



水泥搅拌桩复合地基综合强度指标方法 在岸坡设计中的适用性分析

贝建忠, 赵瑞东, 李伟仪, 陈良志

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 水泥搅拌桩是加固软基岸坡的一种常用处理工艺, 通常采用复合地基综合强度指标设计方法进行岸坡稳定性分析。但在某些情况下, 采用该方法核算整体稳定满足规范要求却发生了滑移事故, 因此须进一步分析该方法在岸坡设计中的适用性。基于 Plaxis 3D 软件, 针对某失事工程, 分别采用复合地基综合强度指标以及桩体和桩间土的强度指标进行稳定性核算, 并调整软土的黏聚力以及水泥搅拌桩置换率, 对比分析其对整体稳定的影响。结果表明, 当软土黏聚力和水泥搅拌桩置换率较低时, 水泥搅拌桩复合地基综合强度指标设计方法在岸坡设计中的适用性较差, 该方法不能真实地反映水泥搅拌桩对软基的加固效果。

关键词: 水泥搅拌桩; 复合地基综合强度指标设计方法; 岸坡稳定性分析; 软基加固效果; 黏聚力; 置换率

中图分类号: U 655.54+4.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0184-07

Applicability of DCM composite foundation comprehensive strength method in revetment design

BEI Jian-zhong, ZHAO Rui-dong, LI Wei-yi, CHEN Liang-zhi
(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: DCM is a common ground improvement method for strengthening revetment on soft foundation. It is a common way to analyze the overall stability of revetment adopting composite foundation comprehensive strength design method. In some cases, the results of overall stability by the above method can satisfy the requirement of codes, but sliding accident happened. Thus the applicability of this method in revetment design needs further analysis. Focusing on a failed engineering project, we applied composite foundation comprehensive strength parameters, strength index of DCM piles and original soil parameters between DCM piles respectively to check the stability of revetment by software Plaxis 3D, and by changing the shearing strength of soft soil and replacement ratio of DCM, we analyze comparatively their influence on the overall stability. The results show that under the condition of low shearing strength of soft soil and low replacement ratio of DCM, the DCM composite foundation comprehensive strength method has a poor applicability in revetment design. It means comprehensive strength method can't equivalently reflect DCM's strengthening effect on very soft soil foundation.

Keywords: DCM(deep cement mixing pile); composite foundation comprehensive strength design method; overall stability analysis for revetment; strengthening effect on soft soil; shearing strength; replacement ratio

收稿日期: 2021-07-27

作者简介: 贝建忠(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口、航道与近海工程设计。

水泥土搅拌法(水泥搅拌桩)是一种用于加固饱和黏性土地基的常见地基处理方法。自 20 世纪 80 年代起,国内开始应用此软基加固处理技术,并取得良好效果。但也有不少工程失事的案例,特别是在一些工程的堤防、岸墙和基坑工程中,边坡失稳是主要的破坏形式之一。引发边坡失稳的原因众多,其中一个重要原因是设计过程中过高地估计了水泥搅拌桩的加固效果。因此,有必要对水泥搅拌桩复合地基的稳定性分析开展进一步研究。

目前,针对水泥搅拌桩复合地基的研究主要集中在复合地基的竖向承载力和沉降等方面^[1-4],对水泥搅拌桩复合地基稳定分析的研究^[5-6]较少。在《复合地基技术规范》^[7]中有复合地基稳定分析的内容,指出当水泥搅拌桩处理稳定性工程时,应进行稳定性验算,可采用以下 2 种方法。1)复合地基加固区强度指标采用复合地基综合强度指标;2)复合地基加固区强度指标分别采用桩体和桩间土的强度指标。

以上规范中的描述,在某种程度上说明 2 种计算方法是基本等效的,其中采用复合地基综合强度指标计算整体稳定是较为普遍的方法。但通过分析失事案例可以发现:在某些情况下,采用复合地基综合强度指标验算整体稳定满足规范要求,却发生了滑坡事故,有的甚至出现水泥搅拌桩断桩的现象,其中一个重要原因是,在某些情况下,水泥搅拌桩复合地基综合强度指标设计方法在岸坡设计中的适用性较差,采用的复合地基综合强度指标未能真实地反映水泥搅拌桩对软弱地基的加固效果,即针对整体稳定核算,有些情况下 2 种方法不能完全等效。

针对某失事工程,借助 Plaxis 3D 建立三维模型,分别采用 2 种方法进行岸坡稳定性计算,

分析工程失稳的原因。同时,在该工程原始设计的基础上,分别调整软土的黏聚力以及水泥搅拌桩置换率,分析复合地基综合强度指标设计方法在岸坡设计中的适用性,以便指导今后的工程设计。

1 复合地基综合强度指标的确定

《地基处理手册》第三册^[8] 2.7 节中指出,在计算复合地基稳定性分析时,复合地基综合强度指标可采用面积比法计算。复合土体黏聚力 C_c 和内摩擦角 φ_c 计算公式如下:

$$C_c = C_s(1-m) + m C_p \tag{1}$$

$$\tan\varphi_c = \tan\varphi_s(1-m) + \tan\varphi_p \tag{2}$$

式中: C_c 为复合土体黏聚力(kPa); C_s 为桩间土黏聚力(kPa); C_p 为桩体黏聚力(kPa); φ_c 为复合土体内摩擦角(°); φ_s 为桩间土内摩擦角(°); φ_p 为桩体内摩擦角(°); m 为复合地基置换率。

另外,该手册 11.3 节还指出水泥土的黏聚力随其无侧限抗压强度的增加而增加,水泥土的无侧限抗压强度 q_u 一般为 0.5~4.0 MPa,其黏聚力 C_c 一般约为 q_u 的 20%~30%,其内摩擦角变化范围是 20°~30°。

2 工程案例

某岸坡工程港池岸墙采用 L 形挡墙,底高程 -4.5 m,顶高程 1.80 m,典型断面如图 1 所示。挡墙底部淤泥较厚、标贯较低,采用水泥搅拌桩进行加固,桩位布置如图 2 所示。水泥搅拌桩直径为 0.5 m,桩体采用三角形布置,排距为 1.0 m,共 10 排,L1~L8 排的桩长为 12.0 m,L9 和 L10 排采用长短桩结合的套桩,长桩为 14.9 m,短桩为 6.0 m。

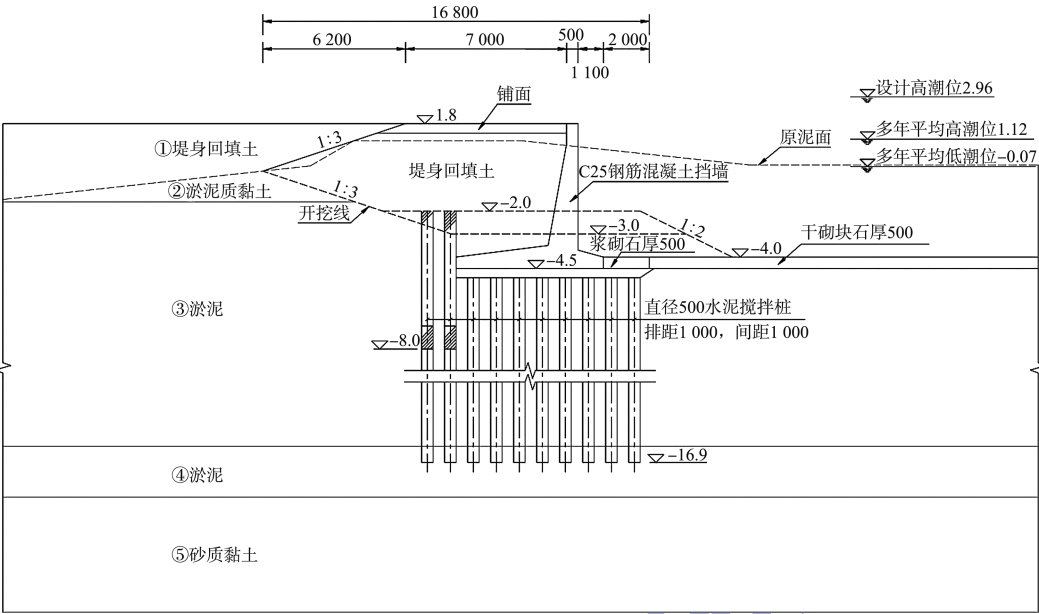


图 1 港池挡墙设计断面 (高程: m; 尺寸: mm)

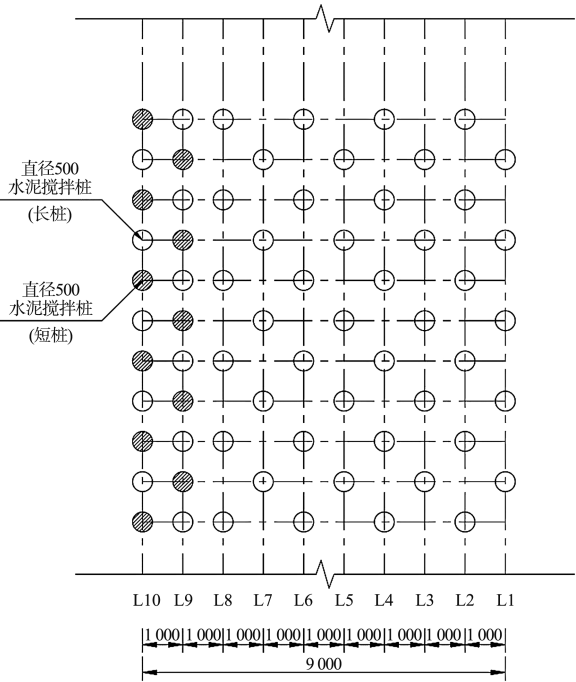


图 2 水泥搅拌桩桩体平面布置 (单位: mm)

原状土指标及复合地基强度指标分别如表 1、2 所示。

表 1 原状土参数			
土层	密度 $\rho /$ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 $C /$ kPa	内摩擦角 $\varphi /$ ($^{\circ}$)
①填身回填土	1.85	12.0	15.0
②淤泥质黏土	1.68	5.2	5.7
③淤泥	1.60	5.6	3.9
④淤泥	1.86	17.2	9.1
⑤砂质黏土	1.91	18.0	29.0

表 2 置换率为 10%的复合地基强度指标

土层	土体类型	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
③淤泥	原状淤泥	5.6	3.9
	水泥搅拌桩($q_u=0.75\text{ MPa}$)	185.0	24.0
	复合地基	23.5	5.9
④淤泥	原状淤泥	17.2	9.1
	水泥搅拌桩($q_u=0.75\text{ MPa}$)	185.0	24.0
	复合地基	34.0	10.6

通过 Plaxis 3D 建立三维模型,采用复合地基综合强度指标(方法 1)进行岸坡稳定性分析,安全系数 $F_{OS}=1.155$, 见图 3。

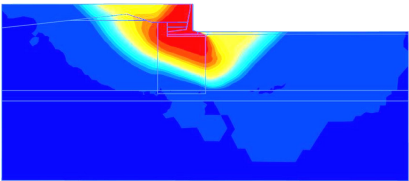


图 3 方法 1 计算整体稳定安全系数

分别采用桩体和桩间土的强度指标(方法 2)进行岸坡稳定性分析,挡墙出现失稳,最大水平位移为 8.633 m,计算结果如图 4 所示。

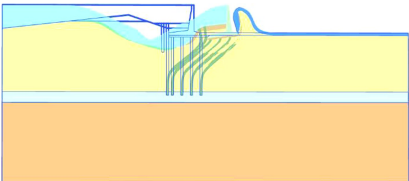


图 4 方法 2 计算最大水平位移

通过计算可知, 2 种计算方法的结果差距很大。方法 1 采用复合地基综合强度指标, 整体稳定安全系数 $F_{os}=1.155(>1.15)$, 根据《海堤工程设计规范》^[9] 10.2 节中规定, 满足施工期整体抗滑稳定要求。但在实际工程施工期该岸坡失稳, 出现了滑移断桩现象(图 5), 与方法 2 分别采用桩体和桩间土的强度指标计算整体稳定的结果相符。



图 5 现场挡墙失稳、断桩

分析得知, 该工程案例中水泥搅拌桩置换率较低(10%)且桩间土黏聚力较小(5.6 kPa), 桩体对桩间土的约束作用较差, 在后方回填料自重荷载的作用下, 软土从水泥搅拌桩中间滑出, 在挡墙前脚趾处形成隆起, 水泥搅拌桩体被剪断, 岸墙失稳倾倒, 导致工程失事。

因此, 采用复合地基综合强度指标设计方法对岸墙稳定进行验算, 未能真实地反映水泥搅拌桩对软弱地基的加固效果, 过高地估计了低置换率水土搅拌桩的加固作用, 导致工程失事。该工程条件下, 复合地基综合强度指标设计方法在岸坡设计中的适用性较差, 即并非所有工况下采用复合地基综合强度指标与分别采用桩体和桩间土的强度指标都是等效的。

因此, 在工程设计中, 复合地基综合强度指标设计方法在岸坡设计中的适用性应引起高度重视, 尤其在软土黏聚力和水泥搅拌桩置换率较低的情况下, 须建立三维模型, 分别采用桩体和桩间土的强度指标(方法 2)进行岸坡整体稳定分析。

3 复合地基综合强度指标方法适应性分析

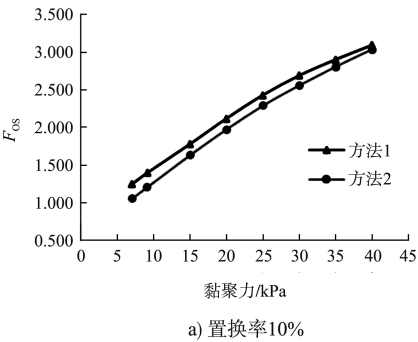
3.1 不同软土的黏聚力

分别针对水泥搅拌桩置换率 10%、19%、25%、

39%, 改变软土(③淤泥)的黏聚力, 建立三维模型, 分别采用方法 1 和方法 2 进行岸坡稳定分析, 计算结果如表 3 及图 6 所示。

表 3 不同黏聚力情况岸坡稳定安全系数

置换率/ %	黏聚力 C/kPa	岸坡稳定安全系数 F_{os}			差值百 分比/%
		方法 1	方法 2	差值	
10	7	1.245	1.058	0.187	17.70
	9	1.394	1.210	0.184	15.20
	15	1.780	1.635	0.145	8.90
	20	2.118	1.975	0.143	7.20
	25	2.430	2.290	0.140	6.10
	30	2.690	2.558	0.132	5.20
	35	2.903	2.806	0.097	3.50
	40	3.095	3.035	0.060	2.00
19	7	1.465	1.113	0.352	31.60
	9	1.625	1.284	0.341	26.60
	15	2.042	1.744	0.298	17.10
	20	2.367	2.100	0.267	12.70
	25	2.634	2.451	0.183	7.50
	30	2.874	2.763	0.111	4.00
	35	3.094	3.041	0.053	1.70
	40	3.265	3.220	0.045	1.40
25	7	1.553	1.139	0.414	36.30
	9	1.703	1.312	0.391	29.80
	15	2.104	1.779	0.325	18.30
	20	2.424	2.155	0.269	12.50
	25	2.678	2.511	0.167	6.70
	30	2.940	2.833	0.107	3.80
	35	3.155	3.121	0.034	1.10
	40	3.376	3.348	0.028	0.80
39	7	1.563	1.203	0.360	29.90
	9	1.709	1.378	0.331	24.00
	15	2.108	1.851	0.257	13.90
	20	2.429	2.225	0.204	9.20
	25	2.721	2.596	0.125	4.80
	30	3.010	2.968	0.042	1.40
	35	3.244	3.227	0.017	0.50
	40	3.431	3.425	0.006	0.20



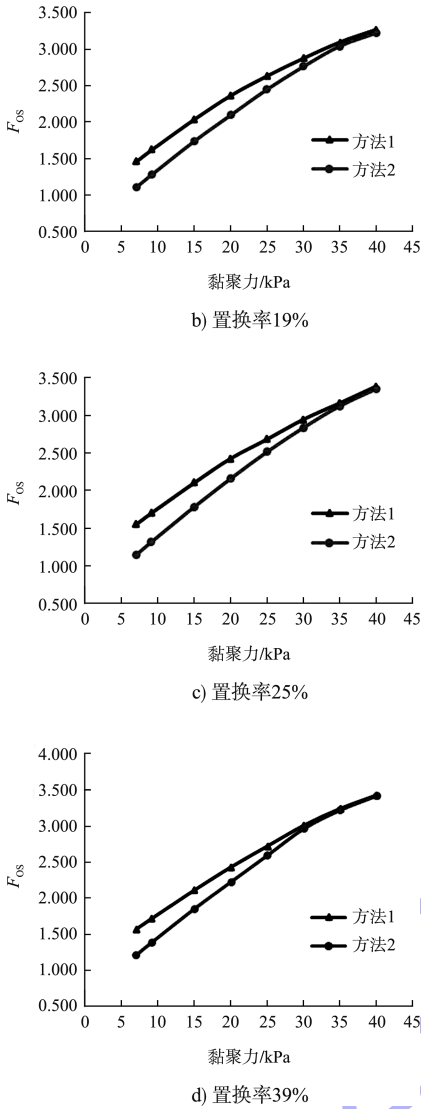


图 6 不同置换率情况黏聚力与安全系数关系曲线

从表 3 和图 6 可知，相同水泥搅拌桩置换率条件下，软土的黏聚力越大，2 种方法计算的整体稳定安全系数越接近，即软土的黏聚力越大，水泥搅拌桩复合地基综合强度指标设计方法越能真实地反映水泥搅拌桩对软基的加固软基效果，复合地基综合强度指标设计方法在岸坡设计中的适用性越好。

3.2 不同水泥搅拌桩置换率

3.2.1 软土黏聚力较低工况

当软土黏聚力较低时，分别针对软土(③淤泥)的黏聚力为 7、15、20 kPa 情况下，改变水泥搅拌桩置换率 10%、19%、25%、39%、57%、66%，建立三维模型，分别采用 2 种方法进行岸

坡稳定分析，计算结果如表 4 及图 7 所示。

表 4 低黏聚力工况不同置换率下岸坡稳定安全系数

黏聚力 C/kPa	置换率/%	岸坡稳定安全系数 F_{OS}			差值百分比/%
		方法 1	方法 2	差值	
7	10	1.245	1.058	0.187	17.70
	19	1.465	1.113	0.352	31.60
	25	1.553	1.139	0.414	36.30
	39	1.563	1.203	0.360	29.90
	57	1.571	1.343	0.228	17.00
	66	1.573	1.400	0.173	12.40
15	10	1.780	1.635	0.145	8.90
	19	2.042	1.744	0.298	17.10
	25	2.104	1.779	0.325	18.30
	39	2.108	1.851	0.257	13.90
	57	2.108	1.984	0.124	6.30
	66	2.108	2.005	0.103	5.10
20	10	2.118	1.975	0.143	7.20
	19	2.367	2.100	0.267	12.70
	25	2.424	2.155	0.269	12.50
	39	2.429	2.225	0.204	9.20
	57	2.429	2.360	0.069	2.90
	66	2.429	2.376	0.053	2.20

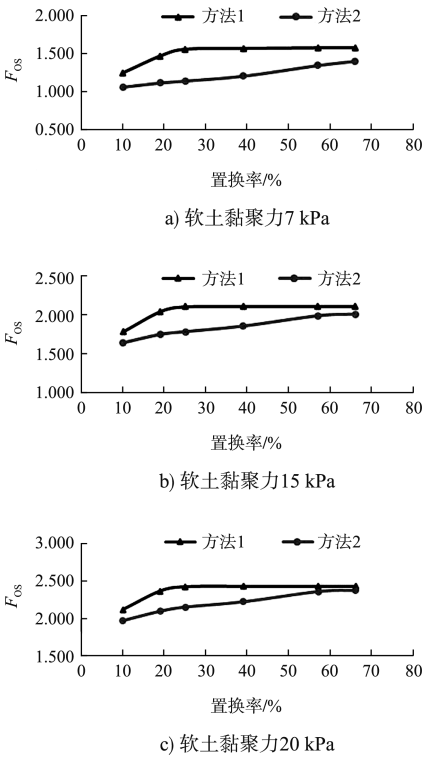


图 7 低黏聚力工况置换率与安全系数关系曲线

3.2.2 软土黏聚力较高工况

当软土黏聚力较高时，分别针对软土(③淤泥)的黏聚力为 30、35、40 kPa 情况下，改变水

泥搅拌桩置换率 10%、19%、25%、39%，建立三维模型，分别采用 2 种方法进行岸坡稳定分析，计算结果如表 5 及图 8 所示。

表 5 高黏聚力工况不同置换率下岸坡稳定安全系数					
黏聚力 C/kPa	置换率/ %	岸坡稳定安全系数 F_{os}			差值百分比/%
		方法 1	方法 2	差值	
30	10	2.690	2.558	0.132	5.20
	19	2.874	2.763	0.111	4.00
	25	2.940	2.833	0.107	3.80
	39	3.010	2.968	0.042	1.40
35	10	2.903	2.806	0.097	3.50
	19	3.094	3.041	0.053	1.70
	25	3.155	3.121	0.034	1.10
	39	3.244	3.227	0.017	0.50
40	10	3.095	3.035	0.060	2.00
	19	3.265	3.220	0.045	1.40
	25	3.376	3.348	0.028	0.80
	39	3.431	3.425	0.006	0.20

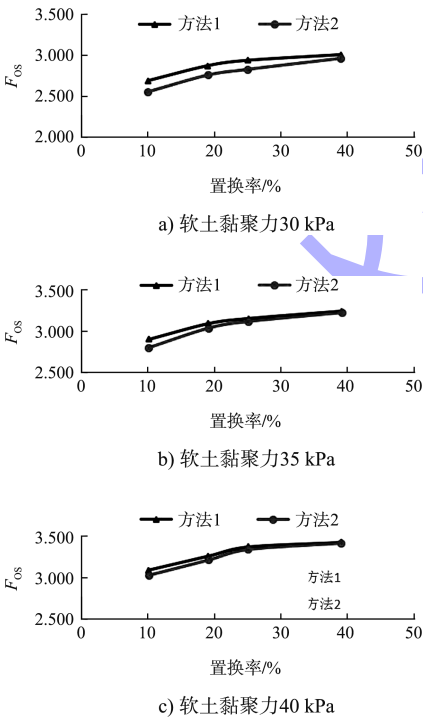


图 8 高黏聚力工况置换率与安全系数关系曲线

综合分析表 4~5 和图 7~8 可知：

- 1) 当软土黏聚力固定时，水泥搅拌桩置换率越大，整体稳定安全系数越大，2 种方法计算整体稳定的安全系数差值越小。
- 2) 当软土黏聚力较小时，2 种方法整体稳定的安全系数差别较大；随着水泥搅拌桩置换率的

增大，方法 1 整体稳定安全系数的增速明显大于方法 2。

3) 当软土黏聚力较小时，水泥搅拌桩置换率增大到某个值后，方法 1 整体稳定的安全系数基本保持不变，而方法 2 整体稳定的安全系数还在持续增大。这主要是因为大于该置换率后，复合地基综合强度指标已经足够强，整体稳定滑弧几乎不再经过水泥搅拌桩加固区，继续提高水泥搅拌桩置换率，对方法 1 的整体稳定安全系数影响不大；而若分别采用桩体和桩间土的强度指标(方法 2)分析岸坡整体稳定性，滑弧仍经过该水泥搅拌桩加固区，继续提高水泥搅拌桩置换率，对方法 2 的整体稳定安全系数影响较大。

4) 当软土黏聚力较大时，2 种方法整体稳定的安全系数差别较小，且随着水泥搅拌桩置换率的增大，2 种方法计算整体稳定的安全系数快速趋于相同。

4 结语

1) 采用水泥搅拌桩加固软基岸坡，当软土黏聚力、水泥搅拌桩置换率较低时，桩体对桩间土的约束作用较差，常规设计方法——复合地基综合强度指标设计方法(方法 1)在岸坡设计中的适用性较差，该设计方法不能真实地反映水泥搅拌桩对软基的加固效果。

2) 当软土黏聚力超过 30 kPa、水泥搅拌桩置换率超过 20% 后，2 种方法的整体稳定安全系数差值小于 5%，几乎等效。但由于每个工程的地质条件、结构形式并不相同，其岸坡稳定性对软土黏聚力和水泥搅拌桩置换率的敏感程度也不相同。本案例归纳的软土黏聚力和水泥搅拌桩置换率临界点不具普遍适用性，建议同时采用方法 1(复合地基综合强度指标设计方法)和方法 2(分别采用桩体和桩间土的强度指标设计方法)对岸坡整体稳定性进行评估，相互校核。

3) 在水泥搅拌桩加固软基岸坡的工程中，可基于 Plaxis 3D 有限元软件，分别建立水泥搅拌桩桩体和桩间土的三维模型，采用方法 2 进行岸坡

稳定性分析,可较真实地反映水泥搅拌桩对软基岸坡的加固效果。

参考文献:

[1] 刘惠康.水泥搅拌桩复合地基承载力问题研究[D].广州:华南理工大学,2015.

[2] 张日波,蔡雪峰.水泥搅拌桩复合地基承载力特征值确定方法的探讨[J].中国水能与电气化,2016,138(9):59-61.

[3] 杨凤伟,王剑锋.水泥搅拌桩复合地基的沉降计算方法探讨[J].山西建筑,2017,43(28):64-65,216.

[4] 郝玉龙,王立忠,陈云敏,等.深厚软土水泥搅拌桩复合地基沉降分析及控制[J].岩土工程学报,2001,23(3):

345-349.

[5] 顾长存,刘胜松.堤防水泥土搅拌桩复合地基稳定分析及应用研究[J].防灾减灾工程学报,2005,25(3):330-334.

[6] 邓垵,翟志芳.水泥搅拌桩复合地基边坡稳定计算设计经验总结[J].中国水运(下半月),2016,16(10):248-250.

[7] 浙江省住房和城乡建设厅.复合地基技术规范:GB/T 50783—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.

[8] 龚晓南.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[9] 水利部水利水电规划设计总院.海堤工程设计规范:SL 435—2008[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 146 页)

参考文献:

[1] 曹民雄,蔡国正.山区河流急流滩险航道整治技术研究[M].北京:人民交通出版社,2006.

[2] 赵家强,刘俊涛,李少希等.大藤峡坝下水位未衔接段滩群整治研究[J].中国水运(下半月),2014,14(8):263-266.

[3] 庞雪松,潘荣友,曹民雄等.长洲枢纽变动回水区汇流河段羊栏滩航道整治研究[J].水运工程,2012(1):132-137.

[4] 黎国森,刘俊涛.郁江口及羊栏滩汇流段船舶对会条件改善措施研究[J].水道港口,2009,30(2):119-122.

[5] 周家俞,徐奎,黄成林.山区河流枢纽库尾河段航道整

治模型试验研究[J].水运工程,2018(10):143-147.

[6] 郑钧予.梯级枢纽坝下脱水段航道整治方案评价[D].南京:东南大学,2019.

[7] 张明,张明进.来宾至桂平 2000 吨级航道工程大藤峡坝下航道整治数学模型研究报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2019.

[8] 王鑫,金辉.来宾至桂平 2000 吨级航道工程羊栏滩物理模型研究报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2019.

[9] 江涛,毕雪峰.来宾至桂平 2000 吨级航道工程初步设计报告[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2020.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 183 页)

3)在综合分析各种方案后,先施工横梁(墩台),再采取两端钢埋件与中间支撑组合的上承式正支架方案,并结合上述相应的施工措施,避免了斜梁产生的水平推力对现浇支撑体系的影响,成功解决了受三峡库区水位调度影响情况下大跨度连续斜梁整体现浇施工中的技术难题,可为类似工程的上部结构施工提供借鉴。

参考文献:

[1] 彭振峰,郑成梁,吕佳.超高层屋面超高斜柱、斜梁施工技术[J].江西建材,2020(6):104-105,107.

[2] 郭一贤,何德华,陈建宁,等.桥梁现浇箱梁反吊支架系统:201821259466.3[P].2018-08-06.

[3] 中国长江三峡集团公司.三峡(正常运行期)—葛洲坝水利枢纽梯级调度规程[R].北京:中国长江三峡集团公司,2019.

[4] 沈阳建筑大学.建筑施工模板安全技术规范:JGJ 162—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[5] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程混凝土结构设计规范:JTS 151—2011[S].北京:人民交通出版,2011.

[6] 中交第四航务工程局有限公司.码头结构施工规范:JTS 215—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

(本文编辑 王璁)