

福建滨海软土地层灌注单桩承载性能试验研究

黄斌彩

(福建省水利水电勘测设计研究院有限公司,福建福州350000)

摘要:为探究福建沿海地区广泛分布的淤泥或淤泥质软土区域灌注单桩的荷载传递机理和承载特性,依托泉州某道路工程,采用慢速维持荷载法对单桩进行竖向和水平静载原位试验。研究表明:桩周土体在荷载传递中发生了应力重分布,部分土体由弹性转为塑性并向深部扩展,使桩顶沉降增加;桩顶荷载、桩土界面摩擦阻特性、土层类别及桩土相对位移共同影响桩身轴力变化。在福建滨海软土层中,灌注单桩在淤泥层中的侧阻力标准值按规范下限取值,淤泥质土层取上限值。低荷载阶段,浅层土体以弹性变形主导荷载传递,当荷载超过土体弹性阈值后,塑性变形渐进发展并促使荷载传递路径向深层土体延伸。

关键词:灌注单桩;滨海软土地层;原位静载试验;承载性能;荷载传递机理

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)03-0051-06

Experimental Study on Bearing Performance of Bored Single Pile in Fujian Coastal Soft Soil Layer

HUANG Bincai

(Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China)

Abstract: The coastal region of Fujian is characterized by a widespread distribution of silt or silty soft soils. To investigate the load transfer mechanism and bearing characteristics of bored piles in this area, a series of vertical and horizontal static load in-situ tests were conducted on single piles using the slow maintenance load method, based on a road project in Quanzhou. The research findings indicate that during load transfer, the surrounding soil experiences stress redistribution, with some soil transitioning from elastic to plastic behavior, which extends deeper and leads to increased settlement at the pile head. The axial force in the pile is influenced by several factors, including the pile head load, the friction characteristics at the pile-soil interface, the types of soil layers, and the relative displacement between the pile and soil. In the soft soil layers of coastal Fujian, the standard value for lateral resistance of bored piles within the silt layer should be taken at the lower limit of the specifications, while the silty soil layer should be taken at the upper limit. During the low-load phase, the shallow soil predominantly exhibits elastic deformation for load transfer; however, once the load exceeds the elastic threshold of the soil, progressive plastic deformation develops, prompting the load transfer path to extend into deeper soil layers.

Keywords: bored single pile; coastal soft soil layer; in situ static load test; bearing performance; load transfer mechanism

福建沿海地区广泛分布着天然含水量大、压缩性高且承载力较低的淤泥或淤泥质深厚软土地层。灌注桩因具备较大的竖向刚度、高承载能力和优良的稳定性,通常被广泛应用于此类地层的工程建设

中。在设计时,通常将桩身贯穿上覆软土层,并将桩端持力层设在下伏的风化岩层,以应对软土层的低承载特性和沉降问题。

由于灌注桩的承载特性较为复杂,目前主要通

过现场静载荷试验来研究其承载性能。近年来,众多学者针对不同地质条件下灌注桩的受力性状展开了深入研究。储诚富等^[1]在无黏性土地地区通过现场试桩试验研究了钻孔灌注桩在桩端压浆后的承载性能。孙树礼^[2]对某黏土地地区的钻孔灌注桩进行了竖向静载试验,探讨了不同荷载条件下的桩身轴力分布规律,并分析了其竖向受力机理及承载特性。冯世进等^[3]、任鹏等^[4]通过原位试验研究了黄土地基中超长钻孔灌注桩的承载性能、桩身轴力传递规律、桩侧阻力和端阻力的发挥性能。万志辉等^[5]基于石首长江公路大桥 8 根大直径钻孔灌注桩的现场静载荷试验结果,研究了超厚细砂地层大直径后压浆桩的荷载变形特性,并分析了其荷载传递特性。王卫东等^[6-7]探讨了武汉绿地中心某微风化地基嵌岩灌注桩的荷载传递机理和承载特性,指出嵌岩桩荷载-沉降曲线为缓变型。张亚妹等^[8]基于青岛某工程试验场地,开展了现场灌注桩静载荷试验,揭示了泥岩地基及其嵌入风化泥岩中灌注桩的承载机制。尹俊涛等^[9]在典型黄泛区土层条件下对灌注单桩进行了竖向承载力静载试验,研究了大直径灌注桩的受荷性状、承载性能及荷载传递机理。柳天杰等^[10]依托天津某主塔楼桩基工程,通过双循环静载试验及数据分析,研究了滨海软土中灌注桩的承载性能。李甜甜等^[11]通过对天津软土地基中钻孔灌注桩进行静载荷试验和桩身轴力的测试,探讨了软土地基中超长钻孔灌注桩的承载力性能和荷载传递机理。根据以上研究可知,尽管已有大量研究涉及不同地质条件下灌注桩的承载性能,但针对福建滨海软土地地区灌注桩的研究则相对匮乏。该地区典型的淤泥或淤泥质软土地层与下伏风化岩地层的协同受力特性尚不明确,具体的传力机理和荷载分担情况也难以确定。目前,沿海软土的研究正从单一力学行为分析,向多场耦合、微观机理与宏观响应结合的综合方向发展^[12-14]。在此背景下,未来需要进一步结合工程实践与新兴技术,提升软土地基处理的可靠性和可持续性。因此,迫切需要对福建滨海软土地地区的灌注桩开展系统的试验研究,以掌握其承载特性,满足工程设计和实践的需求。

鉴于此,本文以泉州某道路工程所在地区的桩基为研究对象,基于慢速维持荷载法开展现场竖向和水平原位静载试验。通过对现场试验数据的深入分析,探讨该地区灌注单桩的荷载传递机理和承载特性,并确定深厚淤泥及淤泥质土中的桩侧摩阻力标准值的取值。研究结果可为福建滨海软土地地区灌

注桩的设计和施工提供参考。

1 试验概况

1.1 工程地质条件

试验依托工程位于泉州市泉港区。根据工程地质勘察报告,该地区为海积平原,地势平缓,覆盖有广泛的深厚淤泥及淤泥质软土层。试验场地的土层自上而下分别为:①杂填土,厚度为 1.6 m;②淤泥,厚度为 18.2 m;③淤泥质土,厚度为 4.5 m;④砂土状强风化花岗岩,浅黄、土黄色,硬塑,岩芯呈砂土状,遇水崩解、软化。各土层的物理力学参数如表 1 所示,工程地质剖面如图 1 所示。

表 1 土层物理力学参数

土层名称	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模量 E_s/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
杂填土	2000	3.50	0.33	15.00	25.0
淤泥	1600	0.80	0.45	7.80	7.8
淤泥质土	1800	7.93	0.40	36.14	17.1
砂土状强风化花岗岩	2000	8.50	0.30	200.00	45.0

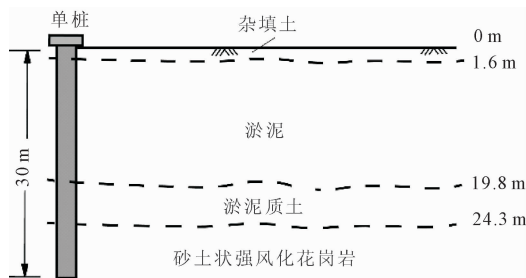


图 1 工程地质剖面图

1.2 试桩设计

试桩为圆形截面,桩身直径为 1.0 m,桩长为 30 m,混凝土等级为 C35,纵向配筋采用 HRB335, 24 Φ 16,环形等间距配置。桩身截面如图 2 所示。

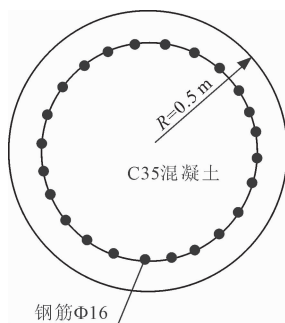


图 2 试桩桩身截面图

1.3 传感器埋设及监测设备

为观测桩基在受力过程中的应力应变特性,在

试桩钢筋笼上进行钢筋计的布置。在试桩加载方向的箍筋与纵筋的交接处,分别对称绑扎1枚钢筋计,竖向间距设定为3 m。同时,将1根测斜管固定于钢筋上,以监测桩身水平位移。钢筋计和测斜管绑扎如图3所示。钢筋笼在预装钢筋计与测斜管后,被缓缓下降至桩孔位置,并按顺序逐节连接。随后进行混凝土浇筑以形成桩基。成桩后30 d,进行桩帽制作。

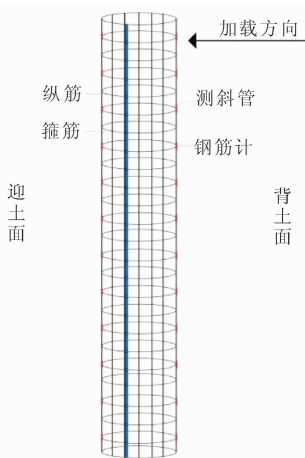


图3 钢筋计和测斜管布置图

利用自动化综合测试系统来收集试桩内传感器的数据。在此过程中,采集的频率与主机百分表的读数时间和次数相协调,以保证所有数据在同一时间点被捕获,以便后续对单桩的承载性能进行深入分析。试桩水平位移则用智能型测斜仪进行人工采集,测量方法为双向拉测法,每级荷载稳定后采集水平位移数据。此外,在竖向静载试验中,桩顶的荷载与沉降数据是通过液压系统所配备的主机进行自动采集与记录的。

2 竖向静载试验及结果分析

为了探究福建滨海软土地区灌注单桩的承载性能,本文对具有代表性的灌注桩进行原位静载试验。竖向静载试验过程依据《建筑基桩检测技术规范》^[15](JGJ 106—2014)进行。慢速维持荷载法因其高精度和可靠性,被广泛视为桩基承载力检测的“金标准”,适用于重大工程验收、复杂地质条件下的评估以及科研分析。因此,本试验采用慢速维持荷载法进行分级加载与卸载。为确保竖向静载试验后试桩不发生破坏且仍能进行水平静载试验,试验确定竖向静载试验的最大荷载为2 000 kN。试验共分九级加载,分别设定为400 kN、600 kN、800 kN、

1 000 kN、1 200 kN、1 400 kN、1 600 kN、1 800 kN 和 2 000 kN。

试验一般流程为:①对桩周土体进行场地整平与加固处理;②架设主次梁结构体系作为反力支撑平台;③采用标准配重单元堆载法,在反力平台系统上分层码放预制混凝土配重块以构建反力装置;④通过千斤顶逐级改变桩基荷载,千斤顶置于桩顶与平台之间。及时记录每一级荷载各个传感器的数据。现场竖向堆载试验如图4所示。

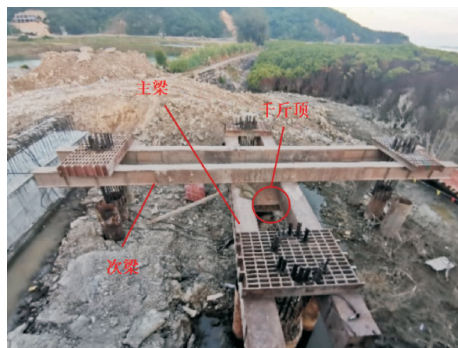


图4 现场竖向静载试验

2.1 桩顶沉降分析

桩顶竖向荷载沿桩身可分解为桩侧摩阻力与桩端阻力,一部分以剪应力形式沿桩土界面传递给桩周土体,另一部分则沿桩身传递至桩端持力层,同样以剪应力的形式扩散。桩侧受荷载压缩,由此导致持力层土体发生沉降。为了揭示桩顶竖向荷载 Q 与桩顶沉降 s 的关系,总结现场实测数据如表2所示。

表2 竖向静载荷载 Q 与试验桩顶沉降 s 结果记录表

荷载 Q/kN	历时/min		沉降 s/mm	
	本级加载时间	累计	本级沉降增量	累计
0	0	0	0.00	0.00
400	120	120	0.15	0.15
600	120	240	0.50	0.65
800	120	360	0.75	1.40
1000	120	480	0.72	2.12
1200	120	600	0.81	2.93
1400	120	720	0.77	3.70
1600	120	840	0.23	3.93
1800	150	990	0.47	4.40
2000	180	1170	0.74	5.14
1600	60	1230	-0.19	4.95
1200	60	1290	-0.96	3.99
800	60	1350	-1.19	2.80
400	60	1410	-1.06	1.74
0	180	1590	-1.16	0.58

竖向荷载 Q 与桩顶沉降 s 的关系曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看到,在初始加载阶段 ($Q = 400$ kN),当荷载水平处于弹性工作区间时,桩周土体处于弹性变形阶段,桩顶沉降量很小。随着竖向荷载增加, $Q = 400$ kN 处荷载-沉降曲线显现首阶拐点特征值,线曲率发生显著改变,沉降速率明显加快,但未破坏。当荷载为 1 600 kN~2 000 kN 之间时,沉降曲线斜率有所降低,土体表现出一定的“强化”现象,但桩基尚未发生明显破坏。在卸载阶段,随着桩顶荷载的进一步减小,回弹开始变快,沉降曲线与相应竖向荷载加载阶段的曲线大致平行,最终回弹率高达 84.6%。

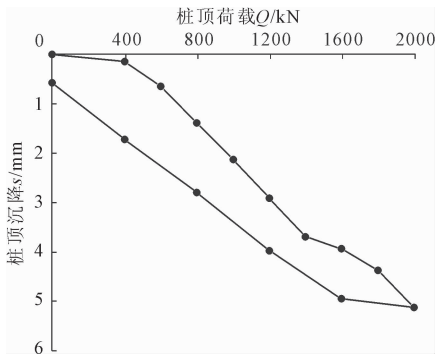


图 5 试桩荷载-沉降 ($Q-s$) 曲线

图 6 为基于半对数坐标系下 $s-lgt$ 时间效应曲线,由图 6 可知,当 $Q < 1 400$ kN 时,荷载加载稳定后,桩顶沉降趋于平缓,也即说明桩土变形仍处于弹性阶段。然而,当 $Q > 1 600$ kN 时,尽管竖向静载装置保持荷载不变,但桩顶沉降会随着时间的推移而发生一定变化,最终趋于稳定。究其原因在于竖向荷载沿桩身传递重分布的过程中,桩周土会经历自上而下的应力梯度耗散,桩土体系三维应力场重分布,部分土体由弹性状态转变为塑性状态,并向下扩展,导致桩顶沉降的增加。当桩土体系达到新的平衡状态后,沉降速率减缓并趋于稳定。

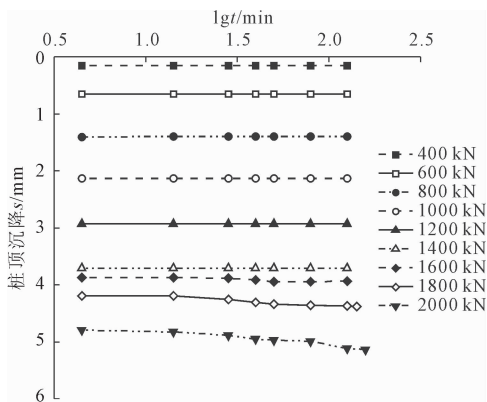


图 6 试桩静载试验 $s-lgt$ 曲线

2.2 桩身轴力分析

图 7 为桩身轴力沿深度的变化曲线。由图 7 可知,桩顶竖向荷载与桩身轴力呈正相关,且在分级加载条件下,轴力沿桩长方向呈现非线性递减特征,但上部桩身轴力衰减较慢,至 24 m 淤泥质土与强-全风化花岗岩界面处发生应力突降现象,迅速降至零,表现出显著的地质界面变化特征。桩基承载表现为桩侧摩阻力和桩端阻力共同作用,而因淤泥层和淤泥质土层的低摩阻特性,埋深 24 m 以上竖向荷载基本由桩身承担,并向下传递至嵌岩部分,由嵌岩部分承担大部分竖向荷载,迅速消纳上部竖向荷载。即说明桩顶荷载、桩土界面摩阻特性以及桩土相对位移大小均能影响桩身轴力变化。

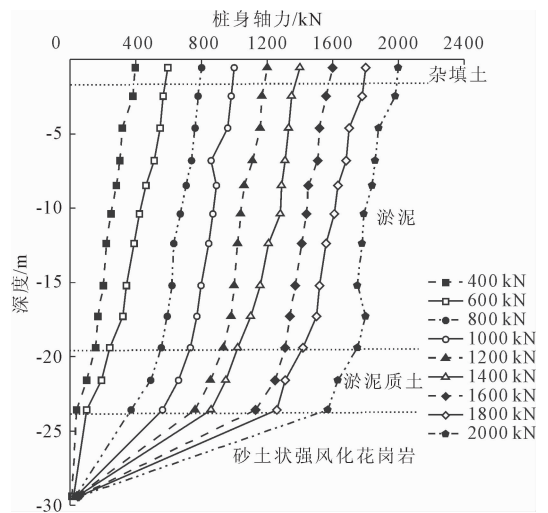


图 7 试桩桩身轴力分布

2.3 桩侧摩阻力分析

由图 7 可知,桩身轴力随深度的增大而逐渐趋于 0,即桩侧阻力会先于端阻力发挥出来,且由于施加在试验桩顶部的荷载较小,桩端阻力尚未发挥,此时试验桩仍属于摩擦桩。为了进一步获得灌注桩桩侧摩阻力分布规律,根据《建筑桩基技术规范》^[16] (JGJ 94—2008) 的规定,将桩身相邻断面间的轴力作差,并结合桩身参数计算得到各土层的侧摩阻力。

图 8 为砂土状强-全风化岩层桩侧摩阻力随桩顶荷载的变化曲线,由图 8 可以看出,当桩顶竖向荷载较小时,由软土层提供大部分向上抗力。

图 9 为淤泥层和淤泥质土层的桩侧摩阻力平均值随桩顶荷载的变化曲线。在《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) 中,钻孔灌注桩在淤泥层中的侧阻力标准值的建议值为 6 kPa~9 kPa,而在淤泥质土中的侧阻力标准值为 10 kPa~14 kPa。根据图 9

可知,淤泥层中的桩侧摩阻力平均值在规范推荐的侧阻力标准值的下限值(6 kPa)附近波动,而淤泥质土中的桩侧摩阻力平均值在规范推荐的上限值(14 kPa)附近波动。需要说明的是,图 9 中淤泥质土的桩侧摩阻力在低荷载阶段接近规范下限,主要因其土体特性(高含水量、结构性)和试验条件(加载速率、固结时间)导致初期抗剪强度未完全发挥。因此,在福建滨海软土地层中,钻孔灌注桩在淤泥层中的侧阻力标准值可以取规范建议值的下限,而在淤泥质土中的侧阻力标准值可以取规范建议值的上限。

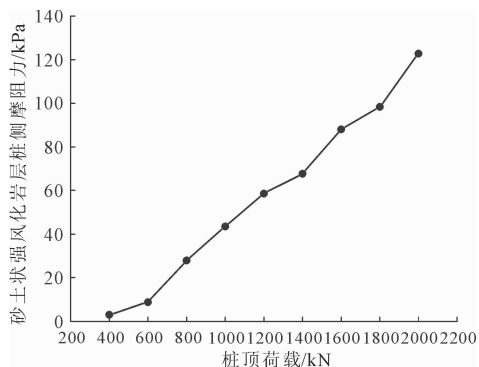


图 8 桩侧摩阻力随桩顶荷载变化曲线

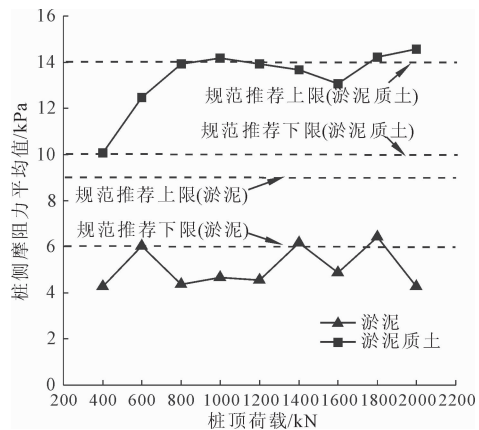


图 9 桩侧摩阻力平均值随桩顶荷载变化曲线

3 水平静载试验及结果分析

为进一步研究水平荷载作用下的单桩受力性能,同样基于慢速维持荷载法开展桩身水平静载试验,亦采用预制块提供反力,千斤顶控制逐级荷载。因荷载达到 400 kN 时,桩顶位移呈现持续增长态势,致使该荷载等级无法完成稳定加载过程,固以 400 kN 为最大荷载,共设置九级加载,分别为 80 kN、120 kN、160 kN、200 kN、240 kN、280 kN、320 kN、360 kN 和 400 kN,在每级荷载趋于稳定时,对桩身相关数据进行采集。

3.1 桩顶位移分析

图 10 为桩顶水平位移 y 与荷载 P 曲线。由图 10 可知,当荷载小于 200 kN 时, P 与 y 之间呈现出线性关系,即说明桩身及桩周土体仍处于弹性变形阶段, y 与 P 呈正相关。而荷载的增加,位移受荷载影响更为敏感, $P-y$ 曲线斜率增长,桩土应力场开始进入塑性阶段。较为明显的,荷载加载至 320 kN 时,曲线出现了明显的拐点,说明桩顶水平位移变化更为敏感,随荷载变化更为显著,这是由桩土体系接近屈服阶段导致。

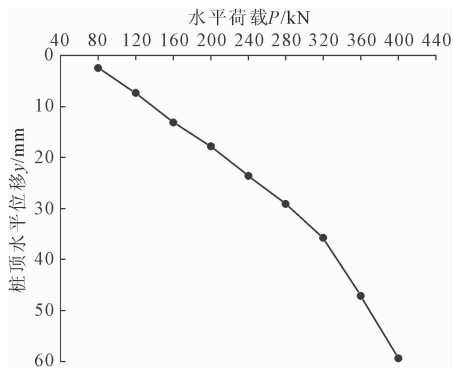


图 10 荷载与水平位移 $P-y$ 曲线

桩顶水平位移与时间对数关系曲线如图 11 所示,由图 11 可知,在水平荷载未超过 200 kN 的工况下,桩顶水平位移随时间推移未出现显著变化,表明桩-土系统处于持续稳定状态。当水平荷载增至 200 kN 时,观测到桩顶位移呈现先递增后收敛的变化特征,最终趋于稳定。说明桩周特定区域土体已发生塑性变形,且塑性区呈现向下延伸趋势。当荷载提升至 320 kN 和 360 kN 阶段时,桩顶位移表现出阶段性波动特征,后期位移逐步收敛,这可能与塑性变形区在土体中的发展扩张相关。基于此,亦可确定该桩体水平极限承载力为 360 kN。

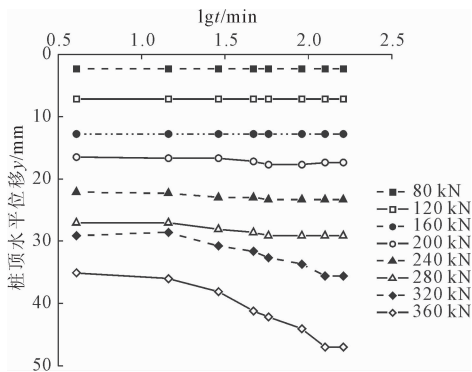


图 11 水平位移与时间对数曲线

3.2 桩身弯矩分析

图 12 为水平静载作用下桩身弯矩随水平荷载

变化曲线。从图 12 可以看出,桩身弯矩随深度变化大致呈反“S”型,即说明桩侧土体提供的水平抗力沿深度呈现非线性分布特性。在低水平荷载阶段,桩身弯矩分布范围较浅,此时桩顶荷载主要通过桩侧浅层土体的弹性变形完成传递,弯矩峰值集中于深度 5 m 附近的浅层区域,最大弯矩作用点随荷载增长逐渐下移,在 7 m 处达到最大值,负弯矩最大位置出现在桩身中下部。该现象源于土体塑性变形的渐进发展,促使荷载传递路径向深层土体延伸。当荷载较大时,桩周土体出现屈服特征,土体达到极限状态,桩-土水平承载能力逐渐衰减。

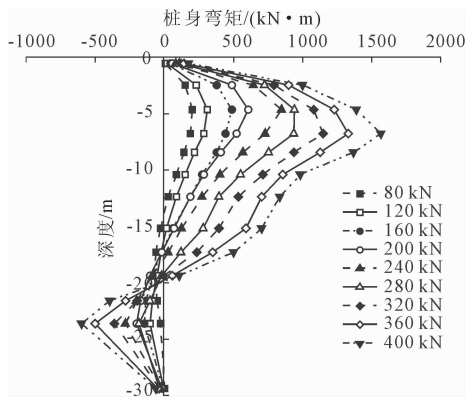


图 12 水平荷载与弯矩曲线

4 结 论

本文依托泉州某道路工程钻孔灌注桩的单桩现场试验,采用慢速维持荷载法开展竖向和水平原位静载试验,对福建滨海典型的淤泥及其下伏风化岩地层条件下灌注单桩的荷载传递机理和承载特性展开了系统的研究,所得主要结论如下:

(1) 桩基的竖向荷载传递过程中,桩周土体经历了应力重分布,部分土体由弹性状态转变为塑性状态,并向下扩展,导致桩顶沉降增加。当桩土体系达到新的平衡状态后,沉降速率会减缓并趋于稳定。

(2) 桩顶荷载、桩土界面摩阻特性、桩周土层类别以及桩土相对位移大小均能影响桩身轴力变化。当桩顶竖向荷载较小时,由软土地层提供大部分向上抗力。随着荷载的逐渐增加,嵌岩段的桩侧摩阻力逐渐发挥作用,其承担的荷载占总荷载的比例也越来越大。

(3) 试验结果表明,在福建滨海软土地层中,钻孔灌注桩在淤泥层中的侧阻力标准值可取规范建议值的下限,在淤泥质土中的侧阻力标准值则可取规范建议值的上限。

(4) 在低水平荷载阶段,浅层土体通过弹性变形承担主要荷载传递作用,当荷载超过土体弹性阈

值时,塑性变形的渐进发展促使荷载传递路径向深层土体延伸。当荷载增大到桩材不能容许或桩侧土体屈服破坏时,桩土体系趋于破坏,桩的水平承载力丧失。

参考文献:

- [1] 储诚富,李小春,鹿立好,等. 无黏性土地地区大直径超长钻孔灌注桩桩端压浆后的承载性能研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(S2):388-391.
- [2] 孙树礼. 大直径超长钻孔灌注桩承载特性试验研究[J]. 铁道工程学报,2011,28(10):66-71.
- [3] 冯世进,柯瀚,陈云敏,等. 黄土地基中超长钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(1):110-114.
- [4] 任鹏,邓荣贵,于志强. 高速铁路超长桥桩承载特性试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(1):174-178.
- [5] 万志辉,戴国亮,龚维明. 超厚细砂地层大直径后压浆桩荷载传递计算与分析[J]. 岩土力学,2018,39(4):1386-1394.
- [6] 王卫东,吴江斌,聂书博. 武汉绿地中心大厦大直径嵌岩桩现场试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(11):1945-1954.
- [7] 王卫东,吴江斌,聂书博. 武汉中心大厦超长软岩嵌岩桩承载特性试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(6):196-203.
- [8] 张亚妹,秘金卫,白晓宇,等. 泥岩地基及嵌岩灌注桩的承载特性试验[J]. 科学技术与工程,2023,23(2):722-730.
- [9] 尹俊涛,王世杰,宋广,等. 黄泛区大直径超长钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 中外公路,2014,34(4):117-123.
- [10] 柳天杰,王焱,刘坤. 后注浆灌注桩在湿陷性黄土中的试验研究[J]. 建筑结构,2016,46(16):97-100.
- [11] 李甜甜,韩玉涛,刘永超,等. 天津软土地地区超长桩试验及承载机理研究[J]. 建筑科学,2022,38(3):90-96.
- [12] 罗云华,宋亚亚,谢永顺,等. 大直径嵌岩灌注桩承载性状试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2025,23(1):102-108,117.
- [13] 张骞,李木才,张乾青,等. 软土地区超长单桩承载特性的现场试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(S2):1066-1070.
- [14] 穆保岗,龚维明,黄思勇. 天津滨海新区超长钻孔灌注桩原位试验研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(2):268-271.
- [15] 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.
- [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.