

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201907056

## 注浆微型钢管桩体轴向承载特性的试验研究\*

肖成志, 司雨, 王子寒, 葛辰贺

(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要:** 针对注浆微型钢管桩用于桩基工程时的承载与变形性能的研究相对较少, 借助室内试验研究钢管直径  $d$  和壁厚  $t$ 、桩体长  $H$ 、浆体水灰比、钢管表面布孔直径  $r$  和间距  $s$  等因素对微型钢管桩轴向承载、变形和破坏模式的影响。结果表明: 钢管直径和壁厚是影响微型钢管桩轴向极限荷载的主要因素, 随着钢管直径和壁厚增加, 极限荷载近似呈线性增加, 破坏模式由脆性破坏向延性破坏发展; 增加桩长或注浆体水灰比, 极限荷载呈减少趋势; 当钢管直径与桩径之比增至  $0.59 \leq d/D \leq 0.72$  时, 试验桩长、注浆水灰比和钢管表面布孔形式对轴向极限荷载的影响较小; 进而基于桩体轴向承载特性及钢管受力与应变分析, 提出了合理桩径比值为  $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ , 并提出了微型钢管桩轴向极限荷载计算公式。

**关键词:** 微型钢管桩; 轴向承载; 钢管; 极限承载力

**中图分类号:** TU311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1167-10

## Test Study on Axial Mechanical Properties of Grouted Micro-steel-pipe-piles

XIAO Chengzhi, SI Yu, WANG Zihan, GE Chenhe

(School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Studies on mechanical and deformation performance of grouted micro-steel-pipe-piles (MSPP) in pile engineering are relatively rare. In this paper, a series of tests were carried out to investigate the effect of the parameters, such as diameter  $d$  and wall thickness  $t$  of steel pipe, the length of pile specimen  $H$ , the water-cement ratio, and the layout mode of holes in steel pipes, on axial bearing capacity, deformation and failure mode of MSPP. The tests results showed that the diameter and the wall thickness of steel pipe play dominant roles in enhancing axial bearing capacity of MSPP. With the increase of diameter and wall thickness of steel pipe, the ultimate axial load of MSPP tends to increase linearly, and the failure mode of MSPP shifts from brittle failure to ductile fracture. Increasing the length of MSPP specimen or improving the water-cement ratio results in a decrease of axial ultimate bearing capacity; when the diameter ratio of steel pipe to MSPP,  $d/D$ , increases and falls in the range of 0.59 to 0.72, the length of MSPP specimen, the water-cement ratio and the layout of holes do not significantly affect the axial ultimate bearing capacity of MSPP. Furthermore, on the basis of comprehensive consideration on axial load characteristics and mechanical behavior and strain of steel pipe, a reasonable diameter ratio range of steel pipe to MSPP,  $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ , is presented here-

\* 收稿日期: 2019-07-21; 修回日期: 2019-10-08

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)资助

作者简介: 肖成志(1976—), 男, 教授, 博士。主要从事岩土工程领域方面的研究。E-mail: chengzhixiao@hotmail.com

in, and an empirical expression on calculating the axial bearing capacity of grouted MSPP is put forth as well. The analytical results in this paper will be helpful in guiding design of MSPP in practical projects.

**Keywords:** micro-steel-pipe-pile; axial loading; steel pipe; ultimate bearing capacity

## 引言

直径小于 300 mm 的微型桩概念自 20 世纪 50 年代由 F. Lizzi<sup>[1]</sup> 提出以来,因其施工工艺简便、施工速度快、造价低和噪声小等工程特性,被广泛用于边坡和地基等岩土加固工程中<sup>[2-3]</sup>。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。当前,钻孔注浆微型钢管桩几何尺寸设计及其力学特性的理论研究,主要是借助结构上钢管桩轴载特性方面的丰富成果,如张耀春等<sup>[4]</sup>、柯晓军等<sup>[5]</sup>、周绪红等<sup>[6-7]</sup>基于钢管混凝土柱的轴压试验,详细地分析了钢管截面形状、混凝土强度和长径比等因素对承载力和破坏模式的影响,徐鹏飞等<sup>[8]</sup>、谷利雄等<sup>[9]</sup>通过分析钢管壁厚对钢管混凝土短柱轴压力学性能的影响,定量的分析了变形模量与钢管壁厚的关系。吕文龙等<sup>[10]</sup>、宗钟凌等<sup>[11]</sup>基于注浆钢管桩轴压承载试验研究了钢管桩的破坏过程,其结果为工程实践提供了有益指导;龚健等<sup>[12]</sup>借助  $p-y$  曲线计算了微型钢管桩单桩和群桩的变形特点;张津荣<sup>[13]</sup>、乐腾胜等<sup>[14]</sup>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等结论。

目前对注浆微型钢管桩主要集中在承载特性的研究,多数针对单一影响因素进行研究,缺乏整体性和全面性,且对注浆微型钢管桩中钢管与桩径尺寸的相互关系及其对承载与变形的综合分析相对较少。因此,基于轴向承载特性试验,综合对比分析钢管直径  $d$  与壁厚  $t$ 、长径比  $H/D$ 、注浆体水灰比、钢管表面注浆孔布设方式等因素对微型钢管桩轴向承载特性与变形的影响,定量和定性地研究微型钢管桩轴向承载特性及破坏模式,并在合理发挥桩体轴向承载特性时明确钢管尺寸与桩径的相互关系。

## 1 注浆微型钢管桩轴向承载特性试验

### 1.1 试验介绍

为了分析注浆微型钢管桩轴向承载特性,试验针对直径  $D=150$  mm 的注浆微型钢管桩,改变钢管管径  $d$  与壁厚  $t$ 、桩体高度  $H$ 、注浆体水灰比、钢管表面注浆孔径  $r$  和间距  $s$ ,以此分析各因素对微型钢管桩轴向承载特性影响,试验方案见表 1。

注浆微型钢管桩采用自制微型钢管桩模具制成,如图 1(a)和(b)所示。钢管外包浆体形成由 PVC 管道圆筒模具支撑,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不同钢管直径,且确保钢管中心与 PVC 圆筒中心相同。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,最终形成钢管桩试件,如图 1(c)所示。

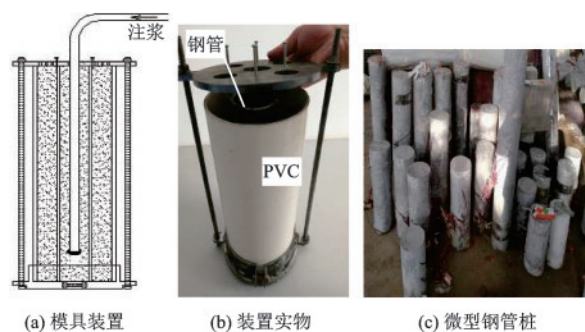


图 1 微型注浆钢管桩模具及试件

Fig.1 Diagram of mould device and specimen of grouted micro-steel-pipe-pile

### 1.2 注浆微型钢管桩试验材料

微型钢管桩试件制作所需钢管,选用 7 种标准规格的 Q235 无缝钢管,钢管直径  $d$  和壁厚  $t$  分别为 42 mm×3.5 mm、60 mm×4 mm、76 mm×6 mm、89 mm×4 mm、89 mm×5 mm、89 mm×6 mm 和 108 mm×6 mm,依照《金属材料拉伸试验第 1 部分:

表 1 注浆微型钢管桩轴压承载特性试验设计

Table 1 Test design for axial compression behavior of grouted MSPP

试件编号	管径 $d \times$ 壁厚 $t$ / mm $\times$ mm	试件高度 $H$ / mm	浆液水灰比 $W/C$	钢管注浆孔径和 间距 $r/s$ /mm	$d/D$
A300-42/3.5-0.45-8/75	42 $\times$ 3.5				0.28
A300-60/4-0.45-8/75	60 $\times$ 4				0.40
A300-76/6-0.45-8/75	76 $\times$ 6				0.50
A300-89/4-0.45-8/75	89 $\times$ 4	300	0.45	8/75	0.59
A300-89/5-0.45-8/75	89 $\times$ 5				0.59
A300-89/6-0.45-8/75	89 $\times$ 6				0.59
A300-108/6-0.45-8/75	108 $\times$ 6				0.72
A450-89/6-0.45-8/75		450			
A600-89/6-0.45-8/75	89 $\times$ 6	600	0.45	8/75	0.59
A750-89/6-0.45-8/75		750			
A450-108/6-0.45-8/75		450			
A600-108/6-0.45-8/75	108 $\times$ 6	600	0.45	8/75	0.72
A750-108/6-0.45-8/75		750			
A750-89/6-0.60-8/75			0.60		
A750-89/6-0.75-8/75	89 $\times$ 6	750	0.75	8/75	0.59
A750-108/6-0.60-8/75			0.60		
A750-108/6-0.75-8/75	108 $\times$ 6	750	0.75	8/75	0.72
A450-89/6-0.45-8/37.5				8/37.5	
A450-89/6-0.45-12/75	89 $\times$ 6	450	0.45	12/75	0.59
A450-108/6-0.45-8/37.5				8/37.5	
A450-108/6-0.45-12/75	108 $\times$ 6	450	0.45	12/75	0.72

注:以 A300-42/3.5-0.45-8/75 为例,A 表示试件轴向加载,300 表示桩体试件高度  $H$  为 300 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  $W/C$  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

室温试验方法》<sup>[15]</sup>确定钢管屈服强度和极限抗拉强度分别约为 267.4 和 325.7 MPa,弹性模量为 200.5 MPa,泊松比为 0.32,并根据表 1 中试验方案截取不同长度钢管,在其表面布设不同孔径  $r$  和间距  $s$  的注浆孔,如图 2 所示。

试验中微型钢管桩注浆体采用水泥净浆,参照



图 2 钢管及其布孔

Fig.2 Steel pipe and layout of holes for grouting

《建筑桩基技术规范》<sup>[16]</sup>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 42.5,分别采用水灰比为 0.45、0.60 和 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,试制微型钢管桩时,针对水泥净浆取样制取 70.7 mm  $\times$  70.7 mm  $\times$  70.7 mm 标准试块,静候 24 h 后拆模,养护 28 d 后开展抗压试验,标准水泥浆试块如图 3 所示。试验测得水灰比 0.45、0.60 和 0.75 时相应试块的平均抗压强度分别为 36.4、30.0 和 25.1 MPa。

### 1.3 微型钢管桩轴向加载试验

微型钢管桩轴压加载采用 1 000 kN 压力试验机分级加载,如图 4(a)、(b)所示。加载过程中通过在试样左、右对称两侧各设置一个竖向和横向位移



图3 水泥浆标准试块

Fig.3 Standard test specimen of cement paste

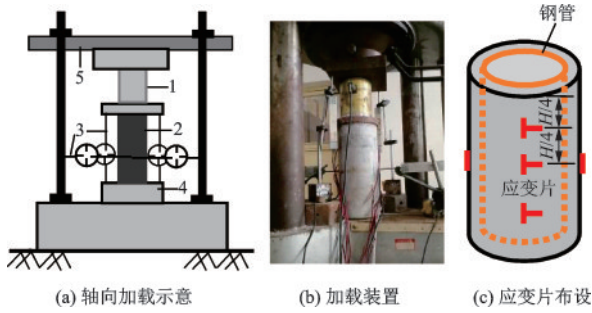


图4 微型钢管桩轴向加载试验

Fig.4 Axial loading test for micro-steel-pipe-piles

注:1.压力传感器;2.管桩试件;3.位移计;4.液压升降台;5.反力架

计,以测量加载时钢管桩轴向和横向变形。另外,在钢管外表面和桩身外表面沿纵向和环向布设电阻应变片,以测量轴向加载过程中钢管和外包浆体的纵向应变和横向应变,如图4(c)所示。试验采用DH3816静态应变测试仪监测各测点应变值。

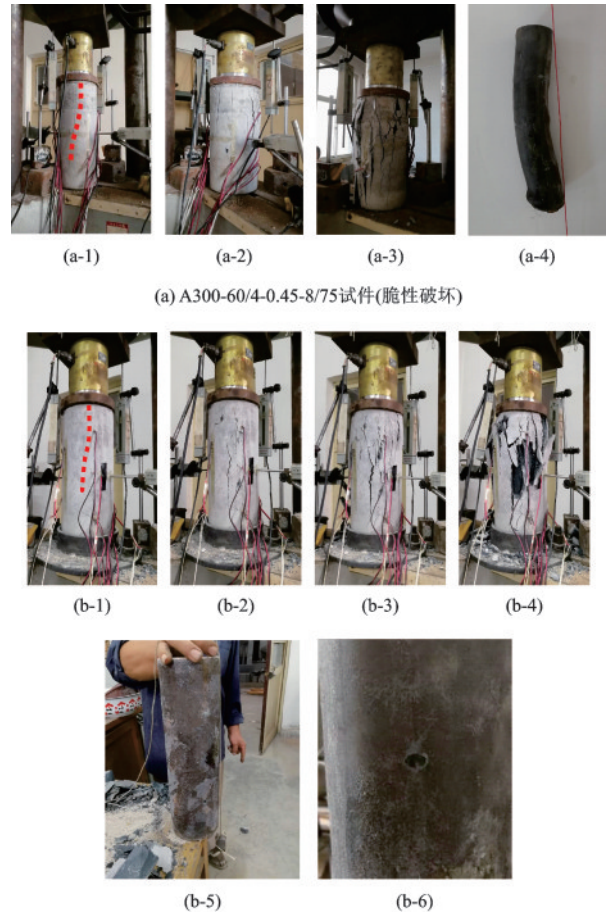
## 2 注浆微型钢管桩轴向加载试验分析

### 2.1 注浆微型钢管桩试件破坏形式

试验中钢管桩试件在逐级加载过程中破坏现象大致相同,且主要受钢管直径 $d$ 的影响明显,以桩身高度 $H=300\text{ mm}$ 、水灰比为0.45、钢管表面布孔直径 $r$ 和间距 $s$ 分别为8 mm和75 mm时为例,分析注浆微型钢管桩轴向加载破坏形式。

微型钢管桩轴向加载初期,轴向变形逐渐增加,试件出现轻微崩裂声响且伴随着钢管外包浆表面从顶部和底部出现细裂缝,对应荷载为130~150 kN,如图5(a-1)和图5(b-1)所示;继续施加荷载至200~300 kN时,裂缝增多且纵向延伸明显,并伴随更大的开裂声,如图5(a-2)和图5(b-2)所示,此时钢管应变相对较小,当继续加载至300~350 kN时,外包浆破损较为严重,如图5(a-3)和(b-3)所示,此时,

对于 $d\leq 60\text{ mm}$ 或 $d/D\leq 0.4$ 的试件,其承载接近极限,去除钢管外包浆体可以发现钢管呈屈曲破坏,如图5(a-4)所示,破坏模式为脆性破坏;而对于 $d>60\text{ mm}$ 或 $d/D>0.4$ 的试件,以 $d=89\text{ mm}$ 为例,此时外包浆体虽破损且部分呈现脱落现象,但桩体因钢管直径较大且对钢管内部注浆体的约束作用,使钢管及其内核注浆体仍具有承载能力,直至加载后期,外包水泥浆大块掉落,导致钢管表面电阻应变片脱落失效,压力机荷载不再上升,开始自动卸载,桩体完全破坏失去承载能力,此时停止试验,去除钢管外包水泥浆,钢管发生轻微剪切破坏,且可以明显看出注浆孔由圆形变成椭圆形,如图5(b-5)和图5(b-6)所示,破坏模式为延性破坏。



(b) A300-89/4-0.45-8/75试件(延性破坏)

图5 试件破坏过程和钢管破坏形态

Fig.5 Failure mode of micro-steel-pipe-pile specimens

### 2.2 钢管直径和壁厚对微型钢管桩承载特性影响

针对直径 $D=150\text{ mm}$ 的微型钢管桩,选取桩身高度 $H=300\text{ mm}$ 、水灰比为0.45,钢管表面布孔直径 $r=8\text{ mm}$ 和间距 $s=75\text{ mm}$ ,分析钢管直径和壁厚

对微型钢管桩承载特性的影响,结果如图6所示。

由图6可知,当钢管直径 $d$ 较小时,如 $d \leq 60$  mm或 $d/D \leq 0.4$ 时,微型钢管桩轴向变形随着荷载增加而增加,在轴向荷载—变形曲线达到拐点时,桩身破坏且承载迅速降低,拐点对应荷载值与极限荷载值基本一致,表明钢管直径较小时桩身承载以钢管外部水泥浆体的承载为主,且以脆性破坏为主;当钢管直径 $d=76$  mm或 $d/D=0.5$ 时,桩体轴向荷载—变形曲线达到拐点且直至达到极限破坏时,桩体延性较好,对应极限荷载约为578 kN,与采用水灰比为0.45浆体的同等桩径的抗压强度对应的桩身荷载值相当,表明 $d/D=0.5$ ,以钢管和钢管内外浆体共同承担且同时达到极限荷载值为主;当钢管直径 $d$ 持续增加,如 $76 \text{ mm} < d \leq 108$  mm或 $0.5 < d/D \leq 0.72$ 时,桩身轴向变形随荷载增加而近似呈线性增加,当轴向荷载—变形曲线在达到拐点时,桩身承载能力仍缓慢上升,最终达到极限荷载而破坏,表明钢管直径增加使桩身承载能力提高,桩体具有延性破坏特征。以钢管直径 $d=89$  mm为例,试验发现当钢管外包浆体发生严重破损时,轴向荷载—变形曲线达到拐点,此时由于桩身截面面积变化引起轴向荷载—变形曲线剧烈变化,并有回弹现象,随后因钢管对内部浆体的包裹或紧箍作用而继续承载,当钢管屈服并出现弯曲现象时承载能力下降且试件破坏。

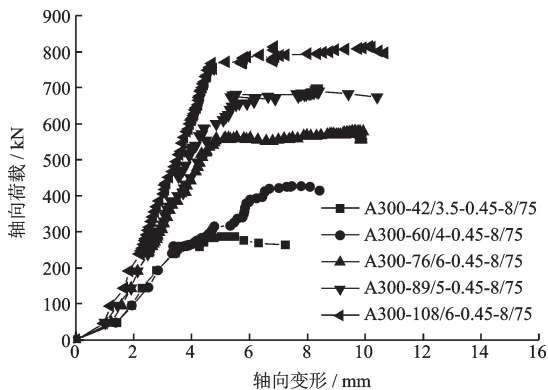


图6 不同钢管直径和壁厚下桩体轴向荷载与变形的关系  
Fig.6 Relationship of axial load and deformation for different combinations of diameter and wall thickness

图7分析了不同 $d/D$ 时桩身轴向加载过程时外包浆出现裂纹破损、钢管屈曲和轴向极限时所对应的荷载。由图可知,3种情况下对应的桩身轴向荷载均随着钢管直径或 $d/D$ 的增加而增加,且桩身轴向极限荷载 $P_{ult}$ 与 $d/D$ 呈近似线性关系,通过拟合

可得:

$$P_{ult} = 1\,236.03 \left( \frac{d}{D} \right) - 57.28 \quad (1)$$

此外,当 $d/D=0.28$ 和 $d/D=0.4$ 时,钢管外包浆体较厚,轴向荷载下钢管外包浆出现开裂时,对应荷载分别占轴向极限荷载的50.2%和56.3%,即当 $0.28 \leq d/D \leq 0.4$ 时,钢管作用不明显,微型钢管桩承载以钢管外包浆承担为主;当 $d/D=0.5$ 时,外包浆开裂时荷载占极限荷载的43.5%,钢管屈曲时的荷载约占轴向极限荷载值的89.5%,即当 $d/D$ 位于0.5附近或 $0.4 < d/D < 0.59$ 时,钢管及钢管内注浆体承载作用明显,钢管外包浆体承载占极限荷载比值逐渐变小,钢管屈曲时对应荷载呈线性增长,并逐渐接近极限荷载,表明微型钢管桩的轴压承载力逐渐由外包浆转移到钢管与核心水泥浆共同承担,并最终实现注浆体与钢管同时达到承载极限;当 $d/D=0.59$ 和 $d/D=0.72$ 时,外包浆开裂时荷载分别占极限荷载的36.4%和45.4%,即当 $0.59 < d/D \leq 0.72$ 时,随钢管直径增加,钢管外包浆厚度减少,外包浆开裂所对应荷载占极限荷载比例呈上升趋势,其原因主要是外包浆相对较薄且主要起保护层作用,轴向荷载主要由钢管及内部注浆体承担,钢管紧箍作用限制了内部注浆体侧向挤压变形,从而延缓了钢管外包浆开裂时间,导致对应荷载有所上升。

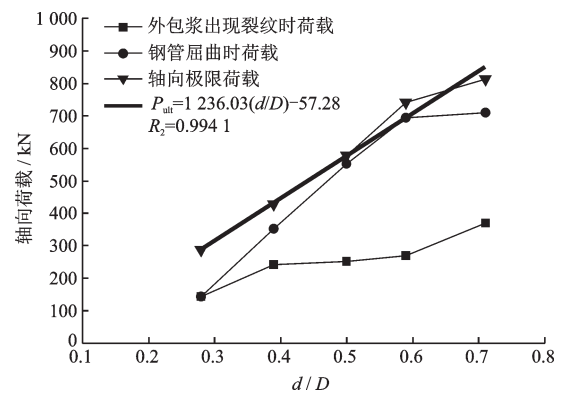


图7 微型钢管桩轴向荷载随 $d/D$ 的变化  
Fig.7 Axial load varies with  $d/D$  for micro-steel pipe pile

为了分析钢管壁厚对微型钢管桩轴向承载特性影响,选取钢管直径 $d=89$  mm、注浆体水灰比为0.45、桩体高度 $H=300$  mm,钢管表面布孔直径 $r=8$  mm和间距 $s=75$  mm,分析壁厚 $t$ 分别为4、5和6 mm时桩体承载特性,如图8所示。由图8(a)可知,不同壁厚时轴向荷载与轴向变形曲线具有相同

的变化趋势,初始阶段为弹性阶段,轴向变形随荷载增加呈线性增长,随着加载持续,桩身两端的钢管外包浆出现开裂并渐趋延伸,轴向荷载—变形曲线开始变缓,进入弹塑性阶段并出现拐点,钢管达到屈服,外包浆脱落,完全退出工作,此时桩身轴向压力由钢管和内部注浆体共同承担;后续加载时桩体呈现轻微强化,达到极限荷载后桩体破坏,承载力下降。结合图8(b)可知,随着钢管壁厚的增加,微型钢管桩极限承载力近似呈线性增加,但增长幅度不大,当壁厚 $t$ 由4增至5和6 mm时,极限承载力分别增加6.8%和13.4%,且壁厚越大,钢管进入屈服阶段的轴向变形越小。鉴于此,针对图8(b)中桩体轴向极限荷载与壁厚的关系可以得到拟合曲线为:

$$P_{ult} = 43.67t + 478.98 \quad (2)$$

式中, $t$ 为钢管壁厚。

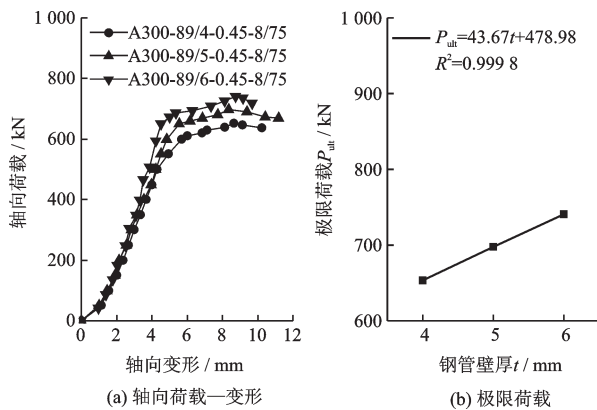


图8 微型钢管桩轴向荷载随钢管壁厚 $t$ 的变化

Fig.8 Variation of axial load with wall thickness of steel pipe for micro-steel-pipe pile

### 2.3 微型钢管桩试样长度对轴向承载特性影响

考虑到钢管桩试样长度对轴向承载的影响,取注浆体水灰比为0.45、钢管壁厚 $t=6$  mm、钢管表面布孔直径 $r=8$  mm和间距 $s=75$  mm时,分别选取 $d=89$ 和108 mm两种钢管直径研究桩长 $H$ 分别为300、450、600和750 mm时对轴向承载特性影响,结果如图9所示。由图可知,两种钢管直径下,桩长 $H$ 或 $H/D$ 对轴向荷载—变形曲线及其极限荷载的影响相似,即随着 $H$ 或 $H/D$ 增加,极限承载力呈现略微下降趋势,钢管直径越大,下降过程相对越平缓;增加 $H$ ,轴向变形增速变大,钢管屈服时对应的轴向变形越大,且钢管直径为108 mm的试件极限承载力更高,轴向变形相对更小。另外,改变试件高度 $H$

即控制长径比 $H/D$ 为2、3、4和5时,微型钢管桩试样以发生剪切破坏为主,该范围内长径比总体上对微型钢管桩的轴向承载力影响不大。

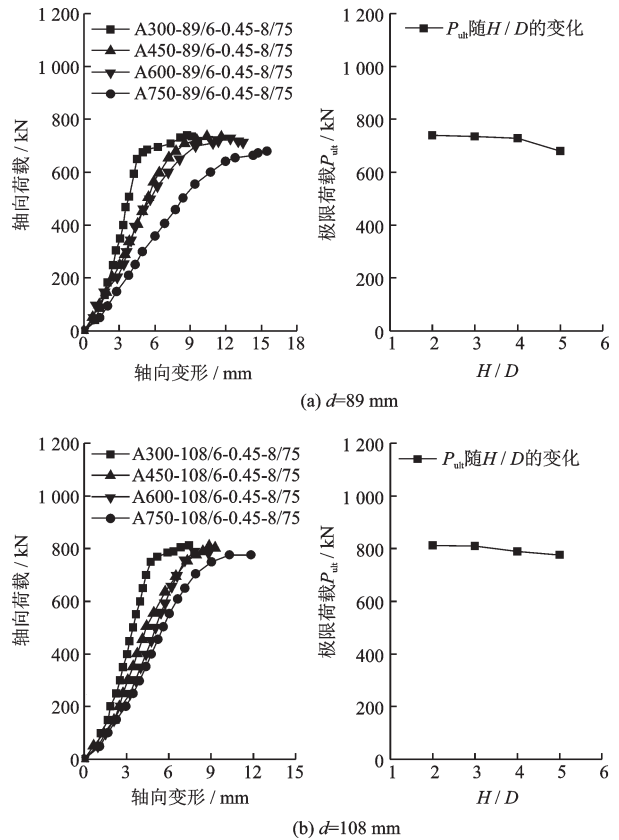


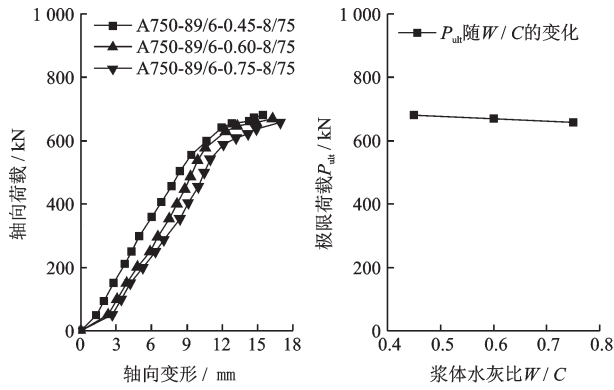
图9 微型钢管桩轴向荷载随桩长的变化

Fig.9 Variation of axial load with length of micro-steel-pipe pile

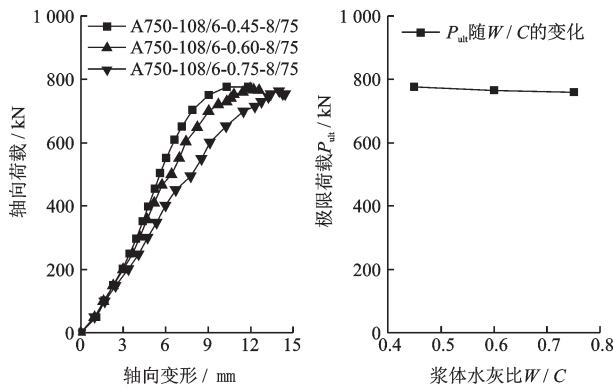
### 2.4 微型钢管桩注浆体水灰比对承载特性影响

试验中微型钢管桩注浆体水灰比选取了0.45、0.60和0.75等3种配置,基于立方体标准试块测定相应的平均抗压强度分别为36.4、30.0、25.1 MPa,相比水灰比为0.45,当水灰比增至0.60和0.75时,相应平均抗压强度分别降低了17.6%和31.0%。

基于桩长 $H=750$  mm、钢管表面布孔直径 $r=8$  mm和间距 $s=75$  mm,以及钢管壁厚 $t=6$  mm时,针对 $d=89$ 和108 mm两种钢管直径,研究注浆体水灰比为0.45、0.60和0.75时对桩体轴向承载特性影响,结果如图10所示。由图可知,对于 $d=89$  mm试件,在弹性和弹塑性阶段,注浆体强度对试件抗压性能有明显影响,而当钢管直径增至 $d=108$  mm时,不同水灰比试件的轴向荷载—变形曲线基本重合,当加载至200 kN即外包浆体出现裂纹时,荷载变形曲线区分度明显,总体上随着注浆体水灰比增



(a)  $d=89$  mm



(b)  $d=108$  mm

图10 微型钢管桩轴向荷载与浆体水灰比的关系

Fig.10 Variation of axial load with water-cement ratio

加,轴向变形越大,即随着水泥浆强度的提高,在塑性阶段轴向变形越小,可减缓钢管屈服变形。另外,桩身极限承载力随注浆体水灰比增大而降低,如钢管直径 $d=89$  mm时,当注浆体水灰比由0.45增至0.60和0.75时,微型钢管桩桩体轴向极限荷载仅降低了1.4%和3.3%,且钢管直径越大,降低幅度越小,表明钢管对注浆体约束作用明显。因此,当钢管直径较大如 $d/D \geq 0.59$ 时,注浆体水灰比在0.45~0.75变化时对桩身轴向极限承载影响较小。

### 2.5 微型钢管桩中钢管表面布孔对承载特性影响

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 $H=450$  mm、水灰比为0.45和钢管壁厚 $t=6$  mm时,针对 $d=89$  mm和108 mm两种钢管直径,研究钢管表面布孔形式对桩体轴向承载特性影响,结果如图11所示。由图可知,改变钢管表面孔径大小和间距,对桩体轴向荷载—变形曲线的影响很小,增加钢管表面孔径时,对轴向极限荷载的影响较小,对于采用钢管直径 $d=89$  mm的微型钢管桩,达到轴向极限荷载所对应的轴向变

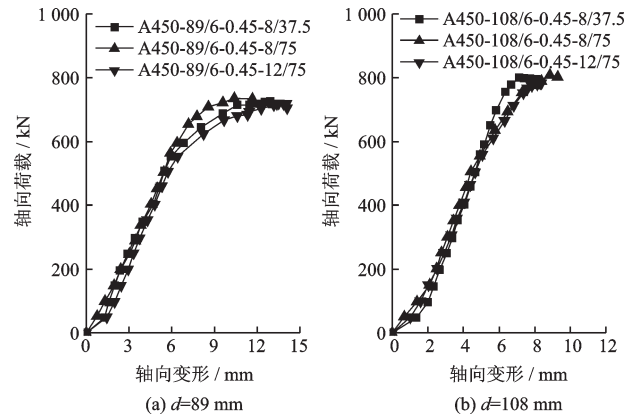


图11 微型钢管桩承载特性与钢管布孔形式的关系

Fig.11 Relationship of layout of hole and bearing capacity of micro-steel-pipe-pile

形会略微增加,而钢管直径增至 $d=108$  mm且采用相同布孔形式时,开孔孔径大小与间距对试件几乎没有影响,表明注浆孔的排布对微型钢管桩影响最小。

### 2.6 钢管桩加载对钢管和外包浆体应变的影响

试验通过在钢管外表面和桩身注浆体表面粘贴纵向和环向应变片,观察注浆微型钢管桩轴向承载过程中注浆体和钢管的受力与变形情况。取桩长 $H=750$  mm、钢管表面布孔直径 $r=8$  mm和间距 $s=75$  mm、壁厚 $t=6$  mm,针对 $d=89$  mm和108 mm两种钢管直径,研究不同注浆水灰比时桩体中间截面上钢管和外包浆体表面应变变化情况,结果如图12和图13所示。图13中钢管外包浆体表面应变以其开裂而应变片损坏时记录终止。

由图12可知,针对两种钢管直径,钢管桩轴向加载初期,钢管轴向方向即纵向应变以压缩变形为主,而环向应变以钢管外胀侧鼓为主,随轴向荷载增加,纵向应变增长速度明显要比环向应变快,表明该阶段钢管对其内部注浆体的紧箍约束作用不明显。结合图13中钢管外包浆体表面应变变化,加载初期如轴向荷载在200~300 kN时,桩身外包浆承载明显而最终开裂导致应变片损坏,该阶段因钢管外包浆对钢管的保护约束作用,钢管总体纵向和环向应变变化较小;随着加载持续增加,钢管外部水泥浆破裂,核心水泥浆逐渐受压鼓胀,钢管对核心水泥浆产生约束作用,且约束效果随加载越明显,当荷载达到极限荷载约80%时,钢管纵向和环向应变开始快速增大,钢管开始屈服,核心水泥浆受压鼓胀产生环向应力与钢管的约束作用更加明

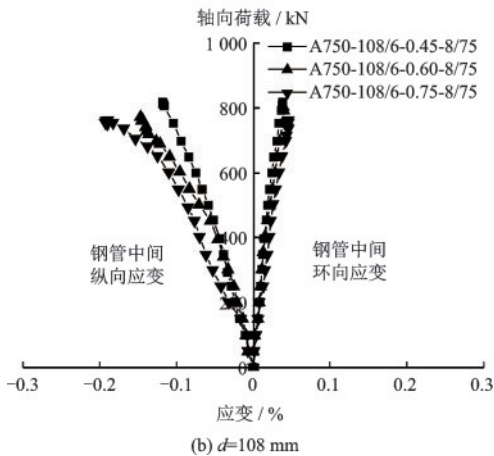
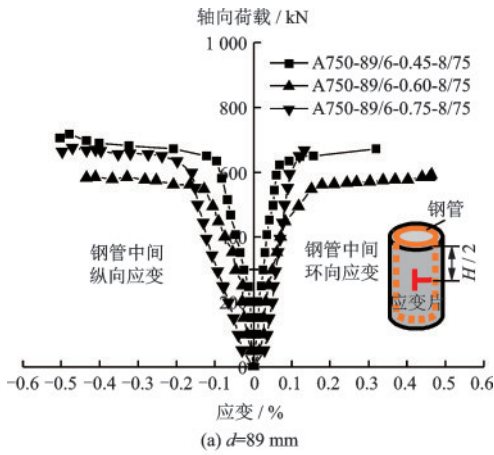


图12 微型钢管桩中钢管应变与荷载的关系曲线  
Fig.12 Relationship curve of axial load and steel pipe strain

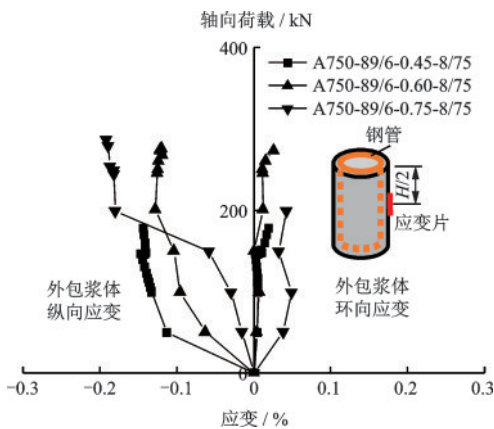


图13 微型钢管桩外包浆体表面应变与荷载的关系曲线  
Fig.13 Relationship curve of axial load and steel pipe strain

显,由此增加了钢管的环向应变。

另外,由图12所示两种不同直径钢管的荷载—应变曲线可知,注浆体强度越高,承载力越高,同等情况下钢管的应变相对较小,钢管对核心注浆体的约束作用减弱,且钢管直径越大,钢管中间截面测点环向应变越小,钢管对核心水泥浆的约

束作用越小。如 $d=89\text{ mm}$ 时,达到轴向极限荷载前,纵向应变和环向应变迅速增大,而 $d=108\text{ mm}$ 时,达到轴向极限荷载时,纵向应变和环向应变缓慢增加,应变曲线没有明显的水平段,表明钢管增加了构件的延性,直径越小,延性易观察到,直径越大,延性越好。

### 3 讨论

(1)上述针对轴向极限荷载下微型钢管桩承载特性的分析表明,当 $d/D \leq 0.4$ 时钢管在微型钢管桩轴向加载过程中的作用不明显;当 $0.4 < d/D < 0.59$ 时,钢管与内外包浆体共同承载且几乎同时达到极限破坏,但钢管对管内注浆体的紧箍约束作用未能有效发挥;当 $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ 时,钢管以及钢管内外浆体共同承载,外包浆体更多承担保护层作用,钢管对管内注浆体约束作用明显,钢管和内部注浆体协同作用对极限承载力提高明显。

实际上,注浆微型钢管桩用于桩基础时,基于桩基规范和安全考虑,允许承载力通常是极限承载力的50%。因此,针对注浆体水灰比为0.45、 $H=300\text{ mm}$ 、 $r=8\text{ mm}$ 和 $s=75\text{ mm}$ 时,取 $P_{ult}/2$ 轴向荷载时分析轴向变形和钢管应变,综合考虑钢管与桩径相对尺寸大小对承载特性影响,结果如图14和图15所示。

由图14可知,当轴向荷载为 $P_{ult}/2$ 时,轴向变形总体较小,且当 $0.4 \leq d/D \leq 0.72$ 时其轴向变形变化幅度很小,此时,结合图15中钢管应变来分析,可知当 $d/D \leq 0.4$ 时,钢管纵向和环向应变增加明显,但荷载水平较低,表明钢管直径较小时微型钢管桩轴

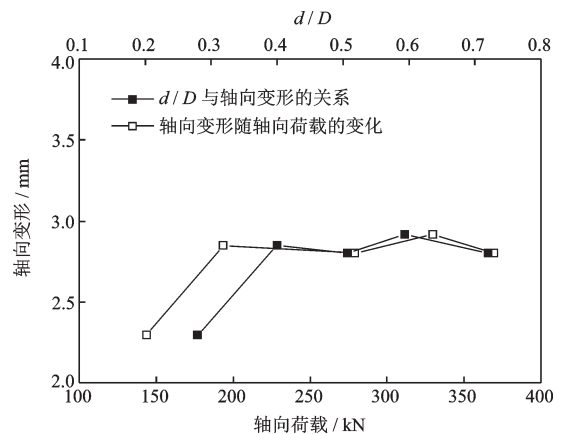


图14  $P_{ult}/2$ 下钢管桩轴向变形与管径和荷载的关系曲线  
Fig.14 Relationship curve of axial load, diameter of steel pipe and axial deformation under  $P_{ult}/2$  axial load

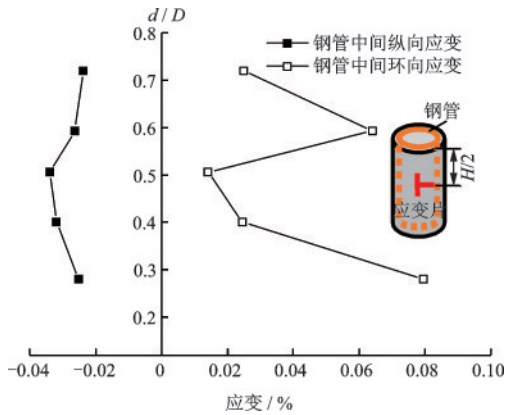


图 15  $P_{ult}/2$  下钢管应变与管径的关系曲线

Fig.15 Steel pipe strain varies with diameter of steel pipe under  $P_{ult}/2$  axial load

向承载的稳定性不理想;当  $0.59 \leq d/D \leq 0.72$  时,钢管纵向应变有所减少,而环向应变呈先增加后减少的趋势,表明钢管由纵向承载向环向发挥紧箍为主,有利于钢管对微型钢管桩承载能力的提升。

因此,综合微型钢管桩轴向极限和  $P_{ult}/2$  荷载作用下的承载与变形特性分析可知,实际中微型钢管桩钢管直径与桩径的合理取值为  $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ 。

(2) 基于表 1 中试验方案与试验结果的分析表明,同等情况下钢管直径和壁厚对微型钢管桩轴向极限荷载影响显著,且当  $0.59 \leq d/D \leq 0.72$  时,微型钢管桩桩长、注浆体水灰比和钢管表面布孔直径与间距对桩体轴向极限荷载的影响较小。因此,综合式(1)和式(2),并考虑  $d/D=0.59$  和  $t=5 \text{ mm}$  时,  $P_{ult}=698.01 \text{ kN}$ ,则可得考虑钢管直径与壁厚时,微型钢管桩极限承载值的计算式为:

$$P_{ult} = \left( 1.236.03 \left( \frac{d}{D} \right) - 57.28 \right) (0.06t + 0.69) \quad (3)$$

## 4 结 论

(1) 钢管直径大小影响微型钢管桩的破坏模式,当  $d/D \leq 0.4$  时,外包浆主要承担轴向荷载,外包浆体先出现裂纹,钢管迅速屈曲,桩体呈脆性破坏;而当  $0.4 < d/D \leq 0.72$  时,钢管和核心水泥浆逐渐承担轴向荷载,外包浆体先出现裂缝,荷载继续增加,钢管紧箍约束作用明显,微型钢管桩呈延性破坏。

(2) 钢管直径和壁厚对微型钢管桩轴压承载力影响显著,且壁厚能有效控制钢管屈服变形;微型钢管桩轴向承载力随长径比增加或注浆体水灰比增加而逐渐降低,而当钢管直径与桩径比值增至

$0.59 \leq d/D \leq 0.72$  时,长径比、注浆体水灰比和钢管表面布孔形式对轴压承载力影响不显著。

(3) 基于注浆微型钢管桩轴向承载特性及钢管受力与应变分析,推荐实际工程中钢管直径与桩径之比的合理范围为  $0.59 \leq d/D \leq 0.72$ ,并给出了微型钢管桩轴向极限荷载的计算公式。

(4) 试验未考虑微型钢管桩作为桩基使用时存在地层土体的围压作用,但若单纯考虑围压作用时微型钢管桩轴向极限荷载理应有提升。

## 参考文献:

- [1] Lizzi F. Reticulated root piles to correct landslides[C]// ASCE Convention and Exposition. Chicago: [s. n.], 1978:25.
- [2] Cantoni R, Collotta T, Ghionna V, et al. A design method for reticulated micropiles structures insliding slopes[J]. Ground Engineering, 1989, 22(4): 41-47.
- [3] Kahribt M A, Abbas J M. Lateral response of a single pile under combined axial and lateral cyclic loading in sandy soil[J]. Civil Engineering Journal, 2018, 4(9): 1996-2010.
- [4] 张耀春,王秋萍,毛小勇,等.薄壁钢管混凝土短柱轴压力学性能试验研究[J].建筑结构,2005,35(1): 22-27.  
Zhang Y Ch, Wang Q P, Mao X Y, et al. Research on mechanics behavior of stub-column of concrete-filled thin-walled steel tube under axial load [J]. Building Structure, 2005, 35(1): 22-27. (in Chinese)
- [5] 柯晓军,陈宗平,应武挡,等.钢管高强混凝土柱轴压性能试验研究[J].建筑结构,2014,44(16): 46-49.  
Ke X J, Chen Z P, Ying W D, et al. Experimental study on the axial compression performance of high-strength concrete filled steel tube columns[J]. Building Structure, 2014, 44(16): 46-49. (in Chinese)
- [6] 周绪红,刘界鹏,张素梅.圆钢管约束钢筋混凝土短柱的轴压力学性能[J].工程力学,2009,26(11): 53-59.  
Zhou X H, Liu J P, Zhang S M. Behavior of circular tubed reinforced concrete stub columns under axial compression[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 53-59. (in Chinese)
- [7] 周绪红,王宣鼎,甘丹,等.大径厚比圆钢管约束型钢混凝土短柱轴压性能研究[J].建筑结构学报,2015,36(增1): 240-246.  
Zhou X H, Wang X D, Gan D, et al. Axial loading behavior of circular tubed-steel-reinforced-concrete stub

- columns with high diameter-to-thickness ratio[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(Sup 1): 240-246. (in Chinese)
- [8] 徐鹏飞, 张公, 李晓璐, 等. 不同壁厚钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. *北京工业大学学报*, 2017, 43(10): 1514-1520.  
Xu P F, Zhang G, Li X L, et al. Experiment study of axial compression performance of concrete filled steel tube short column with different wall thickness [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(10): 1514-1520. (in Chinese)
- [9] 谷利雄, 丁发兴, 付磊, 等. 圆端形钢管混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(1): 57-63.  
Gu L X, Ding F X, Fu L, et al. Mechanical behavior of concrete-filled round-ended steel tubular stub columns under axial load [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(1): 57-63. (in Chinese)
- [10] 吕文龙, 刘恋, 邓婷. 钻孔注浆钢管桩桩身轴压承载力的试验研究[J]. *建筑科学*, 2016, 32(3): 61-65.  
Lyu W L, Liu L, Deng T. Axial behavior test of steel tubular injection piles filled with cement mortar [J]. *Building Science*, 2016, 32(3): 61-65. (in Chinese)
- [11] 宗钟凌, 鲁先龙, 李青松, 等. 静压钢管注浆微型桩承载性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(增 2): 323-329.  
Zong Zh L, Lu X L, Li Q S, et al. An experimental study of bearing capacity of post-grouting jacked steel pipe micropiles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Sup 2): 323-329. (in Chinese)
- [12] 龚健, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 微型桩原型水平荷载试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(20): 3541-3546.  
Gong J, Chen R P, Chen Y M, et al. Prototype testing study on micropiles under lateral loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(20): 3541-3546. (in Chinese)
- [13] 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 J R. Axial compression stability analysis of thin-walled tubular with hole [J]. *Building Structure*, 2013, 43(Sup 1): 1444-1446. (in Chinese)
- [14] 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 T Sh, Lei J B, Zhou X, et al. Test and analysis of bearing capacity behavior of pipe-pile with holes [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Sup 2): 415-420. (in Chinese)
- [15] 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法 GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at room temperature GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2010. (in Chinese)
- [16] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)