/7/8): 725-758.

- [11] 王少杰,刘福胜,段绪胜,等. 抗弯功能微型桩试验研究与应用[J]. 建筑科学,2009,25(11):73-75.
WANG Shao-jie, LIU Fu-sheng, DUAN Xu-sheng, et al. Experimental Study and Application on Micro Piles with Anti-bending Function[J]. Building Science,2009,25(11):73-75.
- [12] 邓朗妮,钱香国,马 骏,等. 微型钢管桩正截面受弯性能试验及有限元分析[J]. 桂林理工大学学报,2017,37(4):619-623.
DENG Lang-ni, QIAN Xiang-guo, MA Jun, et al. Micro Steel Pipe Piles of Normal Section Flexural Performance Test and Finite Element Analysis[J]. Journal of Guilin University of Technology,2017,37(4):619-623.
- [13] 陈再谦,蒲黍條,郭 果,等. 微型钢管混凝土构件抗弯性能数值模拟研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2018,37(1):72-79.
CHEN Zai-qian, PU Shu-tao, GUO Guo, et al. Numerical Simulation on the Bending Properties of Micro CFST Members[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science,2018,37(1):72-79.
- [14] 武 斌,谭卓英,车 媛. 圆钢管混凝土抗弯刚度研究[J]. 混凝土,2018(12):34-39.
WU Bin, TAN Zhuo-ying, CHE Yuan. Study on Flexural Stiffness of Concrete-filled Steel Tubes with Circular Sections[J]. Concrete,2018(12):34-39.
- [15] 乐腾胜,雷金波,周 星,等. 有孔管桩单桩承载性状试验及分析[J]. 岩土力学,2016,37(增 2):415-420.
YUE Teng-sheng, LEI Jin-bo, ZHOU Xing, et al. Test and Analysis of Bearing Capacity Behavior of Pipe-pile with Holes[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(S2):415-420.
- [16] 张津荣. 薄壁开孔圆钢管轴压稳定分析[J]. 建筑结构,2013,43(增 1):1444-1446.
ZHANG Jin-rong. Axial Compression Stability Analysis of Thin-walled Tubular with Hole[J]. Building Structure,2013,43(S1):1444-1446.
- [17] 梁中勇,饶军应,陈再谦,等. 钢管-桩心配筋微型桩极限抗弯承载力研究[J]. 铁道建筑,2018,58(11):99-102.
LIANG Zhong-yong, RAO Jun-ying, CHEN Zai-qian, et al. Study on Ultimate Flexural Bearing Capacity of Mini Pile Featuring Steel Tube and Centered Steel Bar[J]. Railway Engineering,2018,58(11):99-102.
- [18] 杜新喜,胡 锐,袁焕鑫,等. 混合配筋预应力混凝土管桩抗弯承载性能研究[J]. 土木工程学报,2019,52(1):44-52.
DU Xin-xi, HU Rui, YUAN Huan-xin, et al. Study on Flexural Behavior of Prestressed Concrete Pipe Pile with Hybrid Reinforcement[J]. China Civil Engineering Journal,2019,52(1):44-52.
- [19] 张忠苗,刘俊伟,谢志专,等. 新型混凝土管桩抗弯剪性能试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(增 2):271-277.
ZHANG Zhong-miao, LIU Jun-wei, XIE Zhi-zhuan, et al. Experimental Study on Flexural and Shearing Properties of Modified Concrete Pipe Piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(S2):271-277.
- [20] 陈 龙,邱文亮,耿铁锁,等. 预制高强混凝土薄壁钢管桩抗弯试验与数值模拟[J]. 大连理工大学学报,2017,57(1):61-67.
CHEN Long, QIU Wen-liang, GENG Tie-suo, et al. Bending Test and Numerical Simulation of Precast Thin-wall Steel and Spun Concrete Composite Pile[J]. Journal of Dalian University of Technology,2017,57(1):61-67.
- [21] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].
JGJ 94—2008, Technical Code for Building Pile Foundations[S].