

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.06.014

复杂地层大直径深嵌岩桩荷载传递及抗力研究

李子兵¹, 殷永高², 陈涛涛², 王克宏², 何敏², 奚邦禄²

(1. 安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司, 安徽 合肥 230031; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章以重载作用下某公铁两用长江大桥大直径深嵌岩桩为研究对象, 针对目前对嵌岩桩桩侧摩阻力的研究, 传统的做法认为在构造上桩-岩接触界面是一个平面, 提出了嵌入深厚岩石地层的桩基础在桩-岩界面会形成几何形态差异较大的粗糙面, 需要考虑界面粗糙度(joint roughness coefficient, JRC)及混凝土初凝期与围岩侧壁作用压力 P_{hi} 对灌注桩承载力的影响, 通过室内混凝土-岩样界面直剪试验获取考虑三维 JRC 与 P_{hi} 的影响下的桩-岩接触界面参数, 建立嵌岩桩竖向荷载下数值计算模型, 分析其桩-岩接触界面侧向抗力、重载作用下桩基的传力机理及极限承载力。结果表明:大直径深嵌岩桩在承受上部重载作用时, 嵌岩段桩身侧向抗力沿桩深位置是变化的, 不同于桩基规范认为同一地层桩侧摩阻力是不变的假定;在桩-岩界面成型中, 混凝土浆液自重应力随成桩深度增加而增加, 可大大提升桩-岩界面特性深度效应, 进而提升桩基容许承载力;提出考虑桩基挤压效应和桩-岩界面特性深度效应的侧阻发挥系数修正公式。该研究成果对重载作用下复杂地层深嵌岩桩基础的设计具有一定参考意义。

关键词:深嵌岩桩;桩-岩界面;粗糙度;承载特性;桩身侧向抗力

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2026)06-0813-08

Study on load transfer and resistance of large diameter deep embedded rock piles in complex strata

LI Zibing¹, YIN Yonggao², CHEN Taotao², WANG Kehong², HE Min², XI Banglu²

(1. Anhui Expressway Test and Research Center Co., Ltd., Hefei 230031, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This study focuses on large diameter deep embedded rock piles of a rail-cum-road Yangtze River bridge under overload conditions. Traditional research approaches regarding the lateral friction resistance of rock-embedded piles assume that the pile-rock interface is a plane. However, it is proposed that in deep embedded rock foundations in thick rock strata, the pile-rock interface actually forms a rough surface with significant geometric variations. Therefore, it is necessary to consider the joint roughness coefficient(JRC) and the pressure exerted by the initial setting of the concrete against the surrounding rock(referred to as P_{hi}) to evaluate the bearing capacity of the cast-in-place pile. By conducting indoor direct shear tests on concrete-rock interface samples, parameters for the pile-rock interface considering JRC^{3D} and P_{hi} are obtained, and a numerical calculation model for the vertical load of rock-embedded piles is developed to analyze the lateral resistance at the pile-rock interface, as well as the load transfer mechanism and ultimate bearing capacity of the pile foundation under overload conditions. The following conclusions are drawn: when subjected to upper load conditions, the lateral resistance of the rock-embedded segment of large diameter deep embedded rock piles varies with depth, which differs from the assumption in pile design codes that the lateral friction resistance remains constant across the same stratum; during the formation of the pile-rock interface, the self-weight stress of the concrete slurry increases with the depth of the pile, significantly enhancing the depth effect of the interface

收稿日期: 2024-01-19; **修回日期:** 2024-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52209127);安徽省交通控股集团有限公司科技资助项目(JKKJ-2020-31)

作者简介: 李子兵(1983—),男,河南周口人,安徽省高速公路试验检测科研中心有限公司高级工程师;

殷永高(1960—),男,安徽枞阳人,合肥工业大学教授,博士生导师;

何敏(1976—),女,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: hemin@hfut.edu.cn.

characteristics and, consequently, improving the allowable bearing capacity of the pile foundation. A modified formula for the mobilization coefficient of the lateral resistance, taking into account the squeezing effect of the pile foundation and the depth effect of the interface characteristics, is proposed. The research results may provide reference for the design of the large diameter deep embedded rock piles in complex strata under overload conditions.

Key words: deep embedded rock piles; pile-rock interface; roughness; bearing characteristics; lateral resistance of pile body

随着大跨度桥梁的出现,其上部结构的荷载量级和复杂程度越来越高,对基础的承载力要求也越来越高,基础的变形和承载性能变得尤为重要,而大直径桩具有承载力大、变形小、侧向刚度大等特点,被运用到工程实践中。安徽地区地形相对平坦,地表主要覆盖第四系冲积上更新统冲积层黏性土,其下为中、新生界碎屑岩,工程地质条件较好,契合嵌岩桩施工所需的工程地质条件。因此,在大型工程背景下,对于大直径深嵌岩桩基础的研究是大势所趋,具有广泛的应用前景。

大直径深嵌岩桩由于深嵌岩,嵌岩段承受上部传递下来的大部分荷载,荷载通过桩的侧向抗力和桩端阻力联合承担。其中,对桩侧摩阻力的研究传统上认为在构造上桩-岩接触界面是一个平面,文献[1]在桥梁桩土接触分析过程中,采用参数识别的办法,利用勘察资料初步确定土体及接触面参数,然后通过计算结果与试验结果修正各项参数,直到二者在一定范围内符合;文献[2]采用数值模拟分析的方法研究桩岩相互作用,接触面材料参数的确定基于红层泥岩桩岩接触面大型直剪试验;文献[3]基于 FLAC3D 对大直径桩竖向承载力特性研究,桩岩接触面材料参数直接根据工程地勘报告确定。事实上,大直径深嵌岩桩在成孔过程中,由于受成孔方式、岩层性质的影响,浇筑完混凝土后桩-岩界面不是平面,而是一个几何形态差异较大的粗糙面,受界面粗糙度的影响,桩-岩界面的受力特性不再是传统的侧摩阻力;即便是同一岩层,成桩浇筑混凝土的过程中,同一岩层不同桩深位置混凝土与围岩侧壁作用压力 P_{hi} 各不相同,且覆盖层和岩层刚度存在极大差异,变形不协调,荷载的分配在覆盖层和深嵌岩段并不明确,受力机理复杂,如图 1 所示。

桩侧摩阻力的计算参照桩基规范^[4-5],文献[4]忽略了上覆盖土层的桩侧摩阻力,只考虑嵌岩部分桩的侧摩阻力和桩端阻力;两者对于嵌岩段桩侧摩阻力和桩端阻力的计算中桩端、桩侧摩阻力系数 C_1 、 C_2 仅是根据岩石层及清底情况给

一个固定的经验取值,且嵌岩段桩侧摩阻力只考虑了抗压强度的影响,在同一地层侧摩阻力不随桩深位置的变化而变化,而实际上超大直径深嵌岩桩在竖向荷载作用下,桩侧摩阻力值在同一地层随桩深位置的变化而变化,需考虑在不同桩深位置时混凝土初凝前与围岩侧壁的作用压力 P_{hi} 及桩岩三维界面粗糙度(joint roughness coefficient, JRC)对灌注桩承载力的影响。

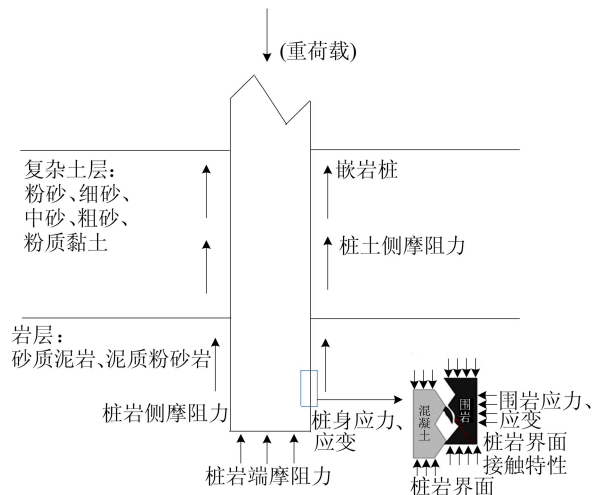


图 1 大直径深嵌岩桩受力分析模型

本文依托巢马城际铁路马鞍山公铁两用长江大桥,以重载作用下大直径深嵌岩桩为研究对象,采用本团队自主研发的桩-岩接触界面压剪试样制备装置进行室内混凝土-岩样界面直剪试验,根据试验得到的桩-岩接触界面参数建立嵌岩桩数值计算模型,分析其桩-岩接触界面侧向抗力、重载作用下桩基的传力机理及极限承载力,建立了考虑重载作用下复杂地层深嵌岩桩的极限侧向抗力修正计算公式,为重载作用下复杂地层深嵌岩桩基础的设计提供理论依据。

1 室内混凝土-岩样界面直剪试验

1.1 试验工况

基于桩-岩界面粗糙度定量化分析同一岩层不同桩深位置的 P_{hi} 对大直径深嵌岩桩-岩界面受

力机理的影响,研究桩-岩界面受力机理及抗剪强度指标沿桩深位置的演化规律,将泥岩与砂岩界面分别设置不同试验工况。泥岩的界面工况具体分为 3 组, P_{hi} 分别为 0.50、0.75、1.00 MPa, 分别测试侧向应力为 0.1、0.2、0.3、0.4 MPa 情况下的峰值抗剪强度。砂岩的界面 3 组工况的 P_{hi} 分别为 0.50、0.75、1.00 MPa, 三维 JRC 分别为 14.62、16.81、18.07, 分别测出各工况下砂岩的峰值抗剪强度参数。

1.2 试验结果

1.2.1 混凝土-泥岩界面抗剪强度

由于泥岩为极软岩,在不同法向应力下,混凝土-泥岩界面的剪应力-剪切位移曲线和砂岩并不相同,剪应力随着剪切位移的增加而增大,最后趋于稳定。此时可认为混凝土-泥岩界面已经被剪断;且 P_{hi} 越大,相同法向应力下的界面峰值抗剪强度和残余抗剪强度也越大。

混凝土-泥岩界面峰值抗剪强度曲线,如图 2 所示。

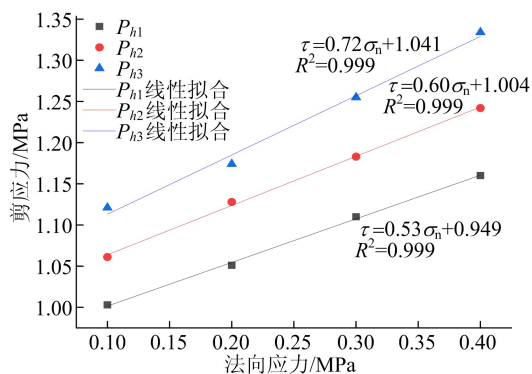


图 2 混凝土-泥岩界面峰值抗剪强度曲线

参考有关侧向应力及侧压力系数的计算公式^[6],计算得到混凝土-泥岩界面抗剪断内摩擦角 φ_p ,黏聚力 c_p ,相关度系数 R^2 ,混凝土-泥岩界面强度参数计算结果见表 1 所列。

表 1 混凝土-泥岩界面强度参数

界面情况	$\varphi_p/(^\circ)$	c_p/MPa	R^2
$P_{h1}=0.50 \text{ MPa}$	27.92	0.949	0.992
$P_{h2}=0.75 \text{ MPa}$	30.96	1.004	0.999
$P_{h3}=1.00 \text{ MPa}$	35.75	1.041	0.999

通过对 P_{hi} 进行线性拟合,得到泥岩内摩擦角和黏聚力的计算公式为:

$$\varphi_p = 15.540P_{hi} + 19.633, R^2 = 0.985 \quad (1)$$

$$c_p = 0.184P_{hi} + 0.860, R^2 = 0.987 \quad (2)$$

1.2.2 混凝土-砂岩界面剪切结果分析

关于砂岩界面剪切试验,本课题组已有过相关研究,本文将直接引用其结果。三维 JRC^[7] 是通过对砂岩界面进行三维扫描获得的界面粗糙度。采用剖面面积比 $A=S/S_0$ 来表示结构曲面的三维 JRC,其中: S 为结构面曲面的面积; S_0 为结构面投影到基准面上的面积。 S 的具体计算方法是采用图像处理软件 Getdata 对 10 条标准粗糙度轮廓线数据进行采集,然后运用 Excel 软件将二维数据延伸到三维点数据,导入到逆向工程软件 GeomagicStudio 中将点云数据拟合合成曲面,利用软件自带的分析计算功能计算出结构面曲面面积 S 。最后将这 10 组粗糙度轮廓线对应的 JRC 值与 S/S_0 进行拟合,可得出三维 JRC 的拟合公式为:

$$C_{JRC} = 134.54 \frac{S}{S_0} - 132.48, R^2 = 0.973 \quad (3)$$

整理混凝土-砂岩界面强度参数计算结果见表 2 所列。

表 2 混凝土-砂岩界面强度参数

界面情况	峰值抗剪强度参数		
	$\varphi_p/(^\circ)$	c_p/MPa	R^2
$P_{h1}=0.50 \text{ MPa}, C_{JRC}=14.62$	43.59	0.92	0.964
$P_{h2}=0.75 \text{ MPa}, C_{JRC}=16.81$	50.42	1.05	0.950
$P_{h3}=1.00 \text{ MPa}, C_{JRC}=18.07$	57.34	1.17	0.977

通过对 P_{hi} 和 JRC 进行多元线性拟合,得到内摩擦角和黏聚力的计算公式为:

$$\varphi_p = 22.5P_{hi} + 0.73C_{JRC} + 21.5, R^2 = 0.999 \quad (4)$$

$$c_p = 0.426P_{hi} + 0.010C_{JRC} + 0.550, R^2 = 0.852 \quad (5)$$

可以看到:式(4)的拟合相关系数 R^2 接近为 1,说明内摩擦角随 P_{hi} 和 JRC 基本呈线性变化;式(5)的拟合相关系数 R^2 低于 0.9,可能由于样本数量较少导致。说明凝结压力 P_{hi} 每提高 1 MPa,内摩擦角增加 22.5°,黏聚力提高 0.426 MPa;界面粗糙度 JRC 每增加 1,内摩擦角增加 0.73°,黏聚力提高 0.01 MPa。

2 大直径深嵌岩桩有限元分析

2.1 嵌岩桩计算模型的构建

以马鞍山长江公铁大桥桩基为研究对象,承台及桩体均采用 C35 钢筋混凝土材料,基桩桩径 4 m、桩长 80 m、长径比 20、嵌岩比 11.75;承台厚

10 m、长宽各 8 m 来建立嵌岩桩桩身数值模型;为消除边界效应,向 x 、 y 向各延伸 10 倍桩径,共 80 m, z 向从桩底向下延伸 10 倍桩径,共 120 m;并对嵌岩桩基的本构模型采用线弹性模型,桩周岩土体本构模型基本符合理想的弹塑性本构模型,屈服准则采用能反映压剪和张拉破坏的摩尔-库伦模型;根据实际受力情况,约束模型四周及底面位移,边界条件约束为 $x=-80$ m、 $x=80$ m、 $y=-80$ m、 $y=80$ m、 $z=-120$ m,在竖直方向上允许产生竖向变形作为本次模拟的边界条件。嵌岩桩有限元模型单元划分如图 3 所示。

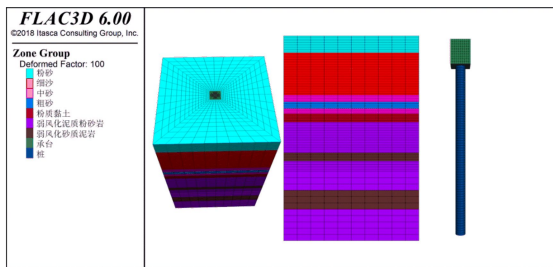


图 3 嵌岩桩有限元模型单元划分图

2.2 岩土体参数和接触面参数选取

岩层基本物理力学参数来自各项试验数据,上覆土层(细砂、粗砂、中砂、粉质黏土)物理力学参数来自实际工程现场《工程地质勘察报告》。接触面的参数主要包括切向刚度 K_s 、法向刚度 K_n 、界面黏聚力 c 和界面内摩擦角 φ 。其中考虑 P_{hi} 和三维 JRC 工况下的弱风化砂岩与泥岩地层桩-岩界面的界面内摩擦角,界面黏聚力均来自室内混凝土岩样界面剪切试验,其余地层界面强度参数以及不考虑 P_{hi} 和三维 JRC 工况时,桩-岩土体界面参数参考文献[8]。

2.3 竖向荷载下大直径深嵌岩桩承载机理

2.3.1 桩顶沉降随荷载的变化

为了研究混凝土初凝期与围岩侧壁作用压力及桩-岩界面粗糙度对复杂地层深嵌岩桩基承载性状的影响,根据室内剪切试验结果设置了 2 种工况,分别为桩-岩界面参数不随深度变化和 P_{hi} 、三维 JRC 对桩-岩界面参数的影响,结果如图 4、图 5 所示。

从图 4 和图 5 可以看出:当不考虑 P_{hi} 、三维 JRC 对桩-岩界面参数的影响,接触面参数仅与地层有关;当考虑 P_{hi} 、三维 JRC 对桩-岩界面参数的影响时,接触面参数不仅与地层有关,还与桩的深度有关。

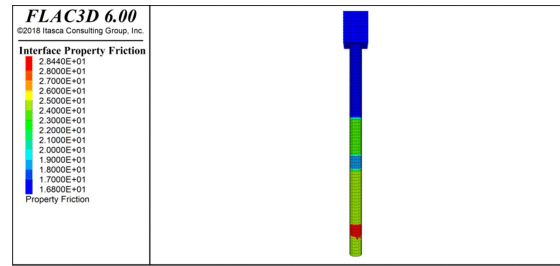


图 4 桩-岩界面参数不随深度变化情况

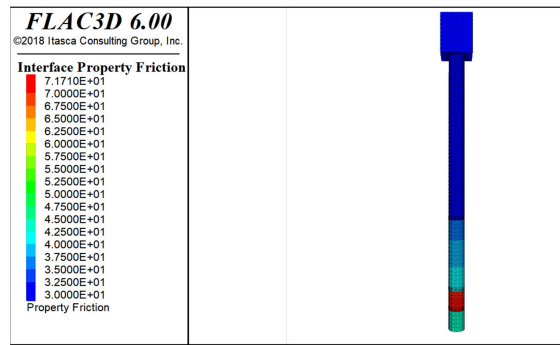


图 5 桩-岩界面参数随深度变化情况

桩顶荷载-沉降($Q-S$)线如图 6 所示。由图 6 可知:不考虑混凝土初凝期围岩应力和桩-岩界面粗糙度时,随着桩顶荷载的施加,桩顶 $Q-S$ 曲线呈现陡降型;考虑混凝土初凝期围岩应力和桩-岩界面粗糙度时,随着桩顶荷载的施加,桩顶 $Q-S$ 曲线一直为缓变型。在荷载加载初期阶段,桩顶沉降量增加速率平稳,桩基 $Q-S$ 曲线都近似呈线性变化,随着桩顶荷载逐渐加大,没有考虑混凝土初凝期围岩应力和桩-岩界面粗糙度的桩基 $Q-S$ 曲线开始逐渐分离向下弯曲,首先出现转折点,表明此时桩顶荷载已经超过了桩基极限承载力,桩顶急剧发生沉降。随着桩顶荷载的继续增加,考虑混凝土初凝期围岩应力和桩-岩界面粗糙度的桩基 $Q-S$ 曲线也到达极限承载力。

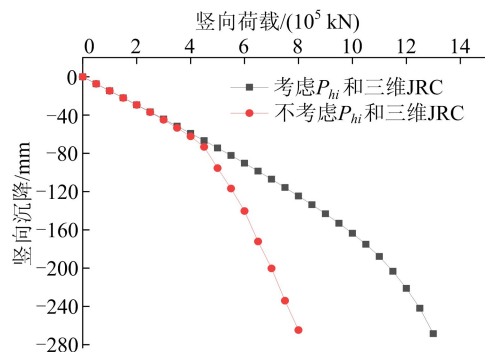


图 6 桩顶荷载-沉降曲线

对于陡降型 $Q-S$ 曲线,极限承载力为曲线发

生明显陡降的起始点所对应的荷载^[9]。不考虑 P_{hi} 和三维 JRC 影响时,桩基极限承载力为 4×10^5 kN,容许承载力是极限承载力的 0.5 倍,为 2×10^5 kN;考虑 P_{hi} 和三维 JRC 影响时,桩基极限承载力为 12×10^5 kN,容许承载力是极限承载力的 0.5 倍,为 6×10^5 kN。表明考虑 P_{hi} 和三维 JRC 影响时承载力提升近似 3 倍。

对于缓变型(Q-S)曲线,根据沉降 S 取 40~60 mm对应的荷载作为极限承载力。大直径桩 S 可取 $0.03D \sim 0.06D$ 的荷载值,其中 D 为桩端直径,本工程属于尺寸偏大的大直径桩,因此取沉降达到 $0.03D$ 时对应的荷载作为竖向极限承载力。桩顶沉降达到 $0.03D$ (120 mm)对应不考虑 P_{hi} 和三维 JRC 影响时极限荷载为 5.5×10^5 kN,则容许承载力为 2.75×10^5 kN;考虑 P_{hi} 和三维 JRC 影响时极限荷载为 7.75×10^5 kN,则容许承载力为 3.88×10^5 kN,即考虑 P_{hi} 和三维 JRC 影响时承载力提升显著。

上述 2 种方法确定的容许承载力相差较大,因此对于不考虑 P_{hi} 和三维 JRC 影响时陡降型 Q-S 曲线,以发生明显陡降的起始点作为依据,即容许承载力确定为 2×10^5 kN。对于考虑 P_{hi} 和三维 JRC 影响时缓变沉降型 Q-S 曲线,以容许位移作为依据,即容许承载力为 3.88×10^5 kN。

参照地勘报告中的岩土体参数计算桩基容许承载力,《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 3363—2019)计算结果为 1.2×10^5 kN,《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017)计算结果为 1.19×10^5 kN,远小于数值模拟中桩基容许承载力,分析原因如下。

1) 桩基侧向挤压效应。桩基在自身应力作用下会产出侧向变形,向两侧膨胀,使得桩-岩界面间法向应力大大提升(桩基挤压效应),且在重载作用下大直径深嵌岩桩效果更为显著,而已有规范中忽略了这一挤压效应;FLAC3D 数值模拟中土体单元在变形时可较好地模拟桩基挤压效应,如图 7 所示,可更为真实地反映实际桩基承载特征。因此桩基承载力计算有必要考虑桩基挤压效应对承载力的提升效果。

2) 桩-岩界面特性深度效应。在桩-岩界面成型过程中,混凝土浆液自重应力随成桩深度增加而增加,80 m 深时混凝土浆液应力达 2.0 MPa,可大大提升桩-岩界面特性,即实际工程中桩岩界面特性呈现随深度增加而增加的规律,进而提升桩基容许承载力。

综上所述,对于重载作用下大直径深嵌岩界面,桩基挤压效应和桩-岩界面特性深度效应的耦合作用使得桩基侧摩阻力提升尤其明显,在桩基承载力设计计算中不可忽略,这对于科学计算桩基承载力、合理设计桩基,从而节约造价、实现低碳化绿色建造尤为重要。

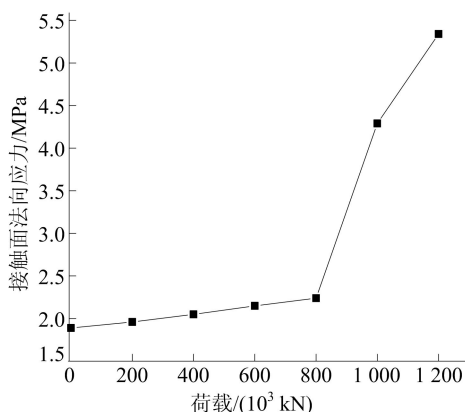


图7 不同荷载接触面法向应力变化曲线

2.3.2 桩身轴力分析

通过桩身轴力分布图可以掌握桩基荷载传递规律,根据数值模拟结果分别提取 2 种计算工况下桩基达到极限承载力时各级荷载作用下的桩身轴力分布,如图 8 所示。

桩顶轴力最大,沿桩身向下减小,上覆土层与岩石层交界处,由于嵌岩段地层相对覆盖层段,其强度大、变形小,大直径深嵌岩桩桩身轴力在嵌岩地层随深度相较于覆盖层下降更迅速,尤其在弱风化砂岩和弱风化粉砂岩泥岩地层趋势更加明显,桩身轴力急剧减小。桩身轴力分布曲线间隔较一致,岩石地层桩身轴力分布曲线间隔逐渐拉大;在同一桩深位置,随着桩顶荷载的加大,桩身轴力也在增加。

在分级荷载加载过程中,桩端轴向应力很小,且每增加一级荷载桩身轴力增量极小,在桩端处几乎没有增加,由此可以推断,在荷载施加过程中,桩顶荷载主要由桩身侧向抗力来承担,桩端阻力很小,且在分级加载过程中基本保持不变。

由图 8a 可知,在加载至 4.5×10^5 kN 时,桩端轴力减小的速率不再与前几级桩端轴力一致,且桩端轴力有较大增加。由图 8b 可知,在加载过程中,桩端轴力增加并不明显,说明大直径深嵌岩桩桩身侧向抗力和桩端阻力异步发挥,在加载初期桩身上部荷载主要由桩身侧向抗力承担,桩端阻力并未得到充分发挥。

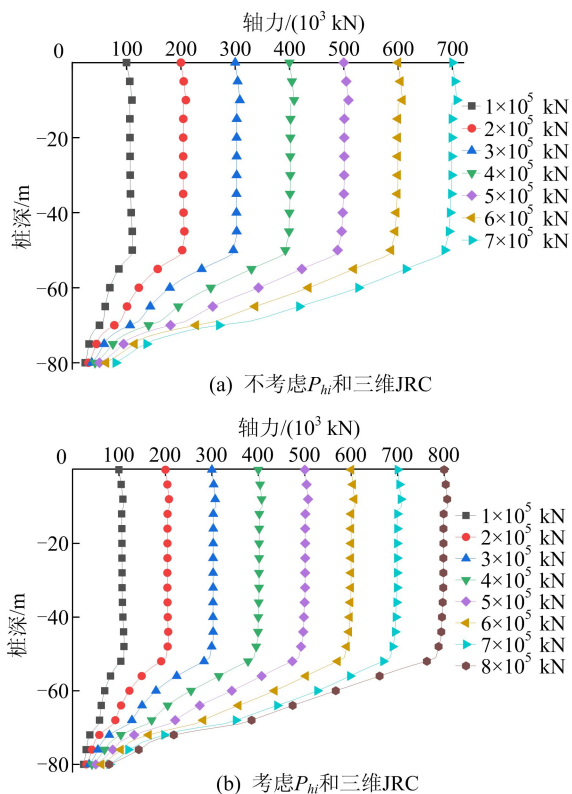


图 8 各级荷载下桩身轴力分布图

2.3.3 桩身侧向抗力分析

在桩顶分级施加荷载,荷载类型为 0.5×10^5 kN,共 16 级,在各级荷载下桩身各处的桩身侧向抗力计算公式为:

$$\pi D L_i f_i = N_{i+1} - N_i \quad (6)$$

其中: D 为桩身直径; L_i 为第 i 段桩身分段长度; f_i 为第 i 段桩身分段的桩身侧向抗力; N_{i+1} 、 N_i 分别为第 i 段桩身分段的顶部和端部轴力。

根据式(6)得出桩身侧向抗力沿桩深变化曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,桩-土侧摩阻力在覆盖层变化很小,几乎没有增量,在嵌岩地层桩身侧向抗力变化很大,尤其在弱风化砂岩和弱风化粉砂质泥岩地层变化较显著,且嵌岩地层桩身侧向抗力远远大于覆盖层桩-土侧摩阻力,说明桩顶荷载主要由嵌岩段桩身侧向抗力来承担。

根据规范桩基侧向摩阻力公式^[4-5]计算得到桩基侧向摩阻力,将其与数值模拟结果进行对比,结果如图 10 所示。

在覆盖层,《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)计算结果与数值模拟结果基本一致。而在嵌岩段,《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)与《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017)只考虑了岩石强

度对桩侧摩阻力影响,在同一地层侧摩阻力不随桩深位置的变化而变化,即侧阻发挥系数 C_2 为定值,而图 10 显示超大直径深嵌岩桩在竖向荷载作用下桩侧摩阻力值在同一地层随桩身位置的变化而变化,说明目前规范对于大直径深嵌岩桩适用性有限,并不能准确计算桩基承载力。

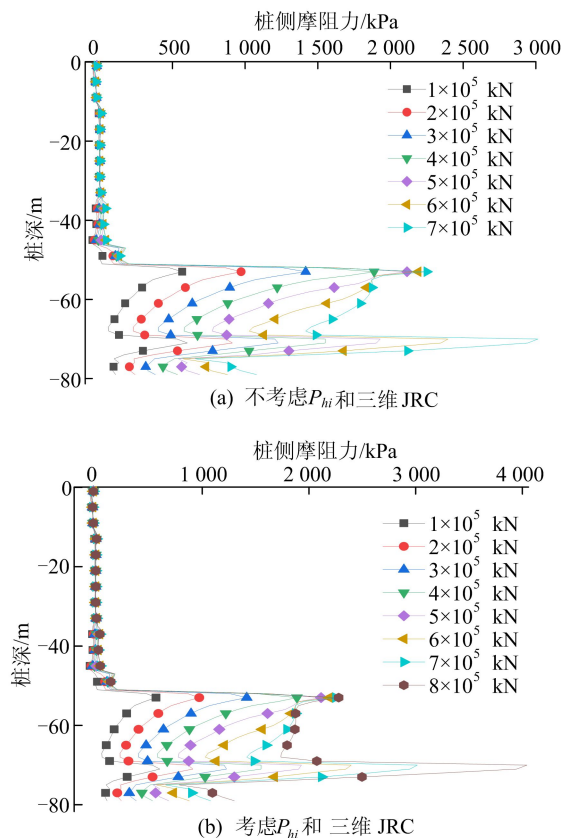


图 9 各级荷载下桩身侧向摩阻力分布图

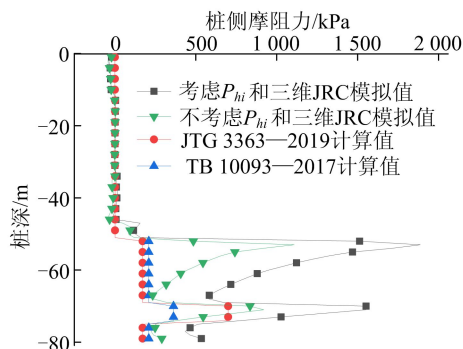


图 10 规范与数值模拟桩侧摩阻力曲线

2.3.4 容许状态侧阻发挥系数分析

为了详细分析侧阻发挥系数的影响因素,参考《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017),计算得到侧阻发挥系数 C_2 随桩深和岩层的变化曲线如图 11 所示,拟合公式见表 3 所列。

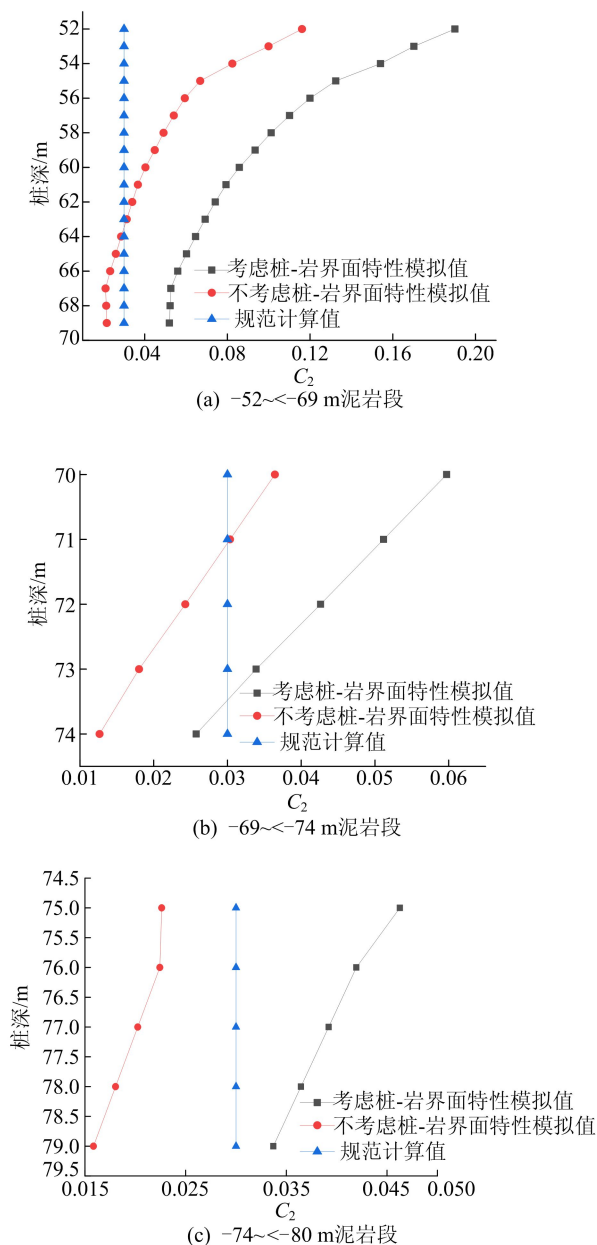


图 11 参考规范的侧阻发挥系数

表 3 参考规范的侧阻发挥系数拟合公式

桩深/m	不考虑桩-岩界面	考虑桩-岩界面
[-52, -69)	$C_2 = 0.340 - 0.0048h$	$C_2 = 0.55 - 0.0080h$
[-69, -74)	$C_2 = 0.460 - 0.0060h$	$C_2 = 0.66 - 0.0085h$
[-74, -80)	$C_2 = 0.158 - 0.0018h$	$C_2 = 0.28 - 0.0030h$

2.3.5 极限侧向抗力计算

《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017)和《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)最主要的区别是后者考虑覆盖层的侧摩阻力,本文通过分析得知在深嵌岩桩中覆盖层桩侧阻力为 0 kPa,桩端阻力和规范相差不大,并且荷载主要由嵌岩段桩侧阻力承担,因此主要对《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—

2017)中侧向抗力发挥系数 C_2 进行修正。从对桩身侧向抗力分析中发现侧摩阻力发挥系数与桩深度有很大关系,通过多项式进行拟合,得到相关计算式为:

$$[P] = R(C_1 A + C_2 U h) \quad (7)$$

$$P_a = U \sum_{i=1}^m C_{2i} h_i R_i \quad (8)$$

$$C_{2i} = \begin{cases} 0.55 - 0.0080h, & 52 \leq h < 69; \\ 0.66 - 0.0085h, & 69 \leq h < 74; \\ 0.28 - 0.0030h, & 74 \leq h < 80 \end{cases} \quad (9)$$

其中: P_a 为桩的极限侧向抗力; R_i 为第 i 段岩石单轴抗压强度; U 为嵌入岩石层内的桩的钻孔周长; h_i 为第 i 段桩深度; h 为自桩顶算起的桩基深度; C_{2i} 为第 i 段岩石侧阻发挥系数。

3 结 论

1) 本文基于数值模拟,考虑 P_{hi} 和三维 JRC 这 2 种计算工况,分析复杂地层大直径深嵌岩桩在竖向荷载作用下桩身轴力、桩身剪力、桩侧摩阻力等变化过程,得到复杂地层大直径深嵌岩桩竖向荷载传递机制。在大直径深嵌岩桩在承受上部重载作用时,桩顶荷载主要由嵌岩段的桩身侧向抗力来承担,尤其是由嵌岩段中强度高的岩层来承担,桩-土侧摩阻力承受极少部分荷载,在桩身侧向抗力发挥完全后端阻阻力开始参与。且嵌岩段桩身侧向抗力沿桩深位置是变化的,不同于规范认为同一地层桩侧摩阻力是不变的假定。

2) 根据数值模拟得到以下结果:在桩-岩界面成型中,混凝土浆液自重应力随成桩深度增加而增加,可大大提升桩-岩界面特性(桩-岩界面特性深度效应),进而提升桩基容许承载力;桩基受荷时,会向两侧膨胀,使得桩-岩界面间法向应力大大提升(桩基挤压效应),进而提升桩基容许承载力。考虑桩基挤压效应使得容许承载力相比于规范提升约 66.7%;同时考虑桩基挤压效应和桩-岩界面特性深度效应,使得容许承载力相比于规范提升约 212%,因此桩基承载力计算有必要考虑桩基挤压效应和桩-岩界面特性深度效应对承载力的提升作用。

3) 根据数值模拟得到桩身轴力分布、侧向摩阻力分布规律等,对已有规范中桩身侧向抗力计算公式进行修正,提出考虑桩基挤压效应和桩-岩界面特性深度效应的侧阻发挥系数修正公式,并发现侧阻发挥系数与混凝土强度有较大关系,为更科学合理地设计桩基容许承载力提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 李磊. 基于 ANSYS 的桥梁桩土接触分析[J]. 国防交通工程与技术, 2022, 20(5): 21-23.
- [2] 胡启军, 蒋晶, 徐亚辉, 等. 红层泥岩桩岩接触面本构模型试验及数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3): 122-128.
- [3] 高晋明. 基于 FLCA3D 的大直径桩竖向承载特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019: 42-43.
- [5] 国家铁路局. 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10093—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017: 30-31.
- [6] 吴顺川. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021: 118-122.
- [7] 张丹. 重载作用下复杂地层深嵌岩桩桩-岩界面力学特性及竖向承载机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [8] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 143-144.
- [9] 莫海鸿. 基础工程实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 111-113.
- (责任编辑 吴 亮)
-
- (上接第 771 页)
- [3] ZHU X L, CHEN J, GAO F, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 2610-2623.
- [4] WENG Q H, FU P, GAO F. Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 145: 55-67.
- [5] WU P H, SHEN H F, ZHANG L P, et al. Integrated fusion of multi-scale polar-orbiting and geostationary satellite observations for the mapping of high spatial and temporal resolution land surface temperature[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 156: 169-181.
- [6] ZHUKOV B, OERTEL D, LANZL F, et al. Unmixing-based multisensor multiresolution image fusion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1212-1226.
- [7] ZHU X L, HELMER E H, GAO F, et al. A flexible spatiotemporal method for fusing satellite images with different resolutions[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 172: 165-177.
- [8] ZURITA-MILLA R, CLEVERS J G P W, SCHAEPMAN M E. Unmixing-based landsat TM and MERIS FR data fusion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(3): 453-457.
- [9] WU M G, NIU Z. Use of MODIS and Landsat time series data to generate high-resolution temporal synthetic Landsat data using a spatial and temporal reflectance fusion model[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2012, 6(1): 063507.
- [10] SONG H H, LIU Q S, WANG G J, et al. Spatiotemporal satellite image fusion using deep convolutional neural networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(3): 821-829.
- [11] TAN Z Y, GAO M L, LI X H, et al. A flexible reference-insensitive spatiotemporal fusion model for remote sensing images using conditional generative adversarial network[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1-13.
- [12] HUANG B, SONG H H. Spatiotemporal reflectance fusion via sparse representation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10): 3707-3716.
- [13] SONG H H, HUANG B. Spatiotemporal satellite image fusion through one-pair image learning[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 51(4): 1883-1896.
- [14] WU B, HUANG B, ZHANG L P. An error-bound-regularized sparse coding for spatiotemporal reflectance fusion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(12): 6791-6803.
- [15] WEI J B, WANG L Z, LIU P, et al. Spatiotemporal fusion of remote sensing images with structural sparsity and semi-coupled dictionary learning[J]. Remote Sensing, 2016, 9(1): 21.
- [16] LIU X, DEN C W, ZHAO B J. Spatiotemporal reflectance fusion based on location regularized sparse representation[C]// 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). [S. l.]: IEEE, 2016: 2562-2565.
- [17] WEI J B, WANG L Z, LIU P, et al. Spatiotemporal fusion of MODIS and Landsat-7 reflectance images via compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(12): 7126-7139.
- [18] ZHAO C Y, GAO X B, EMERY W J, et al. An integrated spatio-spectral-temporal sparse representation method for fusing remote-sensing images with different resolutions[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(6): 3358-3370.
- [19] ASEFFPOUR VAKILIAN A, SARADJIAN M R. An object-based sparse representation model for spatiotemporal image fusion[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 1-14.
- [20] PENG Y D, LI W S, LUO X B, et al. Spatiotemporal reflectance fusion via tensor sparse representation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 5608318.
- (责任编辑 闫杏丽)