



周期性潮位下碎石桩复合地基 岸坡稳定性分析

龚永康¹, 李嘉豪²

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;

2. 南昌航空大学 土木建筑学院, 江西南昌 330063)

摘要: 针对碎石桩复合地基布置对岸坡整体稳定性的影响, 进行数值建模分析及现场试验。采用 Geostudio 有限元软件结合某碎石桩复合地基岸坡工程实例进行模拟计算的方法, 分析不同碎石桩间距、施打范围以及周期性潮位变化对岸坡稳定的影响, 同时开展海侧前沿增加碎石桩的试验段对比监测。结果表明, 碎石桩间距变化对岸坡稳定性影响较小, 周期性潮位变化下海侧安全系数的浮动区间较陆侧大, 岸坡前沿增大碎石桩施打范围有利于护岸整体的稳定。在不改变桩径及桩间距的条件下, 在岸坡海侧前沿加宽一定的碎石桩范围, 可增强滑动面内的复合地基整体抗剪强度比例, 达到提高海侧岸坡稳定性效果。

关键词: 软土地基; 岸坡; 碎石桩; 稳定分析

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0164-06

Stability of bank slope of composite foundation with gravel pile under periodic tide level

GONG Yong-kang¹, LI Jia-hao²

(1. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Regarding the influence of the arrangement of gravel pile composite foundation on the whole stability of bank slope, numerical modeling analysis and field test are carried out. Using the method of Geostudio finite element software combined with the slope engineering example of a gravel pile composite foundation for simulation calculation, the influence of different gravel pile spacing, driving range and periodic tidal level changes on the stability of the bank slope is analyzed. Meanwhile, the comparative monitoring of the test section of adding gravel pile at the sea front is carried out. The results show that the variation of gravel pile spacing has little influence on the stability of bank slope, the floating range of safety coefficient on the sea side is larger than that on the land side under periodic tidal level variation, and increasing the range of gravel pile in front of bank slope is conducive to the overall stability of bank protection. Under the condition of not changing the pile diameter and pile spacing, widening the scope of gravel pile on the front of the seaside bank slope can enhance the overall shear strength ratio of composite foundation in the sliding surface, and achieve the effect of improving the stability of the bank slope.

Keywords: soft soil foundation; bank slope; gravel pile; stability analysis

收稿日期: 2022-05-10

作者简介: 龚永康(1983—), 男, 高工, 注册岩土工程师, 从事岩土工程勘测研究。

近年来, 随着国内海上交通运输的快速发展, 在软土基础上修建了大量的港口和码头, 但由于软土承载能力差、施工时期沉降速率大等问题, 使得沿海岸坡的稳定性成为关注的重点。粒料桩复合地基^[1]、堆载预压^[2]、真空排水固结法^[3]等都被用来解决软土地基承载能力低的问题。其中碎石桩是以碎石为主要材料制成的复合地基加固桩, 因其施工期短, 施工后沉降小等优点而被广泛使用, 但其稳定性问题仍没有彻底解决, 由于复合基础中碎石桩与周边土体的强度不同, 在水平与竖向力共同作用下容易出现压缩、拉伸、剪切^[4]以及弯曲破坏, 从而导致失稳现象时有发生。吴莹^[5]分析碎石桩复合地基固结的原理和计算方法, 并给出了碎石桩复合地基与复合土体的稳定性验算方法。本文结合东南沿海某岸坡工程实例, 采用 Geostudio^[6]有限元软件中 Slope 与 Seep 模块对岸坡进行数值模拟分析, 分别探究复合地基碎石桩的间距与施打范围对岸坡稳定性影响以及周期水位变化下岸坡的稳定性分析, 给出最优碎石桩

的间距与布置方案, 并通过现场监测数据佐证分析结果。

1 工程概况

我国东南沿海某护岸工程护岸长约 300 m, 护岸下软基主要为淤泥质土与砂混淤泥, 下部为粉质黏土, 土体参数见表 1。考虑到地基承载能力较差, 施工期为防止出现岸坡失稳的现象, 采用振动沉管碎石桩形成复合地基对岸坡进行加固处理, 陆域地基处理区域采用塑料排水板加固。对于岸坡区域, 首先在淤泥质土层上铺设土工布和土工格栅各 1 层, 回填中粗海砂到 3.5 m 高程, 在砂层上施打碎石桩, 碎石桩直径 1.0 m, 正方形布置, 间距 2.5 m, 长度为打穿淤泥质土、砂混淤泥等软土层, 至粉质黏土层顶面。而后铺设碎石及二片石垫层、分层抛填堤心石至护岸堤顶设计高程 8.3 m。对于陆域软基区域, 在回填中粗海砂层表面施打塑料排水板, 正方形布置, 间距 1.0 m, 长度同碎石桩, 上部回填开山土石, 直至堤顶高程。

表 1 土层物理力学参数

土层	平均层厚 H/m	压缩模量 $E_{s(1-2)}/\text{MPa}$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	标准贯入击数 N	十字板剪切强度 C_u/kPa	地基承载力特征值 f_{ak}/kPa
淤泥质土	17.2	2.39	15.0	16.5	1~3	11.0	50.0
砂混淤泥	7.1	3.58	1.5	30.0	3~8	-	80.0
粉质黏土	8.9	7.50	39.0	21.0	10~25	-	180.0

2 模型计算及实测对比

数值分析采用 Geostudio 岩土软件, 其中 Slope 模块采用 Bishop 法对不同土体类型和复杂滑移面的边坡形状进行建模分析, 其根本原理是圆弧滑动面分析、下滑力与抗滑力的关系比较。以库仑强度理论为基础的分析方式, 通过与 Seep 模块瞬态浸润线的耦合得到更符合实际值的不同孔压下的安全系数。

2.1 几何模型

选择典型岸坡及地基处理断面建立几何模型, 见图 1, 左侧为海侧, 淤泥质土层厚度 15 m, 砂

混淤泥土层厚度 10 m, 在淤泥质土层顶部设有块石及碎石的反压平台, 坡比 1:3, 宽度 16 m。护岸堤顶高程 8.3 m, 外侧平台高程 4.9 m, 堤身两侧坡比均为 1:1.5, 外侧平台及堤身宽度 32 m, 下部 A 区碎石桩直径 1.0 m, 正方形布置, 间距 2.5 m, 深度自回填砂顶到粉质黏土层顶, 为 28.5 m。最右侧为陆域地基处理区域 B 区, 碎石桩正方形布置, 间距 1.0 m, 长度同碎石桩。设计高、低水位分别为 6.83、0.54 m。对侧向边界限制水平位移, 底部边界同时限制水平和竖向位移。

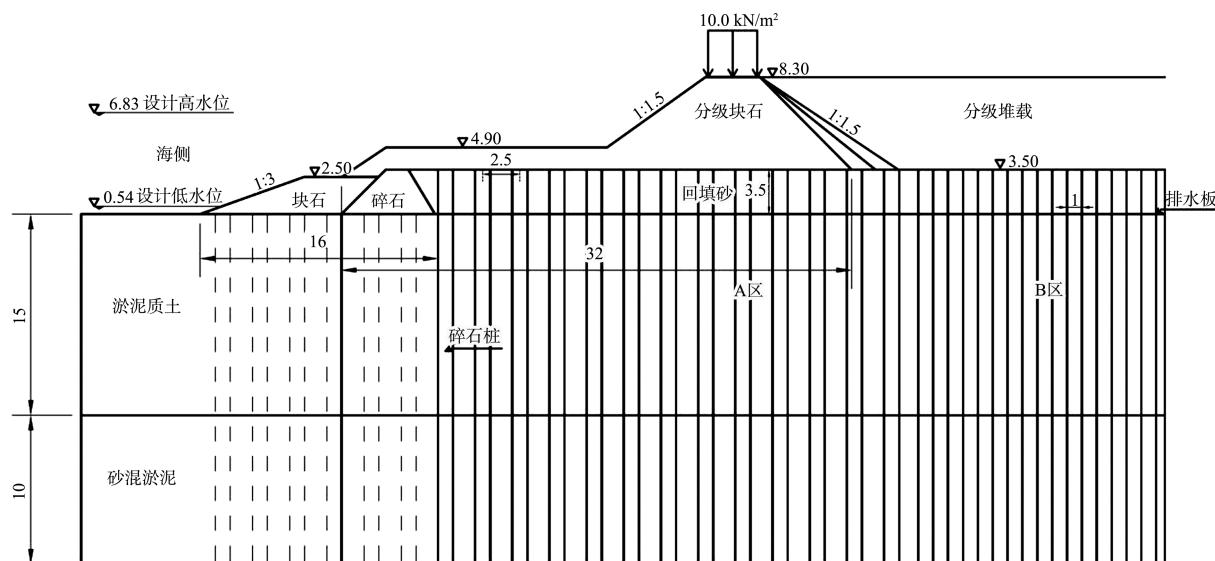


图 1 岸坡及地基处理断面 (单位: m)

2.2 计算参数

采用摩尔-库仑本构模型对护岸的稳定性进行

分析。根据地质资料, 材料参数见表 2。

表 2 各材料参数选值

名称	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	浮密度 $\rho_{sat}/(g \cdot cm^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	渗透系数 $K/(m \cdot s^{-1})$	含水率 $w/\%$
块石	1.70	1.00	45.0	0	7.0×10^{-3}	10
海砂	1.80	0.90	28.0	0	3.0×10^{-4}	15
碎石桩	1.60	0.80	35.0	0	3.0×10^{-3}	12
淤泥质土	1.76	0.76	16.5	15	6.0×10^{-7}	45
砂混淤泥	1.80	0.80	1.5	30	5.0×10^{-5}	38

碎石桩复合地基整体抗剪考虑把碎石桩和桩间土作为改良土体, 得到整体改良土体的摩擦角和黏聚力, 进行强度和稳定性分析^[7]。根据 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》, 复合土层的抗剪强度标准值按下式计算:

$$\tan\varphi_{sp} = m\mu_p \tan\varphi_p + (1-m\mu_p) \tan\varphi_s \quad (1)$$

$$\mu_p = \frac{n}{1+(n-1)m} \quad (2)$$

$$c_{sp} = (1-m)c_s \quad (3)$$

式中: φ_{sp} 为复合土层内摩擦角标准值; m 为面积置换率, $m=d^2/d_e^2$, d 为桩身平均直径, d_e 为单桩等效圆直径, 正方形布置时 $d_e=1.13s$, s 为桩间距); μ_p 为应力集中系数; φ_p 为桩体材料内摩擦角标准值; φ_s 为桩间土内摩擦角标准值; c_{sp} 为复合土层黏聚力标准值; c_s 为桩间土黏聚力标准值; n 为桩土应力比, 土坡和地基稳定计算时宜取

1.0~2.0, 附加应力小时取低值, 反之取高值。根据规范, 砂桩复合地基考虑桩间土的强度增长, 碎石桩则不考虑。

碎石桩体是提高复合地基承载能力的主要因素, 同时外侧的潮位变化对岸坡的稳定性也产生影响。设计高、低水位分别为 6.83、0.54 m, 本海域属于正规半日潮, 考虑外侧潮位变化下的极限瞬态稳定分析, 模型假设潮位按设计高、低水位呈往复周期性变化, 见图 2。

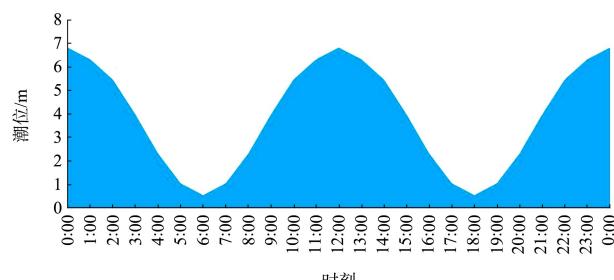


图 2 岸坡外侧潮位变化曲线

2.3 计算结果

2.3.1 岸坡海侧前沿不增加碎石桩情况

如图3所示, 对典型断面桩间距取1.0、1.5、2.5、3.0、4.0 m 5档进行计算(不考虑水位变化), 计算结果显示陆侧的安全系数均大于海侧, 加桩后两侧的安全系数大幅提升, 说明碎石桩的设置有利于提高岸坡的整体稳定性。但随着桩间距的增加, 两侧的安全系数均呈下降趋势。海侧的安全系数从最大值1.45降至1.35, 陆侧的安全系数从最大值1.94降至1.83。

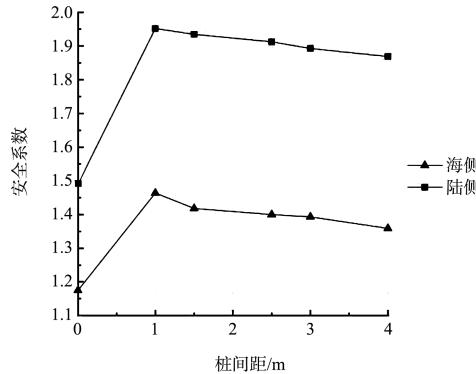


图3 不同桩间距下的安全系数

对于潮位周期变化下的稳定性分析, 结合图2分别选取无桩状态与桩间距1.5、2.5、4.0 m进行对比计算, 见图4。结果表明, 1)无桩状态下陆侧安全系数的浮动区间小于加桩状态, 分析原因是由于淤泥质土层的渗透性较小, 在不加桩的情况下, 陆侧浅层基础的孔隙水压力变化较小, 当进行碎石桩处理时, 浅层基础的渗透能力增大, 故陆侧浅层基础的孔隙水压力变化区间相对增大, 导致陆侧安全系数的浮动区间增大。2)瞬态的水位变化对于海侧和陆侧有不同的影响, 海侧的安全系数随着水位上升而增大, 反之则下降, 陆侧则与海侧相反。从图中可以看出水位变化对于海侧影响较大, 安全系数变化幅度较大, 水位涨至设计高水位时安全系数最大, 均大于2.0, 水位下降至设计低水位时处于安全系数最小。水位变化对于陆侧的影响相对较小, 陆侧安全系数的浮动区间较小, 均处于稳定状态。3)当水位下降至设计低水位时, 海侧的安全系数均达到最小值, 其中桩间距为2.5 m时最大, 安全系数为1.235, 但仍小于安全系数规范值1.25, 且在无桩状态以及

桩间距1.5 m时, 安全系数下降至1.0附近, 处于极限稳定状态, 出现极端天气及瞬时加载时可能有失稳现象的发生, 因此需考虑进行增强处理。

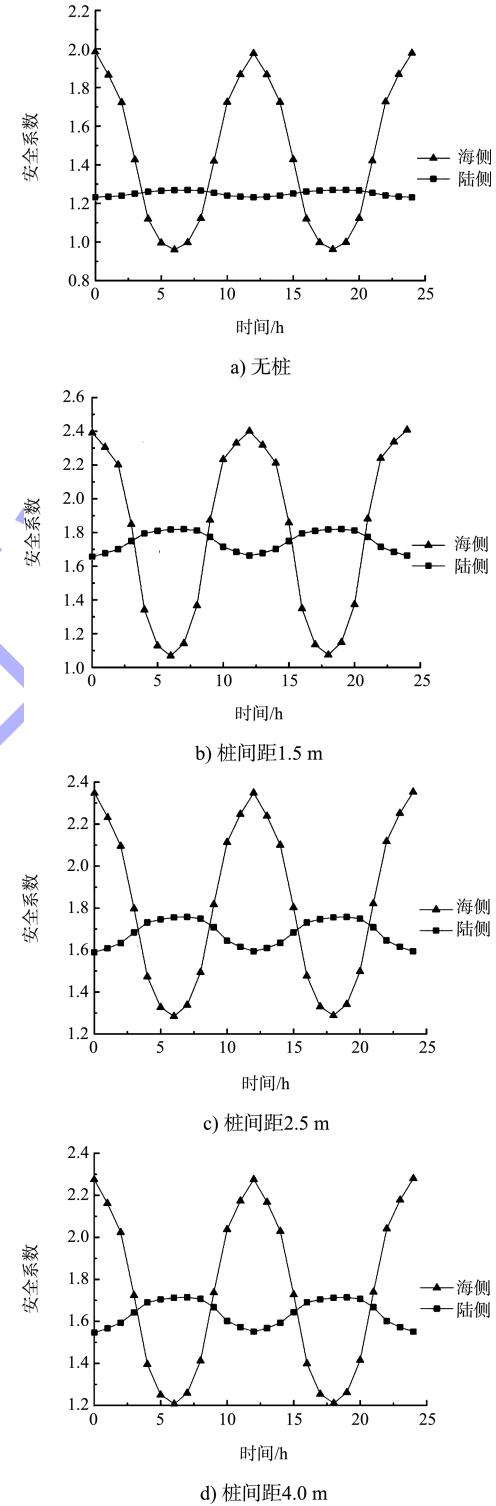
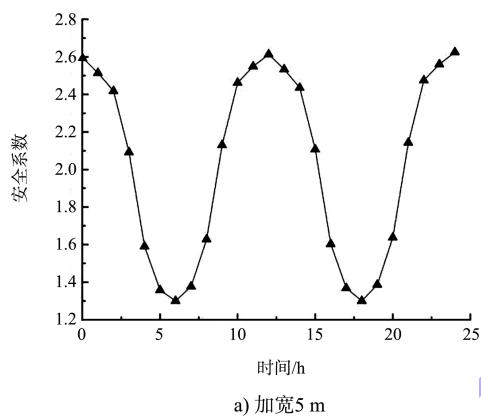


图4 不同桩间距潮位周期变化下的安全系数

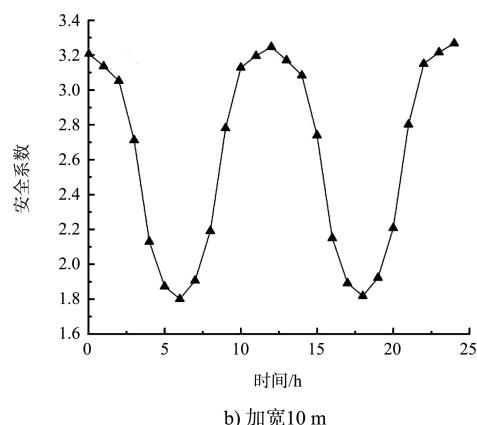
2.3.2 岸坡海侧前沿增加碎石桩情况

根据前文计算结果, 周期性水位变化下海侧的安全系数极小值小于规范值1.25且有下降的趋势,

可能出现局部失稳现象；同时，桩间距的变化对岸坡海侧的安全系数影响较小，因此对岸坡海侧前沿进行加桩处理。桩间距 2.5 m 时海侧的安全系数最接近规范值，故以桩埋深 28.5 m、间距 2.5 m 为几何模型进行加桩模拟计算，并对岸坡海侧前沿加桩施打范围加宽 5、10 m 两种情况进行稳定计算分析，结果见图 5。加桩后海侧的安全系数上涨明显，根据计算结果可知，加宽 10 m 时的海侧岸坡更稳定，安全系数最小值为 1.75；加宽 5 m 时海侧安全系数最小值为 1.28，均大于规范值 1.25。



a) 加宽5 m



b) 加宽10 m

图 5 碎石桩不同施打范围的海侧安全系数

2.4 现场对比试验

为了比较岸坡海侧前沿增加碎石桩对整体稳定性的影响，在典型断面附近各选择 10 m 长的堤段进行试验段对比监测，甲区不增设碎石桩，乙区在岸坡海侧前沿加宽 10 m 范围的碎石桩，监测表层沉降及深层水平位移(测斜)，监测设备安装断面见图 6，监测成果见图 7，试验时长约 2 个月。

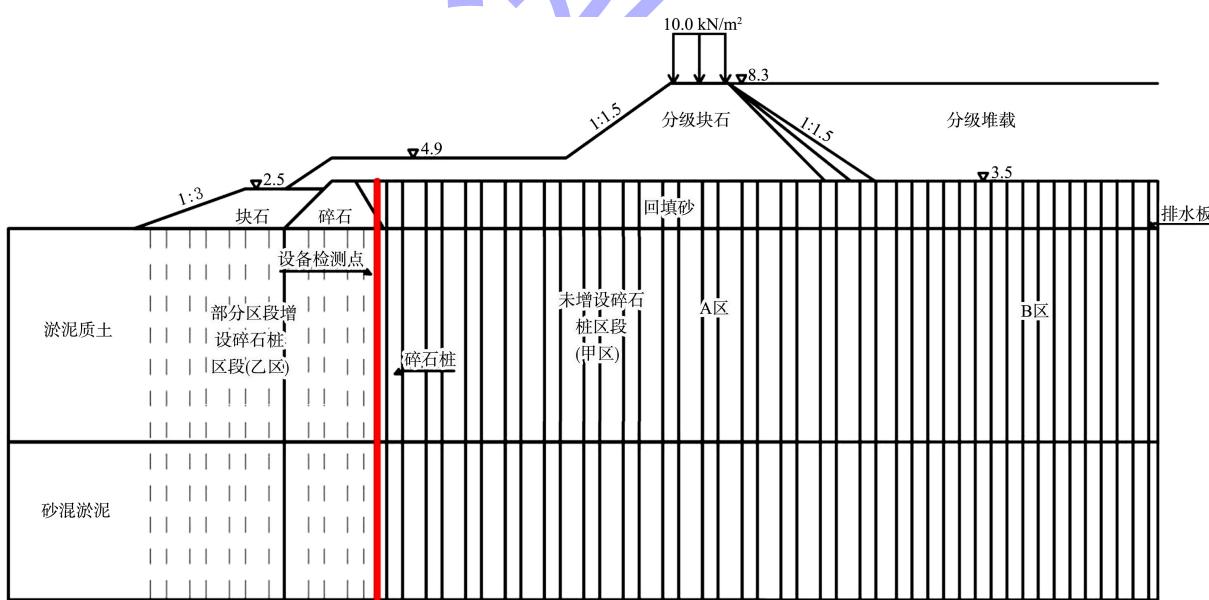
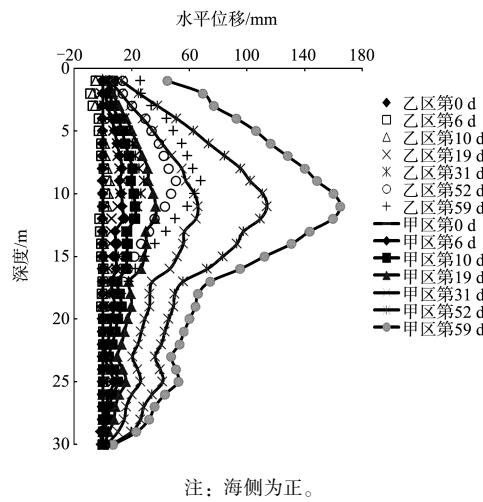


图 6 监测点埋设位置 (单位: m)

如图 7 所示，该典型断面试验区上部均匀布荷载加载速率为 10 kPa/15 d，乙区在 59 d 时的最大累计水平位移量约为 70 mm，发生在 10 m 深度附近；甲区在 31 d 时同一深度最大累计水平位移量已经接近 70 mm，甲区在 59 d 时的最大累计水平

位移量约为 160 mm。在相同的加载速率条件下，对于同一深度的潜在滑动面，乙区的最大水平位移量远小于甲区，而甲区和乙区的表层沉降量几乎相等。试验结果表明：岸坡海侧前沿加宽 10 m 范围的碎石桩大幅提高了岸坡的安全系数，增强

了岸坡的稳定性。



注: 海侧为正。

图7 深层水平位移监测对比曲线

3 结论

1) 碎石桩复合地基岸坡的整体稳定安全系数随着桩间距的增大而降低。其中, 陆侧由于陆域上部荷载覆压作用, 在无潮位变化时安全系数普遍高于海侧; 海侧的安全系数受桩间距的影响较小; 在研究护岸中最优的桩间距宜为 1.5~2.5 m。

2) 周期性潮位变化下, 海侧瞬态时的安全系数波动较大, 陆侧则相对稳定。在设计低水位时无桩状态以及桩间距为 1.5 m 时处于极限稳定状态, 出现极端天气及瞬时加载时可能有失稳现象的发生。无桩状态下陆侧安全系数的浮动区间相对有桩状态下小, 分析原因是因为淤泥质土的渗透性较小, 所以陆侧浅层基础的孔隙水压力变化缓慢, 碎石桩的施打使得浅层基础的渗透性增大, 进而孔隙水压力变化增大, 因此陆侧安全系数的浮动区间增大。

3) 碎石桩复合地基稳定性相较天然地基增长

的机理是: 通过置换作用使得碎石桩和桩间土两者整体抗剪。岸坡海侧前沿增设碎石桩后安全系数显著提高。试验段监测数据表明, 岸坡海侧前沿增设碎石桩后表层沉降变化不大, 但在 10 m 深度潜在滑动面附近的最大水平位移量减小 2 倍以上, 表明海侧岸坡稳定性增强。因此在不改变桩径及桩间距的条件下, 在岸坡海侧前沿加宽 5~10 m 的碎石桩范围, 增强滑动面内的复合地基整体抗剪强度比例, 可以达到提高海侧岸坡稳定性效果。

参考文献:

- [1] 张卫民, 凌道盛, 陈兰云, 等. 粒料桩加固的软土地基上填筑路堤的稳定分析[J]. 铁道建筑, 2007(11): 46-49.
- [2] 赵娟, 吴友仁, 韩瑞芳. 排水板堆载预压加固软基中固结度和沉降的计算[J]. 水运工程, 2008, (12): 146-150.
- [3] 龚晓南, 岑仰润, 李昌宁. 真空排水预压加固软土地基的研究现状及展望[C]//中国土木工程学会. 地基处理理论与实践: 第七届全国地基处理学术讨论会论文集. 兰州: 中国水利水电出版社, 2002: 3-7.
- [4] 吴沛峰, 张如栋, 袁国柱. 加固土桩复合地基抗剪强度计算及路堤整体稳定分析[J]. 城市道桥与防洪, 2018(11): 151-154.
- [5] 吴莹. 碎石桩复合地基的沉降与固结计算以及稳定分析[J]. 工程建设与设计, 2009(12): 83-87.
- [6] 袁海龙, 林剑锋. 基于 GeoStudio 的二维地质建模及数值模拟应用[C]//中国土木工程学会. 中国土木工程学会 2020 年学术年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 61-68.
- [7] 陈健, 苏岩松, 张杰, 等. 碎石桩软土复合地基整体抗剪强度研究[J]. 水运工程, 2016(5): 146-148, 161.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 156 页)

- [5] 埃克哈特 申克尔. 世界上的升船机[M]. 韦忠和, 赖蓉莎, 译. 成都: 四川科学技术出版社, 2005.
- [6] 吴晓青, 向化雄, 龚国庆, 等. 三峡升船机上闸首工作门止水结构数值模拟与优化改造[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6): 167-171.
- [7] 王可, 王蒂. 三峡升船机下沉工作大门充压止水应用研究[J]. 人民长江, 2014, 45(5): 28-30, 64.
- [8] 史冬岩, 张亮, 张成, 等. 冲击载荷作用下预紧力螺栓强

度特性研究[J]. 船海工程, 2012, 41(2): 166-169, 173.

- [9] 毕涛, 石端伟, 王可. 三峡升船机卧倒门支铰座螺栓联结载荷特性分析与强度设计[J]. 工程设计学报, 2018, 25(6): 655-660.
- [10] 王嘉昌, 郑宝峰, 舒赣平, 等. 不锈钢高强度螺栓受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(11): 195-202.
- [11] 吴持恭. 水力学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.

(本文编辑 王传瑜)