

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.05.010

分布式光纤测试技术在水泥土复合管桩检测中的应用

朱田

(上海勘测设计研究院有限公司,上海 200434)

摘要: 为了分析水泥土复合管桩内力和位移的变化规律,采用基于BOTDR的分布式光纤测试技术对水泥土复合管桩进行应变测试,介绍管桩光纤布设工艺,结合单桩竖向抗压静载试验、单桩水平静载试验成果分析桩侧摩阻力、桩身内力及位移的变化规律。试验检测结果表明:试桩的单桩竖向抗压极限承载力推荐为8 000 kN,试桩破坏方式均为桩顶处桩身混凝土碎裂。浅部土层的摩阻力发挥程度较高,圆砾层的摩阻力发挥程度较低,试桩属摩擦桩;试桩的单桩水平承载力特征值及圆砾层地基土水平抗力系数的比例系数推荐为130.0 kN、23.9 MN/m⁴,水平试验后桩身均存在明显缺陷,弯矩及位移的有效影响深度不超过测试地面下7 m。水泥土复合管桩的检测结果为设计计算提供技术支撑,并对类似桩基工程的测试有一定借鉴意义。

关键词: 水泥土复合管桩;分布式光纤;光纤布设;静载试验;桩侧摩阻力;承载力

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)05-0063-08

Application of Distributed Optical Fiber Testing Technology on Pipe Pile Embedded in Cement Soil Test

ZHU Tian

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: In order to analyze the changes in the internal force and displacement of pipe pile embedded in cement soil, strain testing of pipe piles embedded in cement soil using distributed fiber optic testing technology based on BOTDR, presenting the layout of optical fibers in pipe pile, the change pattern of the friction resistance exerted on the pile, the internal force and displacement of pile shafts is analyzed, with the results of vertical compressive static load test and horizontal static load test on single piles also considered. Based on the results of the test, the single-pile vertical compressive bearing capacity of the test pile is recommended to be 8 000 kN, and the failure mode was fragmentation of the concrete of pile shaft on the pile top. The friction resistance exerted on the pile by the shallow soil layer was high while that of the round gravel layer was low, so the test pile is a friction pile. The characteristic value of single-pile horizontal bearing capacity and the proportional coefficient of the horizontal foundation resistance in the round gravel layer is recommended to be 130.0 kN and 23.9 MN/m⁴, respectively. There were obvious defects in the pile shaft after the horizontal test. The depth of effective influence of bending moment and displacement did not exceed 7 m below the test ground. The test results of pipe pile embedded in cement soil can provide a basis for design-related calculations, and its application in this project may serve as a reference for similar pile foundation projects.

Keywords: pipe pile embedded in cement soil; distributed optical fiber; layout of optical fibers; static load test; friction resistance exerted on the pile; bearing capacity

收稿日期:2023-05-13

修稿日期:2023-06-17

基金项目:中国三峡上海勘测设计研究院有限公司自主科研项目(2022YF(5)-010)

作者简介:朱田(1991—),男,工程师,主要从事地基基础检测与研究工作。E-mail:1572125542@qq.com

水泥土复合管桩是由高喷搅拌法形成的水泥土桩与同心植入的预应力高强度混凝土(PHC)管桩复合而形成的基桩,该桩型可以充分发挥水泥土桩侧摩阻力和混凝土桩桩身材料强度,提高基础承载性能,近年来得到快速发展^[1-2]。水泥土桩与管桩界面特性研究表明两者具有较好的粘结特性,可以有效复合协同工作。但水泥土复合管桩在受荷时的承载数据、荷载传递规律仍有待积累与研究^[2-3]。近年来基于布里渊光时域反射技术(BOTDR)的光纤传感测试技术愈发成熟,其具有分布式测量、长距离传输、成活率高、耐久性强等优点,较应变式和振弦式测试精度更高、抗干扰能力更强,在地质监测与岩土测试领域的应用也越来越广泛^[4-6]。杨文生等^[7]研究了应变式、振弦式、光纤式传感器的适用性,结合工程实例说明了光纤式更易存活且测试精度更高。马加骁等^[8]将点位法、线法、分布式光纤和准分布式光纤光栅应用于PHC管桩内力监测,研究发现分布式光纤监测能有效避免以点概面且具有较高的精度。张慧海等^[9]、魏广庆等^[10]成功运用光纤技术测试出受压桩的桩身应力。

本文以江西某水利工程的水泥土复合管桩为依托,结合单桩竖向抗压静载试验、单桩水平静载试验检测成果,采用分布式光纤测试技术对受压和受水平力作用下的桩身内力和位移变化规律进行分析研究,以期类似桩基工程设计计算提供技术支撑。

1 内力计算原理

1.1 抗压试验侧阻力与端阻力计算

埋置于土体中的竖向桩基,当受竖向荷载作用,桩身的上部首先受到压缩而发生相对于土的向下位移,桩侧摩阻力和桩端阻力逐渐发挥。荷载沿桩身向下传递的过程就是不断克服侧摩阻力并通过它向土中扩散的过程,桩身轴力沿着深度而逐渐减小。桩身轴力应按下列公式计算^[11]:

$$Q(z) = \bar{\varepsilon}(z) \cdot E(z) \cdot A(z) \quad (1)$$

式中: $Q(z)$ 为桩顶下深度 z 处的轴力值,kN; $\bar{\varepsilon}(z)$ 为外力作用下,桩顶下深度 z 处多根光纤实测桩身应变平均值; $E(z)$ 为桩顶下深度 z 处的桩身弹性模量,kPa; $A(z)$ 为桩顶下深度 z 处的桩身截面面积,m²。

桩侧摩阻力和端阻力可按下列式计算^[11]:

$$q_s(z) = \frac{dQ(z)}{u \cdot dz} \quad (2)$$

$$q_p = \bar{\varepsilon}_p \cdot E_p \quad (3)$$

式中: $q_s(z)$ 为桩顶下深度 z 处的摩阻力,kPa; u 为桩

身周长,m; q_p 为桩端阻力,kN; $\bar{\varepsilon}_p$ 为桩端处多根光纤实测桩身应变平均值; E_p 为桩端弹性模量,kPa。

1.2 水平试验桩身弯矩与位移计算

桩身在水平荷载作用下,桩顶下深度 z 处的弯矩 $M(z)$ 和挠度 $\omega(z)$ 可按下列公式计算^[11]:

$$M(z) = \frac{\varepsilon_a(z) - \varepsilon_b(z)}{D} \cdot E(z) \cdot I(z) \quad (4)$$

$$\omega(z) = - \int_L^z \int_L^z \frac{\varepsilon_a(z) - \varepsilon_b(z)}{D} dz dz \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_a(z)$ 为水平力作用下,桩顶下深度 z 处受拉侧实测桩身应变值; $\varepsilon_b(z)$ 为水平力作用下,桩顶下深度 z 处受压侧实测桩身应变值; $I(z)$ 为桩顶下深度 z 处的桩身截面惯性矩,m⁴; D 为对称布设光纤间距,m; L 为桩长,m。

2 工程与地质概况

江西某大型水利枢纽工程基础采用水泥土复合管桩,管桩规格为PHC 600 AB 130,水泥土桩径800 mm,采用强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥,水灰比1:1,水泥掺量20%。因该地区缺少类似工艺工程资料,设计方计划进行6根试桩,水泥土桩与管桩同长。实际施工时有3根管桩未能沉桩至水泥土桩底,试桩概况表详见表1。第一批试桩进行单桩竖向抗压静载荷试验,检测单桩竖向抗压极限承载力;第二批试桩先进行单桩竖向抗压静载荷试验,同步测试桩身应变,检测单桩竖向抗压极限承载力、桩侧摩阻力和端阻力,抗压试验结束后开挖截桩至基础底板标高,进行单向多循环水平静载荷试验,检测单桩水平承载力、桩身弯矩、位移及地基土水平抗力系数的比例系数(以下简称 m 值)。

根据本工程地质勘察报告,临近试桩场地钻孔揭露土层分布概况见表2。

3 光纤布设与数据采集处理

3.1 光纤布设工艺

桩身应变数据需在进行静载试验的同时同步采集,故需提前预埋光纤传感器^[11-13]。本次试验光纤安装采用开槽浅埋对称布设工艺。操作步骤及注意事项如下:

(1)在管桩桩身用切割机对称开出深约5 mm~8 mm、宽度2 mm~4 mm凹槽以确保传感光缆全部没入槽内。在距桩底50 cm处可按U型布设过渡,为便于光缆布设,“U”形过渡段凹槽可适当加宽加深,详见图1。

表 1 试桩概况

试桩批次	试桩桩号	设计桩长 /m	桩顶标高 /m	水泥土桩桩底标高/m	管桩底标高/m	管桩桩长 /m	管桩持力层
第一批	SZ-3	45.0	+13.00	-32.0	-32.0	45.0	④ ₂
	SZ-4	45.0	+12.50	-32.5	-32.5	45.0	泥质粉砂岩
	SZ-6	48.0	+14.60	-33.4	-33.4	48.0	粉砂岩
第二批	SZ-9	43.0	+14.60	-28.36	-15.40	30.0	② ₁₀
	SZ-10	43.0	+14.69	-28.36	-21.81	36.5	圆砾
	SZ-11	43.0	+14.58	-28.36	-22.82	37.4	

表 2 场地土层分布概况

土层编号	土层名称	土层分布 /m	土层描述
② ₃	黏土	+16.64 ~ +11.44	棕黄色,可塑,稍湿
② ₆	粉细砂	+11.44 ~ +10.44	棕灰色,饱和,结构松散
② ₇	中砂	+10.44 ~ +9.14	棕黄色,饱和,稍密状
② ₈	粗砂	+9.14 ~ +6.14	棕黄色,饱和,密—中密状
② ₁₀	圆砾	+6.14 ~ -28.96	黄色,饱和,密实状
④ ₁	泥质粉砂岩	-28.96 ~ -31.86	强风化,岩芯多呈块状、黏性土状,局部饼状
④ ₂	泥质粉砂岩	-31.86 ~ -43.16	弱风化,岩芯多呈长块状、短柱状,局部长柱状

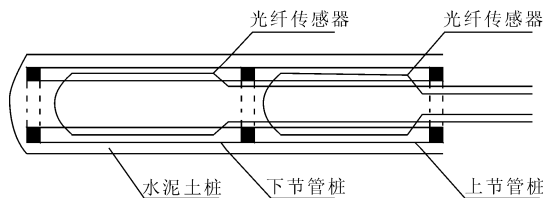


图 3 多节桩光纤布设示意图

(2) 凹槽切割完成后需采用鼓风、毛刷对凹槽进行有效的除尘,同时将槽中凹凸不平的位置磨平修直。

(3) 沿凹槽放置传感光缆,光缆需预拉顺直并同步采用快干胶定点固定,后全线涂覆环氧树脂胶粘结剂,同时使用热风枪等将粘结剂修整抹平,排除气泡,详见图 2。

(4) 对于接桩位置,下节桩光缆在距接桩位置 0.5 m 处打孔先引至桩孔内部,再自上节桩孔引出,详见图 3。

(5) 当桩身传感光缆布设完成后,桩顶引线光缆应采用硬质波纹管加强保护,以避免桩搬运和打入过程中引线光缆遭到破坏。

3.2 光纤数据采集处理

当探测光脉冲注入到传感光纤中,脉冲光在光纤中传播时产生后向散射光,根据后向散射光回来的时间可以确定光散射发生的位置。同时光纤后向布里渊散射信号频谱的中心频率会偏移,频谱的漂移量与光纤发生的轴向应变呈一定的线性关系,依据测试前标定的光纤线性系数,便可获得不同测点的光纤应变变化量^[4,14]。

本工程分布式光纤数据采集间隔为 1 m,抗压试验取实测对称测点的平均值为原始应变。试桩 SZ-9 的抗压测试原始应变及平滑处理后应变曲线见图 4。分析可见在不同荷载下应变变化规律呈现较好的一致性,但存在一定数量的异常点,根据测点变化趋势采用移动平滑的处理方式消除异常测点^[4]。单桩水平测试时因一侧受拉一侧受压数据变化趋势相反,试桩 SZ-9 的水平测试原始应变见图 5,可直接用于弯矩及位移计算。试桩 SZ-10、试桩 SZ-11 原始应变数据与试桩 SZ-9 类似,不再赘述。

4 单桩竖向抗压试验检测成果

水泥土复合管桩单桩在受压情况下有三种破坏模式:桩周土对水泥土桩的支承失效、水泥土桩对管桩的支撑失效、桩身材料受压破坏。单桩竖向抗压极限承载力应取以上三种承载力的最小值^[1]。因无法确定破坏模式,设计方给出的预估竖向抗压极限值承载力范围为 8 000 kN ~ 12 000 kN,根据规范要求试验采用慢速荷载维持法,反力装置为压重平台,单级加载量 1 000 kN,首级加载量取两倍极差。

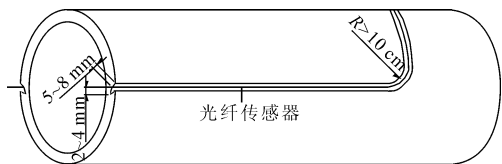


图 1 桩端 U 型槽示意图

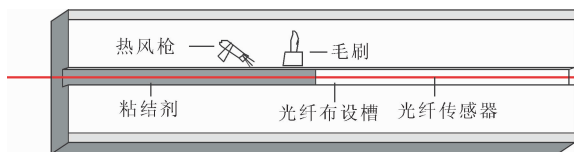


图 2 桩身光纤粘结示意图

抗压测试前首先采用低应变法检测管桩桩身完整性,各桩曲线形态基本一致,桩身未发现缺陷,6 根试桩抗压检测成果见表 3,破坏前加载量-累计沉降量曲线($Q-s$ 曲线)见图 6、破坏前加载量-单级沉降量曲线($Q-\Delta s$ 曲线)见图 7。

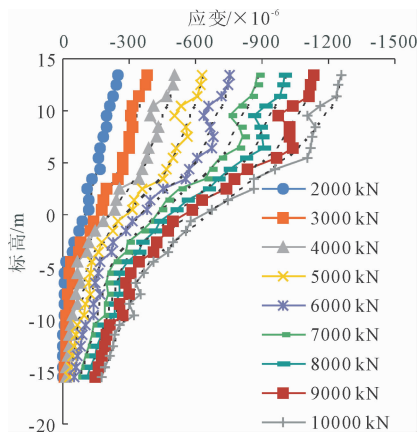


图 4 试桩 SZ-9 抗压试验应变曲线

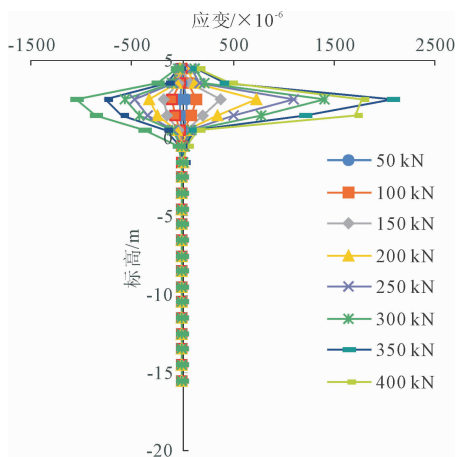


图 5 试桩 SZ-9 水平试验应变曲线

表 3 试桩抗压检测成果

试桩批次	试桩桩号	最大加载量/kN	竖向抗压极限承载力/kN	破坏前累计沉降量/mm
第一批	SZ-3	12000	11000	42.04
	SZ-4	10500	10000	23.53
	SZ-6	9000	8000	14.68
第二批	SZ-9	10000	9000	24.39
	SZ-10	9000	8000	13.50
	SZ-11	9000	8000	13.68

PHC 管桩不考虑压屈影响的轴心受压承载力标准值 R 可按式计算^[15]:

$$R \leq \varphi_c \cdot f_{ck} \cdot A \quad (6)$$

式中: φ_c 为考虑沉桩工艺影响及混凝土残留预压应

力影响的综合折减系数,取 0.7; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值,C80 混凝土取 50.2 MPa; A 为管桩截面面积。

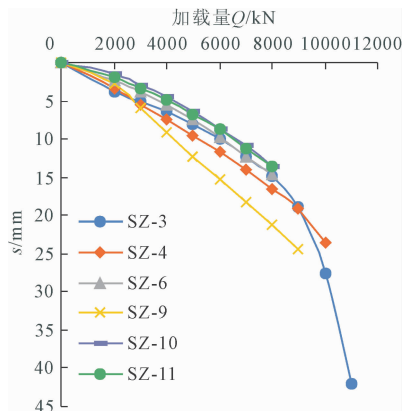


图 6 试桩 $Q-s$ 曲线

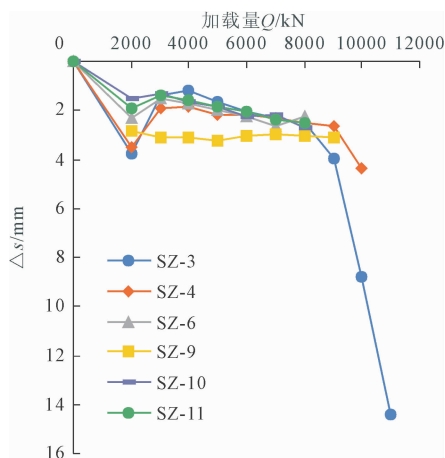


图 7 试桩 $Q-\Delta s$ 曲线

经计算本工程试桩轴心抗压标准值为 6 742 kN,6 根试桩混凝土受压破坏时的极限压力均不低于 9 000 kN,桩身混凝土强度能够满足规范要求。6 根试桩单桩竖向抗压极限承载力在 8 000 kN ~ 11 000 kN 之间,破坏模式均为桩顶处桩身混凝土碎裂,承载力差异来源于混凝土材料本身的抗压离散型,本工程试桩推荐单桩竖向抗压极限承载力取为 8 000 kN。试桩 SZ-9 的管桩桩长最短,加载量自 3 000 kN ~ 8 000 kN 范围内的 s 及 Δs 均为最大, Q 达到 8 000 kN 时 s 为 21.28 mm,而其余 5 根试桩的 s 为 13.50 mm ~ 16.50 mm,沉降差异明显;试桩 SZ-3、试桩 SZ-4 加载至 9 000 kN 以上,当 Q 大于 9 000 kN 时, Δs 开始明显增加,9 000 kN 为沉降缓慢变化到快速变化的临界荷载。

结合试桩临近的地层信息,根据桩底标高及光纤在桩身上的安装位置可得出各个测点标高及所处地层。桩身弹性模量 E 与混凝土材料和应变状态

相关^[10],选取每级荷载稳定时的桩身应变实测数据,桩顶下第一测点处的轴力值可认为等于桩顶加载量,由此可反算出各级荷载下的 E 值,取平均值计算进而得到各级荷载下的桩身轴力。

3根试桩均为桩身材料破坏,桩土阻力尚未充分发挥。试桩进入圆砾层长度较深而其他土层较薄,依据桩身轴力在该层中分布特征,对试桩在圆砾层中部分分段计算摩阻力。试桩 SZ-9 进入圆砾层长度为 21.54 m,摩阻力按标高 5.5 m ~ -4.5 m(圆砾 1)、标高 -5.5 m ~ -15.5 m(圆砾 2)分两段计算;试桩 SZ-10 进入圆砾层长度为 27.95 m,摩阻力按标高 5.5 m ~ -2.5 m(圆砾 1)、标高 -3.5 m ~ -11.5 m(圆砾 2)、标高 -12.5 m ~ -21.5 m(圆砾 3)分三段计算;试桩 SZ-11 进入圆砾层桩长为 28.96 m,摩阻力按标高 5.5 m ~ -2.5 m(圆砾 1)、标高 -3.5 m ~ -11.5 m(圆砾 2)、标高 -12.5 m ~ -22.5 m(圆砾 3)分三段计算。试桩的计算轴力经平滑处理后的变化图见图 8,桩侧摩阻力 f_s 变化图见图 9。

轴力及摩阻力计算结果表明:(1)随着加载量的增加,桩侧各层土的摩阻力逐步增加,浅部土层在加载后期逐步趋于稳定,摩阻力接近极限值;(2)受

成桩质量影响及各试桩桩侧土层可能存在的厚度偏差,三根试桩在相同的加载量下,相同土层提供的阻力不同,计算摩阻力数值存在一定差异;(3)桩端阻力可取为桩身最后一处测点的轴力值,试桩 SZ-9、试桩 SZ-10、试桩 SZ-11 的最大端阻力分别为 1 413 kN、159 kN、135 kN,当加载量达到 10 000 kN 时,端阻力明显增加,圆砾层摩阻力发挥程度更高;(4)圆砾 2 和圆砾 3 与圆砾 1 的计算摩阻力相差较大,表明圆砾层整体上摩阻力发挥程度较低,而圆砾层以上土层在试桩破坏时发挥程度较高。可取圆砾 1 及以上土层在试桩破坏时计算平均摩阻力作为本次检测推荐值,而端阻力因发挥程度过低不做推荐,计算结果见表 4。

表 4 推荐摩阻力 f_s

土层	f_s 计算值/kPa			f_s 推荐值 /kPa
	SZ-9	SZ-10	SZ-11	
② ₃ 黏土	39.5	47.4	42.7	43.2
② ₆ 粉细砂	72.7	63.2	69.6	68.5
② ₇ 中砂	101.1	82.2	95.0	92.7
② ₈ 粗砂	125.3	120.1	116.1	120.5
② ₁₀ 圆砾	192.4	207.1	202.6	200.7

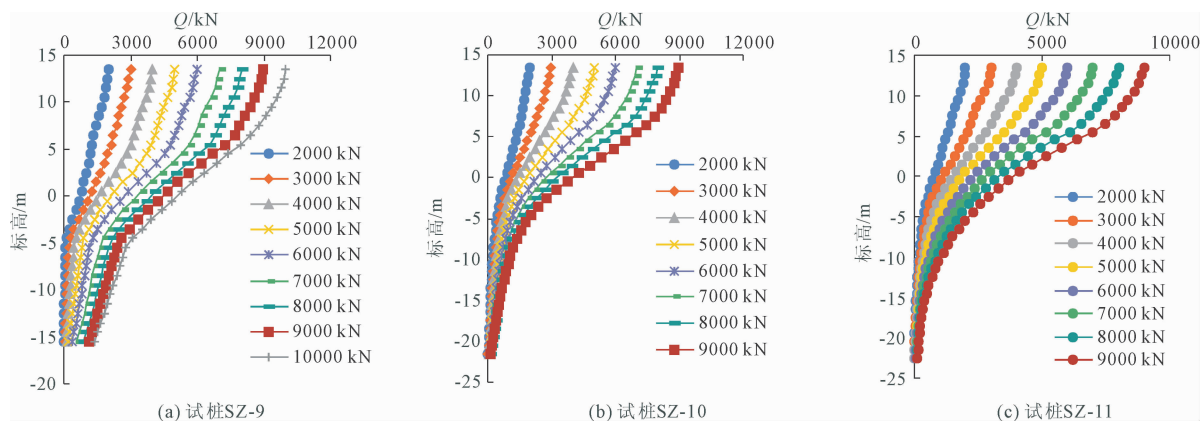


图 8 试桩轴力变化图

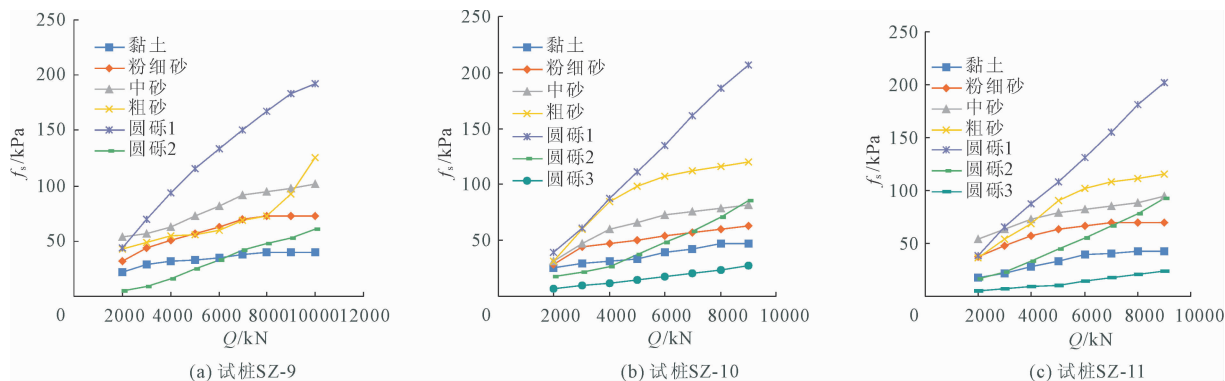


图 9 桩侧摩阻力变化图

5 单桩水平试验检测成果

5.1 水平承载力与 m 值

抗压试验结束后对第二批次试桩开挖至圆砾层截桩,水平位移 Y_0 与测点水平力 H 作用平面一致。单级加载量为 50 kN,按设计要求加载至水平力作用处最大水平位移超过 35 mm。试桩加载前低应变测试表明桩身完整,试验结束后均发现桩身存在明显缺陷。最大加载量的前一级累计水平位移均小于 35 mm,水平试桩测试概况见表 5。

表 5 水平试桩测试概况

桩号	试验点 标高/m	入土 桩长/m	试验后缺陷位置	最大加 载量/kN	最大水平 位移/mm
SZ-9	+5.30	20.70	地面下 6.2 m 左右	400	37.31
SZ-10	+5.38	26.19	地面下 6.8 m 左右	450	54.79
SZ-11	+5.43	28.25	地面下 8.1 m 左右	400	41.50

单桩水平临界荷载 H_{cr} 为桩身产生开裂前对应的水平荷载,可取 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ (水平力-位移梯度曲线)上第一拐点对应的加载量;单桩水平极限荷载 H_u 为桩身折断或钢筋应力达到屈服的前一级水平荷载,可取 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线上第二拐点对应的加载量。本工程试桩为桩身不允许开裂的预制桩,单桩水平承载力特征值 H_a 应取为 $0.6H_{cr}$ 且应满足不大于 $0.5H_u$ [1,12-13]。 H_a 推荐值取 3 根试桩的 H_a 平均值,计算结果见表 6。

表 6 水平承载力与 m 值

桩号	EI /($kN \cdot m^{-2}$)	H_{cr} /kN	H_u /kN	H_a /kN	H_a 推荐 值/kN	H_{10} /kN	m /($MN \cdot m^{-4}$)	m 推荐值 /($MN \cdot m^{-4}$)
SZ-9	224162	200.0	300.0	120		228.7	17.5	
SZ-10	224162	200.0	350.0	120	130.0	288.1	25.8	23.9
SZ-11	224162	250.0	300.0	150		305.9	28.5	

5.2 桩身弯矩与位移

由于混凝土抗折能力远低于桩身混凝土,桩周浅部混凝土在水平力施加后便快速开裂而失效,因此只考虑管桩对抗水平力的作用。3 根试桩在标高 -1.5 m (地面下 7 m 左右) 以上范围内产生弯矩,发生水平位移的最大深度在标高 0.5 m (地面下 5 m 左右) 处。标高 -1.5 m 以下弯矩为 0,而低应变测试表明桩身折断位置位于地面下 6 m~8 m 左右,两者基本对应。试桩的桩身弯矩变化图见图 11,水平位移结果见表 7—表 9,其中第一测点位移为水平力作用处的实测最大值,标高 4.5 m~-1.5 m 的测点位移为计算值。

本工程管桩共布置 16 根公称直径为 10.7 mm 的纵向预应力钢筋,配筋率为 0.75%。桩周混凝土在加载初期便开裂,只考虑管桩抗弯,桩身抗弯刚度 EI 按《预应力混凝土管桩图集》考虑钢筋影响的公式计算 [15]。三根试桩的 $H-m$ 曲线见图 10,由 m 反算得到的各级水平力作用下的 ah 均大于 4 m,符合规范的计算假定,数据有效。 m 值不是一个常量,而是与水平位移及荷载相关 [13],三根试桩的 m 值整体上均表现出随着 H 增大而递减的趋势,但 m 值大小在加载初期有明显差异,当 H 大于 100 kN 时,试桩 SZ-10 和试桩 SZ-11 的 m 值已较为接近,当 H 大于 200 kN 时三根试桩的 m 值逐步趋于一致。本工程基桩属对水平位移不敏感,按插值法取水平位移为 10 mm 对应的水平力 H_{10} 计算 m 值,并取其平均值为检测推荐值,计算结果见表 6。

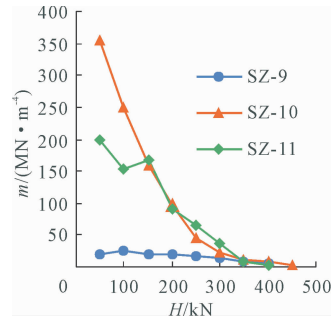


图 10 试桩 $H-m$ 曲线

试桩弯矩与位移的计算结果表明:(1) 桩身同一深度测点的计算弯矩及位移随着水平推力增加而增加。桩身不同深度测点的计算弯矩随着深度的增加先增加后减小至 0,而位移则从桩顶处向下递减至 0,在达到 H_u 后,桩身仍能够继续承载,单级水平位移增加量快速提高;(2) 桩身最大计算弯矩出现在标高 2.5 m 处 (地面下 3 m 左右),试桩 SZ-9、试桩 SZ-10、试桩 SZ-11 的最大计算弯矩分别为 1 121 kN·m、1 515 kN·m、2 160 kN·m,其中试桩 SZ-9、试桩 SZ-10 在加载后期弯矩计算值已较为接近,抗水平力接近极值,但试桩 SZ-11 弯矩计算值仍在快速增长。

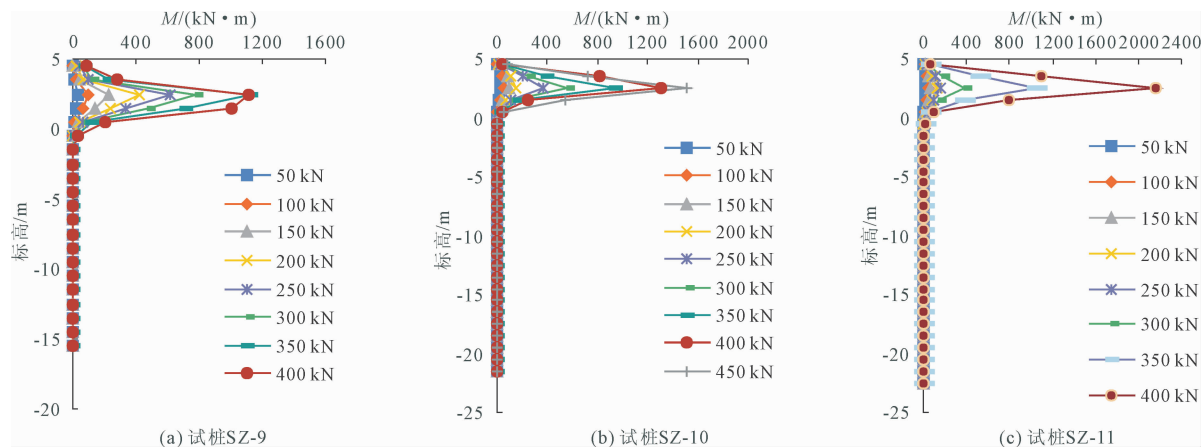


图 11 试桩弯矩变化图

表 7 试桩 SZ-9 水平位移

测点 标高/m	不同水平力下(kN)试桩水平位移/mm							
	50	100	150	200	250	300	350	400
5.30	2.0	3.5	5.9	8.4	11.2	15.7	24.3	37.3
4.50	0.7	1.9	4.3	7.6	11.1	14.8	21.9	27.9
3.50	0.4	1.1	2.5	4.4	6.4	8.7	12.8	16.8
2.50	0.2	0.5	1.1	1.9	2.7	3.7	5.4	7.7
1.50	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.4	2.3
0.50	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4
-0.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-1.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表 8 试桩 SZ-10 水平位移

测点 标高/m	不同水平力下(kN)试桩水平位移/mm								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
5.38	0.4	0.9	1.8	3.1	6.1	11.2	18.6	29.3	54.8
4.50	0.4	1.0	1.8	2.9	5.7	7.8	12.5	18.4	24.0
3.50	0.2	0.5	1.0	1.5	2.9	4.0	6.3	9.0	12.7
2.50	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	1.3	2.0	2.8	4.5
1.50	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.9
0.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
-0.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-1.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表 9 试桩 SZ-11 水平位移

测点 标高/m	不同水平力下(kN)试桩水平位移/mm							
	50	100	150	200	250	300	350	400
5.43	0.5	1.2	1.7	3.3	4.9	8.4	22.1	41.5
4.50	0.5	1.0	1.7	2.9	4.1	7.7	17.4	35.1
3.50	0.3	0.6	1.0	1.7	2.4	4.3	9.3	18.5
2.50	0.1	0.3	0.4	0.8	1.1	1.8	3.5	6.7
1.50	0.0	0.1	0.2	0.2	0.4	0.5	0.8	1.4
0.50	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
-0.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-1.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

6 结 论

(1) 第一批试桩与第二批试桩在竖向抗压静载试验下的破坏模式均为桩顶处混凝土碎裂,桩身混凝土的破坏压力均不低于 9 000 kN,其中试桩 SZ-9 管桩长度最短,破坏前沉降变化较其他 5 根试桩更明显。6 根试桩的单桩竖向抗压极限承载力推荐取为 8 000 kN,应增加缩短长度的水泥石复合管桩进行抗压试验,以便合理选择工程桩长。

(2) 抗压试验内力分析结果表明端阻力在单桩极限压力中占比为 1.5%~14.1%,本工程水泥石复合管桩属摩擦桩。圆砾层以上各土层较薄,摩阻力总体上表现出随着加载量增加而增加并在后期趋于稳定的变化趋势,后期各土层摩阻力已接近极限值。圆砾层的摩阻力始终呈递增的变化趋势,且上层圆砾层计算摩阻力远高于中下层,该土层摩阻力整体上仍有较大发挥空间。

(3) 桩周水泥石在水平力施加后便快速开裂失效,抗水平力主要由管桩提供,水平试验结束后管桩桩身均存在明显缺陷。试桩在圆砾层中的水平临界荷载不低于 200 kN,水平极限荷载不低于 300 kN,水平承载力特征值推荐取为 130.0 kN。试桩 m 值均表现出随着水平力增加而递减的变化趋势,但在加载初期 m 值相差较大,水平位移为 10 mm 的 m 值推荐取为 23.9 MN/m⁴。

(4) 水平试验内力分析结果表明在达到水平极限荷载后桩身仍能继续承载,桩身弯矩从上至下先增加后减小至 0,弯矩影响深度范围在测试地面下 7 m 以内,最大弯矩在测试地面下 3 m 左右。单桩水平位移从上至下递减至 0,位移影响深度范围在测试地面下 5 m 以内。

参考文献:

- [1] 水泥土复合管桩基础技术规程:JGJ/T 330—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [2] 梁善斋. 水泥土复合管桩竖向承载特性现场试验[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):280-283.
- [3] 李俊才,张永刚,邓亚光,等. 管桩水泥土复合桩荷载传递规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S1):3068-3076.
- [4] 黄晓维,郑建国,于永堂,等. BOTDR 分布式光纤传感技术在桩基测试中的应用研究[J]. 岩土工程技术,2021,35(5):281-285.
- [5] 贺玉平,王凯,杨眉. 分布式光纤传感技术在预制管桩应力测试中的应用[J]. 建筑监督检测与造价,2022,15(5):28-33.
- [6] 苗鹏勇,王宝军,施斌,等. 分布式光纤桩基检测数据智能化处理方案的研究与应用[J]. 工程地质学报. 2017,25(6):1610-1616.
- [7] 杨文生,李晓勇,张松,等. 常用桩身内力测试方法数据分析过程与实例[J]. 建筑结构. 2019,49(4):122-125.
- [8] 马加骁,张明义,王永洪. 预应力高强度混凝土管桩桩身受力特性测试技术研究进展[J]. 工程地质学报[J]. 2020,28(4):896-906.
- [9] 张慧海,马林,石怀清,等. 基于光纤测试的超长灌注桩内力测试研究[J]. 岩土工程技术,2021,35(3):196-198.
- [10] 魏广庆,施斌,余小奎,等. BOTDR 分布式检测技术在复杂地层钻孔灌注桩测试中的应用研究[J]. 工程地质学报,2008,16(6):826-832.
- [11] 基桩分布式光纤测试规程:T/CECS 622—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [12] 建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [13] 建筑地基与基桩检测技术规程:DG/TJ08-218—2017[S]. 上海:同济大学出版社,2018.
- [14] 陈磊,詹跃东,田庆生. 基于 BOTDR 分布式传感系统的研究[J]. 仪表技术与传感器,2019(6):96-100.
- [15] 预应力混凝土管桩:10G409[S]. 北京:中国计划出版社,2010.

(上接第 47 页)

- [6] Chen Guoxing, Ruan Bin, Zhao Kai, et al. Nonlinear response characteristics of undersea shield tunnel subjected to strong earthquake motions[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020,24(3):351-380.
- [7] 孙钧. 论跨江越海建设隧道的技术优势与问题[J]. 隧道建设,2013,33(5):337-342,332.
- [8] 何怡帆,李天斌,曹海洋. 隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用[J]. 水文地质工程地质,2020,47(2):102-111.
- [9] 程国良,李彦锦,杨俊,等. 复合地层越江大直径地铁隧道盾构地层适应性风险及选型分析[J]. 施工技术(中英文),2023,52(1):48-54.
- [10] 胡炜,谭信荣,蒋尧,等. 深埋顺层偏压隧道围岩破坏机理及规律研究——以郑万线某隧道为例[J]. 水文地质工程地质,2020,47(3):60-68.
- [11] Mroueh H, Shahrouh I. A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction[J]. Computers and Geotechnics,2003,30(3):245-253.
- [12] 赵凯,崔允亮,李明照,等. 大断面水工隧洞下穿既有公路隧道沉降影响分析[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(3):162-168.
- [13] You Shuang, Sun Jianan. Deformation and control of super-large-diameter shield in the upper-soft and lower-hard ground crossing the embankment[J]. Applied Sciences, 2022,12(9):4324.
- [14] 曹磊,易宸,刘娟,等. 水位骤降对下伏隧道堤防安全影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(2):142-146.
- [15] 张贵金,刘丽玲,陈宏任,等. 穿江隧道对堤防工程影响研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(10):2018-2026.
- [16] 宋少云,尹芳. 有限元网格划分中的圣维南原理及其应用[J]. 机械设计与制造,2012(8):63-65.
- [17] 城市轨道交通结构安全保护技术规范:CJJ/T202—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.