

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.095



微型抗滑桩极限抗弯承载力试验研究

陈再谦¹, 帅世杰¹, 蒲黍條¹, 张丽华¹, 饶军应²

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司 贵阳 550081; 2. 贵州大学土木工程学院, 贵阳 550025)

摘要:对桩心配筋桩、钢管+桩心配筋桩和钢管+H型钢桩共 27 根试件进行极限抗弯承载力试验,发现桩心配筋桩极限抗弯承载力较低且为脆性破坏,钢管+桩心配筋桩和钢管+H型钢桩表现出较高的极限抗弯承载力和延性性能。对桩心配筋桩、钢管+桩心配筋桩和钢管+H型钢桩荷载-位移曲线进行分析,将桩心配筋桩受荷分为试件咬合阶段、弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段,将钢管+桩心配筋桩和钢管+H型钢桩分为试件咬合阶段、弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段。钢管+桩心配筋桩极限抗弯承载力计算可用钢管混凝土桩极限抗弯承载力乘以 1.2 的提高系数计算。

关键词:桩心配筋桩;钢管+桩心配筋桩;钢管+H型钢桩;极限抗弯承载力;荷载-位移曲线

中图分类号:TU758.11 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)05-0059-08

Study on the ultimate flexural bearing capacity of micro anti-slide piles

Chen Zaiqian¹, Shuai Shijie¹, Pu Shutao¹, Zhang Lihua¹, Rao Junying²

(1. Power China Guiyang Engineering Co., Ltd. Guiyang Guizhou 550081, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, P. R. China)

Abstract: The ultimate flexural bearing capacity test was carried out through a total of 27 root specimen of the heart reinforcement pile, the steel pipe + heart reinforcement pile, the steel pipe + H section steel pile. It was found that the heart reinforcement pile ultimate flexural bearing capacity is low and that the failure was of brittle type, while the steel pipe + heart reinforcement pile and the steel pipe + H section steel pile show a higher bearing capacity and was of better ductility performance. Through the load-displacement curve, the heart reinforcement pile under loading is divided into specimen bite stage, elastic stage, elastic-plastic stage and failure stage, while the steel pipe + heart reinforcement pile and the steel pipe + H section steel pile can be divided into specimen bite stage, elastic stage, elastic-plastic stage and strengthening stage. The ultimate flexural bearing capacity for steel pipe + heart reinforcement pile can be regarded as that of steel pipe concrete pile multiplied by an increase coefficient of 1.2.

Keywords: heart of pile reinforcement of pile; steel pipe + heart reinforcement pile; steel pipe + H section steel pile; ultimate flexural bearing capacity; load-displacement curve

收稿日期:2018-12-25

基金项目:国家自然科学基金(51608141)

作者简介:陈再谦(1981-),男,主要从事岩土工程研究,E-mail: 48300187@qq.com。

饶军应(通信作者),男,博士,E-mail: jyrao@gzu.edu.com。

Received:2018-12-25

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51608141)

Author brief: Chen Zaiqian(1981-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: 48300187@qq.com.

Rao Junying(corresponding author), PhD, E-mail: jyrao@gzu.edu.com.

微型桩作为一种直径小于 300 mm 的钻孔灌注桩,桩体主要采用钢管、钢筋或型钢等材料,钻孔成型后以压浆方式充填细石混凝土或水泥砂浆^[1]。近年来在滑坡防治工程中,特别是滑坡应急抢险中,微型桩以其非开挖施工、对滑体扰动小、桩位布置灵活、施工振动小、对土层适应性强、加固见效快等特点,备受工程师们青睐^[2-4]。在滑体推力作用下,微型桩加固坡体主要依靠微型桩所提供的极限抗滑力,由两部分组成,一是桩体发生弯曲变形来阻止滑体变形的抗弯能力,二是阻止滑体沿滑面滑动的抗剪能力。现有研究表明,微型桩的破坏模式正是滑面附近的弯曲与剪切相结合的破坏^[5-7]。目前,微型桩单桩设计方法主要是悬臂桩法,微型群桩设计方法主要有“P-Y”曲线法、平面刚架法等多种,由于微型桩在实际工程应用中组合形式多样,加上复杂的桩土相互作用,至今设计、施工仍未规范化^[8-10]。微型桩作为一种细长桩体,抗剪能力往往优于抗弯能力,对于滑坡的滑体较厚者,滑体推力作用力臂较大,力矩也较大,往往较易达到微型桩的极限抗弯承载力^[11-13]。与此同时,微型桩直径较小,刚度也较小,滑面处微小弯曲变形也可能导致桩顶发生较大的位移,从而影响支挡结构的使用功能^[14-16]。因此,较为准确地确定微型桩的极限抗弯承载力变得尤为重要。

通过几种不同截面形式下的微型桩极限抗弯承载力试验取得的一些试验结果,总结出微型桩的抗弯承载力与桩体截面形式的关系。

1 试验模型设计

1.1 试验流程

1) 试验准备阶段:查阅相关资料,购买试验材料,制作试验所需的试件和混凝土立方体标准试块,试件养护,压力试验机和应变测试系统的调试。

2) 试验实施阶段:将试件需贴片处表面打磨,粘贴应变片,按试验试件摆放位置安装试件,连接数据采集系统,设置数据采集相关参数,最后采用预设的加载方式进行加载直至试件破坏或变形达到试验要求为止,并用相机拍摄试验过程中的试件状态图片。

3) 试验后处理阶段:数据整理。

1.2 试验装置

微型桩的极限抗弯承载力试验采用改装过的 YAS-2000 型压力试验机,在试验台上部的刚性横

梁上焊接倒挂外台座,并固定横梁位置,通过压力油泵将焊接内台座的试验台下部顶升,从而满足微型桩试件中段为纯弯段的试验条件,如图 1 所示。其中,外台座间距为 1.5 m,内台座间距 0.5 m,以试验机顶升轴中心对称布置,采用单跨简支梁两个集中力对称加载形式,如图 2 所示。油压千斤顶对试件进行加载过程中,通过压力传感器测定每一时刻施加在试件上的荷载并保存。

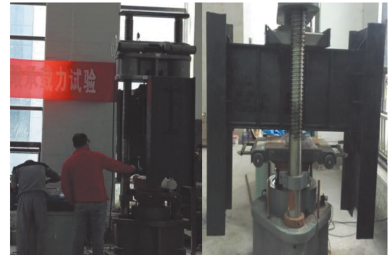


图 1 改装过的 YAS-2000 型压力试验机

Fig. 1 Modifiedyas-2000 pressure testing machine

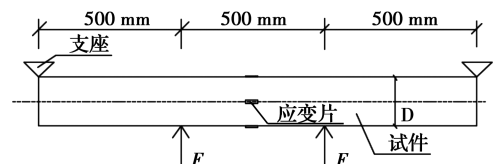


图 2 荷载加载形式

Fig. 2 Loading mode

数据采集装置主要由一台静态电阻应变仪和一台计算机组成,在试验开始前需将电脑和静态电阻应变仪接通,并调试正常,使试验数据能准确地被计算机记录,试验进行中,采用温度补偿,为测量试件在受力全过程中的纵向变形,在每个试件中点所对应的截面位置沿纵向粘贴应变片,此过程需要注意的是,应变片和试件粘贴牢固,连接导线编号分组,等应变片和试件的粘接强度达到共同变形的要求后方可进行试验,过程中保持应变片平整无折痕。

1.3 微型桩截面形式

微型桩的截面形式多样,有桩周配筋、桩心配筋、钢管注浆等。试验采用的 3 种截面形式如图 3 所示,试件截面尺寸见表 1,试件长 1.5 m,其中,桩心配筋桩采用聚乙烯塑料管作模具,混凝土养护期满后去除。试件采用 C30 细石混凝土,强度等级为 42.5R 的普通硅酸盐水泥,灌注过程中采用插入式振捣器振捣密实,每个规格试件为 3 根,共计 27 根试验试件,其中钢管+H 型钢桩中 H 型钢的保护层

厚度不小于 20 mm。

表 1 微型桩试件截面尺寸(单位:mm)

Table 1 Section size of micro-pile specimen (unit: mm)

尺寸规格	指标	桩心配筋桩	钢管+桩心配筋桩	钢管+H型钢桩
	外径	140	140	140
尺寸规格 1	钢管壁厚		4.5	4.5
	钢筋直径	25	25	
	H 型钢规格			HN100×50
	外径	168	168	168
尺寸规格 2	钢管壁厚		5	5
	钢筋直径	25	25	
	H 型钢规格			HN100×100
	外径	203	203	203
尺寸规格 3	钢管壁厚		6	6
	钢筋直径	25	25	
	H 型钢规格			HN125×125

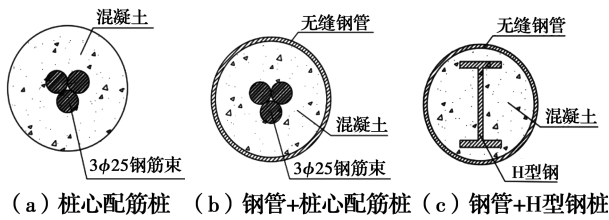


图 3 3 种微型桩的截面形式

Fig. 3 Section form of three micro-piles

2 试验结果分析

经过对试验数据的处理,得到了各试件的极限抗弯承载力、加载全过程的荷载-位移曲线,在试验完成后,对试件的最终状态拍照记录,了解试件的破坏形态。

2.1 试件的极限抗弯承载力

经试验测得,桩体破坏且产生过大变形(约 15 cm)时的最终荷载值如表 2 所示,该工况下推算得出相应的极限抗弯承载力试验数据也列于表 2 中;表 2 中荷载 F 为施加在试件上的集中荷载,是压力试验机供给力的 1/2。对每一个尺寸规格的 3 个试件所得荷载取平均值,即为计算试件极限抗弯承载力的集中荷载取值,试件极限抗弯承载力为 $0.5F$ kN。试验过程中,钢管+桩心配筋桩、钢管+H 型钢桩加载值并未达到其强度极限,但其变形显著,视同试件已经失效,表中数据为试件加载处位移为 150 mm 时的荷载值,此时的混凝土已超过其极限压、拉应变值。

通过图 4 得出桩心配筋桩、钢管+桩心配筋桩、钢管+H 型钢桩随截面尺寸的极限抗弯承载力变化。由曲线可看出,试验选用的 3 种截面形式试件的极限抗弯承载力排序为桩心配筋桩<钢管+桩心配筋桩<钢管+H 型钢桩。对于桩心配筋桩,随着

表 2 试验数据统计表

Table 2 Statistical table of test data

试件型号	直径/mm	桩心配筋桩			钢管+桩心配筋桩			钢管+H 型钢桩		
		荷载 F /kN	平均力/kN	极限抗弯承载力/(kN·m)	荷载 F /kN	平均力/kN	极限抗弯承载力/(kN·m)	荷载 F /kN	平均力/kN	极限抗弯承载力/(kN·m)
尺寸规格 1	140	22.79			(64.60)			97.03		
		26.82	23.33	11.67	111.43	108.30	54.15	108.08	100.56	50.28
		20.39			105.16	96.58				
尺寸规格 2	168	28.97			166.94			180.11		
		34.26	15.48		153.07153.62	76.81		154.11165.54	82.77	
		29.6730.97			140.86	162.41				
尺寸规格 3	203	45.70			361.27			421.94		
		32.25	39.16	19.58	366.10	365.43	182.72	416.90	418.42	209.21
		39.54			368.93	416.42				

截面尺寸的增大,试件的极限抗弯承载力近似按斜率为 0.1 的直线增长,试验过程中发现,从荷载施加开始,受拉侧混凝土便开裂,随即裂缝贯通,90% 以上的抗弯承载力为桩心钢筋提供,当直径为 203 mm

时极限抗弯承载力仅为 19.58 kN·m,完全未发挥受压侧混凝土的抗压性能及钢筋的抗拉性能。对于钢管+桩心配筋桩和钢管+H 型钢桩,随着截面尺寸的增大,试件的极限抗弯承载力增大显著,从直径

168 mm 增大到 203 mm 时,钢管+桩心配筋桩和钢管+H 型钢桩分别按斜率为 2.45 和 2.93 的直线增长到了 182.72 kN·m 和 209.21 kN·m,体现出较好的抗弯性能。说明钢管、H 型钢的存在有效地延缓或阻止了混凝土中剪切滑移裂缝的产生,混凝土的存在则增强了钢管、钢筋、H 型钢的稳定性。

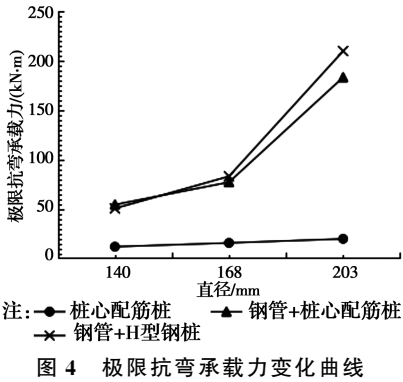


Fig. 4 Curves of ultimate flexural capacity

2.2 荷载-位移分析

整理试验数据发现,对于同类不同直径下的桩心配筋桩、钢管+桩心配筋桩、钢管+H 型钢桩荷载-位移曲线类似,故各取一组数据作说明。

2.2.1 桩心配筋桩荷载-位移曲线 图 5 为桩心配筋桩(直径 168 mm)试件的荷载-位移曲线,根据曲线特点可将其分为 4 个阶段,分别为试件咬合阶段、弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。

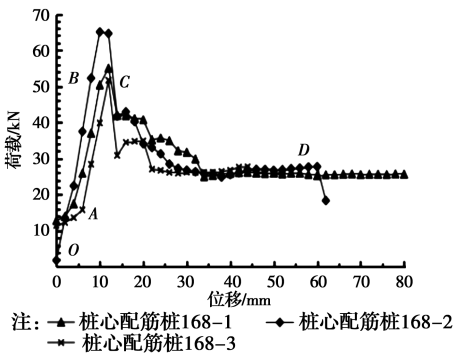


图 5 桩心配筋桩荷载-位移曲线(直径 168 mm)

Fig. 5 Heart of pile reinforcement of pile load-displacement curves (Diameter is 168 mm)

第 1 阶段:试件咬合阶段 OA,从压力试验机加载开始,试件加载点与试验机加载架之间咬合不紧密,通过试验咬合期消除接触影响。

第 2 阶段:弹性阶段 AB,当继续加载,试件处于弹性工作阶段,荷载-位移曲线表现为线性增长,受拉区边缘混凝土产生微裂缝,并随荷载的增大而

增大。

第 3 阶段:弹塑性阶段 BC,当试件进入弹塑性阶段后,荷载增长缓慢,此时混凝土受拉区裂缝已发展到对称轴以下,桩心钢筋承担着拉力,部分区域可看出钢筋上缘与混凝土脱离接触。

第 4 阶段:破坏阶段 CD,随着裂缝贯穿整个桩截面,桩承载力逐渐下降,位移明显增大,抗弯承载力完全由钢筋承载。

试验过程中明显发现,从荷载正常施加开始,受拉侧混凝土便产生微裂缝,一直不断向受压侧扩展,呈脆性破坏趋势,钢筋的抗拉性能和混凝土的抗压性能都未得到充分的体现,此种组合方式在工程中不适宜推广使用。

2.2.2 钢管+桩心配筋桩、钢管+H 型钢桩荷载-位移曲线 图 6 为钢管+桩心配筋桩(直径 168 mm)荷载-位移曲线,图 7 为钢管+H 型钢桩(直径 168 mm)荷载-位移曲线,两类曲线走向类似,根据曲线特点可将两者荷载-位移曲线分为 4 个阶段,分别为试件咬合阶段、弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段。

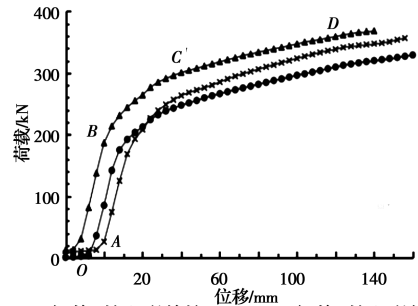
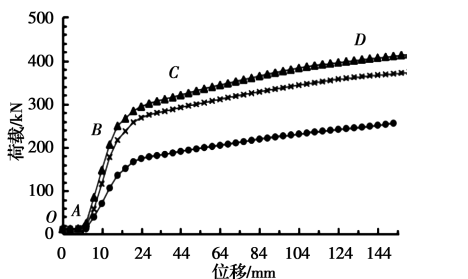


图 6 钢管+桩心配筋桩荷载-位移曲线(直径 168 mm)
Fig. 6 Steel pipe + heart reinforcement pile load-displacement curves (Diameter is 168 mm)

第 1 阶段:试件咬合阶段 OA,原理同桩心配筋桩一样。

第 2 阶段:弹性阶段 AB,A 点为试验压力机与试件接触紧密点,B 点为弹性阶段与强化阶段分界点。在此阶段,曲线近似于直线,随着荷载的增大,截面中和轴从截面形心轴慢慢向试件受压区移动,并未超过 H 型钢上翼缘,钢管处于弹性受力阶段,钢管和混凝土变形协调,在受压区钢管与混凝土近似认为处于单向受压状态,在受拉区钢管为三向应力状态,混凝土对钢管起横向约束作用;

第 3 阶段:弹塑性阶段 BC,随着荷载的增加,受



注: ▲ 钢管+H型钢桩168-1 ● 钢管+H型钢桩168-2
■ 钢管+H型钢桩168-3

图7 钢管+H型钢桩荷载-位移曲线(直径168 mm)

Fig.7 Steel pipe + H section steel pile load-displacement curves(Diameter is 168 mm)

拉区钢管进入弹塑性阶段并逐渐屈服,截面内力发生重分布,截面中和轴向截面受压区方向移动加快,混凝土受拉区逐渐扩大,此时曲线明显偏离原来直线,随着荷载的增加,变形明显加快;

第4阶段:强化阶段CD,随着外荷载的继续增加,钢管表面氧化层剥落明显,截面塑性区域不断向内发展,内部钢材快速达屈服,拉区钢材进入强化阶段,此后,荷载随着位移缓慢增加,曲线在此阶段基本上呈缓线性增长。试验结果显示受弯试件在变形很大时,荷载仍可继续增加,曲线没有明显下降趋势,表明试件在纯弯矩作用下具有良好的延性性能。

2.3 试件破坏形态

通过分析试件的破坏形态不仅可以直观地得出试件是延性破坏或脆性破坏,还可了解影响试件破坏形态的因素以及对各因素采取针对性的措施,以充分发挥试件的承载能力。

2.3.1 桩心配筋桩破坏形态 图8为桩心配筋桩的破坏形态图。由图8看出,试件整体呈微弯状态,纯弯段受拉区核心混凝土出现大量裂缝,且裂缝较长,贯通到试件横截面中下部,受拉区混凝土与桩心钢筋连接脱落,纯弯段受压区核心混凝土被压碎鼓起。试验中,由于试件加载块与支座之间的部位变形严重,该区域混凝土提前开裂,最终试件纯弯段钢筋与混凝土完全脱离。

2.3.2 钢管+H型钢桩破坏形态 图9为钢管+H型钢桩破坏形态图。加载完成后,试件中部并未与两侧形成正弦挠度曲线,由于位移值过大,视同试件已经失效,试验中发现外侧钢管表面有较为明显的塑性变形,若继续加载,试件还可继续承载,具有较好的延性性能。钢管+桩心配筋桩与钢管+H型钢桩破坏形态类似。



图8 桩心配筋桩破坏形态

Fig.8 Failure mode of heart of pile reinforcement of pile



图9 钢管+H型钢桩破坏形态

Fig.9 Failure mode of steel pipe + H section steel pile

3 微型桩结构理论分析

3.1 基本假定

理论分析采用如下基本假定:

1)组合构件截面应变沿截面高度呈线性分布,即符合平截面假定,忽略剪力对构件变形的影响;

2)H型钢与混凝土、混凝土与钢管、混凝土与钢筋之间无相对滑移,协同作用,钢管、钢骨的应力取其应变与弹性模量的乘积;

3)忽略受拉区混凝土对抗拉承载力的贡献,混凝土受压区为半圆形,其应力图采用实际受压区高度的矩形图形,混凝土极限应变取0.003。

3.2 理论计算

3.2.1 桩心配筋桩抗弯承载力计算 由试验结果看,当直径为140 mm时,桩心配筋桩的极限抗弯承载力仅为11.67 kN·m;直径为168 mm时,极限抗弯承载力仅为15.48 kN·m;直径为203 mm时,极限抗弯承载力仅为19.58 kN·m。钢筋、混凝土材料的性能没有有效的发挥出来,不适宜推广,故不对其承载力公式计算进行推算。

3.2.2 钢管+桩心配筋桩抗弯承载力计算 试验中发现,钢管+桩心配筋桩纯弯段中性轴在加载过程中从对称轴往受压区移动,桩心钢筋贡献了部分拉力,但由于距离中性轴较近,未能达到屈服。参考

文献[1],可对比钢管混凝土微型桩计算公式进行提高系数 γ_0 的修正,即

$$M_u = \gamma_0 [1.62\beta M_s + 0.255(1.15 + \alpha_s\theta + \alpha_c\theta^2)M_c] \quad (1)$$

式中: β 为与混凝土强度等级有关的参数,普通混凝土取1.0,高强混凝土取0.96; θ 为套箍系数,按式(2)计算; α_s 、 α_c 为材料影响系数,分别按式(3)和式(4)计算。

$$\theta = \frac{f_s A_s}{f_c A_c} \quad (2)$$

$$\alpha_s = \frac{0.175f}{212} + 0.973 \quad (3)$$

$$\alpha_c = \frac{-0.102f_c}{14.3} + 0.032 \quad (4)$$

式中: A_s 、 A_c 为钢管、混凝土截面面积。

现将试验值与文献[1]数值对比结果列于表3。从表3中可以看出,钢管+桩心配筋桩抗弯承载力试验值大于文献[1]中的理论计算值。分析发现,产生此误差的原因是表3中的试验值是按破坏后产生过大变形时的最终值,而实际情况是当混凝土的极限压应变 $\epsilon_u = 0.0033$ 时,则可认为梁已经破坏,故试验值应取当混凝土达到其极限压应变时的值,如表4所示。

表3 试验值与文献[1]数值对比

Table 3 Comparison between test value and reference [1]

直径/mm	试验值/(kN·m)	文献[1]/(kN·m)	比值
140	54.15		
168	76.81	43.06	1.78
203	182.72	101.11	1.81

表4 混凝土达极限压应变 $\epsilon_u = 0.0033$ 时的试验值与文献[1]数值对比

Table 4 Comparison between reference [1] and test value when the ultimate compressive strain ϵ_u of the concrete is 0.0033

直径/mm	试验值/(kN·m)	文献[1]/(kN·m)	比值	推荐 γ_0 取值
140	36.40			1.2
168	64.23	43.06	1.49	1.2
203	126.92	101.11	1.26	1.2

由表3和表4还可发现,随着钢管直径增大,套箍效应逐渐减小,说明桩径增大后,钢管对混凝土桩的约束作用在减弱;针对文章3种不同形式的微型钢管桩,推荐 γ_0 取值为1.2。

3.2.3 钢管+H型钢桩抗弯承载力计算 采用极

限状态下的叠加原理^[11-13]计算钢管+H型钢桩的抗弯承载力,即 $M_u \leq M_c + M_a + M_s$,该式中的 M_c 、 M_a 和 M_s 分别表示混凝土、钢管和H型钢的抗弯承载力。由试验可知,试件加载过程中,中和轴逐渐向受压区移动,但始终处于H型钢翼缘内,计算中视同钢管全部屈服、H型钢和混凝土部分屈服,计算简图如图10所示。

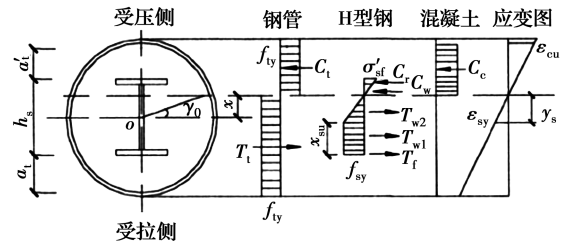


图10 钢管+H型钢桩计算简图

Fig. 10 Calculation diagram of steel pipe + H section steel pile

根据图10计算简图,可分析得出混凝土、H型钢及钢管等各部分受力情况如下:

混凝土受压区合力

$$C_c = f_c [r_i^2 (\pi/2 - \gamma_0 - 0.5 \sin 2\gamma_0)] \quad (5)$$

H型钢上翼缘弹性受压

$$C_{tf} = \sigma'_{st} A_{tf} \quad (6)$$

H型钢腹板弹性受压

$$C_w = \sigma'_{sw} t_w (r_i - x - a'_t - t_{tf}) \quad (7)$$

H型钢腹板弹性受拉

$$T_{w1} = y_{w1} / 2 t_w f_{sy} \quad (8)$$

钢管腹板部分受拉屈服

$$T_{w2} = x_{su} t_w f_{sy} \quad (9)$$

钢管受拉翼缘

$$T_{bf} = A_{tf} f_{sy} \quad (10)$$

受压钢管

$$C_a = t r_m (\pi - 2\gamma_0) f_{acy} \quad (11)$$

受拉钢管

$$T_a = t r_m (\pi + 2\gamma_0) f_{acy} \quad (12)$$

按图10保证截面合力平衡,合力矩平衡,考虑截面的对称性,公式简化后有

$$f_{cc} r_i^2 [\pi/2 - \gamma_0 - 0.5 \sin(2\gamma_0)] - 4 t r_i \gamma_0 f_{ty} - 2 f_{sy} x t_w = 0 \quad (13)$$

$$M_u = \frac{2}{3} f_{cc} r_i^3 \cos^3 \gamma_0 + 4 t f_{ty} r_i \cos \gamma_0 + f_{sy} \cdot$$

$$A_{sf} h_s + 0.5 f_{sy} t_w \left[\left(\frac{h_s}{2} + x \right)^2 - y_s^2 \right] + \frac{2}{3} f_{sy} t_w y_s^2 \quad (14)$$

此时, x 的界限范围为

$$r_i - \frac{(2r_i - a_t)}{1 + f_{sy}/\epsilon_{cu}E_s} < x < r_i - a'_t - t_t \quad (15)$$

式中: x 为混凝土受压区界限到形心轴的位置; γ_0 为混凝土受压界限处的圆心角,其他符号见文献[11-13]。

现以直径为 140 mm 的钢管+H 型桩为例进行计算, $f_{acy} = 2f_{ay} = 2 \times 215 = 430 \frac{N}{mm^2}$, $\gamma_m = 67.75 \text{ mm}$, $t = 4.5 \text{ mm}$, $\gamma_i = 65.5 \text{ mm}$, $a'_t = 15.5 \text{ mm}$, $r_i - a'_t - t_{tf} = 65.5 - 15.5 - 7 = 43 \text{ mm}$, $r_i - \frac{a'_t \epsilon_{cu} E_s}{\epsilon_{cu} E_s - f_{acy}} = 65.5 - \frac{15.5 \times 618}{618 - 430} = 14.55 < 43 \text{ mm}$,

当取 $x_{\min} = 14.55 \text{ mm}$ 时, $\gamma_0 = \arcsin \frac{x}{r_i} = \arcsin$

$\frac{14.55}{65.5} = 12.82^\circ$, 由此可计算得

1) 钢管抗弯承载力最大值为

$M_n = f_{acy} r_m^2 t \cos \gamma_0 = 430 \times 67.75^2 \times 4.5 \times \cos 12.82^\circ = 8.66 \text{ kN} \cdot \text{m}$

2) 混凝土抗弯承载力最大值为

$M_c = \frac{2}{3} f_c r_i^3 \cos^3 \gamma_0 = \frac{2}{3} \times 14.3 \times 65.5^3 \times \cos^3 12.82^\circ = 2.48 \text{ kN} \cdot \text{m}$

3) H 型钢受压承载力最大值为

$M_{sc} = C_{tf}(r_i - x - a'_t - 0.5t'_{tf}) + \frac{2}{3} C_w(r_i - x - a_t - t'_{tf}) = 4\ 333\ 652.312 + \frac{2}{3} \times 24\ 544.20 \times 28.45 = 4.80 \text{ kN} \cdot \text{m}$

4) H 型钢受拉承载力最大值为

$M_{st} = \frac{2}{3} T_{w1} y_{w1} + T_{w2} \left(\frac{x_{su}}{2} + y_{w1} \right) + T_{bf}(r_i + x - a_t - 0.5t'_{sf}) = 0.146 + 1\ 611\ 236.66 + 4\ 594\ 012.5 = 6.21 \text{ kN} \cdot \text{m}$

因此, $\varphi 140$ 的钢管+H 型钢桩其抗弯承载力为 $22.15 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

同理, 可计算得 $\varphi 168$ 及 $\varphi 203$ 的钢管+H 型钢桩抗弯承载力分别为 40.06 、 $70.61 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

从理论计算与试验结果来看, 试验结果显著大于理论计算结果。分析原因发现, 理论计算结果未考虑钢管对混凝土及桩心 H 型钢的约束作用, 仅为各建材承载力的简单叠加, 从而导致理论计算结果偏小。建议在对钢管+H 型钢桩抗弯承载力理论计算时, 仍可按文中式(5)~式(15)计算, 但最终结果需对原简单叠加公式进行修正, 修正后的钢管+H 型钢桩抗弯承载力计算式为

$$M_u \leq M_u + \Phi(M_c + M_s) \quad (16)$$

式中: Φ 为约束系数, 表示钢管对混凝土及桩心 H 型钢的约束系数作用, 文中 Φ 取 1.8 较为合适。现将混凝土达极限压应变时修正理论值与试验结果列于表 5。

表 5 混凝土达极限压应变时的试验与修正理论结果

Table 5 Modified theoretical results and test results when concrete reaches ϵ_u

直径/mm	试验值/(kN·m ⁻¹)	修正理论值/(kN·m ⁻¹)	误差/%
140	39.95	32.94	17.55
168	65.71	60.69	7.64
203	131.93	107.08	18.84

从表 5 中结果来看, 修正理论值仍小于试验值, 理论计算结果偏于保守, 富余承载力可作为设计时的安全储备, 可符合工程设计要求。

4 结论

1) 通过对桩心配筋桩、钢管+桩心配筋桩和钢管+H 型钢桩共 27 根试件进行极限抗弯承载力试验, 发现桩心配筋桩表现出较低的极限抗弯承载力和脆性破坏特征, 钢管+桩心配筋桩和钢管+H 型钢桩表现出较高的极限抗弯承载力和较好的延性性能。

2) 通过对桩心配筋桩、钢管+桩心配筋桩和钢管+H 型钢桩荷载-位移曲线分析, 可将桩心配筋桩受荷分为试件咬合阶段、弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段, 将钢管+桩心配筋桩和钢管+H 型钢桩分为试件咬合阶段、弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段。

3) 对钢管+桩心配筋桩极限抗弯承载力计算可由钢管混凝土桩极限抗弯承载力值乘以 1.2 的提高系数。

4) 计算钢管+桩心 H 型钢桩极限抗弯承载力时需考虑钢管对混凝土及桩心 H 型钢的约束系数作用, 建议取约束系数为 1.8。

参考文献:

- [1] 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 Z Q, PU S T, GUO G, 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. (in Chinese)
- [2] 陈再谦, 郭果, 郭维祥, 等. 微型钢管抗滑桩的受力特点及其应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 43-47.
CHEN Z Q, GUO G, GUO W X, et al. Stress characteristics and application of micro steel anti-slide piles [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science, 2017, 53(1): 43 -47. (in Chinese)
- [3] 辛建平, 唐晓松, 郑颖人, 等. 单排与三排微型抗滑桩大型模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(04): 1050-1056.
XIN J P, TANG X S, ZHENG Y R, et al. Large-scale model tests of single-row and triple-row anti-slide micropiles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 1050-1056 (in Chinese)
- [4] 张丹丹, 刘小丽, 黄敏, 等. 微型群桩加固岩石滑坡受力特性的有限元分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(增刊): 502-507.
ZHANG D D, LIU X L, HUANG M, et al. Finite element analysis on mechanical characteristics of micropile group for rock slide reinforcement [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(Sup): 502-507. (in Chinese)
- [5] CHIARA C M, FFANCESCA D, SANDRO C, et al. Full-scale experimental assessment of the dynamic horizontal behavior of micropiles in alluvial silty soils [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 113(5): 58-74.
- [6] DONG J, WU Z H, LI X, et al. Dynamic response and pile-soil interaction of a heavy-haul railway embankment slope reinforced by micro-piles [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 100(8): 144-157.
- [7] JANG Y E, HAN J T. Field study on axial bearing capacity and load transfer characteristic of waveform micropile [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(5): 653-665.
- [8] 李征. 微型钢管桩边坡加固技术及其应用的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
LI Z. Research on technique and application of mini steel-tube piles in landslide treatment [D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)
- [9] 闫金凯, 殷跃平, 马娟. 滑坡防治独立微型桩性状的大型物理模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 55-60.
YAN J K, YIN Y P, MA JUAN. Large scale model test study on single micropile in landslide reinforcement [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 55-60. (in Chinese)
- [10] 闫金凯, 殷跃平, 门玉明, 等. 滑坡微型桩群桩加固工程模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(4): 120-128.
YAN J K, YIN Y P, MEN Y M, et al. Model test study of landslide reinforcement with micropile groups [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(4): 120-128. (in Chinese)
- [11] 刘晓, 王连广, 李敏. 钢管钢骨混凝土柱压弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(12): 86-90.
LIU X, WANG G L, LI M. Experimental research on steel tube columns filled with steel-reinforced concrete subjected to compression-flexure loading [J]. Industrial Construction, 2012, 42(12): 86-90. (in Chinese)
- [12] 刘晓, 李敏, 王连广. 钢管钢骨高强混凝土压弯柱全过程分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(6): 121-125.
LIU X, LL M, WANG G L. Full-range analysis of steel tube columns filled with steel-reinforced concrete subjected to compression-flexure loading [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(6): 121-125. (in Chinese)
- [13] 刘晓. 钢管钢骨高强混凝土组合构件力学性能研究[D]. 长春: 东北大学, 2009.
LIU X. Mechanical behaviors study of steel tube filled with steel-reinforced high-strength concrete [D]. Changchun: Northeastern University, 2009. (in Chinese)
- [14] GUO Z Y, DENG L J. Field behaviour of screw micropiles subjected to axial loading in cohesive soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(1): 34-44.
- [15] JUSTO E, MANUEL V B, LUIS J J, et al. An elastoplastic model for the analysis of a driven pile extended with a micropile [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 87(1): 10-19.
- [16] 闫金凯, 殷跃平, 门玉明. 微型桩单桩加固滑坡体的模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 669-674.
YAN J K, YIN Y P, MEN Y M. Model test study on landslide reinforcement with single micropile [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(5): 669-674. (in Chinese)