

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904001

不同桩芯微型桩抗弯承载力试验研究*

谢财进, 饶军应, 刘灯凯, 聂崇欣

(贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为研究不同桩芯微型桩在隧道洞口不良地质边坡中的治理效果, 拟对钢筋-混凝土、工字钢-混凝土、钢管-钢筋-混凝土、钢管-工字钢-混凝土微型桩开展抗弯极限承载力试验。研究表明, 工字钢-混凝土微型桩相比钢筋-混凝土微型桩极限抗弯承载力不仅大幅度提升, 其抵抗位移变形的能力也有所增加。钢筋-混凝土微型桩和工字钢-混凝土微型桩桩径由140 mm变化到203 mm, 韧性分别提高25%、50%, 抗弯承载力分别提高89%、91%。钢管微型桩的韧度、极限抗弯承载力都明显强于裸露混凝土桩, 即使变形已非常显著, 仍能继续受力。钢管-钢筋-混凝土微型桩、钢管-工字钢-混凝土微型桩桩径由140 mm变化到203 mm, 抗弯承载力分别提高近256%、265%。

关键词: 不同桩芯微型桩; 抗弯极限承载力试验; 隧道洞口边坡; 治理效果

中图分类号: TU758.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0540-09

Experimental Study on Flexural Capacity of Micro-piles with Different Pile Cores

XIE Caijin, RAO Junying, LIU Dengkai, NIE Chongxin
(School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to study the treatment effect of micro-piles with different pile cores for stabilizing tunnel slopes in adverse geological conditions, a series of bending flexural tests have been conducted on micro-piles made of steel bar-concrete, steel I-beam-concrete, steel pipe-steel bar-concrete, steel pipe-steel I-beam-concrete, respectively. The test results show that both the ultimate flexural capacity and deformation resistance of the steel I-beam-concrete micro-pile are larger than those of the steel bar-concrete micro-piles. When the diameters of the steel bar-concrete and the steel I-beam-concrete micro-piles increase from 140 mm to 203 mm, the toughness is increased by 25% and 50%, respectively, and the flexural capacity is increased by 89% and 91%, respectively. The toughness and ultimate bending capacity of the steel pipe micro-pile are significantly greater than the bare concrete pile, and the loading capacity remains even when the deformation is very large. If the diameters of steel pipe-steel bar-concrete and steel pipe-steel I-beam-concrete micro-piles increase from 140 mm to 203 mm, the flexural capacity increase by nearly 256% and 265%, respectively.

Keywords: micro-piles with different pile cores; ultimate flexural bearing capacity test; tunnel entrance slope; treatment effect

* 收稿日期:2019-04-11;修回日期:2019-11-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51608141)、贵州省科技计划项目(黔科合基础[2016]1041)、土木工程一流学科项目(QYNYL[2017]0013)资助

作者简介:谢财进(1994—),男,硕士研究生。主要从事隧道工程方面的研究。E-mail:2697173429@qq.com

通讯作者:饶军应(1983—),男,副教授,博士。主要从事岩土、隧道工程方面的教学与研究。E-mail:jyao@gzu.edu.cn

引言

微型桩是一种桩径为100~300 mm的小口径钻掘桩,以施工速度快,对岩体扰动小等特点在应急抢险工程中被广泛使用。随着学者们对微型单(群)桩施工工艺、承载能力以及特殊地质条件下的施工技术的不断研究,微型桩的应用不仅仅局限于抢险工程中,微型群桩在特殊地质边坡治理方面也得到应用^[1-5]。

近年来,随着微型桩技术不断应用与推广,无论是理论深度还是试验研究都取得了可观的成果。李楠等^[6]依托大型振动台开展微型桩群桩支护滑坡和无桩滑坡物理模型试验,基于不同形式、不同频率的地震波,通过监测滑坡不同位置的加速度、桩身前后土压力及桩身应变等,分析地震作用下2组滑坡的加速度响应规律、桩身前后土压力分布特征、桩身受力情况及破坏模式等,该研究主要针对外在环境影响微型桩加固边坡的效果,却未分析微型桩自身因素对边坡治理效果的影响。陈伟志等^[7]在非饱和膨胀土地区为减弱或消除地基隆起变形,将传统微型桩改进为一种抗隆起的长短微型桩结构,主要研究长短微型桩桩径、桩间距、桩长等因素减弱甚至消除地基隆起变形;K.G.Kazuo等^[8]认为大多数横向加载的桩是柔性的,在整个长度上不会产生变形,将桩体上部结构下方紧密组合在一起的桩筒化为单个等效直立梁,并进一步验证了围绕群桩土体的非线性行为;苏兴矩^[9]通过分析隧道山体蠕滑病害原因,结合工程实际情况,采用微型桩群对病害进行加固治理,在控制山体滑移的同时,结合引排地下水、地表注浆等措施进行病害处治。这类研究都仅考虑微型桩嵌入岩体后产生的加固效应,却未对桩体本身的结构组成开展分析。宗钟凌等^[10]通过配比试验,分析水灰比、磷尾矿砂与水泥质量比对抗压强度的影响,对不同长度钢管微型桩展开研究,包括混合注浆液的配比设计、微型桩成桩施工方法、注浆体积与微型桩抗压极限承载力之间的关系,虽分析了微型桩本身的材料特性,却未研究不同材料组合对微型桩极限承载力的影响。故不同桩芯微型桩加固边坡治理效果研究是极具意义的,可为以后不同组合材料微型桩的研究提供借鉴。

1 工程概况及病害原因

本文依托都匀酒厂至斗篷山路段师院隧道,该

隧道起止里程K0+468~K0+672,隧区地面高程785~950 m,全长204 m,隧道最大开挖宽度为23.82 m,最大开挖高度16.49 m,扁平率0.69,最大开挖面积313.81 m²。

隧区属于溶蚀、剥蚀中低山地貌区,线路通过溶蚀残丘、斜坡剥蚀坡地地带,山体呈南北向条带,线路呈东西向。隧道洞口边坡表层为第四系溶沟、溶槽填充黏土(Q4^c)、耕植土(Q4^{m1}),冲洪积(Q^{4al+pl})黏土,其下基岩分别为硬岩花岗岩、栖霞组(P_{1q})灰岩夹白云岩、极其破碎强风化灰岩,最下层为硬质白云岩(图1)。

该地质条件属于两层硬岩中间夹软弱岩层,隧道洞口边坡自稳能力差,加之大跨度隧道施工打破了原场区应力平衡,并且施工时间段处于本地雨季,造成洞口段围岩软化。若不对洞口边坡进行合理加固,山体极易沿着软弱夹层滑移,安全风险极大。

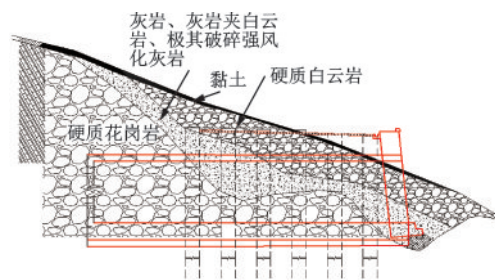


图1 隧道洞口纵断面
Fig.1 Tunnel opening Profile

2 不良地质隧道洞口边坡病害原因及治理措施

洞口边坡实际情况属于上伏薄土层,下伏两层硬岩中间夹软弱岩层,通过边坡建模分析可知软弱夹层极易失稳(图2)。若采用人工挖孔抗滑桩进行边坡加固,不仅有较大安全风险,而且工程

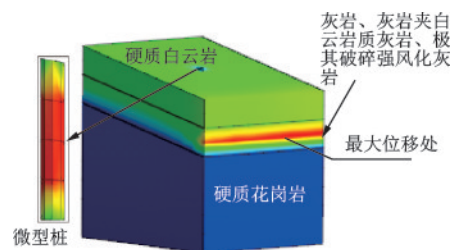


图2 边坡、微型桩位移云图
Fig.2 Displacement contour of the slope and the micro-pile

量大,故采用施工速度快、安全性高的微型桩加固边坡。

为保证隧道洞口边坡稳定,采用微型群桩对其进行加固,将其排列为网状(间距100 cm×100 cm,梅花型布置)与岩体结合形成挡土结构,用以平衡开挖过程中形成的应力。洞口边坡微型桩加固治理如图3所示。

为研究隧道洞口边坡治理效果,本文拟对四种

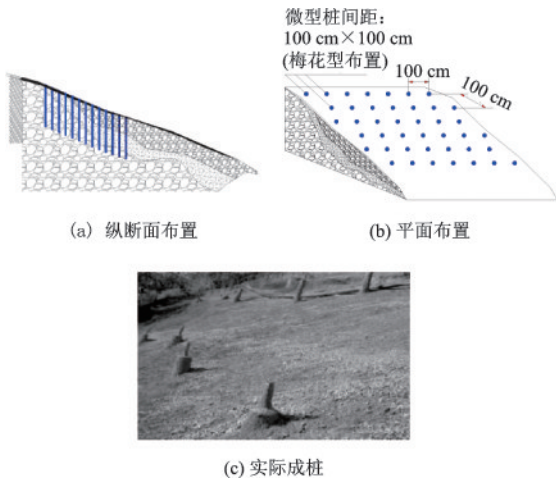


图3 微型桩加固边坡布置

Fig.3 Layout of the slope stabilized by micro-piles

微型桩单桩极限抗弯承载力展开研究:钢筋-混凝土微型桩、工字钢-混凝土微型桩、钢管-钢筋-混凝土微型桩、钢管-工字钢-混凝土微型桩(表1)。最终基于试验数据,对实际工程选用何种微型桩加固给出合理建议^[11-12]。

3 微型桩抗弯极限承载力试验

基于建模结果可知,软弱岩层区位移最大,微型桩加固隧道洞口边坡时,微型桩两端嵌入硬岩中,处于中间软弱岩段的微型桩将受到由于中间岩体下滑产生的极大均布力作用,使其产生较大位移(图4),故需对其抗弯承载力开展试验研究^[13-16]。

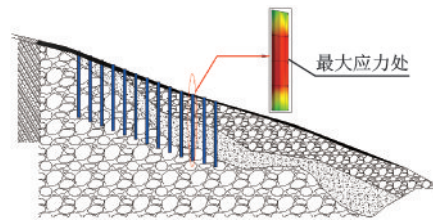


图4 微型桩受力云图

Fig. 4 Stress contour of the micro-pile

表1 不同类型微型桩

Table 1 Different types of micro-piles

微型桩类型	桩径 140 mm	桩径 168 mm	桩径 203 mm
钢筋-混凝土微型桩	C30细石混凝土 3φ26钢筋束	C30细石混凝土 3φ26钢筋束	C30细石混凝土 3φ26钢筋束
工字钢-混凝土微型桩	C30细石混凝土 HN100×50工字钢	C30细石混凝土 HN100×50工字钢	C30细石混凝土 HN100×50工字钢
钢管-钢筋-混凝土微型桩	钢管($d=140$ mm, 厚度4.5 mm) C30细石混凝土 3φ26钢筋束	钢管($d=168$ mm, 厚度5.0 mm) C30细石混凝土 3φ26钢筋束	钢管($d=203$ mm, 厚度6.0 mm) C30细石混凝土 3φ26钢筋束
钢管-工字钢-混凝土微型桩	钢管($d=140$ mm, 厚度4.5 mm) C30细石混凝土 HN100×50工字钢	钢管($d=168$ mm, 厚度5.0 mm) C30细石混凝土 HN100×50工字钢	钢管($d=203$ mm, 厚度6.0 mm) C30细石混凝土 HN100×50工字钢

3.1 试件加工及设备改装

试件材料选用C30细石混凝土、低合金高强度Q420圆形钢管、Q420工字钢、HRB400钢筋(直径26 mm)、电导线、混凝土立方体抗压试验所用模具、涂膜剂、电烙铁、熔丝、松香等。每种类型试件制作3个,每根桩长度为2 500 mm,共36根。试件制备流程如图5所示。

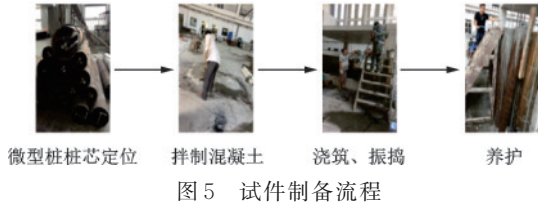


Fig.5 Flow chart of specimen preparation

试验设备采用yas-2000型压力试验机,该压力机不能直接对微型桩进行抗弯承载力试验,需对其进行相应改装(图6)。yas-2000型压力试验机压力泵产生的力推动承载台与微型桩缓慢向上移动,当微型桩与抗弯传力构件的卡槽接触后,传力构件给微型桩两端以向下的力,承载台给微型桩中部以向上的力,进而能有效测试微型桩的极限承载力,同时也符合微型桩在实际边坡中的受力情况。

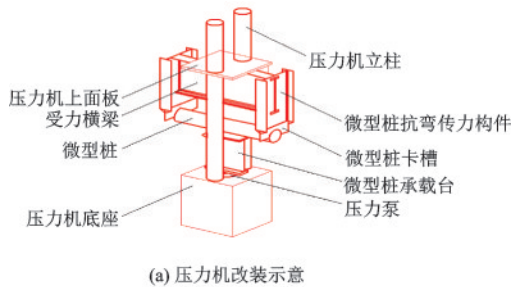


图6 压力机改装

Fig.6 Refitting diagram of the press machine

3.2 试验步骤

(1)在微型桩表面粘贴应变片,并记录其位置。

(2)调试yas-2000压力试验机。

(3)将微型桩放置于改装后的yas-2000压力试验机承载台上,并调整微型桩位置使其对准传力构件卡槽。

(4)将DH3818-2静态应变仪与贴好的应变片导线连接,并对各组应变片标号,便于读数。

(5)安装并调整百分表。

(6)在yas-2000型压力试验机的计算机控制系统上设置试件参数与荷载参数。

(7)进行试验,观察、记录微型桩表面形变特征,钢筋混凝土微型桩和钢管混凝土微型桩的试验破坏分别如图7、8所示。

(8)数据整理与分析。



图7 钢筋混凝土微型桩破坏

Fig.7 Photograph of the failure of a reinforced concrete micro-pile



图8 钢管混凝土微型桩破坏

Fig.8 Photograph of the failure of concrete-filled steel tubular micro-piles

4 微型桩抗弯极限承载力试验结果及分析

本次试验将试验桩定义为二类桩试件,钢筋混凝土、工字钢-混凝土微型桩加载过程中具有明显的极限应力值;但钢管-钢筋-混凝土、钢管-工字钢-混

混凝土微型桩加载时,虽然变形已非常显著,但还未达到其极限强度,试验中所有钢管微型桩的变形位移达到 80 mm 左右时,经观察发现钢管内部混凝土已经完全失效,只是由于钢管的约束还在工作。在实际工程中岩体显然已经发生拉裂破坏,故由此认定为试件已失效,取其跨中挠度约 80 mm 时对应的应力值作为极限应力值。

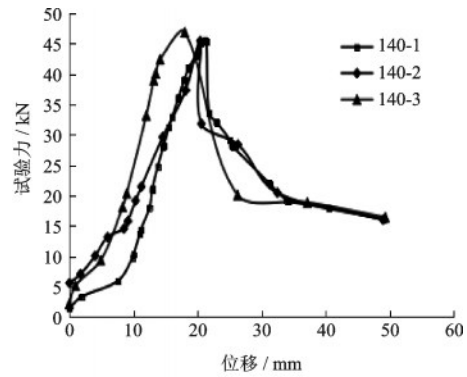
4.1 微型桩抗弯极限承载力试验

4.1.1 钢筋-混凝土微型桩

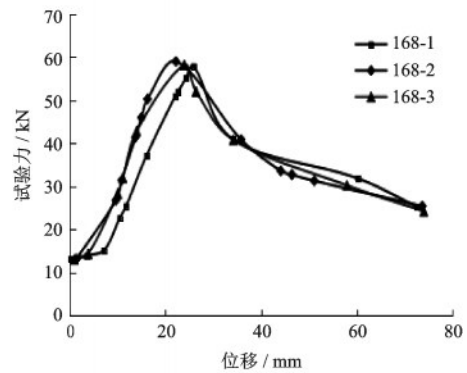
3根同参数钢筋-混凝土微型桩试验应力-位移结果如图9所示。试验结果表明,随着试验力逐渐增加,微型桩变形逐渐增大,当位移增加到一定值时,微型桩达到极限承载力,位移持续增大,微型桩破坏,此时试验力开始降低。桩径 140 mm 钢筋-混凝土微型桩当形变 20 mm 左右时,承载力达到极限值 45 kN 左右;桩径 168 mm 钢筋-混凝土微型桩当形变 25 mm 左右时,承载力达到极限值 60 kN 左右,韧性提高 25%,抗弯承载力提高 33%;桩径 203 mm 钢筋-混凝土微型桩当形变 25 mm 左右时,承载力达到极限值 85 kN 左右,韧性提高 25%,抗弯承载力提高 89%。随着桩径的增加,微型桩的极限抗弯承载力不断增大,桩径从 140 mm 增加到 168 mm 时变形增加 5 mm,但随着桩径从 168 mm 增加到 203 mm 时,对应的变形没有多大改变,主要原因源于混凝土属于脆性材料,抗弯能力差。微型桩中钢筋截面积相对于微型桩截面积较小,由于应力而产生的位移主要由混凝土承受,故而随着桩径增加,其抵抗位移变形的能力不会得到很大的提升。

4.1.2 工字钢-混凝土微型桩

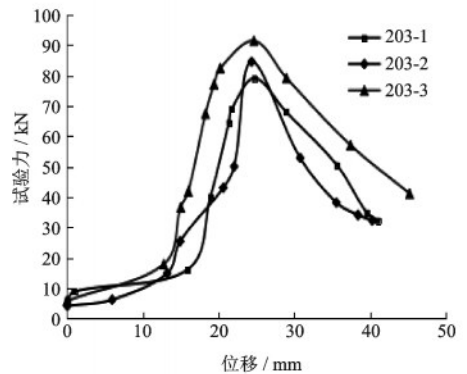
3根同参数工字钢-混凝土微型桩试验应力-位移结果如图10所示。试验结果表明,随着试验力逐渐增加,微型桩变形逐渐增大,当位移增加到一定值时,微型桩达到极限承载力,位移持续增大,微型桩破坏,此时试验力开始降低。桩径 140 mm 工字钢-混凝土微型桩当形变 20 mm 左右时,承载力达到极限值 55 kN 左右;桩径 168 mm 钢筋-混凝土微型桩当形变 25 mm 左右时,承载力达到极限值 65 kN 左右,韧性提高 25%,抗弯承载力提高 18%;桩径 203 mm 钢筋-混凝土微型桩当形变 30 mm 左右时,承载力达到极限值 105 kN 左右,韧性提高 50%,抗弯承载力提高 91%。随着桩径的增加,微型桩的极限抗弯承载力不断增大,韧性也不断增加。工字



(a) 桩径140 mm



(b) 桩径168 mm



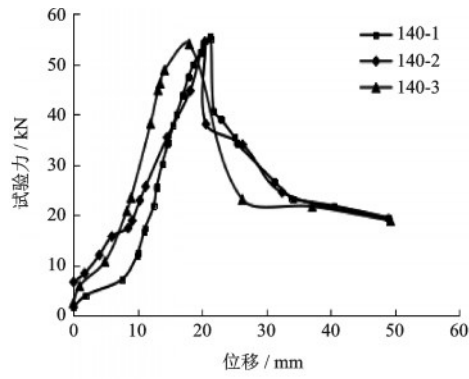
(c) 桩径203 mm

图9 不同桩径钢筋-混凝土微型桩试验应力-位移曲线
Fig.9 Experimental stress-displacement curves of steel bar-concrete micro-piles with different pile diameters

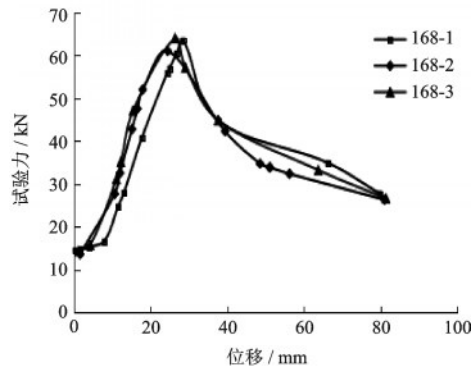
钢-混凝土微型桩相比钢筋-混凝土微型桩极限抗弯承载力不仅大幅度提升,其抵抗位移变形的能力也有所增加,特别是当桩径为 203 mm 的工字钢-混凝土微型桩效果更为明显。

4.1.3 钢管-钢筋-混凝土微型桩

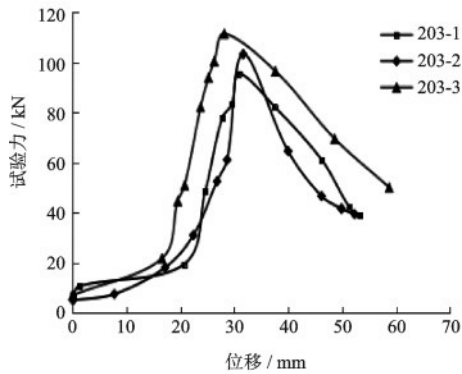
3根同参数钢管-钢筋-混凝土微型桩试验应力-位移结果如图11所示。试验结果表明,随着试验力逐渐增加,微型桩变形逐渐增大,随着试验力持续增加,微型桩的变形非常显著,但未达到其极限强度,主要原因在于即使内部混凝土已经发生大变形



(a) 桩径140 mm



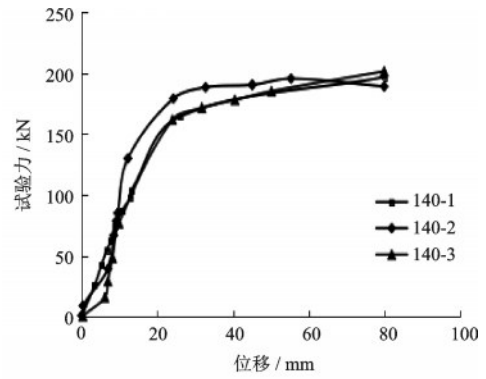
(b) 桩径168 mm



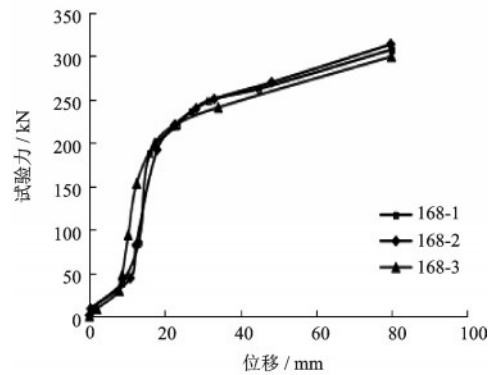
(c) 桩径203 mm

图10 不同桩径工字钢-混凝土微型桩试验应力—位移曲线
Fig.10 Experimental stress-displacement curves of steel I-beam-concrete micro-piles with different pile diameter

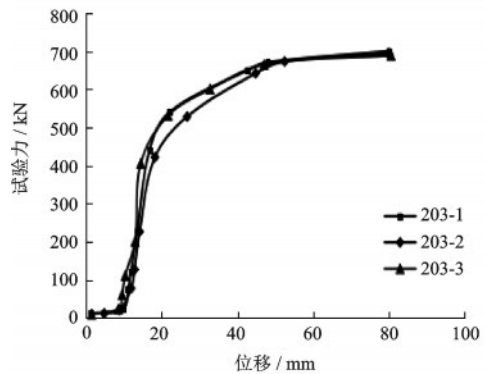
而破坏,但在外包混凝土钢管的束缚作用下,微型桩仍然可以继续承受施加的试验力及抵抗相应的变形。在实际工程中,若岩体变形过大显然已经发生拉裂破坏,故取其跨中挠度约80 mm时,认定为微型桩试件已失效,对应的应力值作为抗弯极限承载力值。当钢管-钢筋-混凝土微型桩位移达到80 mm时,桩径140 mm微型桩承载力极限值为195 kN左右;桩径168 mm微型桩承载力极限值为305 kN左右抗弯承载力提高近56%;桩径203 mm微型桩承载力达到



(a) 桩径140 mm



(b) 桩径168 mm



(c) 桩径203 mm

图11 不同桩径钢管-钢筋-混凝土微型桩试验应力—位移曲线

Fig.11 Stress-displacement curves of steel pipe-steel bar-concrete micro-piles with different pile diameters

极限值695 kN左右,抗弯承载力提高近256%。

4.1.4 钢管-工字钢-混凝土微型桩

3根同参数钢管-工字钢-混凝土微型桩试验应力—位移结果如图12所示。试验现象与钢管-钢筋-混凝土微型桩类似,同样取其跨中挠度约80 mm时的应力值作为抗弯极限承载力值。当钢管-工字钢-混凝土微型桩位移达到80 mm时,桩径140 mm微型桩承载力极限值为230 kN左右;桩径168 mm微

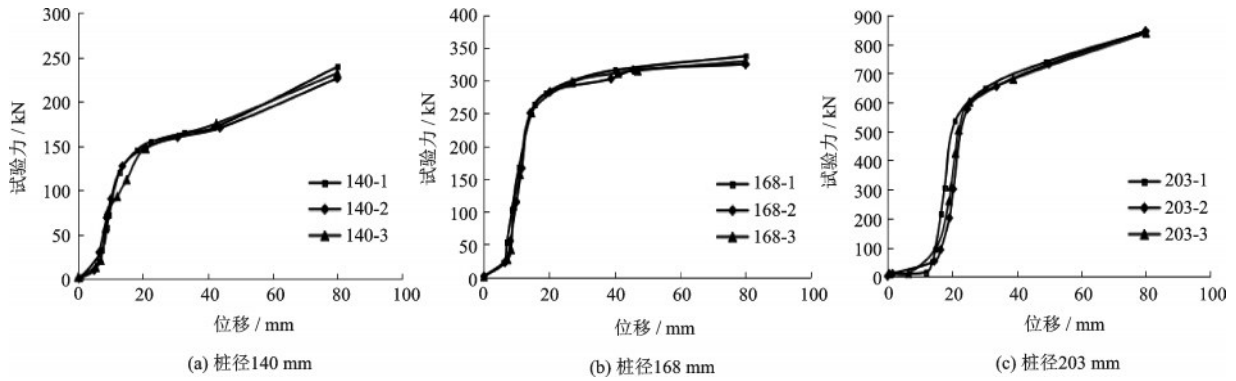


图 12 不同桩径钢管-工字钢-混凝土微型桩试验应力一位移曲线

Fig.12 Stress-displacement curves of steel pipe-steel I-beam-concrete micro-piles with different pile diameters

型桩承载力极限值为 330 kN 左右,抗弯承载力提高近 43%;桩径 203 mm 微型桩承载力达到极限值 840 kN 左右,抗弯承载力提高近 265%。

4.2 微型桩抗弯极限承载力对比分析

通过对四类微型桩所得试验数据整理分析,可得各类试件位移、平均位移、极限抗弯承载力、平均

承载力,见表 2。试验结果表明钢管微型桩的韧度、极限抗弯承载力都明显强于裸露混凝土桩,对比效果如图 13~14 所示。同类型微型桩随着桩径的增大,韧性改善效果不明显,但抗弯极限承载力明显提高。故而对地质条件比较差的隧道洞口边坡进行治理时,应优选钢管微型桩进行加固。针对不同地址条件,可基于试验结果合理选用不同类型微型桩。

表 2 不同桩芯微型桩试验结果

Table 2 Statistics of test results of micro-piles with different pile cores

桩径/ mm	钢筋-混凝土 微型桩		工字钢-混凝土 微型桩		钢管-钢筋-混凝土 微型桩		钢管-工字钢-混凝土 微型桩	
	平均极限挠 度/mm	平均极限抗弯 承载力/kN	平均极限挠 度/mm	平均极限抗弯 承载力/kN	平均极限挠 度/mm	平均极限抗弯 承载力/kN	平均极限挠 度/mm	平均极限抗弯 承载力/kN
140	19.92	45.96	19.90	54.58	80.02	195.61	80.02	232.29
168	24.00	58.39	26.39	64.86	79.95	306.99	80.00	330.50
203	24.60	84.99	30.25	103.25	80.23	693.87	80.06	842.73

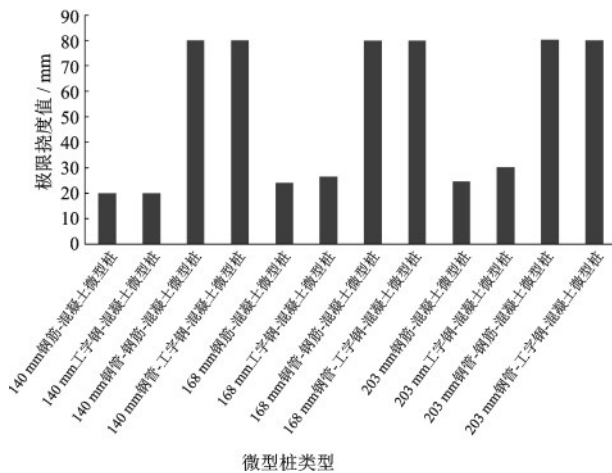


图 13 不同类型微型桩极限挠度对比

Fig.13 Comparison of ultimate deflection of different types of micro-piles

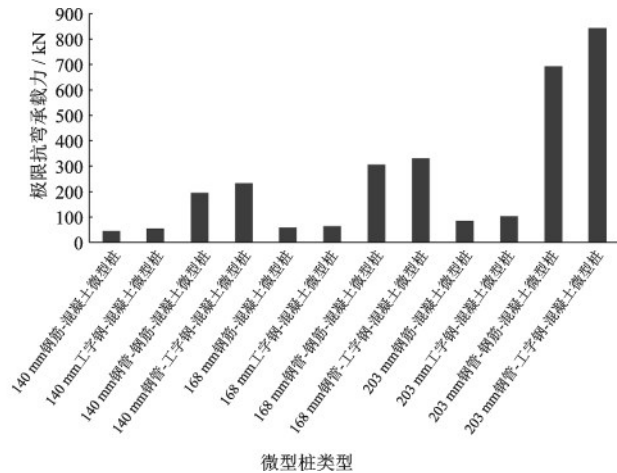


图 14 不同类型微型桩极限承载力对比

Fig.14 Comparison of ultimate bearing capacity of different types of micro-piles

5 结 论

(1) 钢筋-混凝土微型桩桩径由 140 mm 变化到 203 mm, 韧性提高 25%, 抗弯承载力提高 89%; 工字钢-混凝土微型桩桩径由 140 mm 变化到 203 mm, 韧性提高 50%, 抗弯承载力提高 91%。工字钢-混凝土微型桩相比钢筋-混凝土微型桩极限抗弯承载力不仅大幅度提升, 其抵抗位移变形的能力也有所增加。

(2) 钢管-钢筋-混凝土微型桩桩径由 140 mm 变化到 203 mm, 抗弯承载力提高近 256%; 钢管-工字钢-混凝土微型桩桩径由 140 mm 变化到 203 mm, 抗弯承载力提高近 265%。

(3) 钢管微型桩的韧度、极限抗弯承载力都明显强于裸露混凝土桩, 本文依托工程洞口边坡地质条件极差, 建议使用钢管-工字钢-混凝土微型群桩进行加固。

参考文献:

[1] 王斌, 周良春, 陈小勇. 微型桩在隧道洞口边坡处治中的应用[J]. 西南公路, 2009, 55(4): 118-121, 146.
Wang B, Zhou L Ch, Chen X Y. Application of micro-pile in the treatment of tunnel entrance slope [J]. Southwest Highway, 2009, 55(4): 118-121, 146. (in Chinese)

[2] 姜孟. 微型桩挡墙组合结构在边坡整治中的应用技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2017: 1-5.
Jiang M. Research on application technology of micro-cosmetic retaining wall composite structure in slope control [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017: 1-5. (in Chinese)

[3] Federica R, Diana S, Nicolaet C, et al. Thermal response prediction of a prototype energy Micro-Pile[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2018; doi:10.1016/j.gete.2018.07.001.

[4] 朱宝龙, 胡厚田, 张玉芳, 等. 钢管压力注浆型抗滑挡墙在京珠高速公路K108滑坡治理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 399-406.
Zhu B L, Hu H T, Zhang Y F, et al. Application of steel pipe pressure grouting anti-skid retaining wall in treatment of K108 landslide of Jing-Zhu Expressway [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 399-406. (in Chinese)

[5] Cantoni R, Collotta T, Ghionna V, et al. A design

method for reticulated micropiles structure in sliding slopes [J]. Ground Engineering, 1989, 22(4): 41-47.

[6] 李楠, 门玉明, 高讴, 等. 微型桩群桩支护滑坡的地震动响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2144-2151.
Li N, Men Y M, Gao O, et al. Study on seismic dynamic response of landslide supported by micro-pile group [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2144-2151. (in Chinese)

[7] 陈伟志, 李安洪, 蒋关鲁, 等. 铁路路基下膨胀土长短微型桩抗隆起研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 409-423.
Chen W Zh, Li A H, Jiang G L, et al. Study on uplift resistance of expansive soil short and short micro piles under railway roadbed [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 409-423. (in Chinese)

[8] Kazuo K G, Yuan B Y, Yoshitaka M. Single beam analogy for describing soil-pile group interaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(3): 213-221.

[9] 苏兴矩. 微型桩加固隧道蠕滑山体治理效果研究[J]. 土工基础, 2018, 32(5): 480-483.
Su X J. Study on the treatment effect of micro-pile strengthening tunnel creep mountain [J]. Geotechnical Foundation, 2018, 32(5): 480-483. (in Chinese)

[10] 宗钟凌, 鲁先龙, 李青松. 静压钢管注浆微型桩抗压与抗拔对比试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增1): 362-368.
Zong Zh L, Lu X L, Li Q S. Comparative test study on compressive and uplift resistance of static pressure steel pipe grouting micro-piles [J]. Geotechnical Mechanics, 2018, 39(Sup 1): 362-368. (in Chinese)

[11] 王洋, 冯君, 谢先当, 等. 微型桩组合抗滑结构受力机制的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4226-4231, 4250.
Wang Y, Feng J, Xie X D, et al. In-situ experimental study on the mechanical mechanism of micro-pile composite anti-slide structure [J]. Geotechnical Mechanics, 2018, 39(11): 4226-4231, 4250. (in Chinese)

[12] 朱本珍, 孙书伟, 郑静. 微型桩群加固堆积层滑坡原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增1): 2858-2864.
Zhu B Zh, Sun Sh W, Zheng J. In-situ test study of the micro-pile-reinforced stacking landslide [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup 1): 2858-2864. (in Chinese)

[13] 韩凯吉. 宁波软土地质条件下微型钢管桩的承载特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017: 1-10.

Han K J. Study on bearing capacity of micro steel pipe pile under geological conditions of Ningbo soft soil [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017: 1-10. (in Chinese)

- [14] 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 X Y, Yang H P, Xiao J, et al. Study on flexural capacity and flexural stiffness of grouting miniature steel pipe pile [J]. Industrial Building, 2016, 46 (10): 89-94. (in Chinese)

- [15] 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, 54

(8): 35-40.

Ji B H, Hu Zh Q, Chen J Sh, et al. Experimental study on flexural behavior of lightweight aggregate concrete members of circular steel tubes [J]. Journal of Civil Engineering, 2007, 54(8): 35-40. (in Chinese)

- [16] 陈再谦, 帅世杰, 蒲黍條, 等. 微型桩抗弯承载力试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(2): 100-105.

Chen Z Q, Shuai Sh J, Pu Sh T, et al. Experimental study on flexural bearing capacity of micro-piles [J]. Proceedings of the Yangtze Academy of Sciences, 2020, 37(2): 100-105. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)



(上接第 490 页)

- [11] 彭邦阳, 赵志峰. 表面入渗法诱导碳酸钙沉积加固海相粉土研究[J]. 林业工程学报, 2018, 3(5): 136-141.

Peng B Y, Zhao Zh F. Improvement of marine silt by microbial induced calcite precipitation by surface percolation [J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(5): 136-141. (in Chinese)

- [12] 赵志峰, 孔繁浩. 土体环境对微生物诱导碳酸钙沉积加固海相粉土的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 608-614.

Zhao Zh F, Kong F H. Effects of soil environment on microbially induced calcite precipitation in marine silt [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 608-614. (in Chinese)

- [13] 邵光辉, 尤婷, 赵志峰, 等. 微生物注浆固化粉土的微

观结构与作用机理[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 129-135.

Shao G H, You T, Zhao Zh F, et al. Microstructure and mechanism of microbial cementation silt treated by bio-grouting [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 41(2): 129-135. (in Chinese)

- [14] Cui M J, Zheng J J, Zhang R J, et al. Influence of cementation level on the strength behavior of bio-cemented sand [J]. Acta Geotechnica, 2017, 5(12): 971-986.

- [15] Cheng L, Shahin M, Mujah D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(1): 04016083.



(上接第 519 页)

- [19] 李强, 牛荻涛, 刘磊, 等. 箍筋锈蚀混凝土棱柱体试件轴心受压试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(1): 65-68.

Li Q, Niu D T, Liu L, et al. Experimental study on reinforced concrete prism specimens confined by corroded stirrups [J]. Journal of Building Structures, 2013, 43(1): 65-68. (in Chinese)

- [20] 刘磊. 锈蚀箍筋约束混凝土单轴受压本构关系试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

Liu L. Experimental study on constitutive relationship under uniaxial compression of corroded stirrups confined concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)

- [21] Willam K J. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete [J]. International Association for Bridge and Structural Engineering Proceedings, 1975, 19: 1-30.

- [22] Mander J B. Seismic design of bridge piers [D]. Christchurch: University of Canterbury Civil Engineering, 1984.

- [23] Du Y G, Clark L A, Chan A H C. Residual capacity of corroded reinforcing bars [J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57: 135-47.

- [24] Paulay T, Priestley M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1992.