

文章编号: 1673-9469 (2018) 02-0035-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.008

## 长江下游某人工河道软土边坡加固方案对比

陈一冰<sup>1,2</sup>, 王保田<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏南京 210098)

**摘要:** 依托长江下游某人工河道加固二期工程, 通过对工程实际地质条件的考察, 结合一期工程出现的边坡失稳现象, 改进了原抗滑桩加固方案的核算方法, 找出了原加固方案的不足之处。针对边坡土层中存在软弱层的实际情况, 提出了采用水泥搅拌桩加固方案。通过15%、20%和30%三种不同置换率加固方案的计算, 找到满足边坡安全稳定需要的加固范围。通过Geo-slope软件计算结果, 发现不同置换率下的加固方案通过调节加固范围均可使边坡施工期安全稳定系数达到规范要求的标准。

**关键词:** 水泥搅拌桩; 抗滑桩; Geo-slope; 软土层; 边坡稳定分析

**中图分类号:** TV861

**文献标志码:** A

## Comparison of reinforcement schemes for soft soil slope of artificial river in the lower reaches of Yangtze River

CHEN Yibing<sup>1,2</sup>, WANG Baotian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on the investigation of the actual geological conditions of the project and the slope instability in the first stage of the project, this paper improves the accounting method of the original anti-slide pile reinforcement scheme, and finds out the inadequacies of the original reinforcement scheme of an artificial river in the lower reaches of the Yangtze River. Based on the actual situation of the weak layer in the slope soil layer, the reinforcement scheme of the cement mixing pile is presented. Through the calculation of reinforcement scheme with different replacement rates of 15%, 20% and 30%, we find the safety and stability of the slope of the reinforcement range. According to the calculation results of Geo-slope software, it can be found that the reinforcement scheme under different permutation rate can adjust the reinforcement range to make the safety and stability coefficient of the slope construction period meet the standard requirements.

**Key words:** cement mixing pile; anti-slide pile; geo-slope; soft soil layer; slope stability analysis.

水泥搅拌桩施工所需设备简单、操作方便、施工速度快、造价低, 近年来在水工建筑物软基加固和堤防防渗处理中有广泛的应用<sup>[1]</sup>。长江下游某人工河道加固项目二期工程, 原加固方案为使用水泥抗滑桩进行边坡加固。一期工程中该加固方案地段出现了失稳现象, 通过对工程地质条件的进一步分

析, 发现由于坡体软弱土层的存在导致水泥抗滑桩不能完全发挥其性能。提出了新的加固方案, 即水泥土搅拌桩加固方案, 通过对比两种加固方式的施工期边坡安全稳定系数, 发现水泥搅拌桩在软土边坡加固中的可靠性、灵活性等优势<sup>[2-3]</sup>。水泥土因具有良好的物理力学性质被广泛地应用于实际工程<sup>[4-8]</sup>。

收稿日期: 2017-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778211)

作者简介: 陈一冰(1993-), 男, 河南周口人, 硕士, 从事软土地基加固方面的研究。

针对本工程中边坡土层特点,不宜选用预压排水固结、放缓边坡和填筑压载平台等进行处理,故设计选用15%、20%和30%不同置换率下水泥搅拌桩加固方案进行对比,以得到经济可行的置换率和加固范围。

## 1 工程概况

工程河道治理范围:共两段,上游段自庙山撇洪沟到羊山坝(J4+675~J6+215),河道长度为1.54 km,左岸堤防范围为(J5+050~J6+215),右岸堤防范围为(J4+675~J6+215),两侧堤岸共2.705 km;下游段自312国道到河口闸站(J8+830~J12+240),河道长度为3.41 km,两侧堤岸共6.82 km。上游段和下游段合计河道总长4.95 km,堤防总长9.525 km。扣除跨河桥梁暂缓实施段河道,本工程共涉及河道长4.25 km,两侧堤岸总长8.125 km。

河道规模为:河底高程:2.5 m;河底宽:上游段,羊山湖段河底宽度基本维持现状,其余河底宽为11.9 m,下游段,河底宽为15.0~33.2 m。河口宽:上游段,除羊山湖段现状湖面较宽,维持现状,其余河口宽为66.0 m;坡比:1:2.5;亲水平台:迎水坡8.5 m高程设不小于2.5 m宽平台。

堤防工程等级及标准:堤防工程级别为I级。

## 2 工程地质条件及存在问题

### 2.1 堤基土岩性特征及物理力学指标

根据现场勘察、室内土工试验及原位测试结果,本工程段勘察范围内自然沉积土划分为6层12亚层,土层分布及工程地质特性如下:

2<sub>1</sub>重粉质壤土:JZ93、JZ98、JZ100、JZ102、ZK2~ZK4、ZK8~ZK11、ZK8A、ZK9A等孔分布,灰黄,局部灰色,见铁锰质斑点,可塑为主,中等压缩性,局部高压缩性,土质不甚均匀,局部夹砂壤土。

3<sub>1</sub>淤泥质重粉质壤土:普遍分布,灰~青灰色,饱和,流塑,高压缩性,中~高灵敏度,含腐殖质,稍有臭味,土质不甚均匀,局部与重粉质砂壤土呈互层状。干强度中等,韧性中等。

3<sub>2</sub>重粉质砂壤土:分布较广泛,灰色,湿,稍密~中密,中等压缩性,局部与3<sub>1</sub>淤泥质重粉质壤土交错相变,夹腐殖质。干强度低,韧性低。

3<sub>3</sub>淤泥:J31、J33~J35、ZK3等孔分布,灰色,饱和,流塑,高压缩性,含腐殖质,稍有臭味,土质不甚均匀,局部夹砂壤土薄层。

3<sub>4</sub>重粉质壤土:普遍分布,灰色,软塑为主,局部流塑、可塑,中~高压缩性,土质不甚均匀,局部夹砂壤土薄层。

4<sub>3</sub>粉土质砂:J16、ZK10等孔分布。饱和,稍密,土质较均匀,见少许云母碎片。

4<sub>5</sub>重粉质壤土:J5、J6、J11、J12、JZ131、JZ132、ZK9、ZK10、ZK11等孔分布。灰色,可塑为主,局部软塑,中等压缩性为主,局部高压缩性,土质不甚均匀,局部夹粉土质砂,层底局部见少量砾石。

4<sub>6</sub>重粉质砂壤土:J6、J10、J11等孔分布。灰色,松散~稍密,很湿,土质不甚均匀,局部夹粉质粘土薄层。

5<sub>1</sub>粉质粘土:J13、J14、J19、J27、J31~J33、JZ93、JZ94、JZ102、JZ103、JZ105、JZ107、JZ113~JZ116、JZ125、JZ127、ZK3、ZK5、ZK6、ZK9等孔分布,灰绿、灰黄色,可塑,中等压缩性,土质较均匀,含铁锰质结核。

6<sub>1</sub>含砾粉质粘土:J31~J33、JZ115等孔分布,灰~灰黄,含砾石,砾石含量20%~30%,次棱角状,砾石成分为泥质砂岩、砂质泥岩,粒径一般2~8 mm,最大达30 mm。

### 2.2 岸坡稳定性问题

本次工程范围内普遍分布的3<sub>1</sub>淤泥质重粉质壤土、3<sub>2</sub>重粉质砂壤土、3<sub>3</sub>淤泥、3<sub>4</sub>重粉质壤土层,抗冲刷能力低,易引起河道边坡冲蚀、坍塌,对河道边坡稳定不利。3<sub>1</sub>淤泥质重粉质壤土及3<sub>3</sub>淤泥,力学强度低,压缩性大,灵敏度高,荷载作用下易发生流变,排水固结缓慢,固结时间长,极易产生滑动破坏。故河道堤防设计时需对软土分布部位进行堤基抗滑稳定验算。

按设计要求,本文采用抗剪指标推荐值,供稳定分析使用,详见表1。

## 3 计算断面、计算工况及力学参数

### 3.1 计算断面

本工程范围包含上下游两部分,现选取上游段计算断面2个,下游段断面4个,共6个断面作为目标计算断面进行边坡稳定分析,上下游计算断面

情况如表 2、3 所示。

### 3.2 施工期工况

因本工程背水坡堤高较低，最大的在 3 m 左右，稳定计算主要是复核各种工况下迎水坡稳定情况。施工期时工况为地下水水位河底取 2.5 m，河外水位取值与地表标高相同，浸润线为开挖边坡坡面线。

### 3.3 堤身、地基土层特性及物理力学参数

工程河岸广泛分布 3<sub>1</sub> 层软土以及 3<sub>4</sub> 层粉质粘土夹砂壤土薄层和局部分布的 3<sub>2</sub> 层砂壤土层，抗冲刷能力低，为不良土质。

表 1 工程地质段物理力学指标表（推荐值）

Tab.1 Physical mechanics index of engineering geological section

岩土编号	岩土名称	饱和重度 $\gamma_{sat} / (\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	粘聚力 $C_q / \text{kPa}$ (快剪)	内摩擦角 $\varphi_q / ^\circ$ (快剪)
12	堤身填土	19.8	23.6	10.4
13	堤身填土	20.3	6	16.2
21	重粉质壤土	19.4	22	8
31	淤泥质重粉质壤土	18.2	12.8	7.2
32	重粉质壤土	19.0	7.6	21.4
33	淤泥	17.1	5.3	3.9
34	重粉质壤土	19.0	18.4	10.7
43	粉土质砂	18.8	9	28
45	重粉质壤土	19.6	21.7	14.9
46	重粉质壤土	19.7	7	20
51	重粉质壤土	20.0	36.7	13.9
61	含砾粉壤土	20.2	30	13

表 2 上游计算断面

Tab.2 Upstream calculation section

序号	桩号	位置	施工期工况坡后水位 /m
1	9+230	左岸	8.0
2	9+230	右岸	8.0
3	10+850	左岸	6.5
4	10+870	右岸	6.5

表 3 下游计算断面

Tab.3 Downstream calculation section

序号	桩号	位置	施工期工况坡后水位 /m
1	5+100	左岸	9.42
2	6+200	右岸	8.70

## 4 抗滑桩加固方案施工期安全系数

### 4.1 计算方法

针对原加固方案，即以抗滑桩加固目标边坡的边坡稳定性安全系数进行校核。

(1) 使用 Geo-slope 软件对未采取加固措施的目标边坡进行分析，寻找最危险滑动面及滑动面上各力学参数；

(2) 根据滑动面上的抗滑力结合瑞典条分法求得抗滑力矩  $\sum Mr$ ，并通过已求得的边坡稳定性安全系数推求得边坡滑动力矩  $\sum Ms$ ；

(3) 结合抗滑桩桩长、位置和滑动面位置求得抗滑桩有效桩长  $L'$ ；

(4) 抗滑桩有效桩长部分所提供抗滑力  $F$ ，抗滑力由有效桩长左右两侧不平衡力所提供，其中桩前土压力计算拟采用  $\frac{1}{2}$  被动土压力即  $\frac{1}{2} P_p$ ，桩后土压力计算拟采用主动土压力即  $P_a$ 。抗滑桩的有效抗滑力为抗滑桩两侧土压力的差值： $F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} P_p - P_a \right) \times$

$L'$ ；当抗滑桩有效桩长较长时，抗滑桩所提供抗滑力应取抗滑桩强度指标折减值，即  $C = 1\ 000\ \text{kPa}$ ， $\varphi = 0$ ，有效桩截面面积  $A = 0.6\ \text{m}^2$ ；

(5) 抗滑桩提供抗滑力矩  $M'$ ；

设抗滑力方向与抗滑桩垂直，则由抗滑桩和破坏面交点对应的滑动面圆心夹角  $\alpha$ 、圆弧半径  $R$ ，求得  $M' = F \times R \cos \alpha$ ；

设抗滑力方向与滑弧面相切，则  $M' = F \times R$ ，计算增加抗滑桩后目标边坡的稳定性安全系数  $Fs'$ ， $Fs' = \frac{\sum Mr + M'}{\sum Ms}$ ；对应边坡安全系数相关规范进行

核算。

抗滑桩加固边坡示意图如图 1 所示。

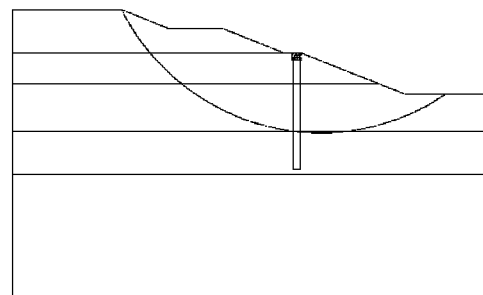


图 1 抗滑桩加固方案滑动面示意图

Fig.1 Slope sliding surface diagram of anti - slide pile reinforcement scheme

### 4.2 各坡面安全系数计算结果

施工期抗滑桩方案边坡稳定计算时,土体强度指标采用直接快剪强度指标,快剪强度指标见表1。施工期河道水位采用设计河底标高2.5 m,河外水位标高与地表标高相同,地下水渗流浸润线为边坡坡面线。抗滑桩的有效桩长提供的抗滑力取以下两种方法计算出来的小值:(1)有效桩长提供的被动土压力与主动土压力差在抗滑面产生的集中力,被动土压力取朗肯土压力的50%,主动土压力等于朗肯土压力;(2)抗滑桩等效面积在滑动面处产生的抗滑阻力,等效面积处取强度指标:凝聚力1 000 kPa,摩擦角0。稳定安全计算方法为瑞典条分法,按照规范,施工期控制安全系数为 $[F_s]=1.20$ 。计算结果见表4。

由表4可见,一排抗滑桩的加固方案不能达到规范要求的安全系数,施工期计算断面安全得不到保证。

线为开挖边坡坡面线。对目标边坡进行加固,坡脚初始边界为滑弧面露出点外2 m范围,且不超过河道中心线,桩底深度超过软土层,通过改变向边坡顶方向的加固范围寻找满足边坡安全系数的加固范围,同时控制加固范围宽度不小于10 m。水泥土强度参数在不同置换率下按水泥强度与原土体强度参数加权求得。

利用软件Geo-slope计算水泥搅拌桩加固方案结果见表5。由表5可见,不同置换率的情况下通过调整加固范围的加固方案能达到规范要求的安全系数,施工期计算断面安全可以得到保证。

搅拌桩加固措施可有效提高边坡安全稳定系数,15%、20%和30%不同置换率情况下,通过对加固范围的调整均可满足各边坡安全稳定需要,即 $F_s > 1.2$ ,加固范围不小于10 m。在实际工程中可选取适当的加固范围和置换率以达到经济可行的目的。

### 5 搅拌桩加固方案施工期安全系数

施工期边坡土层的强度指标见表1。地下水位河底取2.5 m,河外水位取值与地表标高相同,浸润

### 6 结论

通过改良计算方法核算抗滑桩加固方案在本工程应用中不能满足施工期边坡安全稳定的需要,该

表4 边坡抗滑桩加固方案计算结果统计表

Tab.4 Calculation Results of Slope Anti - slide Pile Reinforcement Scheme

断面名称	无抗滑桩安全系数 $F_s$	加抗滑桩后安全系数 $F_s$	滑动力矩 /( $kN \cdot m$ )	抗滑力矩 /( $kN \cdot m$ )	抗滑桩提供抗滑力 /kN	增加抗滑力矩 /( $kN \cdot m$ )	桩长 /m	有效桩长 /m	滑弧面半径 /m
J5+100	1.059	1.139	93 508.4	99 492.9	180.1	6 972.7	16	5.1	38.724
J6+200	0.986	1.12	31 416.7	32 327.8	60	2 853.2	24	18.5	45.304
J9+230	0.847	0.896	18 993.1	14 776.6	60	2250	20	17.6	37.498
J9+230	0.781	0.833	34 011	27 378.9	60	1 712.7	22	14.2	29.200
J10+850	0.745	0.812	32 811.6	24 379	110.7	2 274.3	20	9.5	20.945
J10+870	0.774	0.855	66 408.5	54 388.6	65.7	2 409.5	21	9.8	33.447

表5 水泥搅拌桩加固方案计算结果统计表

Tab.5 Calculation results of cement mixing pile reinforcement scheme

断面名称	置换率	安全系数 $F_s$ (瑞典条分法)	断面名称	置换率	安全系数 $F_s$ (瑞典条分法)
J5+100 左	15%	1.215	J9+230 右	15%	1.203
	20%	1.25		20%	1.211
	30%	1.312		30%	1.334
J6+200 右	15%	1.298	J10+850 左	15%	1.217
	20%	1.343		20%	1.24
	30%	1.411		30%	1.274
J9+230 左	15%	1.329	J10+870 右	15%	1.21
	20%	1.27		20%	1.211
	30%	1.42		30%	1.215

- 面的细观研究[J].岩石力学与工程学报, 2007(Z1): 3196-3202.
- [12] 马宗源, 徐清清, 党发宁. 碎石土地基动力夯实的颗粒流离散元数值分析[J]. 工程力学, 2013, 30(Z1): 184-190.
- [12] 王皆伟, 王汝恒. 土动力本构模型初探[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(5): 84-89.
- [13] JI Shunying, HAYLEY H S. Effect of contact force models on granular flow dynamics[J]. Journal of engineering mechanics-asce, 2006, 132(11): 1252-

1259.

- [14] 关正美, 石伟强. 动三轴试验研究土的动剪切模量和阻尼比[J]. 山西建筑, 2005, 31(20): 91-92.
- [15] 廖红建, 李涛, 马宗源, 等. 黄土骨干曲线模型比较分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(Z2): 17-21.
- [16] 张永兴, 丁玉琴, 陈建功. 基于双曲正切函数的土动力非线性本构模型[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(4): 166-171.

(责任编辑 王利君)

- (上接第34页) 滑坡离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2018(2): 1-9.
- [3] 徐文杰, 王立朝, 胡瑞林. 库水位升降作用下大型土石混合体边坡流-固耦合特性及其稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009(7): 1491-1498.
- [4] 罗红明, 唐辉明, 章广成等. 库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2008(5): 687-692.
- [5] 王力, 王世梅, 杨贝贝. 库水位变动条件下土-水特征曲线对滑坡稳定性计算结果的影响研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2012(3): 10-14.
- [6] 卢博, 郭永成, 赵二平, 等. 库水位变化和降雨条件

下边坡渗流特性及稳定性分析[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2017(2): 54-59.

- [7] 葛修润. 抗滑稳定分析新方法——矢量和分析法的基本原理及其应用[C]//第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2010: 26-44.
- [8] 薛翊国. 锦屏一级水电站左岸渗流模型分析与高边坡稳定性评价[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [9] 周钟, 巩满福, 雷承第. 锦屏一级水电站左坝肩边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(11): 2298-2304.

(责任编辑 王利君)

(上接第38页) 计算结果验证了一期加固工程的失稳现象出现的原因。通过采用水泥搅拌桩加固方案, 在不同置换率情况下, 合理地改变加固范围可以使边坡安全稳定系数达到规范标准。

#### 参考文献:

- [1] 杜春梅, 李守德, 柯倩雯, 等. 水泥土连拱抗滑墙加固软基边坡机理研究[J]. 科学技术与工程, 2016(26): 257-263.
- [2] 孙明霞, 张念, 肖建峰, 等. 水泥土搅拌桩在某堤防滑坡处理中的应用[J]. 人民黄河, 2016(01): 120-121.
- [3] 李守德, 柯倩雯, 王恒, 等. 水泥土搅拌桩连拱抗滑墙加固软土地基边坡模型试验及数值分析[J]. 科学技

术与工程, 2014(35): 281-285.

- [4] 刘建华, 胡晓东. 水泥深层搅拌桩在高速公路软基处理中的应用[J]. 湖南交通科技, 2003(1): 17-18.
- [5] 郭连营, 戚蓝. 粉喷桩处理海河堤岸滑坡应用实例分析[J]. 海河水利, 2004(6): 46-48.
- [6] 顾长存, 刘胜松. 堤防水泥土搅拌桩复合地基稳定性分析及应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2005(3): 330-334.
- [7] 陈东, 何开胜. 港口堆场的失稳滑动原因和治理方案设计[J]. 水运工程, 2005(10): 31-33.
- [8] 吕春峰. 航道驳岸软基处理深搅桩施工质量抽检评定方法的实践[J]. 水运工程, 2008(8): 153-157.

(责任编辑 王利君)