

杨波,张鑫,谭家伟,等.泥岩蠕变下嵌岩桩极限承载力研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):440-446.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240465
YANG Bo,ZHANG Xin,TAN Jiawei,et al.Study on the ultimate bearing capacity of rock-socketed piles with mudstone creep[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(4):440-446.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240465

泥岩蠕变下嵌岩桩极限承载力研究

杨波¹,张鑫¹,谭家伟¹,严渊¹,陈为¹,董天文^{2*}

(1. 中交建筑集团有限公司 第二工程有限公司,江西南昌 330038;
2. 辽宁工程技术大学 土木工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘要:为揭示泥岩蠕变、嵌岩桩深径比对富水区泥岩嵌岩基桩长期承载性状的影响,采用岩石蠕变试验、静载荷试验、有限元极限分析方法,分析了嘉陵江I阶台地的泥岩持力层强度参数变化和基桩极限承载力。研究表明,中风化泥岩在饱和状态的强度参数较平水期天然状态的强度参数低,黏聚力下降7.73%,内摩擦角下降19.58%;泥岩蠕变使大直径嵌岩基桩的长期极限承载力下降10%~30%,长期承载力衰减系数随嵌岩深径比的增大而减小,建议泥岩区大直径嵌岩基桩的深径比大于5。研究结论进一步揭示了富水区泥岩嵌岩桩基础长期承载性状,为完善泥岩区嵌岩桩基础的设计方法和施工标准提供参考。

关键词:嵌岩桩基础;泥岩蠕变;极限承载力;强度参数;有限元

中图分类号:TU473

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)04-0440-07

Study on the ultimate bearing capacity of rock-socketed piles with mudstone creep

YANG Bo¹, ZHANG Xin¹, TAN Jiawei¹, YAN Yuan¹, CHEN Wei¹, DONG Tianwen^{2*}

(1. Second Engineering Limited Company, China Communications Construction Group Limited Company, Nanchang 330038, China; 2. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: For revealing the influence of mudstone creep and the depth-diameter ratio (α) on the long-term bearing behavior of rock-socketed pile (RSP) in water-rich mudstone area, the strength parameters of mudstone bearing layer and ultimate bearing capacity of foundation pile of a super high-rise building in Jialing River terrace I are analyzed by using shear creep test, static load test method and finite element limit analysis method. The results show that the strength parameters of saturated mudstone in Jialing River terrace I are lower than those in natural state in normal water period, and the cohesion decreases by 7.73% and the internal friction angle decreases by 19.58%. The mudstone creep will cause the long-term ultimate bearing capacity of large-diameter rock-socketed pile (LDRSP) to decrease by 10%~30%. The attenuation coefficient of long-term bearing capacity decreases with the increase of the depth-diameter ratio. It is recommended that α should be greater than 5 for LDRSP in mudstone area. The research conclusions further reveal the long-term bearing mechanism of RSP in water-rich rock area, and provide reference for improving the design method and construction standard of rock-socketed pile foundation in mudstone area.

Keywords: rock-socketed pile foundation; mudstone creep; ultimate bearing capacity; strength parameters; FEM

0 引言

随着深基础工程机械的快速发展,高层建筑、

超高层建筑、大型构筑物、桥梁工程、动力设备工程的基础越来越多地选择嵌岩桩基础。嵌岩桩基础承载过程是桩体、桩周岩土体、嵌岩段岩体

收稿日期:2024-12-16 修回日期:2025-01-23 接受日期:2025-02-09 责任编辑:张雯

基金项目:国家自然科学基金项目(52274206);中交建筑集团项目(NCXM-00-2023-003-QTHT-006)

作者简介:杨波(1988-),男,四川巴中人,工程师,主要从事地基基础方面的研究。Email: yangb202411@163.com

通信作者:董天文(1970-),男,天津人,博士,教授,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: dongtianwen111@163.com

的相互作用过程。由于受到不同岩石性质、地质成因、构造多样性、水文情况和施工方法等因素影响,嵌岩桩基础的承载性状存在一定差异。

围绕嵌岩桩基础承载性状问题,众多学者开展了大量研究工作。在岩石成因和岩性方面, SKEJIĆ等^[1]、王金玺等^[2]采用数值分析和静载荷试验方法,研究砾岩岩体中嵌岩桩的竖向传力和桩-岩相互作用。CHEN等^[3]、JIANG等^[4]、SHENG等^[5]采用模型试验、数值方法揭示了风化凝灰岩、溶洞跨度、溶洞顶板厚度等因素对嵌岩桩基础竖向承载性状的影响。CHEN等^[6]建立了分数阶模型和泥岩嵌岩桩的时变性分析方法,开展了压缩性和岩体粗糙对承载力的关联性。蔡行等^[7]分析了自平衡试验的中风化泥岩嵌岩桩荷载传递规律,提出了极限端阻力和极限侧阻力标准值。王金玺等^[2]、王田龙等^[8]采用统计方法、静载荷试验方法,分析了破碎岩石嵌岩桩的端阻、侧阻影响系数和综合影响系数研究。在桩-岩界面对承载力影响方面, ZHAO等^[9]、LIANG等^[10]、ZHAO等^[11]采用模型试验、数值方法,分析了界面粗糙度对界面剪切作用的传递效果、桩端临空面对桩端阻力的影响,提出了强度模型和嵌岩桩承载力折减系数计算方法。MURALI等^[12-13]研发了一种X射线成像装置和成像系统,用于嵌岩桩离心试验的界面特征观察,揭示桩-岩界面的破坏模式。在降低施工扰动对承载力影响方面, LI^[14]、KOMAZAWA等^[15]采用数值方法和现场监测手段,研究了嵌岩桩基础成孔中施工方法对桩周岩体扰动问题,给出了嵌岩段剪切摩阻力提升建议。MISHRA等^[16]、HUANG等^[17]在嵌岩桩基础极限承载力理论研究中,提出了嵌岩桩荷载传递模型和极限承载判定方法。

目前,受到静载荷试验加载周期的限制,嵌岩桩基础研究多集中于短期承载性状方面,对长期承载能力的研究较少。在长期载荷作用下,泥岩周边的地下水会在饱和、非饱和状态的交替变化过程中,通过泥岩的微裂隙渗入,分解岩体中黏土矿物,改变泥岩的微观结构,降低泥岩强度,泥岩发生蠕变现象,改变泥岩-桩体的嵌入段应力场和嵌岩桩承载性状,从而对嵌岩桩基的长期承载力产生不利影响。因此,本文围绕泥岩蠕变下嵌岩桩基础长期承载力研究问题,采用岩石力学试验方法、数值极限分析方法和理论方法,分析并揭示泥岩蠕变的强度衰减与嵌岩桩承载力之间关系,为富水区泥岩嵌岩桩基的设计、施工提供理论依据。

1 岩体性质对嵌岩桩承载性状影响

不论是嵌岩桩基础,还是非嵌岩桩基础,其承载本质都是桩体和周围岩土材料组成的承载系统发挥抗力的过程,岩土体的物理性质将影响这一承载系统的抗力发挥。

嵌岩桩基础承载力包括非嵌岩段桩侧总阻力、嵌岩段桩侧总阻力、桩端阻力,主要取决于桩体材料强度、岩石基本质量和岩石物理性质,由于嵌岩桩基础受到嵌岩段较强的约束,嵌岩桩桩侧剪切变形、桩端岩体压塑变形表现出小于非嵌岩桩基础的剪切变形和压缩变形。嵌岩桩发生破坏时,桩体-岩体的剪切破坏面位置有两种:一是嵌岩段岩体为软岩,剪切破坏面在岩体内;二是嵌岩段岩体为硬岩,剪切破坏面在桩体内。

尽管《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[18]考虑了地质水文环境、岩石力学性质,需要对岩性、近水岸整体稳定性、地下水位和腐蚀性等进行分析,在初步设计阶段可通过经验公式确定单桩竖向极限承载力标准值时采用岩石饱和单轴抗压强度(除黏土岩采用天然湿度单轴抗压强度外)。但是,对于地下水位变化较为频繁的区域,泥岩经历饱和状态、非饱和状态的长期交替作用,蠕变引起嵌岩段岩体剪切破坏面位置改变,泥岩强度参数(黏聚力、内摩擦角)降低,改变嵌岩桩基础的承载性状,对在役大载荷软岩嵌岩桩基础的长期承载力产生影响。

2 泥岩蠕变的试验与分析

选取红泥岩岩样,通过X射线衍射分析,泥岩矿物主要包括石英、长石、方解石、高岭石、伊利石等,其中,黏土矿物(高岭石、伊利石、蒙脱石)占比约为30%~40%,石英、长石占比约为50%,其余为赤铁矿等矿物成分。岩样加工精度满足岩石力学试验标准,岩样为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体。试验采用电液伺服岩石力学试验机,该设备配备了量程为10 mm的轴向引伸计和量程为3 mm的环向链式引伸计,用以控制岩样变形,最大围压为150 MPa,试验装置见图1。

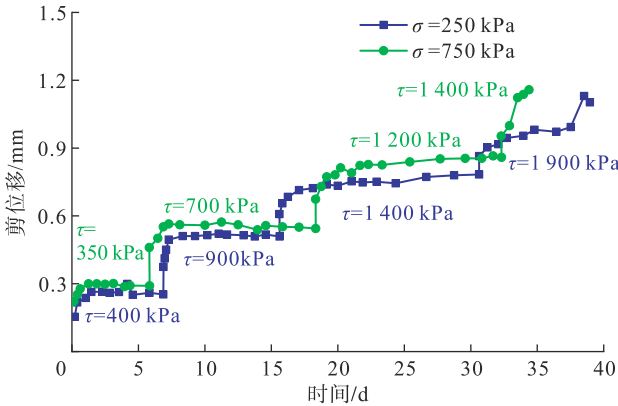
蠕变试验在室温下进行,将天然状态岩样、饱和状态岩样放入试验机,开始阶段以0.05 MPa/s的速率施加轴向载荷和围压,围压梯度设为350~1 900 kPa,以0.5 MPa/s的速率施加轴向载荷,持续48 h后施加下一级载荷,直至试件蠕变破坏,获得剪切蠕变曲线,见图2。由图2可知,泥岩天

然状态、饱和状态的剪切蠕变试验中,每级载荷施加初期均会出现一个瞬时位移增量,随着时间的增加曲线趋于平缓,进入到稳态蠕变阶段。天然状态围压 σ 为 250 kPa、750 kPa 时,剪应力 τ 分别达到 1 900 kPa、1 400 kPa,饱和状态 σ 为 250 kPa、750 kPa 时, τ 分别达到 1 200 kPa、1 400 kPa,泥岩剪切位移-时间曲线的剪切位移时间速率出现波动,即进入到非稳态的加速蠕变阶段,随后岩样发生剪切破坏。

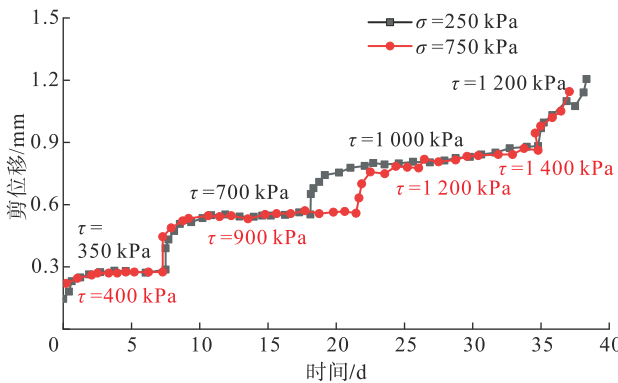


图1 泥岩蠕变试验装置

Fig.1 mudstone creep test apparatus



(a) 天然状态岩样



(b) 饱和状态岩样

图2 泥岩岩样剪切蠕变曲线

Fig.2 shear creep curve of mudstone rock sample

岩石蠕变试验的泥岩强度参数见表1。天然状态下,蠕变对泥岩长期内摩擦角、黏聚力有一定影响,黏聚力、内摩擦角衰减约 6%;饱和状态下,泥岩的长期黏聚力衰减约 6.63%,长期内摩擦角衰减 10.67%。如果出现天然状态与饱和状态交互情况(如河岸台地、库岸边坡),饱和泥岩长期黏聚力、内摩擦角比天然状态长期黏聚力和长期内摩擦角分别衰减 7.73%、19.58%。原因是泥岩中黏土矿物具有较高的晶胞活性,在正应力、剪应力作用下,水通过岩石或岩体的孔隙、微裂隙进入晶胞,促进了泥岩团粒的体积膨胀、崩解,改变了泥岩的微观结构,宏观表现出泥岩强度参数的衰减。同时,泥岩在前期膨胀、崩解后,经过较长时间的外部载荷或周边环境的约束作用,水化黏性矿物重新填充泥岩孔隙或微裂隙,使饱和泥岩的长期黏聚力得到一定程度的恢复。

表 1 岩石蠕变试验的泥岩强度参数

Tab.1 mudstone strength parameters of shear creep test

状态	时间/d	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
天然状态	0	595	34.06
	1	501	33.37
	2	499	33.37
	3	499	33.37
	35	559	32.01
饱和状态	0	611	28.69
	2	588	30.66
	3	589	30.66
	5	489	30.00
	10	489	30.00
	35	549	27.39

3 嵌岩桩长期承载力的有限元分析

3.1 工程概况

川东北金融中心项目毗邻嘉陵江,占地面积为 63 576.0 m^2 ,建筑面积约为 349 256.29 m^2 ,由高层写字楼和商业裙楼组成,最大单体建筑高度为 168 m。该项目桩基设计等级为甲级,采用大直径钻孔灌注桩,以中风化泥岩层为桩端持力层,重点核查桩端持力层的桩底下 3D (D 为桩直径) 或 5 m 深度范围内有无空洞、破碎带、软弱夹层等不良地质条件。桩顶嵌入承台内 100 mm,桩身水下混凝土强度等级为 C30,桩纵筋保护层厚度为 50 mm。

本场地岩土勘察等级为甲级,共布置 249 个探点,探点间距为 12.0~24.0 m,现场勘探于 2022 年 10 月—2022 年 11 月完成,期间为江陵江平水期,稳定水位标高为 259.34~265.67 m;嵌岩桩基础施

工和静载试验期为嘉陵江丰水期, 最高潜水位标高约为 271.0 m, 较平水期水位变化 1.5~5.0 m。

建设场地地貌单元属于嘉陵江 I 级阶地, 勘探深度范围内土层按时代、成因及土性特征自上而下依次划分为: 第四系全新统素填土 (Q_4^{ml}), 第四系全新统冲洪积层 (Q_4^{al+pl}) 粉土②、粉砂③、卵石④ (其中④1 为稍密卵石层、④2 为中密卵石层、④3 为密实卵石层), 以及下伏侏罗系上统遂宁组 (J_3sn) 泥岩⑤ (⑤1 为强风化泥岩层、⑤2 为中风化泥岩层), 勘察样本见图 3。中等风化泥岩⑤2 单轴天然抗压强度标准值 R_0 为 5.23 MPa, 属软岩, 岩体较完整, 岩体基本质量等级评定为 IV 类, 具有较好的力学性质。主要地层的密度 ρ_0 、压缩模量 E_s 、变形模量 E_0 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、标准贯入度击数 N 、重型触探击数 N_{120} 等物理力学参数见表 2。

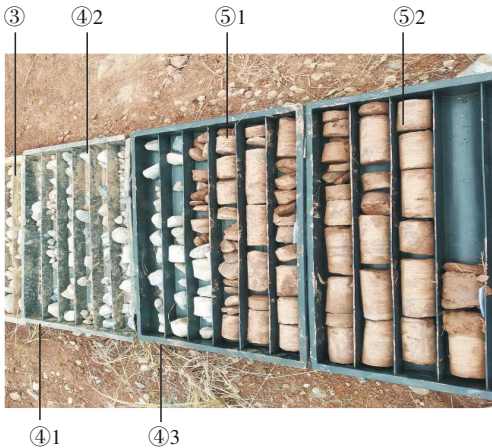


图 3 拟建场区勘察样本

Fig.3 investigation samples of proposed site area

表 2 主要地层物理力学参数

Tab.2 physical and mechanical parameters of master layers

地层	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E_s/MPa	E_0/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	N	N_{120}	R_0/MPa
②	1.82	6.0		19.8	17.8	5.2		
③	1.80	5.3		3.0	22.0	6.1		
④1	2.10		21	3.0	36.0		4.40	
④2	2.20		32	3.0	40.0		8.60	
④3	2.50		40	1.0	45.0		13.00	
⑤1	2.24	15.0		50.0	22.0			1.00
⑤2	2.36			400.0	34.0			5.23

3.2 有限元极限分析参数

为研究泥岩蠕变对嵌岩桩基础长期承载力的影响, 选择桩径 1.2 m、4 种桩长的 I 阶台地大直径

嵌岩基桩为研究对象, 采用 ANSYS 软件并结合载荷增量法进行三维弹塑性极限分析。计算时按照表 2 设置材料参数。其中, 长期承载力计算中, 嵌固段泥岩的黏聚力和内摩擦角分别比天然状态泥岩的黏聚力和内摩擦角降低 10%、20%。桩体材料选用线弹性模型, 土体、岩体采用等面积圆的 DP 模型。

计算模型基于轴对称特性选取 1/4 体建立, X 、 Y 方向选取 1 倍桩长, 桩端以下计算高度为 2 倍桩长。模型底面、圆柱外表面的边界约束采用固定约束, 切割 1/4 岩土体和桩体表面采用对称约束, 顶面为自由面。桩体、岩体采用 SOLID45 单元, 桩体与岩体结合面采用摩擦单元 TARGET170、CONTA175。基桩有限元计算模型见图 4, 有限元分网参数见表 3。

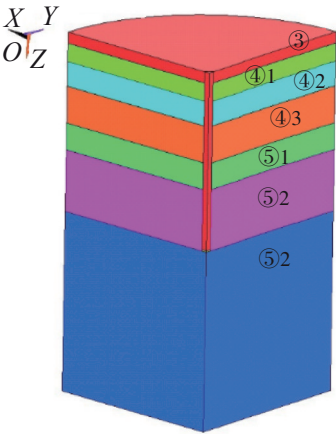


图 4 基桩有限元计算模型

Fig.4 pile calculation model of FEM

表 3 有限元分网参数

Tab.3 meshing parameters of FEM

桩号	体个数	面个数	线条数	单元数	节点数
QY-1	9	46	78	3 445	1 922
QY-2	9	46	78	3 386	1 906
QY-3	9	46	78	3 108	1 783
QY-4	9	46	78	2 867	1 648

3.3 计算与分析

(1) 极限载荷判定方法

对于缓变型 Q - s 曲线, 根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) [18] 和《建筑桩基检测技术规范》(JGJ 106—2014) [19], 桩顶沉降量 $s=0.05D$ (D 为桩直径) 或桩顶控制变形量为 60 mm 时对应的桩顶载荷判定为基桩极限承载力 (方法 1)。实际试验中 4 根大直径嵌岩基桩桩顶位移均未超过规范控制值, 故极限载荷初步确定为基桩静载荷试验的最大加载量。为进一步明确基桩加载过程中承

载性状和判定极限承载力,采用 $\log Q-s$ 曲线法(方法2)、 $\Delta s/\Delta Q-E$ 曲线法(方法3)综合判定嵌岩基桩极限承载力。其中, $\Delta s/\Delta Q$ 、 E 分别为桩顶单位载荷变形梯度、基桩承载系统势能。对于方法2,当曲线出现接近平行于 s 轴(纵轴)的曲线段或稳定斜率曲线段时,判定该曲线段起点对应的载荷即为极限荷载。方法3则基于竖向承压基桩承载系统在外部载荷作用下势能突变特性确定极限载荷^[20]。当桩顶竖向压力的单位载荷变形梯度 $\Delta s/\Delta Q$ 与基桩承载系统势能 E 曲线出现势能连续增加或增量突增时,判定对应的桩顶载荷为极限载荷。

(2) 基桩极限载荷判定

嵌岩基桩参数与极限承载力计算结果见表4, $Q-s$ 曲线见图5。图5中, QYT-1~QYT-4 曲线为静载荷试验结果, QYF1-1~QYF1-4 曲线为采用勘察参数的有限元极限分析结果, QYF2-1~QYF2-4 曲线为考虑泥岩蠕变的强度参数(黏聚力和内摩擦角)衰减的结果。泥岩天然状态下, QYF1-1~QYF1-4 曲线与现场静载荷试验的 QYT-1~QYT-4 曲线比较接近,表明有限元分析采用的岩石参数比较接近实际情况,可用于泥岩蠕变下嵌岩桩长期承载力的有限元极限分析。

表4 嵌岩基桩参数与极限承载力

Tab.4 parameters of rock-socketed pile and ultimately capacity loads

桩号	L/m	D/m	L_q/m	α	$Q_{su}/(10^2 \cdot kN)$				$Q_{lu}/(10^2 \cdot kN)$				β
					方法1	方法2	方法3	判定值	方法1	方法2	方法3	判定值	
QY-1	18.6	1.2	6.0	5.0	120	72.0	120	120	120	108.0	108.0	108.0	0.90
QY-2	18.9	1.2	6.0	5.0	120	120.0	120	120	120	108.0	108.0	108.0	0.90
QY-3	17.5	1.2	5.0	4.2	120	84.0	120	120	120	96.0	96.0	96.0	0.80
QY-4	15.7	1.2	3.6	3.0	107	96.3	107	107	107	74.9	85.6	74.9	0.70

注: L 、 L_q 分别为嵌岩基桩的桩长、嵌岩段桩长; α 为嵌岩段径比,即嵌岩段长度与桩径之比; Q_{su} 、 Q_{lu} 分别为单桩短期极限承载力、单桩长期极限承载力; β 为长期承载力衰减系数。

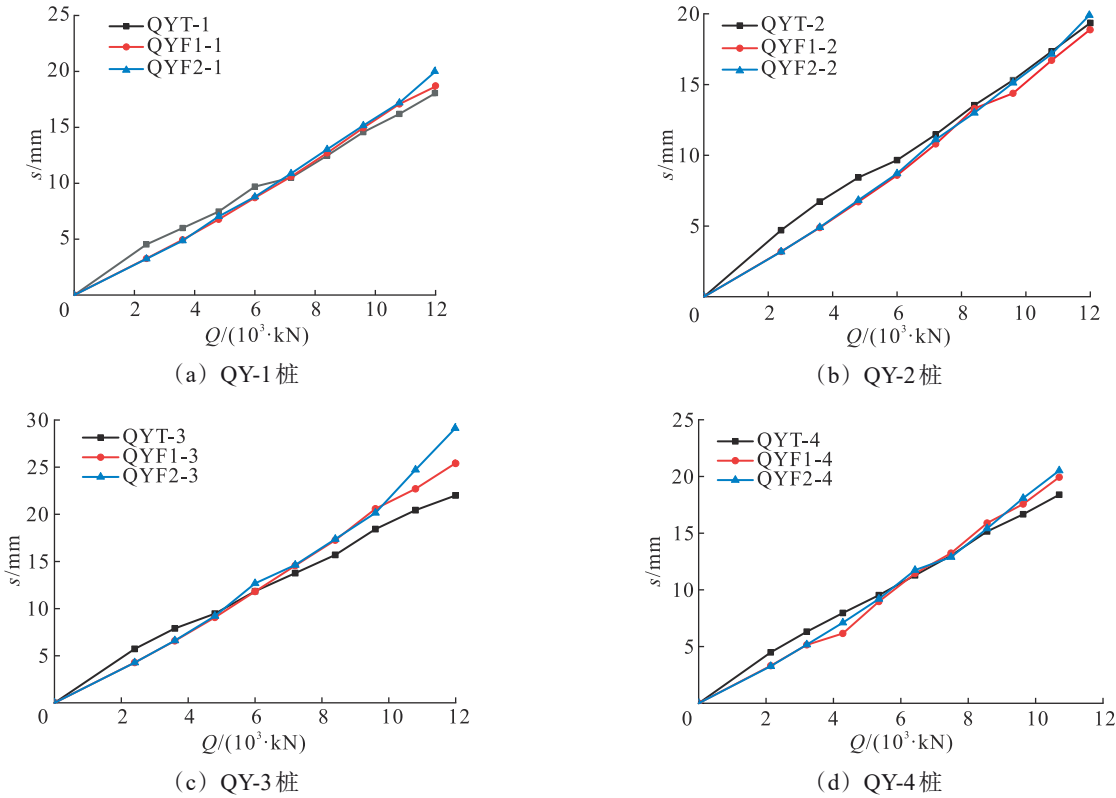


图5 嵌岩桩 $Q-s$ 曲线

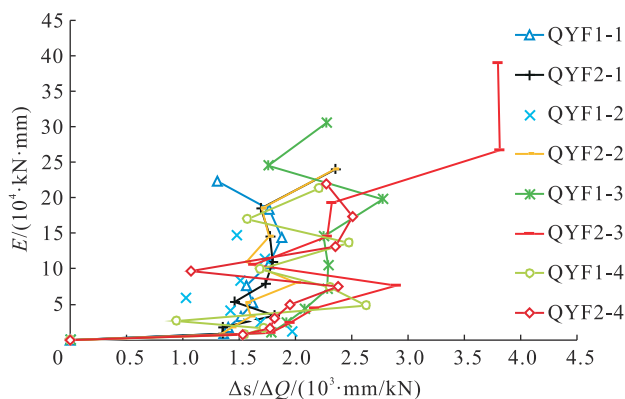
Fig.5 $Q-s$ curves of rock-socketed pile

对于泥岩区嵌岩基桩,在桩端压力作用下,桩端岩体软化而发生沉降,由于受到桩周岩体、桩体的共同约束作用,在达到嵌岩桩基础的极限

承载力前,桩端岩体经历软化、硬化的交替变化,总体的变形量小,不会出现嵌岩桩基础的桩顶位移突变,变形模量(弹性模量)变化较小,可以

假定岩体模量不变。因此,根据本文第2部分饱和泥岩蠕变的强度参数衰减特性和文献[21]研究结果,将该工程I阶台地的饱和泥岩的黏聚力降低10%,内摩擦角降低20%,分别对4种桩型嵌岩桩基础进行有限元极限分析。结果表明,考虑泥岩蠕变作用,大直径嵌岩基桩的 Q - s 曲线在极限荷载之前与未考虑蠕变作用的基桩 Q - s 曲线比较接近,其后嵌岩桩的桩顶位移增大。经判定,各单桩的长期极限承载力分别为10 800 kN (QY-1)、10 800 kN (QY-2)、9 600 kN (QY-3)、7 490 kN (QY-4),较嵌岩桩静载荷试验判定的极限承载力降低了10%~30%,见表4。

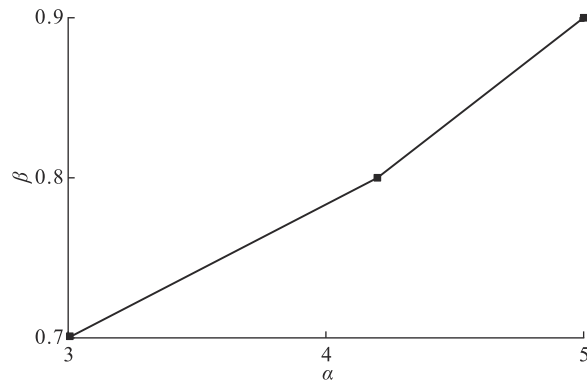
$\Delta s/\Delta Q$ - E 曲线见图6。在基桩达到极限承载力之前,泥岩发生蠕变后的 $\Delta s/\Delta Q$ - E 曲线(QYF2-1~QYF2-4)与静载荷试验的 $\Delta s/\Delta Q$ - E 曲线(对应QYF1-1~QYF1-4)相比呈现如下特征:在较小的桩顶荷载作用时,天然状态、饱和状态泥岩嵌岩桩基础 $\Delta s/\Delta Q$ - E 曲线较为接近;当嵌岩桩基桩的深径比减小时,饱和状态下发生蠕变的泥岩嵌岩桩与天然状态泥岩嵌岩桩相比,在相同桩顶势能下,两者的单位荷载位移增量差异显著。在嵌岩桩基础达到极限承载力后,天然状态、饱和状态的泥岩嵌岩桩基础的 $\Delta s/\Delta Q$ - E 曲线,均出现桩顶势能下的单位荷载位移增量增大的现象。说明在长期荷载作用下,饱和状态泥岩出现蠕变后,改变了原有岩体的应力场分布特征,导致嵌岩桩基础承载性状改变。

图6 $\Delta s/\Delta Q$ - E 曲线Fig.6 $\Delta s/\Delta Q$ - E curves

(3) 嵌岩深径比对长期承载力影响

考虑泥岩蠕变作用的单桩长期承载力与现场静载荷试验判定的单桩承载力之比定义为长期承载力衰减系数 β ,4种桩型的大直径嵌岩桩的 α - β 曲线见图7。考虑泥岩蠕变作用的嵌岩基桩长期承载力衰减系数随嵌岩深径比的增大而减小,总体呈指数函数关系(I象限)。 $\alpha=3$ 时,泥岩蠕变作用下

的嵌岩桩基础长期承载力较无蠕变条件的嵌岩桩基础承载力降低约30%。嵌岩段长度达到5倍桩径时($\alpha=5$),单桩极限承载力判定值约衰减10%,饱和泥岩对嵌岩基桩极限承载力的影响较小。

图7 α - β 曲线Fig.7 α - β curve

4 结论

本文依托嘉陵江I阶台地某超高层建筑的大直径嵌岩桩基础工程,综合采用岩石力学试验方法、静载荷试验方法、有限元极限分析方法,研究了泥岩蠕变对大直径超长嵌岩基桩极限承载力的影响,得出如下结论。

(1) 通过岩样蠕变试验,嘉陵江I阶台地丰水期中风化泥岩在饱和状态的强度参数较平水期天然状态的强度参数低,黏聚力下降7.73%,内摩擦角下降19.58%。

(2) 泥岩蠕变将引起大直径嵌岩基桩长期极限承载力衰减,对于本文研究的直径1.2 m的大直径嵌岩基桩,其静载荷试验判定极限承载力降低了10%~30%。

(3) 嵌岩基桩长期承载力衰减系数随嵌岩深径比的增大而减小,深径比达到5时,单桩极限承载力判定值约衰减10%,建议泥岩区大直径嵌岩基桩深径比大于5。

目前,嵌岩桩静载荷试验受到载荷试验风险大、费用高等限制,长期承载力的研究工作只能借助建筑沉降监测分析和基桩数值极限分析手段。未来仍然需要探索解决基桩长期承载性状的监测分析方法,为特殊岩体区域的嵌岩基桩安全设计奠定基础。

参考文献(References):

- [1] SKEJIĆ A, GAVRIĆ D, JURIŠIĆ M, et al. Experimental and numerical analysis of axially loaded bored piles socketed in a conglomerate rock mass[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(10): 6339-6365.

- [2] 王金玺, 唐红, 许将, 等. 较破碎岩石地基中嵌岩桩竖向承载力分析[J]. 工程勘察, 2023, 51(2): 31-37.
WANG Jinxi, TANG Hong, XU Jiang, et al. Analysis on vertical bearing capacity of rock-socketed pile in relatively broken rock foundation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2023, 51(2): 31-37.
- [3] CHEN H Y, FENG Z J, WU M, et al. Study on the vertical bearing performances of piles on karst cave[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 4944.
- [4] JIANG N, GUO P P, ZHANG H, et al. Mechanical behavior of a new similar material for weathered limestone in karst area: an experimental investigation[J]. Applied Rheology, 2023, 33(1): 154.
- [5] SHENG M H, LU F Q, JIANG N, et al. Bearing behavior of pile foundation in karst region: physical model test and finite element analysis[J]. Applied Rheology, 2024, 34(1): 20230115.
- [6] CHEN Y F, AI Z Y, MA Z G, et al. Time-dependent behavior of vertically loaded rock-socketed piles in multilayered saturated viscoelastic rock-soil mass[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 172: 106438.
- [7] 蔡行, 黄质宏, 穆锐, 等. 贵州地区中风化泥岩嵌岩桩承载特性分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2020, 37(5): 102-107, 113.
CAI Hang, HUANG Zhihong, MU Rui, et al. Analysis of the bearing capacity of the socketed piles in moderately-weathered mudstone in the area of Guizhou[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2020, 37(5): 102-107, 113.
- [8] 王田龙, 詹黔花, 帅海乐, 等. 嵌岩桩及较破碎岩石桩基影响系数探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 312-318.
WANG Tianlong, ZHAN Qianhua, SHUAI Haile, et al. Study on coefficients for rock-socketed piles and less-fragmentized rock pile foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 312-318.
- [9] ZHAO Y L, ZHANG C S, WANG Y X, et al. Shear-related roughness classification and strength model of natural rock joint based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 137: 104550.
- [10] LIANG Y, ZHANG J L, XU B, et al. Influential mechanisms of roughness on the cyclic shearing behavior of the interfaces between crushed mudstone and steel-cased rock-socketed piles[J]. Buildings, 2025, 15(1): 141.
- [11] ZHAO X L, MELENTIJEVIC S, SHEN Y P, et al. Experimental study of the effects of the void located at the pile tip on the load capacity of rock-socketed piles[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 15795.
- [12] MURALI A K, HAQUE A, BUI H H. A new experimental technique to investigate the load-bearing mechanisms of smeared rock-socketed piles using in situ X-ray CT imaging[J]. Geotechnical Testing Journal, 2024, 47(2): 445-465.
- [13] MURALI A K, TRAN K M, HAQUE A, et al. Experimental and numerical investigation of the load-bearing mechanisms of piles socketed in soft rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(9): 5555-5576.
- [14] LI S Y. Research on rapid construction technology of deep water rock-socketed bridge foundation[J]. Journal of Electrical Systems, 2024, 20(2): 1729-1739.
- [15] KOMAZAWA T, HARADA O, INAZUMI K. Installation of steel pipe piles and steel pipe sheet pile for bridge foundation using vibratory inner-excavation method (NB SYSTEM) [C]// Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. Singapore: Springer Singapore, 2020: 451-458.
- [16] MISHRA A, SAWANT V A, DESHMUKH V B. Prediction of pile capacity of socketed piles using different approaches[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(6): 5219-5230.
- [17] HUANG M, JIANG S, XU C S, et al. A new theoretical settlement model for large step-tapered hollow piles based on disturbed state concept theory[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 124: 103626.
- [18] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 22-24.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 17-18.
- [20] 程凌刚, 刘冈朋, 白江涛, 等. 大直径嵌岩桩极限承载力判定的对比研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(6): 656-661.
CHENG Linggang, LIU Gangpeng, BAI Jiangtao, et al. Study on determinations of ultimate bearing capacity of large diameter rock-socketed pile[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2024, 43(6): 656-661.
- [21] 王闰超. 巴东组泥岩蠕变力学特性及边坡变形与支护的时效性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018: 44-45.