

不同荷载作用下桥梁摩擦桩承载特性研究

赵立财^{1,2}

(1. 台湾科技大学 营建工程系, 中国 台北 10607; 2. 中铁十九局集团有限公司第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 研究桥梁钻孔灌注摩擦桩的承载特性及桩身力学性质的分布规律对桥梁的安全稳定运行具有重要意义。以重庆三店互通式1号桥梁桩基为研究对象,根据桥梁桩基特点设计室内试验,依次进行了灌注摩擦桩单桩承载力、桩身轴力以及侧摩阻力等桩基性能研究,并将试验结果与数值模拟结果以及理论公式计算结果进行对比验证。研究表明:持力层岩性对桥梁灌注摩擦桩桩顶沉降量存在影响,持力层岩土性能越高,则桩顶沉降量越小;桩身轴力及摩阻力的变化幅度均随着桩顶荷载的增加呈先增大后减小的规律,且桩身中部所受到的摩阻力最大;经理论公式和有限元分析的验证,本次试验结果整体上偏差率较小,3种分析计算方法均可较好地得出灌注摩擦桩桩身轴力变化规律。研究结果可为桥梁运营后期的病害防治提供重要的理论支撑。

关键词: 桥梁桩基; 灌注摩擦桩; 承载试验; 轴力; 摩阻力

中图分类号: U443.15

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)02-0201-06

Bearing characteristics of bridge friction piles under different loads

ZHAO Licai^{1,2}

(1. Department of Civil and Construction Engineering, Taiwan University of Science and Technology, Taipei 10607, China;

2. The Third Engineering Branch Co., Ltd. of China Railway 19th Bureau Group Co., Ltd., Shenyang 110136, China)

Abstract: It is of great significance to study the bearing characteristics of cast-in-place friction piles constructed by drilling grouting technique and the distribution law of the pile mechanical properties for the safety and stability of bridge operation. Taking the pile foundation of Chongqing Sandian Interchange Type 1 Bridge as the research object, the laboratory test was designed according to the characteristics of the bridge pile foundation, and the performance of the single pile bearing capacity, pile axial force and side friction resistance was studied successively. Then the test results were compared with those of the numerical simulation and theoretical formula. The results show that the lithology of the bearing layer affects the top displacement of the bridge pile, the higher the geotechnical performance of the bearing layer, the smaller the displacement amplitude of the pile top. In addition, the variation range of the pile axial force and friction resistance increases first and then decreases with the increase of the pile top load, and the friction resistance is the largest in the middle of the pile. According to the verification of the theoretical formula and finite element analysis, the overall deviation rate of the laboratory test is small, it reflects that the variation law of the pile axial force are well expressed under these three calculation methods. The findings can provide an important theoretical support for the prevention and control of damages to bridges in the later period of operation.

Key words: bridge pile foundation; cast-in-place friction pile; load-bearing test; axial force; frictional resistance

收稿日期:2022-08-03; 修回日期:2023-11-27

基金项目:辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC2007146);中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(2020-C20)

作者简介:赵立财(1985—),男,辽宁盖州人,博士,正高级工程师,研究方向为桥梁与隧道智能建造及灾变防治理论。

1 研究背景

随着我国基础设施建设的快速发展,桥梁工程建设在高速公路、铁路中的占比增大,成为其重要构成部分,同时,桥梁工程的设计与建设对桥梁桩基也提出了新的要求^[1]。一般桥梁主要采用桩基础,桥梁在通车运行后需控制桩基的沉降量且保障其承载能力,因此进行桩基性能研究是保证桥梁施工和运行安全的关键工作之一^[2-3]。目前桥梁桩基性能研究所采用的方法主要有理论经验法、理论公式法、数值模拟法和室内试验法等。如Feng等^[4]结合层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)与有限元法(finite element method, FEM)重点分析了桥梁桩基的侧向位移以及桩顶的沉降,提出桩基的侧向位移和桩顶沉降是影响桩基稳定性的最危险工况,应予以重点关注;Zhang等^[5]采用数值模拟方法对坡段桥梁桩基进行研究,分析了竖向荷载、水平荷载和倾斜荷载作用对桩基变形特性的影响,发现相比于竖向位移荷载,水平荷载对桩基的水平位移影响较大;Fan等^[6]利用现场静载试验并辅以有限元数值方法验证,探讨了钢筋混凝土配筋率和竖向荷载水平对桩顶位移和桩侧承载力的影响,发现向桩头施加竖向荷载可以减小桩顶位移,同时增大桩身的最大弯矩;Chatterjee等^[7]采用有限元技术研究了地震荷载对埋置在可液化土层中桩基的影响,得出相比于正常荷载,地震荷载下的桩顶挠度约增加了14倍,弯矩约增大了4倍;宋剑等^[8]通过室内模型试验研究了抗滑桩前后桥梁桩基顶部位移变形及桩身应变的相互关系,同时确定了试验中采用抗滑桩处理后的桥梁桩基破坏模式,结果表明抗滑桩能有效阻止桥梁桩基的变形破坏;王崇淦等^[9]采用FLAC3D技术对合安高速铁路某桥梁桩基进行分析,研究了大面积堆土荷载对高速铁路桥墩墩顶位移的影响,结果表明大面积堆土荷载对桩基的影响范围存在着一个临界值,在临界值范围内可以达到最优影响区间;罗小焯等^[10]建立了桩基有限元模型,并通过静载、动载试验对不同类型的桩基进行研究,得出有限元模型的计算基频较试验实测值减小了5.5%,但对桩身整体的力学性能影响不大。

综上所述,目前国内外学者对桥梁桩基性能研究主要集中在桩身位移变形方面,但桩身其他特性也是桥梁性能研究中不可忽略的部分;研究方法主要是采用试验手段进行桩顶位移变形计算,但对试验准确性的验证对比研究相对缺乏。所以,在对桩

身其余基本特性以及计算准确性分析验证方面仍需要进行更深入地研究。基于此,本文以三店互通式立交1号桥梁桩基为研究对象,在工程勘察的基础上开展桩基性能室内试验,在试验中分别研究了单桩承载力和桩身轴力的变化规律,并分别辅以数值模拟及理论公式分类对比方式对试验结果进行了验证。本研究内容相较于国内外现有文献研究成果的区别主要有两点。(1)研究对象及特点更加丰富,本研究不仅仅是常规室内单一桩体力学性能试验研究,还从多个角度对桩基受力机理进行了综合分析。(2)已有研究往往只是通过一种手段(如数值模拟方法或室内试验方法)对桥梁桩基的力学性能进行描述,缺乏数据对比分析;本研究综合了室内试验、理论公式及数值模拟等多个手段进行数据对比验证,证明了本次试验的可靠性,进而获得了更为全面和准确的研究结果。根据研究结果提出了桥梁桩基在实际施工过程中的注意事项,可为同类工程研究提供借鉴。

2 工程地质条件

本研究依托重庆石柱至黔江高速公路交叉的枢纽式立交,该立交主要由C、D两匝道组成,以C匝道1号桥为研究对象。1号桥桥梁中心桩号为CK0+403.00,宽度为10.5 m,全长247.0 m。桥梁上部结构采用预应力混凝土现浇连续箱梁,下部结构采用重力式桥台+桩基础,桩基采用 $\Phi 100$ cm钻孔灌注摩擦桩。区域内填土层厚度为0.5~1.3 m,冲洪积层厚度为0.6~1.8 m,崩坡积层厚度为2.3~3.8 m,泥岩厚度为5.3~8.4 m,砂岩厚度大于10 m,设计桩基桩底进入泥岩、砂岩持力层3~5 m。

2.1 工程地层岩性

研究区主要地层为第四系全新统冲洪积层、崩坡积层、人工填土层及侏罗系中统上沙溪庙组泥岩、砂岩互层。

(1)第四系全新统冲洪积层主要分布于中部溪河冲积沟谷及沟谷两侧地带,其岩性主要由粉质黏土和砂泥岩碎块石以及砂卵石组成。卵石磨圆度较好,粒径在0.1~20.0 cm之间,以圆状及椭圆状分布为主,厚度一般在6.0~15.2 m之间。

(2)第四系全新统崩坡积层主要分布在线路区斜坡及斜坡坡脚地带,其岩性主要由砂、泥岩碎块石夹粉质黏土组成,厚度一般在1.0~8.0 m之间,粒径一般在2.0~40.0 cm之间,土质不均。

(3)第四系人工填土层主要分布于场区已建垫

利高速公路附近,其岩性主要由粉质黏土和砂泥岩碎块石组成,块石含量在 10% ~ 45% 之间,结构较为密实。

(4) 侏罗系中统上沙溪庙组泥岩主要由黏土矿物组成,局部含砂质重,呈块状,厚度一般在 0.8 ~ 3.0 m 之间,其中强风化带岩芯破碎,呈块状;中风化带岩芯较为完整,呈柱状、短柱状,节长 5 ~ 30 cm。

(5) 砂岩主要由长石和石英组成,中厚层状构造,钙泥质胶结,偶夹紫褐色泥质团块和条带,其中强风化带岩芯破碎,厚度一般在 0.5 ~ 2.5 m 之间;中风化带岩芯较为完整,呈短柱状,节长 8 ~ 70 cm,局部裂隙较发育,岩芯呈块状。

2.2 岩土体物理力学特征

对场区进行地质勘察,经钻孔取样后,采用土工试验以及工程类比法获得各土层的主要物理力学参数,具体参数取值见表 1。

3 承载特性试验结果与分析

3.1 承载试验介绍

为了研究桥梁灌注摩擦桩桩基的特性,制作了桩基模型试件,模型试件的建立原则是遵循与原型

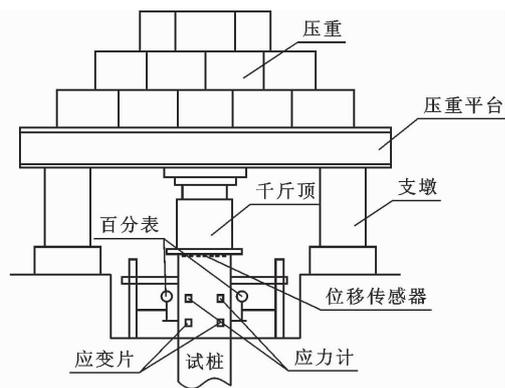
之间的相似性准则。本次桩基承载力静载试验选择的桩基试件直径与原型一致,为 1.0 m,试件高度为 0.5 m(为原型尺寸的 1/10 ~ 1/15)。在试验过程中,试验条件尽可能与现场条件相同,保持各土层厚度一致且各土层采用现场相应区域的土壤。利用重物自重作为竖向荷载力传递到桩基上,采用油压千斤顶进行分级荷载的施加,并通过荷载传感器直接测定;桩顶沉降量采用位移传感器进行测量;在桩基周围的试件上布设应力计和应变片用以量测桩身的轴力和摩擦力。灌注摩擦桩桩身承载试验设备如图 1 所示。

表 1 场区岩土体各土层主要物理力学参数

土层	重度 $\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ	黏聚力 c / kPa	内摩擦 角 $\varphi / (^\circ)$
填土层	21	80	0.18	18	20
冲洪积层	20	100	0.16	17	2
崩坡积层	22	140	0.18	15	26
泥岩	22	32 000	0.15	32	40
砂岩	24	38 000	0.20	35	45



(a) 试验设备实物图



(b) 试验设备及传感器布设示意图

图 1 桥梁灌注摩擦桩承载力室内试验设备

灌注摩擦桩桩身的混凝土标号为 C50,混凝土实际抗压强度 f_c 为 23.1 MPa,混凝土的弹性模量 E_p 为 35.2 GPa。试验过程采用“慢速维持荷载法”的加载方式进行逐级加载,每级荷载施加后按第 5、15、30、45、60 秒测读桩顶沉降量,以后每隔 30 min 测读 1 次,每次当荷载达到相对稳定后再进行下一级荷载的施加,直至桩基发生破坏。

3.2 单桩桩顶沉降量

灌注摩擦桩桩顶竖向载荷和桩顶沉降量的相互关系是反映桩基受力特性的主要表现形式。通过钻

孔揭露的信息表明,现场土层厚度不均匀,根据现场实际调查发现桩基持力层主要集中在泥岩和砂岩中,因而试验重点测试了持力层为泥岩和砂岩时桩顶不同荷载下的桩顶沉降量。分别进行了 3 组泥岩和砂岩下的加载和卸载试验,得到如图 2 所示的桩顶荷载与桩顶沉降量关系曲线。由图 2 可知,3 组泥岩和砂岩持力层下桩顶荷载与桩顶沉降量关系曲线的加载、卸载过程各自变化趋势较为一致。在加载情况下,两种岩性持力层均在桩顶荷载小于 500 kN 时的沉降量-荷载曲线斜率较小,说明桩顶荷载

较小时桩顶沉降量随桩顶荷载的增加而变化的幅度较小;当桩顶荷载增大至 500 ~ 1 800 kN 范围内时,其曲线斜率明显增大;当桩顶荷载超过 1 800 kN 后,其曲线斜率发生突变,陡度大幅增加。以卸载 1 组为例,在卸载过程中桩顶沉降量均随着桩顶荷载的减少而减小,且曲线斜率变化较小;当桩顶荷载为 2 000 kN 时,持力层为砂岩时其灌注摩擦桩桩顶沉降量约为泥岩持力层的 18.42%。以加载 1 组为例,在加载过程中桩顶沉降量均随着桩顶荷载的增大而增加,且曲线斜率差异性变化较大;当桩顶荷载为 2 000 kN 时,持力层为砂岩时其灌注摩擦桩桩顶沉降量约为泥岩持力层的 20.59%。在加载与卸载过程中两种岩性持力层的沉降量-荷载曲线变化趋势均一致;在相同桩顶荷载下,持力层为砂岩的灌注摩擦桩桩顶沉降量要普遍小于持力层为泥岩的情况,说明持力层岩土性能越高,桩顶沉降量越小。

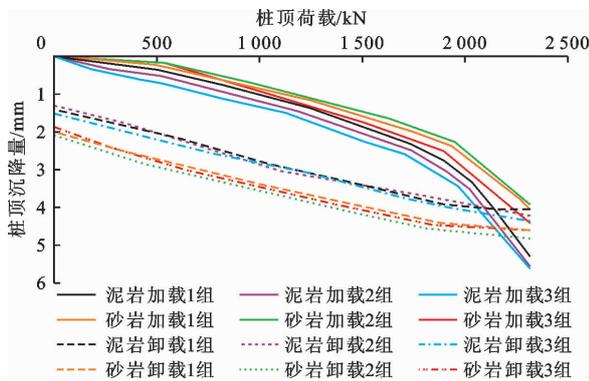


图2 不同岩性持力层灌注摩擦桩桩顶荷载与桩顶沉降量关系曲线

上述试验结果表明,持力层岩性对桥梁桩基顶部沉降量存在影响,由于砂岩的土层性质参数(如弹性模量等)要高于泥岩的土层性质参数,故在实际施工过程中,在允许范围内应尽可能地将灌注摩擦桩桩基底部嵌入到砂岩层,从而减小桩顶沉降量,也可防止可能出现的不均匀沉降问题。

3.3 单桩桩身轴力

灌注摩擦桩顶部荷载传递主要分为两个部分:(1)桩身将荷载直接传到桩周土以及底部基岩或底部土层;(2)桩身通过摩擦力将荷载传到桩周土。由于桩体与周边土之间存在摩擦力,使得桩顶荷载可以有效地向周边土进行传播,因此会降低桩身轴力及上部荷载。为了研究不同桩顶荷载作用下的桩身轴力变化规律,试验过程选择泥岩持力层,测量不同桩顶荷载作用下灌注摩擦桩桩身的轴力变化,结果如图3所示。

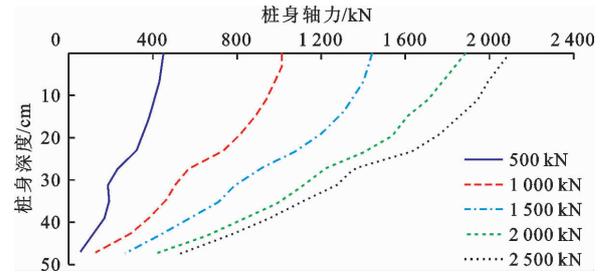


图3 不同桩顶荷载作用下灌注摩擦桩桩身轴力与桩身深度关系曲线

由图3可知,在同一荷载作用下,灌注摩擦桩桩身轴力随着桩身深度的增加而减小。在 500 kN 的桩顶荷载作用下,桩顶(桩身深度为 0)与桩底(桩身深度为 50 cm)轴力相差约 400 kN;在 1 500 kN 的桩顶荷载作用下,桩顶与桩底轴力相差约 1 100 kN;在 2 500 kN 的桩顶荷载下,桩顶与桩底轴力相差约 1 500 kN,说明随着桩顶荷载的增加,灌注摩擦桩桩顶与桩底的轴力差也进一步扩大。在同一深度时,桩身轴力随着桩顶荷载的增加而增大,特别是桩顶荷载在 500 ~ 1 500 kN 范围内其变化幅度更为明显,如在桩身深度 20 cm 处其变化幅度为 31.91% ~ 131.32%,灌注摩擦桩顶部荷载大于 1 500 kN 之后,同一深度处桩身轴力随桩顶部荷载而增大的幅度有所减弱,如在桩身深度 20 cm 处其变化幅度为 14.06% ~ 29.87%。

3.4 单桩侧摩阻力

由上节分析可知,桩侧摩擦阻力是桩基传递顶部荷载的主要因素之一,其对桩基的承载特性有着重要的影响。试验过程选择泥岩持力层,测量不同桩顶荷载作用下灌注摩擦桩桩身的侧摩阻力变化,结果如图4所示。

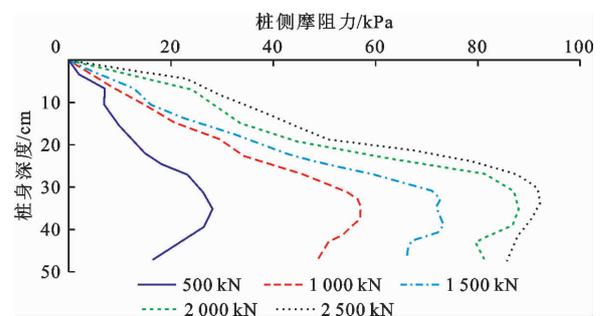


图4 不同桩顶荷载作用下灌注摩擦桩桩身侧摩阻力与桩深度关系曲线

当灌注摩擦桩受到顶部荷载作用时,桩身产生的位移普遍要大于桩周土的位移。由图4可知,摩阻力随着桩身深度的增加呈现先增大后减小的趋势。

势,且主要在桩身中部的 30 ~ 40 cm 深度范围内达到最大值。在 500 kN 的桩顶荷载作用下,最大摩阻力约为 28 kPa;在 1 500 kN 的桩顶荷载作用下,最大摩阻力约为 73 kPa,与 500 kN 桩顶荷载作用下的最大摩阻力相比增大了 160.71%;在 2 500 kN 的桩顶荷载作用下,最大摩阻力达到约 92 kPa,与 500 kN 的桩顶荷载作用下的最大摩阻力相比增大了 228.57%。桩身中部所受到的摩阻力最大,摩阻力的存在会对灌注摩擦桩产生较大的不利影响,大大降低了其桩基的承载性能,故在后期桥梁运行过程中要注意该部位的维护^[11-12]。

4 试验结果对比验证

为了验证本文试验结果的有效性,分别采用理论公式计算法和 MIDAS (multi-tier distributed applications services) 有限元数值模拟方法对摩擦桩桩身轴力及摩阻力进行计算,将计算结果与试验结果进行对比。

4.1 理论计算方法

桩侧负、正摩阻力计算分别见公式 (1)、(2)^[13-16]:

$$\tau_z = \begin{cases} \varepsilon \sigma_v & (s_s - s_p \geq s_{mn}) \\ \frac{(s_s - s_p)}{s_{mn}} \varepsilon \sigma_v & (0 \leq s_s - s_p \leq s_{mn}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\tau_z = \begin{cases} \tau_{ms} & (s_s - s_p \geq s_{ms}) \\ k(s_p - s_s) & (0 \leq s_s - s_p \leq s_{ms}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε 为摩阻力影响因子,与土质类型相关; σ_v 为竖向有效应力, kPa, 当考虑桩顶荷载时, 其值为 $\sigma_v = q + \gamma_i z_i$; q 为桩顶荷载, kPa; γ_i 为第 i 层土体的重度, kN/m³; z_i 为摩擦桩某一点所处深度, m; s_p 为桩身位移, mm; s_s 为土体位移, mm; s_{mn} 为负摩阻力达到极限值时的剪切位移, mm; s_{ms} 为正摩阻力达到极限值时的剪切位移, mm; k 为正摩阻力传递系数, kPa/mm; τ_{ms} 为正摩阻力极限值, kPa。

由荷载传递法的基本理论可得出桩身在桩顶荷载作用下的位移基本微分方程见公式 (3)^[17-18]。

$$\frac{d^2 s_p}{dz^2} - \frac{U}{E_p A_p} \tau(z) = 0 \quad (3)$$

式中: U 为桩基抗拔承载力, MPa; E_p 为桩基的弹性模量, MPa; A_p 为桩基的截面面积, m²。

首先利用分段曲线公式 (1)、(2) 确定桩身摩阻力, 再利用公式 (3) 连续条件确定各阶段位移; 最后可由公式 (4) 计算任意土层处的桩身轴力^[19-20]。

$$P(z) = - E_p A_p \frac{s_p(z_{i+1}) - s_p(z_i)}{z_{i+1} - z_i} \quad (4)$$

4.2 结果对比分析

为验证试验结果的有效性, 本节分别利用理论公式计算法和 MIDAS 有限元数值手段 (有限元模型见图 5) 进行灌注摩擦桩桩身轴力以及摩阻力分析计算。在数值模拟过程中, 固定模型底部以及前、后、左、右 5 个方向不动, 顶部为自由面, 并对顶部桩基面施加桩基荷载; 桩基与土层为桩单元 (pile) 刚性接触, 通过接触面 (interface) 控制, 桩体底部与基岩采用铰链固定, 选择泥岩持力层, 桩周土参数取值与表 1 数据一致。数值模拟中, 桩体直径为 1.0 m, 高度为 0.5 m, 桩基材料选择标号为 C50 的混凝土, 混凝土实际抗压强度 f_c 为 23.1 MPa, 混凝土的弹性模量 E_p 为 35.2 GPa。

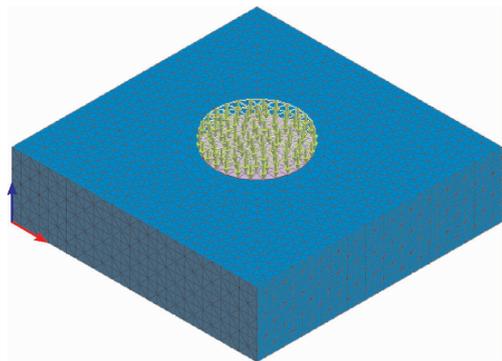


图 5 灌注摩擦桩有限元模型图

图 6 为灌注摩擦桩桩身在 500、1 500 和 2 500 kN 荷载作用下的桩身轴力效果对比曲线。

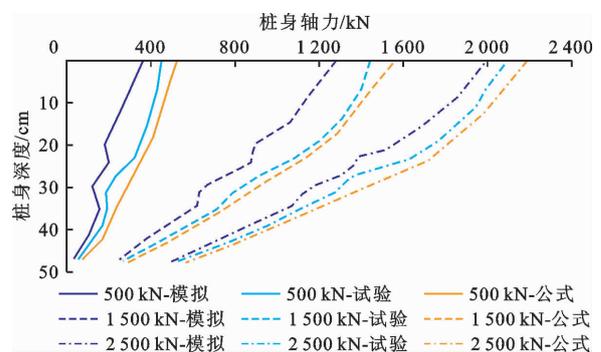


图 6 不同桩顶荷载作用下灌注摩擦桩桩身轴力效果对比曲线

由图 6 可以看出, 在桩身深度 25 cm 处, 当桩顶荷载为 500 kN 时, 桩身轴力试验数据比模拟数据大 88 kN, 比公式计算数据小 57 kN; 当桩顶荷载为 1 500 kN 时, 试验数据比模拟数据大 150 kN, 比公式计算数据小 64 kN; 当桩顶荷载为 2 500 kN 时, 试验数据比模拟数据大 155 kN, 比公式计算数据小

142 kN。总体而言,室内试验测得的桩身轴力分布曲线与公式计算法以及有限元模拟法测得的曲线有较为相似的规律性,采用公式法得到的桩身轴力普遍大于试验实测数据,而有限元模拟获得的桩身轴力普遍小于试验实测数据,但整体上的偏差率较小,表明3种分析计算方法均可较好地得出灌注摩擦桩桩身轴力的变化规律。

图7为灌注摩擦桩桩身在500、1500和2500 kN荷载作用下的桩身摩阻力效果对比曲线。由图7可以看出,在桩身深度30 cm处,当桩顶荷载为500 kN时,桩侧摩阻力的试验数据比模拟数据大3.7 kN,比公式计算数据小3.5 kN;当桩顶荷载为1500 kN时,桩侧摩阻力的试验数据比模拟数据大14.7 kN,比公式计算数据小2.7 kN;当桩顶荷载为2500 kN时,桩侧摩阻力的试验数据比模拟数据大7.4 kN,比公式计算数据小4.9 kN。总体而言,室内试验测得的桩身摩阻力分布曲线与公式计算法以及有限元模拟法测得的曲线有较为相似的规律性,均在桩身深度为30~40 cm范围内达到最大值;采用公式法得到的桩身摩阻力普遍大于试验数据,而有限元模拟获得的桩身摩阻力普遍小于试验数据,但整体上的偏差率较小,表明3种分析计算方法均可较好地得出灌注摩擦桩桩身摩阻力的变化规律,同时也验证了本次试验以及数值模拟所得数据的合理性。

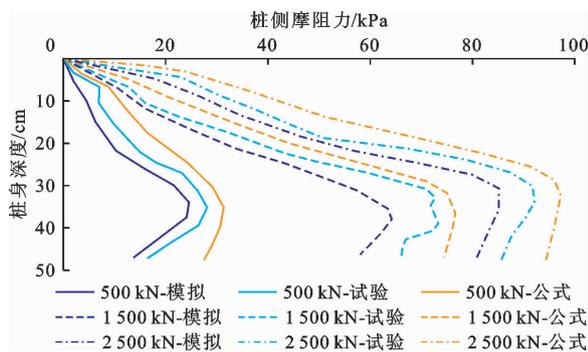


图7 不同桩顶荷载作用下灌注摩擦桩桩身摩阻力效果对比曲线

5 结论

(1)当钻孔灌注摩擦桩的持力层为砂岩和泥岩两种不同岩性土层时,其加载、卸载过程中的桩顶沉降量-荷载曲线变化趋势均一致;在桩顶加、卸相同荷载工况下,持力层为砂岩的灌注摩擦桩桩顶沉降量均小于持力层为泥岩的情况。

(2)灌注摩擦桩桩身轴力随着深度的增加而减

小;随着桩顶荷载的增大,桩身轴力最大变化幅度先增大后减小。本次试验中桩顶荷载为500~1500 kN时,桩身轴力最大变化幅度相对较大,而灌注摩擦桩顶部荷载大于1500 kN之后,桩身轴力变化幅度有所减小。

(3)灌注摩擦桩桩身产生的位移普遍要大于桩周土的位移,摩阻力随着桩身深度的增加呈现先增大后减小的趋势,且在深度30~40 cm范围内达到最大值。

(4)对比试验实测、公式计算以及有限元模拟的灌注摩擦桩桩身轴力和摩阻力数据,三者有较为相似的规律性,且采用公式法得到的数据普遍大于试验实测数据,而有限元模拟获得的数据普遍小于试验实测数据。通过三者的对比验证了本次试验以及数值模拟得出的数据的合理性。

参考文献:

- [1] 胡安峰,肖志荣,江进华,等.双向循环荷载下的单桩基础累积侧向位移[J].上海交通大学学报,2020,54(1):85-91.
- [2] 周涛,徐方,杨奇,等.高速铁路桥梁桩基固结蠕变沉降计算方法研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(8):1968-1977.
- [3] 何俊雄.深厚软土中桥梁桩基长期沉降影响研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [4] FENG Shuangxi, LEI Huayang, WAN Yongfeng, et al. Influencing factors and control measures of excavation on adjacent bridge foundation based on analytic hierarchy process and finite element method[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2021, 15(2): 461-477.
- [5] ZHANG Mingyue, LUO Hao. Research on deformation and force of bridge pile foundation on high and steep slope in mountainous area[J]. World Journal of Engineering and Technology, 2020, 8(3): 551-564.
- [6] FAN Qinglai, GAO Yufeng. Effect of reinforcement ratio and vertical load level on lateral capacity of bridge pile foundations[J]. Polish Maritime Research, 2018, 25(S3): 120-126.
- [7] CHATTERJEE K, DEEPANKAR C. Influence of seismic motions on behavior of piles in liquefied soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2018, 42(3): 516-541.
- [8] 宋剑,张蛟,成进科,等.抗滑桩对桥梁桩基受力变形影响的模型试验研究[J].公路,2022,67(4):118-124.
- [9] 王崇淦,蒋志琳,朱禹,等.大面积堆土荷载对既有高铁桥梁桩基承载性能影响分析[J].铁道科学与工程学报,2020,17(5):1090-1096. (下转第216页)

- 的消减机理及其影响因子分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 42-52.
- [66] 王华栋, 唐浩, 张卫. 生态沟渠对农田径流污染物的去除效果[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(9): 1083-1088.
- [67] 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 等. 生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3160-3167.
- [68] Ji Zehua, TANG Wenzhong, PEI Yuansheng. Constructed wetland substrates: a review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal [J]. Chemosphere, 2021, 286(1): 131564.
- [69] TANG Zepei, WOOD J, SMITH D, et al. A review on constructed treatment wetlands for removal of pollutants in the agricultural runoff [J]. Sustainability, 2021, 13(24): 13578.
- [70] 王超, 贾海燕, 雷俊山, 等. 丹江口库区典型小流域面源污染生态阻控系统效果评估[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 61-68.
- [71] 卢兴顺, 丁晓宇, 林岩, 等. 外加植物碳源强化人工湿地处理农田退水效能分析[J]. 环境工程学报, 2022, 16(5): 1537-1548.
- [72] LUO Hongbing, LI Xinping, CHEN Yuanye, et al. Field engineering application of agricultural farmland surface runoff pollution treatment by combined bioreactor and constructed wetlands[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2021, 19(6): 5493-5510.
- [73] 张雪莲, 赵永志, 廖洪, 等. 植物篱及过滤带防治水土流失与面源污染的研究进展[J]. 草业科学, 2019, 36(3): 677-691.
- [74] ZHENG Yonglin, WANG Haiyan, QIN Qianqian, et al. Effect of plant hedgerows on agricultural non-point source pollution: a meta-analysis [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(20): 24831-24847.
- [75] OSHUNSANYA S O, LI Yong, YU Hanqing. Vetiver grass hedgerows significantly reduce nitrogen and phosphorus losses from fertilized sloping lands[J]. Science of the Total Environment, 2019, 661: 86-94.
- [76] 宋科, 秦秦, 郑宪清, 等. 水肥一体化结合植物篱对减缓果园土壤氮磷地表径流流失的效果[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 83-89.
- [77] 姚祖军, 王娜娜, 黄雪滢, 等. 降雨和水保措施对三峡库区坡地水土流失的协同影响[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(10): 2272-2281.
- [78] 熊丽君, 吴建强, 黄沈发. 不同降雨特征下缓冲带水分及TN分配规律[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1837-1846.
- [79] 王荣嘉, 张建锋. 植被缓冲带在水源地面源污染治理中的作用[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 981-988.
- [80] WU Jianqiang, XIONG Lijun, SHA Chenyan. Removal of N, P from seepage and runoff by different vegetated and slope buffer strips [J]. Water Science and Technology, 2020, 82(2): 351-363.
- [81] 史中奇, 王猛, 谭军, 等. 植被缓冲带对乌梁素海区域农业面源污染的削减效果[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 51-56.
- [82] 付婧, 王云琦, 马超, 等. 植被缓冲带对农业面源污染物的削减效益研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 1-8.
- [83] PROSSER R S, HOEKSTRA P F, GENE S, et al. A review of the effectiveness of vegetated buffers to mitigate pesticide and nutrient transport into surface waters from agricultural areas[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261: 110210.

(上接第 206 页)

- [10] 罗小焯, 陈宝春, 黄福云, 等. 不同类型桩基支撑的整体桥力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 151-160.
- [11] 高登辉, 赵宽耀, 金松丽, 等. 大厚度自重湿陷性黄土场地桩基负摩阻力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 231-235.
- [12] 敖国碧, 杨文学. 深厚土石填方体基桩负摩阻力的原位试验研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(7): 62-64 + 68.
- [13] 薛祥, 朱春杰, 郑毅, 等. 大面积荷载下非饱和软土地场考虑时间效应的单桩负摩阻力计算方法[J]. 建筑结构, 2021, 51(6): 123-128.
- [14] 甘传奇. 嵌岩桩现场监测试验及负摩阻力优化计算研究[J]. 河北工业科技, 2021, 38(2): 148-155.
- [15] 张伟, 陈庆. 桩基负摩阻力国内外计算方法比较研究[J]. 公路, 2018, 63(7): 120-125.
- [16] 靳朋刘, 谢礼飞. 深圳地区入强风化岩后压浆灌注桩承载性状现场试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2699-2706.
- [17] 于莹, 郝向炜, 余波, 等. 淤积土桥梁桩基承载能力影响参数敏感性分析[J]. 公路交通科技, 2022, 39(5): 95-103.
- [18] 李甜甜, 韩玉涛, 刘永超, 等. 天津软土地区超长桩试验及承载机理研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(3): 90-96.
- [19] 王浩宇. 螺杆灌注桩竖向抗拔承载特性的模型试验研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(3): 119-128.
- [20] 周亚龙, 王旭, 张延杰, 等. 灌注桩基础桩底复合式后注浆及承载特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1864-1872.