



富宁港软岩桩基承载特性模型试验成果 及数值分析

周世良, 李克森, 关英俊, 李 怡

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 水库周期性蓄水调度, 导致库岸软岩地基的工程力学特性发生较大变化, 直接影响桩基承载性能的长期有效性。通过对4种不同工况地基模型下的桩基竖向承载特性进行试验研究, 得出了软岩嵌岩桩的桩身轴力、桩侧摩阻力、桩端阻力特性。结合物理模型实测成果, 采用数值模拟分析了3种工况下桩基竖向承载力、桩身轴力和桩侧摩阻力的变化趋势, 为内河库区港口工程软岩桩基设计和承载能力评价提供理论依据。

关键词: 模型试验; 软岩桩基; 荷载试验; 数值模拟

中图分类号: U 656.1; U 656.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0168-05

Test and numerical modeling of piles socketed in weak rock of Funing port

ZHOU Shi-liang, LI Ke-sen, GUAN Ying-jun, LI Yi

(National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The periodical reservoir operation leads to a great change of physical properties of soft rock, thus affects the long-term load-bearing capacity of a rock-socketed pile. This paper investigates the axial load bearing capacity of rock-socketed pile with physical models under four working conditions, and gets the characteristics of axial force, pile side friction and end resistance of piles socketed in weak rock. On the basis of test data, this paper also conducts a 3D elasto-plastic finite element analysis for the axial bearing capacity, shaft friction, and end resistance of the piles with different lengths and diameters under three working conditions, which can provide a theoretical basis and a practical method for designing piles socketed in weak rock in inland river reservoirs.

Key words: physical model; pile socketed in weak rock; loading test; numerical modeling

嵌岩桩的竖向承载力由桩侧摩阻力和桩端阻力两部分组成, 国内外对其承载特性的研究主要围绕着这两部分展开。进行嵌岩桩承载特性研究, 现场荷载试验是一种常用方法。程晔等^[1]通过自平衡试验法解决了大吨位软岩扩底桩承载力测试难题, 对试验数据进行对比分析结果表明, 浸水对软岩桩基的承载性能有较大的削弱。另一方面, 采用模型试验和数值模拟的方法进行嵌岩桩承载特性研究。叶琼瑶^[2]介绍了一种在三轴仪上进行的软岩嵌岩桩模型试验的方法。王耀辉等^[3]采用

物理模型试验得出桩-岩石交界面上的摩阻力是不均匀分布的。熊智彪等^[4]针对红砂岩地区嵌岩桩的桩-岩界面摩阻特性进行现场模型试验, 得出红砂岩嵌岩桩的破坏模式为突变型破坏; 桩侧摩阻力分布模式呈波动式的上大小下小型分布; 红砂岩软化使得桩基承载力和侧摩阻力变小。

随着云南省高原库区港口工程的建设, 软岩嵌岩桩由于岩石强度的时变效应其承载性能的变化趋势成为港口工程建设中的关键问题。现有研究工作不论是现场载荷试验还是模型试验, 都发

收稿日期: 2012-09-29

作者简介: 周世良(1972—), 男, 博士后, 教授, 从事水工结构、岩土工程方面的研究与教学工作。

现浸水对软岩桩基承载性能有削弱作用,但至今未见系统的软岩强度的时变对软岩嵌岩桩承载性能影响的研究成果。鉴于此,本文在现场取样并通过材料力学试验,测试岩石力学性质的时变效应的基础上采用模型试验和数值模拟的方法对软岩嵌岩桩竖向承载特性变化规律进行了系统的研究,并提出了相应的工程对策。

1 模型试验设计

模型试验设计包括岩石力学特性劣化试验研究、模型试验尺寸的确定、试验规划、地基模型设计、桩基模型设计、仪器设备与试验加载等几方面,具体内容参考文献[5]。

2 试验成果

2.1 荷载-位移曲线特性分析

4组模型桩均在养护1周后进行竖向加载试验。从图1中可以看出,第1,2,3组嵌岩桩桩顶位移很小,在桩的弹性受荷阶段,荷载-位移曲线呈直线且相对平滑。27 kN, 24 kN, 20 kN分别是其模型桩荷载-位移曲线的转折点对应的桩顶荷载,至此级荷载后桩由弹性受荷阶段进入弹塑性受荷阶段,桩身应变计失效。由于第4组地基模型强度极低,已失去了嵌岩桩的特性,承载力与其余3组相比亦大幅度降低。

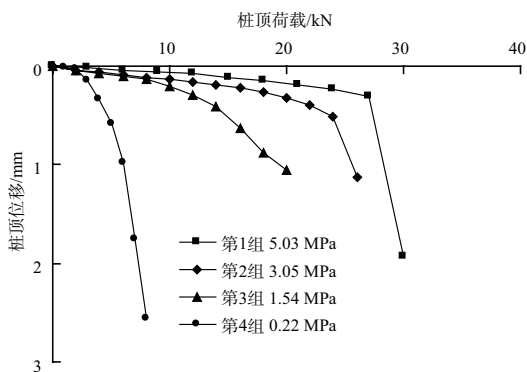


图1 荷载-位移曲线

随着地基模型强度的降低,模型桩极限承载力降低幅度由小到大(图2)。随着岩体强度的降低桩的承载力发挥程度却在增加,致使嵌岩桩的承载力未出现很大的降幅,只有岩体强度的进一步降低直至失去岩石的特性,其承载力才出现大

幅下降。这符合龚维明等通过分析国内外65根具有代表性的嵌岩桩试桩实测数据与现行计算方法之间的关系,得出的“软岩嵌岩桩承载力的发挥程度比硬质岩嵌岩桩要高”^[6]的结论。

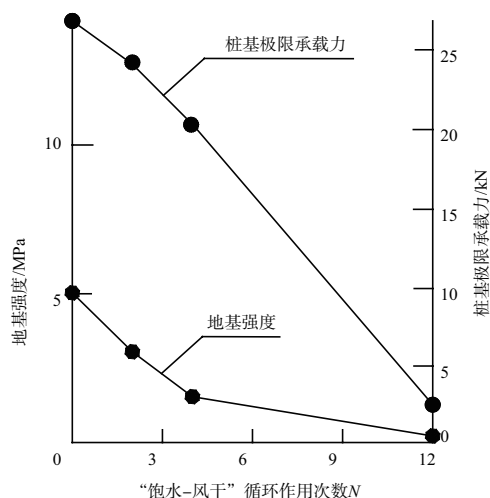
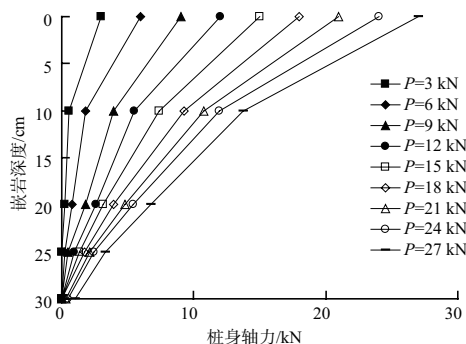


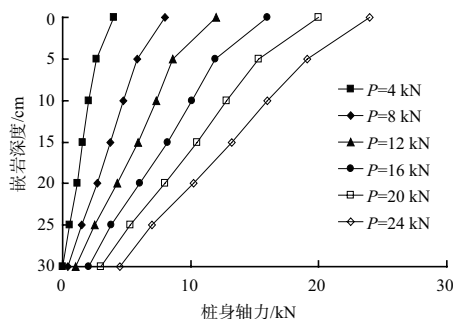
图2 地基强度与桩基承载力变化趋势对照

2.2 桩身轴力曲线对比分析

桩身轴力分布曲线(图3)所表示的桩身内力特性均处于弹性受荷阶段,其随着嵌岩深度的增加而递减,由于此阶段桩端阻力还未开始显著发挥作用,曲线末端趋于集中。第4组试验地基模型强度极低,不具备嵌岩桩特性,没有列入分析。



a) 第1组 ($\sigma_{cmax}=5.03$ MPa)



b) 第2组 ($\sigma_{cmax}=3.05$ MPa)

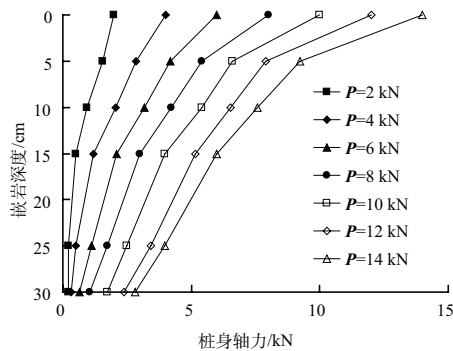
c) 第3组 ($\sigma_{cmax}=1.54$ MPa)

图3 桩身轴力分布曲线

2.3 桩侧摩阻力特性

由图4可知,模型桩桩侧摩阻力出现“上大小”的分布,模型桩桩侧极限摩阻力的发挥所需的位移极小,最大一组的位移仅有0.514 mm。

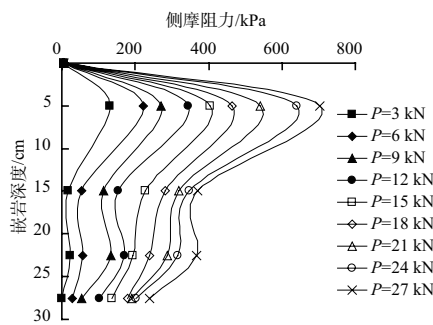
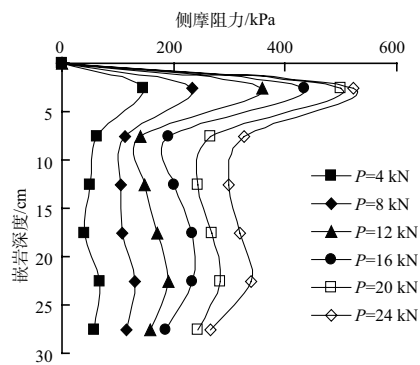
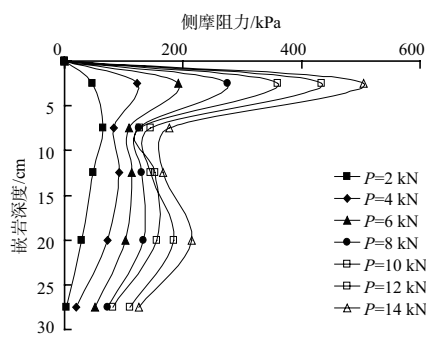
a) 第1组 ($\sigma_{cmax}=5.03$ MPa)b) 第2组 ($\sigma_{cmax}=3.05$ MPa)c) 第3组 ($\sigma_{cmax}=1.54$ MPa)

图4 桩侧摩阻力分布曲线

图5表明在桩的弹性受荷阶段,桩侧摩阻力承担了所有桩顶荷载,这时桩侧摩阻力平均值与桩顶荷载呈线性关系,当桩进入弹塑性受力阶段后,桩端阻力开始发挥作用,但是桩侧摩阻力随着桩身位移的增加,第1,3组模型桩呈加工硬化现象,第2组模型桩则呈脆性破坏(即呈加工软化现象),这与桩-岩界面的粗糙程度相关^[7]。

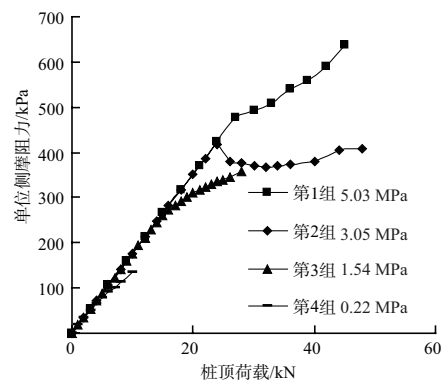


图5 单位摩阻力与桩顶荷载的关系

桩侧摩阻力的极限值随着地基模型强度的降低而降低,桩侧平均单位极限摩阻力降低幅度由小变大。

2.4 桩端阻力特性

第1组模型桩由于在桩底加了1 cm厚的砂垫层,影响了桩端阻力的发挥。当桩基受力处于弹塑性阶段时,第1组模型桩桩端阻力所占桩顶荷载的比例为20%,其余各组模型桩桩端阻力所占桩顶荷载的比例最高可达50%以上。由此看见砂垫层会降低桩端阻力的发挥水平并增大桩顶位移。第4组模型桩桩端由于岩体屈服,随着桩顶荷载与位移的增加桩端阻力逐渐趋于稳定(图6)。

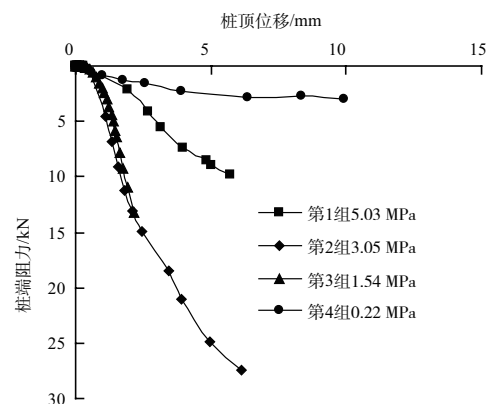


图6 桩端阻力与桩顶位移的关系

3 数值模拟

数值模拟采用ABAQUS有限元软件建模计算,桩岩界面采用绑定约束^[8]。为了简化模型,假定:地基岩体是均质、各向同性的地下空间半无限体;桩身混凝土是均匀且各向同性的弹性体;选择已有的岩(土)体本构模型Mohr-Coulomb模型来模拟桩周岩体。在岩体的侧面和底面均按要求设置了位移约束边界条件(图7)。

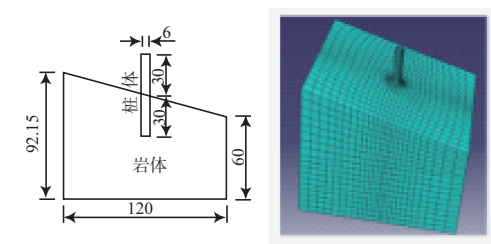


图7 数值模型(单位: cm)

3.1 有限元模型参数取值及网格划分

岩体参数根据地基模型的实测参数拟定取值范围,并将计算得到的荷载-位移曲线与模型实测得到的曲线进行比较(图8),得到最佳拟合情况下的参数组合^[5],结果见表1。桩身混凝土为C30,弹性模量为 $E_p=17\ 000\text{ MPa}$,泊松比为 $\mu=0.2$,密度 $\rho=2.45\text{ t/m}^3$ 。选取的边界条件及单元划分见图7。桩体和岩体均采用三维实体八节点减缩积分单元C3D8R。

3.2 数值模拟结果分析

由图8可见,因为数值模型不考虑沉渣影响,所得出的荷载-位移曲线为缓变形曲线。与模型实

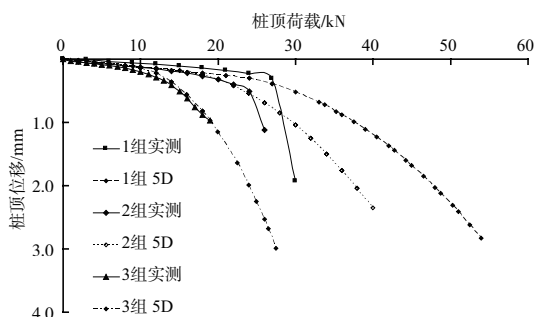


图8 数值模型桩荷载-位移曲线

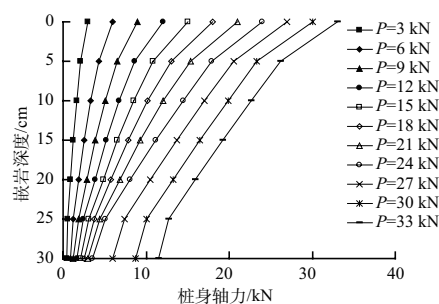
表1 岩体材料参数

组别	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	粘聚力 c/MPa	变形模量 E_m/MPa
1	25.44	0.30	700
2	19.60	0.23	600
3	18.96	0.10	500

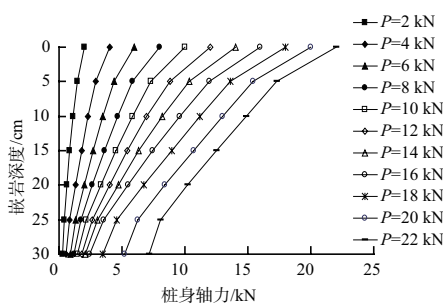
测曲线对比也可反映出桩端砂垫层及桩端荷载传感器与其防水措施之间的间隙对嵌岩桩受力特性的影响。第3组物理模型桩采取措施预先消除了桩端荷载传感器与其防水措施之间的间隙,因此物理模型与数值模拟所得曲线相似合程度较高。

图9中数值模拟桩弹性受力阶段桩身轴力变化曲线与模型实测所得规律相同。桩进入弹塑性受力阶段桩身轴力变化曲线接近平行,桩端阻力开始显著发挥且与桩顶荷载增幅相当,这时与其对应的桩侧摩阻力分布曲线集中于一束(图10),说明桩侧摩阻力亦达到极限。

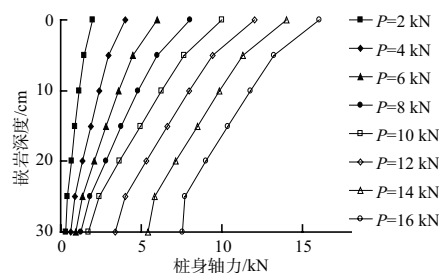
数值结果表明可以近似以Mohr-Coulomb模型来模拟桩周岩体,以绑定约束来模拟软岩嵌岩桩与桩周岩体的接触来分析基于水岩相互作用的软岩嵌岩桩承载特性。



a) 第1组 ($c=0.30\text{ MPa}$)



b) 第2组 ($c=0.23\text{ MPa}$)



c) 第3组 ($c=0.10\text{ MPa}$)

图9 数值模型桩轴力变化曲线

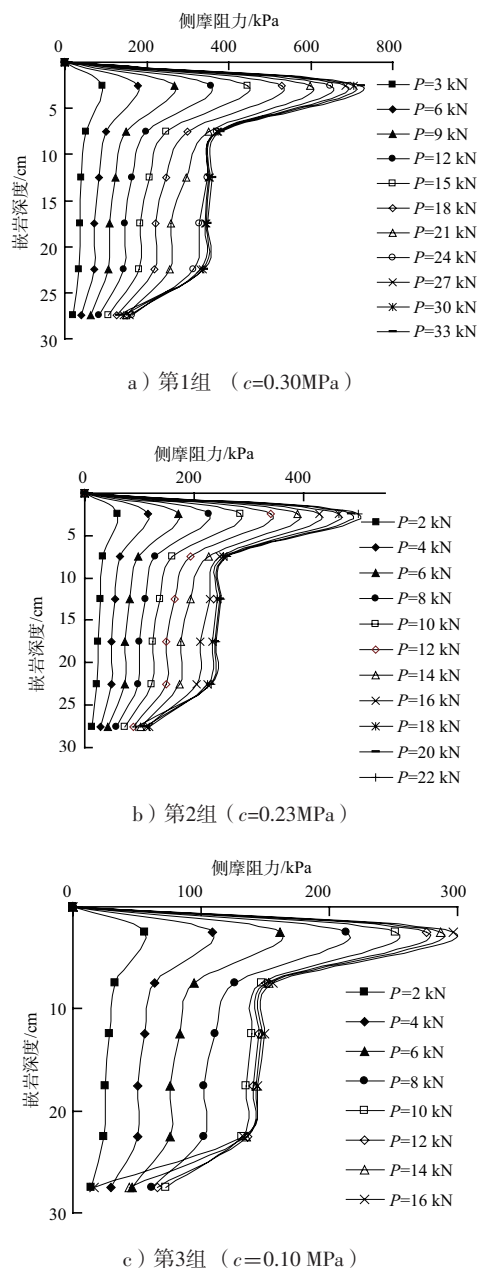


图10 数值模型桩侧摩阻力分布

4 结论

通过岩石力学特性劣化试验、材料力学试验、模型试验与数值模拟对高原库区软岩嵌岩桩承载特性进行了研究,得到如下结论:

1) 库岸软岩工程力学性质在周期性水位变动下存在显著时变效应,随着“饱水-风干”循环作用次数增加呈现先快后慢的劣化趋势。

2) 软岩嵌岩桩承载特性随软岩工程力学性质的劣化而发生改变。随着岩体强度的降低,桩侧极限摩阻力减大幅度先小后大;模型桩极限承载力降低幅度亦由小到大,均与泥岩的劣化趋势相反。数值模拟与物理模型试验结果表明,可以用两种模型相结合的方法来分析基于水岩相互作用的软岩嵌岩桩承载特性。

3) 内河库区港口工程软岩嵌岩桩设计方法与承载力评价应根据水库蓄水调度和建筑物使用年限考虑岩石力学性质的时变效应对软岩嵌岩桩承载特性产生的影响,特别要防止在使用一定年限后,桩基承载力大幅降低对结构产生的危害。

参考文献:

- [1] 程晔, 龚维明, 戴国亮, 等. 软岩桩基承载性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 165-172.
- [2] 叶琼瑶, 黄绍铿. 软岩嵌岩桩的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 461-464.
- [3] 王耀辉, 谭国焕, 李启光. 模型嵌岩桩试验及数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1691-1697.
- [4] 熊智彪, 王启云, 谷淡平. 红砂岩嵌岩桩模型试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(4): 92-95.
- [5] 周世良, 李克森, 关英俊. 富宁港软岩桩基承载特性模型试验设计[J]. 水运工程. 2012, 463(4): 144-148.
- [6] 龚维明, 戴国亮. 大直径深长嵌岩桩承载机理研究与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [7] Williams A F, Pells P J N. Side resistance in sockets in sandstone mudstone and shale[J]. Can Geotech, 1981, 18: 502-513.
- [8] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

(本文编辑 武亚庆)