

大直径深长桩泥岩侧摩阻力试验研究

——以吉林省龙华松花江特大桥工程试桩为例

孙 炜, 徐 燕, 胡天明

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要:泥岩地基中泥岩的桩侧摩阻力设计参数比较缺乏。通过对吉林省龙华松花江特大桥工程试桩的自平衡静载试验分析,并结合室内桩和泥岩接触中型剪切摩擦试验,揭示了该地区泥岩地基中大直径深长灌注桩泥岩侧摩阻力作用机制及承载特征,得出了一些对泥岩地基中钻孔灌注桩的设计和深入研究具有指导意义的结论。结果表明:大直径深长桩桩端阻力分担的荷载只占总承载力的一小部分,属摩擦型桩。自平衡测试中,全风化泥岩侧摩阻力达到 173 kPa,强风化泥岩侧摩阻力达到 279 kPa,中等风化泥岩侧摩阻力达到 336 kPa,实测值较规范参考值大很多。建议在桩基设计时通过室内桩和泥岩接触中型剪切摩擦试验,基于莫尔库伦理论预估泥岩侧摩阻力,为桩基承载力的确定提供参考。

关键词:钻孔灌注桩;大直径深长桩;泥岩;侧摩阻力;自平衡测试;中型剪切摩擦试验

中图分类号:TU473 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)11-0072-07

Testing of skin friction of large diameter deep piles in mudstone: A case study of the test piles for the Songhua River large bridge in Jilin Province

SUN Wei, XU Yan, HU Tianming

(College of Construction and Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: The pile skin friction design parameters for the mudstone foundation are scant. According to the test data of large diameter deep piles of the Songhua River large bridge by means of the Osterberg cell pile test in Jilin Province, and in conjunction with the medium-scale shear test between the pile and mudstone, the interaction mechanism and load characteristics of mudstone skin friction were revealed, leading to some constructive conclusions for the design and in-depth research of the cast-in-place pile for mudstone foundation. The results show that: the end resistance of large diameter deep piles only accounts for a small part of the bearing capacity of the total load, so it belongs to the friction type pile. By means of the Osterberg cell pile test, skin friction in completely weathered mudstone, strongly weathered mudstone and moderately weathered mudstone reached 173kPa, 279kPa and 336kPa respectively. These values of mudstone skin friction are greater than specified reference ones. In the design of pile foundation, it is recommended that the mudstone skin friction estimated using the shear strength parameter measured by medium-scale shear tests, and based on the Mohr-Coulomb criterion, can provide economical and reliable parameters for estimating the bearing capacity of piles.

Key words: cast-in-place piles; large diameter deep pile; mudstone; skin friction; Osterberg cell pile test; medium-scale shear test

0 引言

泥岩在我国有着广泛的分布,是常见的软质岩。

目前泥岩地基中泥岩的桩侧摩阻力设计参数缺乏,特别是因地地质条件差异,不同地区桩基础的泥岩侧

收稿日期:2019-07-03; 修回日期:2019-11-02 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.11.013

基金项目:国家自然科学基金资助项目“乾安泥林土的工程地质特性对泥林潜蚀作用影响机制研究”(编号:41702300)

作者简介:孙炜,男,汉族,1994年生,硕士研究生,土木工程专业,吉林省长春市西民主大街938号吉林大学朝阳校区,750136194@qq.com。

引用格式:孙炜,徐燕,胡天明.大直径深长桩泥岩侧摩阻力试验研究——以吉林省龙华松花江特大桥工程试桩为例[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):72-78.

SUN Wei, XU Yan, HU Tianming. Testing of skin friction of large diameter deep piles in mudstone: A case study of the test piles for the Songhua River large bridge in Jilin Province[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46 (11):72-78.

摩阻力性状有其自身的规律。研究泥岩侧摩阻力特性,特别是大直径深长桩泥岩桩侧摩阻力发挥机制及特性,是桩基础理论发展的需要,也是桩基设计的迫切要求。

目前桩基设计主要依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[1]、《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[2],对于大桥桩基可参考《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTGD 63—2007)^[3],其中规范 JGJ 94—2008 根据风化程度的不同分别给出了全风化软质岩和强风化软质岩侧摩阻力标准值的经验值,从吉林地区的使用情况看,所取经验值与实测值相差较大,有时可差 1 倍多,而规范 GB 50007—2011 和 JTGD 63—2007 未给出泥岩等软质岩侧摩阻力经验值^[4],这些给泥岩地基在设计时侧摩阻力取值带来了一定难度,泥岩桩侧摩阻力的取值问题也一直是桩基设计中的一个难题^[5]。

目前,国内对土层侧摩阻力的研究比较多。曹权等^[6]建立了软土中静压桩的单桩桩侧承载力时效性的理论解,并通过现场单桩承载力试验验证了其合理性;叶建忠等^[7]通过现场试验,采用双曲线函数模型,得到了灌注桩侧摩阻力与桩-土相对位移之间的关系;张明义等^[8]利用改进后的直剪仪进行了室内动摩擦试验,试验结果表明在粘性土中,桩-土的侧摩阻力与桩的承载力增长曲线基本吻合;赵法锁等^[9]结合西安土层结构性质,采用有限单元法对黄土地区灌注桩桩-土相互作用进行模拟,研究了桩-土相互作用与桩侧摩阻力之间的关系,并通过单桩载荷试验资料进行了验证。

对泥岩地基,程晔等^[10]结合广西南宁高层建筑的桩基工程,通过自平衡试桩法测试了泥岩桩基下的桩端承载性能和整桩承载性能;何剑^[11]根据青海西宁某工程试桩的竖向抗压静载试验和高应变动力检测结果,揭示了该地区泥岩地基中大直径灌注桩的承载特性;范秋雁等^[12]通过收集广西地区泥岩深层平板载荷试验资料,对刚塑性太沙基理论计算承载力的公式进行了修正,提出了广西第三系泥岩桩端承载力的计算公式;刘争等^[13]采用 FLUC-3D 软件建立了空间桩-土有限元模型,并采用自平衡试桩法对贵州某大桥泥岩桩基的承载特性及设计参数进行实测,验证了该模型的可靠性;张信贵等^[14]以南宁某工程的桩基失效为例,对南宁泥岩的基本特性与桩基承载力影响因数进行分析,认为水岩相互

作用和机械扰动是影响桩端承载力的最主要因素;王平^[15]修正了规范中桩基承载力计算公式,并通过室内试验和工程实例验证其合理性,使桩基设计更加合理;柳飞等^[16]认为由于侧摩阻力的影响,单桩竖向承载力的粒径效应比桩端阻力的粒径效应更显著,并通过不同长径比情况下的单桩竖向承载力试验进行了验证;张向东等^[17]提出了冻融土体中桩侧摩阻力计算模型,并以实际项目为例对桩基受力情况现场监测,验证了所建立的本构关系模型;李逵等^[18]通过静载试验及桩身内力测试对泥岩地层桩侧面阻力进行了分析,通过对比经验数据得出该地层的实际桩侧摩阻力和桩基设计依据;梅源等^[19]基于荷载传递法,建立侧摩阻力及桩端阻力计算模型,对湿陷性黄土的桩基侧摩阻力微分方程进行求解,得出了黄土地基不同湿陷阶段的桩基侧摩阻力的估算公式。

从以上研究可以看出,目前研究大多对整个桩的承载特性和桩端承载特性方面进行分析,而针对泥岩侧摩阻力承载特性进行研究相对较少^[20]。本文对吉林省龙华松花江特大桥自平衡静载试验数据进行整理分析,并结合室内桩和泥岩接触中型剪切摩擦试验分析,揭示该地区泥岩地基中大直径深长灌注桩泥岩侧摩阻力作用机制及承载特征^[21]。

1 现场自平衡测试

1.1 工程地质与试桩概况

龙华松花江特大桥位于吉林省松原市,是国家高速公路网大庆至广州高速公路松原至肇源段的重要工程。试桩所在场地的地层情况如表 1 所示。大桥基础采用钻孔灌注桩,主桥墩桩长 65 m,桩径 2 m,采用回转反循环钻进成孔。试桩选取主桥 1 号墩 1 号、3 号桩进行单桩自平衡静载测试,试桩概况如表 2 所示。

1.2 自平衡测试原理及方法

对于龙华松花江特大桥大型桩基,由于单桩极限承载力要求较大,单桩承载力达到以“ $\times 10^4$ kN”计的水平,传统桩顶静载试验加荷困难,难以实现^[22]。美国西北大学教授 Jorj O. Osterberg 于 20 世纪 80 年代中期成功研究出一种新的静载试桩法——自平衡测桩法^[23]。在国内外,自平衡法正在应用于大型桩基,并取得了较好的效果。本工程试桩采用自平衡试桩法,其主要装置是一种经特别设

表1 场地地层岩性
Table 1 Site lithology

层名	岩性描述	层位标高/m
中细砂(Q ₄)	灰绿色,饱和,中密,主要有石英砂,暗色岩屑	129.46~124.46
砾砂(Q ₄)	灰绿色,饱和,含量为25%~30%,密实	124.46~116.96
低液限粘土(Q ₄)	灰绿色,可塑,主要由粘性土和少量粉砂组成	116.96~90.76
中砂(Q ₄)	黄绿色,含砾,砾径2~10mm,含量为3%,磨圆好	90.76~84.46
砾砂(Q ₄)	灰色,砾径2~25mm,含量约30%,磨圆好	84.46~81.26
全风化泥岩(N)	灰绿色,全风化,单轴饱和抗压强度480kPa	81.26~77.46
强风化泥岩(N)	灰绿色,强风化,单轴饱和抗压强度745kPa	77.46~71.46
中风化泥岩(N)	灰绿色,较硬,单轴饱和抗压强度1710kPa	71.46~62.46

表2 主桥1号墩试桩情况

Table 2 Test pile conditions of the 1[#] pier of the main bridge

桩号	预估极限承载力/kN	荷载箱距桩端距离/m	设计桩径/m	设计桩长/m
1	2×28000	15	2	65
3	2×28000	10	2	65

计可用于加载的荷载箱,一般是在桩身平衡点位置安设^[24]。测试开始后,荷载箱产生的荷载沿着桩身轴向往上、往下传递,从而调动桩身侧摩阻力及端阻力,直至达到桩承载力极限状态。假设基桩受荷后,桩身结构完好(无破损,混凝土无离析、断裂现象),那么在各级荷载作用下混凝土产生的应变等于钢筋产生的应变,通过量测预先埋置在桩体内的钢筋计,以实测到各钢筋应力计在每级荷载作用下所得的应力应变关系^[25],可以推出相应桩截面的应力应变关系,那么相应桩截面微分单元内的应变亦可求得,由此便可求得在各级荷载作用下各桩截面的桩身轴力值、桩周各岩土层侧摩阻力、单桩总侧摩阻力值 Q_s 。目标场地同时存在砂土和粘土,在承载力计算时假设场地土层以粘性土为主,工程方面考虑偏于安全。

1.3 试桩成果分析

两根试桩荷载位移 $Q-s$ 曲线如图1、图2所示,单桩竖向抗压极限承载力 Q_u 。依据《桩承载力自平衡测试技术规程》(DB32/T 291-1999),计算承载力公式为:

$$Q_u = (Q_{u上} - W) / \gamma + Q_{u下} \quad (1)$$

式中: $Q_{u上}$ ——荷载箱上部桩的实测极限承载力,kN; $Q_{u下}$ ——荷载箱下部桩的实测极限承载力,kN;

W ——荷载箱上部桩自身重力,kN; γ ——系数,对于粘性土和粉土 γ 取0.8,对于砂土 γ 取0.7,本次测桩取 $\gamma=0.8$ 。

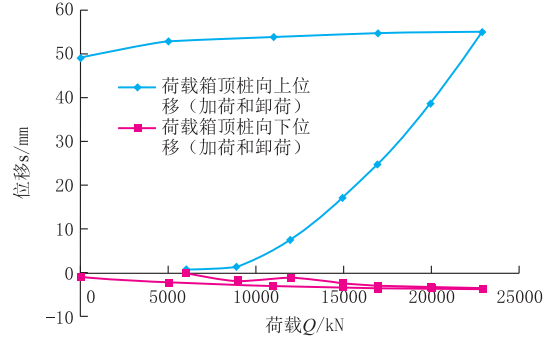


图1 1号桩荷载位移 $Q-s$ 曲线

Fig.1 Q vs s curves of the 1[#] pile

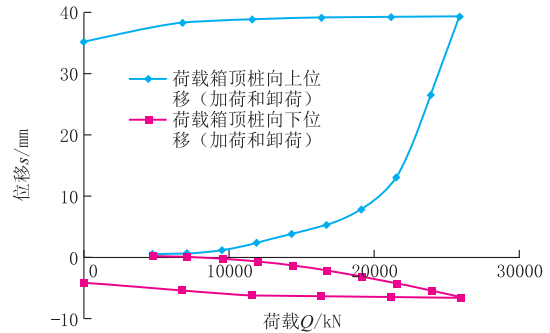


图2 3号桩荷载位移 $Q-s$ 曲线

Fig.2 Q vs s curves of the 3[#] pile

1、3号桩单桩竖向抗压极限承载力 Q_u 及根据钢筋计测试数据计算的桩侧摩阻力值 Q_s 如表3所示。

表3 测桩成果统计

Table 3 Results of test piles

桩号	单桩侧摩阻力 Q_s /kN	单桩竖向抗压极限承载力 Q_u /kN	Q_s/Q_u
1	44621	46844	0.95
3	46625	53102	0.88

根据单桩侧摩阻力 Q_s 分担单桩竖向抗压极限承载力 Q_u 的比,1号桩 Q_s/Q_u 达到95%,3号桩 Q_s/Q_u 达88%,这说明端阻力分担的荷载只占总承载力的一小部分,因而1号和3号大直径深长桩属于摩擦型桩或称端承摩擦桩。图3为分步加荷下各地层桩侧摩阻力,可以看出侧摩阻力的发挥具有一定的深度效应,地层越深,侧压越大,摩阻力也越大。

图4为泥岩侧摩阻力与桩土相对位移曲线,全风化泥岩、强风化泥岩及中等风化泥岩的桩侧摩阻

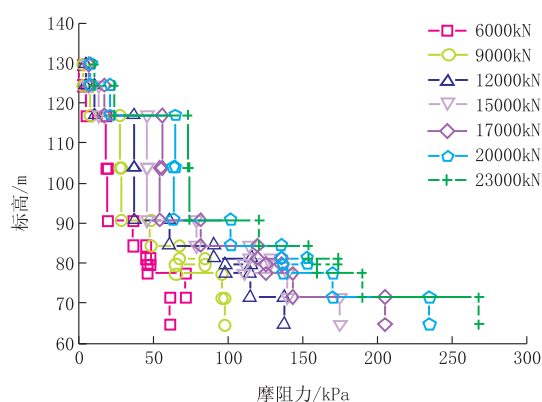


图 3 分步加荷下桩侧摩阻力
Fig.3 Skin friction of piles under step loading

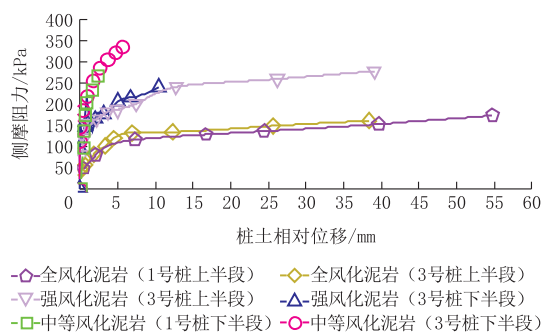


图 4 泥岩侧摩阻力与桩土相对位移曲线
Fig.4 Curve of skin friction vs relative displacement between pile and soil in mudstone

力发挥趋势基本相同,侧摩阻力曲线随桩土相对位移增大而增大,桩侧摩阻力从线性变化到非线性,到一定值后变化趋于平缓(对中等风化泥岩由于埋深较深,桩土相对位移偏小,曲线有一定的趋势,但趋势不完整)。泥岩摩阻力的发挥与泥岩性质、风化程度和埋深有关,由自平衡测试得到全风化泥岩侧摩阻力可达 173 kPa,强风化泥岩侧摩阻力达到 279 kPa,中等风化泥岩侧摩阻力达到 336 kPa,实测值较规范参考取值大很多。

2 桩和泥岩接触中型剪切摩擦试验

2.1 试验设计

通过室内中型剪切试验,模拟桩与泥岩地层之间的相互作用。试验过程中混凝土试块采用工程实际配比制备。根据施工现场配合比,即水泥:水:砂:碎石=1:0.330:1.346:2.194。混凝土中各项材料用量分别是(kg/m^3):水泥 500,水 165,砂 673,碎石 1097。通过钻孔获得实际的地层岩土试样,岩样在制样过程中确保试样不扰动并保持其天

然含水量。将岩样制成直径为 8 cm、高为 10 cm 的圆柱体,将圆柱试样切成两半,试验过程中上剪切盒内为根据桩工程实际配比的混凝土试块,下剪切盒为预制混凝土模具将半个圆柱试样放入,将试样切开面作为剪切面,剪切面高出模具 1 cm 左右,试样剪切面积约为 80 cm^2 。考虑成桩过程中泥浆的影响,试验时将从现场取回的泥浆均匀涂抹于岩样剪切面上,模拟泥浆对桩与周围地层剪切摩擦的影响。

垂直荷载采用一次加荷,加荷后立即读数,每隔 5 min 观测变形一次,直至百分表两次读数差 $< 0.05 \text{ mm}$,认为试样垂直变形稳定,可以施加剪切荷载;试样剪切过程中,采用等应变加荷,控制剪切变形速率为 $0.4 \text{ mm}/\text{min}$,变形稳定的标准为水平向位移不断增大而水平剪切力不再增加为止。

2.2 试验荷载

中型剪切摩擦试验过程中,选择合适的法向应力 σ 值能够使试验更加贴近工程实际。在剪切摩擦试验过程中,考虑桩与周围岩土层之间的摩阻力受桩侧法向应力的影响,共施加 5 级法向应力($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$),将桩周地层的实际受力转化为试样加载状态,转化原理如图 5 所示。5 级荷载的确定方法:采用每一地层中点处的地层自重作用下的水平侧向应力作为剪切试验时的法向应力 σ_1 ,采用桩在桩顶预估极限载荷作用下桩土之间的侧向应力作为 σ_4 ,根据插值法求得其间 σ_2, σ_3 和 σ_5 值。 σ_4 可采用有限元法估算,采用实体单元模拟桩和桩周岩土体,在桩顶施加预估极限载荷的等效节点力,模拟预估极限载荷作用下桩周土的受力状态,采用插值求得桩周节点的水平方向的节点力,对同一层土受力取平均值,为了保证法向应力估算范围合理, σ_5 为稍大于预估极限载荷作用下法向应力。

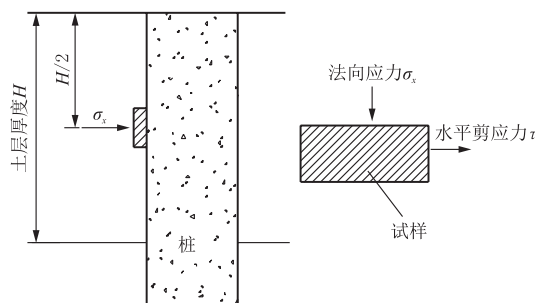


图 5 试样受力转化原理
Fig.5 Load transfer principle of the samples

2.3 试验结果分析

对不同风化程度泥岩各进行2组中型剪切试验,得出试样在每级荷载作用下的剪切应力 τ 与剪切位移的关系曲线,如图6~8所示。不同埋深的全风化泥岩、强风化泥岩及中等风化泥岩的摩擦阻力发挥趋势基本相同,泥岩摩擦阻力随混凝土和泥岩相对位移增大而增大,从线性变化到非线性,到一定值后变化趋于平缓,这与现场测桩结果基本吻合。随着试样所受的法向应力增加,泥岩摩擦阻力有所提高,这也充分体现了侧摩阻力的深度效应。

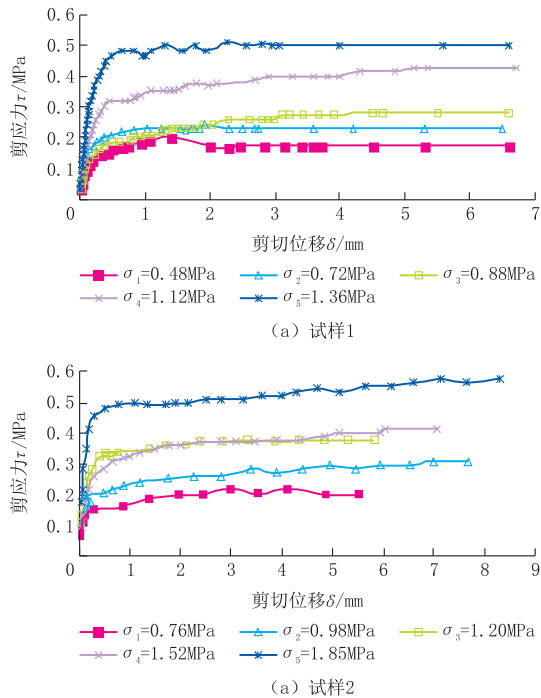


图6 全风化泥岩和混凝土剪应力及位移曲线
Fig.6 Shear stress vs displacement curves with completely weathered mudstone and concrete

依据试验剪应力及位移曲线,取每级荷载下的屈服剪切应力值,即取曲线上上升段和平缓发展阶段的切线,两条切线夹角平分线与曲线交点所对应的剪切应力即为屈服剪切应力。然后做出各级法向应力与相应的屈服剪切应力关系曲线,可求出试样的屈服粘聚力 c 和内摩擦角 φ ,试验获得的泥岩剪切参数如表4所示。

表4 中型剪切试验泥岩 c 、 φ 值

Table 4 c and φ of mudstone by medium-scale shear tests

岩性	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
全风化泥岩	35	16.5
强风化泥岩	70	18.0
中风化泥岩	100	20.0

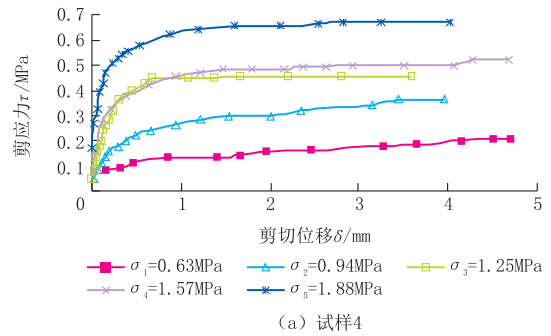
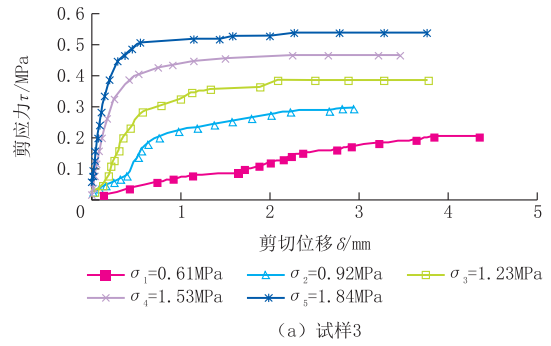


图7 强风化泥岩和混凝土剪应力及位移曲线
Fig.7 Shear stress vs displacement curves with strongly weathered mudstone and concrete

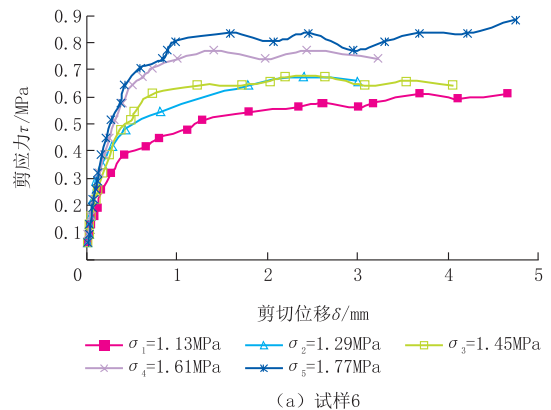
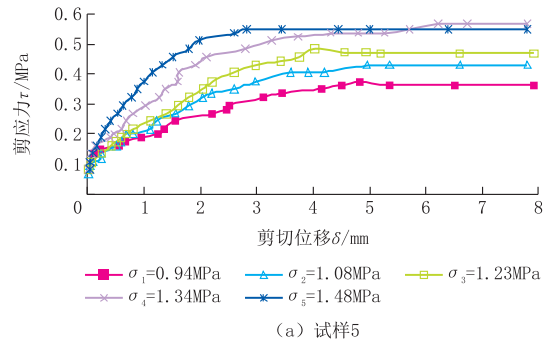


图8 中等风化泥岩和混凝土剪应力及位移曲线
Fig.8 Shear stress vs displacement curves with moderately weathered mudstone and concrete

根据莫尔库伦理论和室内桩和泥岩接触中型剪

切摩擦试验得到的泥岩粘聚力 c 和内摩擦角 φ , 根据式(2), 可初步估算各泥岩地层侧摩阻力极限值, 结果如表 5 所示。

$$q_{su} = \tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c \quad (2)$$

式中: q_{su} ——极限侧阻力; σ ——取自重作用下桩侧法向应力, 即各泥岩地层中点处的自重作用下桩侧压力 σ_x (如图 5 所示)。

表 5 室内试验及自平衡测试泥岩侧摩阻力对比
Table 5 Comparison of mudstone skin frictions between laboratory tests and Osterberg cell pile tests

土层名	室内试验测得泥岩 摩阻力极限值/kPa	自平衡法测得泥岩 摩阻力值/kPa
全风化泥岩	157	173
强风化泥岩	226	279
中风化泥岩	318	336

通过与自平衡测试结果对比, 试验得到的泥岩摩阻力极限值与自平衡测得的泥岩侧摩阻力吻合较好, 并且用该方法求出屈服值来计算桩侧摩阻力时能够给出相对安全的数值, 因而建议在桩基设计时可采用该方法预估泥岩极限摩阻力, 为桩承载力的确定提供参考。

同时室内桩和泥岩接触中型剪切摩擦试验也存在不足, 室内试验泥岩极限侧摩阻力在 0.5~3 mm 位移之间发挥出来, 而现场载荷试验桩侧摩阻力一般在 5~10 mm 位移之间达到极限, 这是由尺寸效应决定的, 但泥岩极限侧摩阻力的值与现场值较为一致。

3 结论

(1) 大直径深长桩, 荷载位移 $Q-s$ 曲线表现为缓变型, 无明显特征点。鉴于大直径深长桩桩端阻力分担的荷载只占总承载力的一小部分, 侧摩阻力对分担荷载起主要作用, 因而这种大直径深长桩一般属于摩擦型桩或称端承摩擦桩。

(2) 泥岩的桩侧摩阻力发挥随桩土相对位移增大而增大, 桩侧摩阻力从线性变化到非线性, 到一定值后变化趋于平缓。对龙华松花江特大桥进行自平衡测试, 全风化泥岩侧摩阻力可达 173 kPa, 强风化泥岩侧摩阻力达到 279 kPa, 中等风化泥岩侧摩阻力达到 336 kPa, 实测值较规范参考取值大很多。

(3) 通过室内桩和泥岩接触中型剪切摩擦试验, 得到泥岩的侧摩阻力发挥规律与自平衡测试结果相符, 并获得桩与泥岩相互作用的屈服抗剪强度参数,

根据莫尔库伦理论, 采用泥岩地层中点处的自重作用下的侧向压力 σ_x 作为法向应力, 得到泥岩摩阻力极限值与自平衡测试结果吻合较好。建议在桩基设计时可采用该方法预估泥岩侧摩阻力, 为桩承载力的确定提供可靠参数。

参考文献 (References):

- [1] GB 50007-2011, 建筑地基基础设计规范[S].
GB 50007-2011, Code for design of building foundation[S].
- [2] JGJ 94-2008, 建筑桩基技术规范[S].
JGJ 94-2008, Technical code for building pile foundations [S].
- [3] JTG D63-2007, 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
JTG D63-2007, Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S].
- [4] 杨校辉, 朱彦鹏, 黄雪峰. 静压桩荷载传递与承载性状试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 139-143.
YANG Xiaohui, ZHU Yanpeng, HUANG Xuefeng. Experimental research on loading transfer and bearing characteristics of a jacked pile[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(1): 139-143.
- [5] 马哲, 吴承霞, 肖昭然. 静压桩端阻力和侧阻力的颗粒流数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4): 622-626.
MA Zhe, WU Chengxia, XIAO Zhaoran. Numerical simulation of particle flow code for pile tip and lateral resistance of jacked pile[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(4): 622-626.
- [6] 曹权, 施建勇, 雷国辉, 等. 软土中单桩桩侧承载力时效性理论解[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3604-3610.
CAO Quan, SHI Jianyong, LEI Guohui, et al. Theoretical solution for time effect of shaft bearing capacity of single pile in soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3604-3610.
- [7] 叶建忠, 周健, 韩冰. 灌注桩侧摩阻力发挥模式的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2029-2032.
YE Jianzhong, ZHOU Jian, HAN Bing. Research on mechanism of skin friction of cast-in-place piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2029-2032.
- [8] 张明义, 邓安福. 桩-土滑动摩擦的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 246-249.
ZHANG Mingyi, DENG Anfu. Experimental study on sliding friction between pile and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 246-249.
- [9] 赵法锁, 俞剑勇, 罗丽娟, 等. 灌注桩桩土相互作用试验及有限元模拟研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(1): 87-92.
ZHAO Fasuo, YU Jianyong, LUO Lijuan, et al. Pile-soil interaction test of filling pile and modeling study by the finite element method[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(1): 87-92.
- [10] 程晔, 龚维明, 戴国亮, 等. 软岩桩基承载性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 165-172.
CHENG Ye, GONG Weiming, DAI Guoliang, et al. Research on bearing performance of socketed pile in soft rock

- [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 165-172.
- [11] 何剑. 泥岩地基中灌注桩竖向承载性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1573-1577.
HE Jian. Testing study on vertical bearing properties of cast-in-place pile in muddy rock foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1573-1577.
- [12] 范秋雁, 吴起星, 周国贵. 广西第三系泥岩桩端承载力确定方法[J]. 工程地质学报, 2004, 12(4): 408-411.
FAN Qiuyan, WU Qixing, ZHOU Guogui. Assessment method for the pile-tip bearing capacity of tertiary mudstone in Guangxi[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(4): 408-411.
- [13] 刘争, 唐志. 某大桥泥岩地质条件桩基静载试验分析[J]. 中外公路, 2016, 36(5): 176-179.
LIU Zheng, TANG Zhi. Static load test of the pile foundation of a bridge in mudstone[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(5): 176-179.
- [14] 张信贵, 易念平. 南宁盆地泥岩特性与工程桩基失效探析[J]. 岩土力学, 2006, 27(S2): 1273-1276.
ZHANG Xingui, YI Nianping. Analysis of mudstone property and bored pile failure in Nanning Basin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 1273-1276.
- [15] 王平. 红层泥岩桩基竖向承载性状模型试验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
WANG Ping. Simulation of vertical bearing behavior of the red mudstone pile foundation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [16] 柳飞, 李东海, 吴炼石. 侧摩阻力对桩基粒径效应的影响研究[J]. 岩土力学, 2013, 35(S2): 1016-1019.
LIU Fei, LI Donghai, WU Lianshi. Influence of shaft resistance on particle size effects of piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 35(S2): 1016-1019.
- [17] 张向东, 柴源, 刘佳琦, 等. 冻融条件下桩基侧摩阻力模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(4): 45-51.
ZHANG Xiangdong, CHAI Yuan, LIU Jiaqi, et al. Experimental research of pile foundation side friction model under freezing-thawing condition [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(4): 45-51.
- [18] 李遼, 吕科验. 长春西站泥岩地层桩侧摩阻力试验研究[J]. 建筑, 2011(7): 55-56.
LI Kui, LÜ Keyan. Experimental study on side friction of pile in mudstone stratum of Changchun West Railway Station[J]. Architecture and Construction, 2011(7): 55-56.
- [19] 梅源, 胡长明, 李修波, 等. 黄土地基湿陷引发桩基负摩阻力的估算方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(6): 854-857.
MEI Yuan, HU Changming, LI Xiubo, et al. Research on the estimating method of the negative skin friction caused by the collapse deformation of loess foundation[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(6): 854-857.
- [20] 屈明勇. 全风化花岗岩桩土侧摩阻力试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
QU Mingyong. Experimental study on pile side friction in fully weathered granite[J]. Changsha: Central South University, 2007.
- [21] 编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
Editing committee. Pile foundation manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995.
- [22] 李作勤. 摩擦桩的荷载传递及承载力的一些问题[J]. 岩土力学, 1990, 11(4): 1-12.
LI Zuoqin. Some problems concerning load transfer and bearing capacity of friction piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 1990, 11(4): 1-12.
- [23] 伊丽娟, 李万宁, 赵洪. 西门坪泥岩-砂岩互层地质条件下桩基础侧摩阻力和桩端阻力取值分析[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2017, 30(2): 27-28.
YI Lijuan, LI Wanning, ZHAO Hong. Analysis of the value of the pile lateral friction resistance and pile tip resistance under the geological conditions of mudstone and sandstone interbedded in Ximenping[J]. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering, 2017(2): 27-28.
- [24] 戴国亮, 杨超, 戴维明. 贵州地区泥(砂)岩层桩端阻力试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(19): 95-98, 68.
DAI Guoliang, YANG Chao, DAI Weiming. Experimental study on pile end resistance of mudstone and sandstone layers in Guizhou[J]. Building Structure, 2013, 43(19): 95-98, 68.
- [25] 蓝俊. 静压桩技术在南宁软土地基中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
LAN Jun. The application of static piles technology in soft clay foundation of Nanning[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.

(编辑 周红军)