

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.02.027

# 河道工程整体稳定计算中水泥土粉喷桩 抗剪强度指标选取讨论

顾 威

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

**摘 要:** 目前国内各行业规范及国标对于水泥搅拌桩抗剪强度指标的计算均未提及,通过分析现有规范及其他资料,并结合工程实例,对河道工程中水泥土粉喷桩抗剪强度指标、复合地基综合抗剪强度指标及边坡的整体稳定进行分析,以供类似项目借鉴。

**关键词:** 河道工程;整体稳定;水泥土粉喷桩;抗剪强度指标

**中图分类号:** TU433

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2021)02-0095-04

## 0 引言

河道边坡的稳定性是关系边坡安全的关键,边坡一旦失稳将引起河道岸坡的塌陷、河底的隆起等破坏,严重影响边坡施工及工后的使用安全。目前水泥土粉喷桩在河道边坡及护岸工程中得到了广泛应用。

水泥土搅拌桩是加固饱和软粘土地基的一种成熟方法,它利用水泥、石灰等材料作为固化剂的主剂,通过特制的搅拌机械,在地基中就将软土和固化剂强制搅拌,利用固化剂和软土之间产生的一些列物理-化学反应,使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的优质地基。其中将用水泥粉体与软土搅拌形成的柱状固结体成为粉喷桩。

目前国内各行业规范及国标对于水泥搅拌桩的应用均以复合地基的形式出现,大多数主要考虑复合地基的地基承载力及复合地基的沉降等设计计算,对水泥搅拌桩复合地基的适用范围、施工工艺、单桩承载力计算、复合地基承载力计算、复合基底沉降计算及检测标准进行了详细的描述,但未提及水泥搅拌桩体抗剪强度指标的计算,也未提及刚性桩复合地基抗剪强度指标的计算。

通过分析现有规范及其他资料,并结合工程实例,对河道工程中水泥土粉喷桩抗剪强度指标、复合地基综合抗剪强度指标及边坡的整体稳定进行

分析,以供类似项目借鉴。

## 1 工程概况

广东省珠海市某河道整治项目,工程等别为Ⅱ等,抗震设防烈度为7度,设计地震分组为第一组。河岸顶高程为3.8 m,部分靠近桥墩的区段填土达到5.5~7.6 m,考虑到地基大部分为淤泥质土,属软弱地基土层,承载力低,压缩性高,对工程结构安全影响较大,靠近桥墩区域河道边坡整体稳定无法满足规范要求,对于该工程,最经济的做法是放缓堤坡和控制施工加荷速率或采用预压地基,加快土体固结,但河道坡比已调整成1:4,前者没有足够的空间来实现上述方法,而预压地基需要较长的时间来完成固结,所以只能放弃这两种方案,拟对该区域局部采用水泥土搅拌桩复合地基加固。地质参数及河道特征水位见表1、表2。

表1 地质参数表

土层	层底 高程	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	直剪快剪	
				黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
填土	-2.0	17.8	4.31	5	25
淤泥②	-15.98	15.9	2.22	9.4	6.5
粉质黏土③	-20.73	18.1	4.02	24.2	17.7
淤泥质土④	-40.02	16.6	3.0	12.6	7.2

收稿日期:2020-06-24

作者简介:顾威(1988—),男,硕士,工程师,从事水运工程、水利工程设计研究工作。

表2 河道特征水位表

工况	河道水位/m	陆域填土标高/m
正常运用条件	0.5(设计低水位)	设计标高 7.6
施工期	—	3.8
地震期	1.0(设计常水位)	设计标高 7.6

## 2 水泥土粉喷桩抗剪强度指标的选取

目前国内各行业规范及国标对水泥搅拌桩的抗剪强度指标的计算均未提及,《地基处理手册》(龚晓南主编第三版)<sup>[1]</sup>对水泥土的抗剪强度开展了一系列直剪试验,结果见表3。

由表3可知,水泥土较原天然土的黏聚力和内摩擦角有较大的增加,当水泥土的无侧限抗压强度 $q_u$ 在0.6~3 MPa的范围内,其黏聚力比天然土大10~20倍,内摩擦角加大一倍左右。所以水泥土的抗剪强度随其无侧限抗压强度的增大而增加,其黏聚力与无侧限抗压强度 $q_u$ 的比值约0.2~0.3,其内摩擦角变化在20°~30°之间。

根据以上结果本文做了相关回归分析,得到黏聚力 $c$ 和无侧限抗压强度 $q_u$ 的关系是如下:

$$c=0.237 1q_u^{0.828 9} \quad (1)$$

设计要求水泥土搅拌桩桩体在标准养护条件下28 d龄期立方体抗压强度不小于1.0 MPa,根据式(1)计算得黏聚力 $c$ 为237 kPa(此处无侧限抗压强度标准值按28 d龄期立方体抗压强度计算),内摩擦角 $\varphi$ 取25°。

另《广东省海堤工程设计导则》(DB44 T182—2004)<sup>[2]</sup>附录R,搅拌桩桩身黏聚力可按式(2)计算;

$$c_1 = \frac{\eta f_{cu}}{2 \tan(45 + \frac{\varphi}{2})} \quad (2)$$

式中: $\eta$ 为桩身强度折减系数,取0.20~0.30; $f_{cu}$ 为与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块在标准养护条件下28 d龄期的立方体抗压强度平均

值,kPa; $\varphi$ 为搅拌桩桩身内摩擦角,取20°~24°。

根据式(2)计算得黏聚力 $c$ 为70.02 kPa,内摩擦角取22°,见表4。

表4 水泥土粉喷桩抗剪强度指标

计算方法	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)
地基处理手册	237	25
广东省海堤工程设计导则	87.53	22
推荐值	87.53	22

综合以上两种计算方法,《地基处理手册》采用的是无侧限抗压强度,试样尺寸为 $\phi 50 \times 100$  mm;而《广东省海堤工程设计导则》采用的是立方体标准抗压强度标准值,试样尺寸为70.7 mm $\times$ 70.7 mm,根据欧标BS EN 1992-1-1:2004<sup>[3]</sup>中表3.1中所示,圆柱体试块抗压强度约只有80%的立方体抗压强度,因此前者计算所用的无侧限抗压强度强度将小于0.8MPa;另《地基处理手册》中未区分干法与湿法,干法较湿法所得的黏聚力较小,所以前者计算的参数较后者大,为安全起见,本文推荐广东省及附近区域的项目拟采用《广东省海堤工程设计导则》的公式进行水泥土粉喷桩抗剪强度指标的计算。

## 3 复合地基抗剪强度指标的计算

河道靠近桥墩区域在河道二级斜坡后方采用了水泥土搅拌桩地基处理,靠近河侧设置5 m宽浅层搅拌桩,桩长8 m,再在陆侧方向设置15 m深层搅拌桩,桩长18 m,桩径500 mm,采用梅花型布置,纵横向间距均为1.0 m,置换率为19.63%。

《粉体喷搅法加固软弱土层技术规范》(TB 10113—96)<sup>[4]</sup>中,在计算用粉喷技术形成的复合地基的基础及边坡稳定性时复合地基的抗剪强度计算公式中黏聚力 $c$ 的计算方法与《广东省海堤工程设计导则》一致,但没有内摩擦角 $\varphi$ 的推荐计算方法,本文推荐采用《广东省海堤工程设计导则》附录R中的公式计算复合地基的综合抗剪强度指标,为河

表3 《地基处理手册》直剪试验表

试验编号	天然土样试验			水泥掺量 $a_w$ /%	水泥土龄期 $T$ /d	水泥土试验		
	无侧限抗压强度 $q_u$ /MPa	抗剪强度				无侧限抗压强度 $q_u$ /MPa	抗剪强度	
		黏聚力 $c$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)			黏聚力 $c$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)	
1				10	28	0.633	0.161	26.5
2	0.037	0.014	14	10	90	1.124	0.271	31
3				15	28	1.315	0.289	32

道边坡的整体稳定计算提供数据支持。

《广东省海堤工程设计导则》搅拌桩复合地基的等效强度指标按下式计算

$$c=c_1m+c_2(1-m) \quad (3)$$

$$\varphi=\arctg\left(\frac{\operatorname{tg}\varphi_1}{1+K_2/\beta K_1}+\frac{\operatorname{tg}\varphi_2}{1+K_1/\beta K_2}\right) \quad (4)$$

$$K_1=\frac{K_1K_2K_3}{K_1K_2+K_2K_3+K_3K_1} \quad (5)$$

$$K_2=\frac{A_2E_s}{l} \quad (6)$$

$$K_1=\frac{A_1E'}{d(1-\mu^2)\omega} \quad (7)$$

$$K_2=\frac{A_2E_p}{l} \quad (8)$$

$$K_3=\frac{A_1E''}{d(1-\mu^2)\omega} \quad (9)$$

式中: $c_1$ 为搅拌桩桩身黏聚力, kPa, 可按式(2)计算; $\varphi_1$ 为内摩擦角, 取 $\varphi_1=20^\circ \sim 24^\circ$ ;  $c_2$ 为软土层黏聚力, kPa;  $\varphi_2$ 为内摩擦角, ( $^\circ$ );  $m$ 为面积置换率;  $K_1$ 为搅拌桩的刚度, kN/m;  $K_2$ 为桩周软土部分的刚度, kN/m;  $\beta$ 为桩的沉降 $S_1$ 和桩周软土部分沉降 $S_2$ 之比, 对填土, 可取 $\beta=0.5$ , 对刚性基础, 则 $\beta=1$ 。

$K_1$ 为搅拌桩桩顶土层的刚度, kN/m;  $K_2$ 为搅拌桩桩身的压缩刚度, kN/m;  $K_3$ 为搅拌桩桩底土层的刚度, kN/m;  $A_1$ 为搅拌桩截面积,  $m^2$ ;  $A_2$ 为桩周土截面积,  $m^2$ ;  $d$ 为搅拌桩直径, m;  $\mu$ 为泊松比, 取0.3;  $\omega$ 为形状系数, 取0.79;  $E'$ , 为桩顶土层的变

形模量, kPa;  $E''$ 为桩底土层的变形模量, kPa;  $E_p$ 为搅拌桩的压缩模量, kPa;  $E_s$ 为桩间土的压缩模量, kPa;  $L$ 为搅拌桩桩长, m。

复合抗剪强度指标见表5。

## 4 河道边坡整体稳定计算分析

### 4.1 断面结构型式

断面结构型式见图1,  $-1.0 \sim 0.5$  m范围内护坡设置300 mm厚雷诺护垫, 护垫下分别设置碎石垫层及土工布一层, 并布置密排木桩, 常水位以上护坡设置三维水土保持毯。在靠近桥墩的地方由于填土最高达到7.6 m, 河道靠近桥墩区域在河道二级斜坡后方采用了水泥土搅拌桩地基处理。

### 4.2 河道边坡整体稳定计算

采用SLIDE有限元软件分别计算了河道断面在正常工况下未采用地基处理和采用地基处理及非常工况下采用地基处理后的整体稳定, 地理处理区域的计算原则是加固区和未加固区土体采用不同的强度指标, 未加固区采用天然地基土体强度指标, 加固区土体强度指标可采用复合地基土体综合强度指标, 计算参数分别采用表1和表5。整体稳定有限元分析见图2。

由表6和断面最不利滑动面可知, 地基加固后整体稳定性安全系数在各种工况条件下均满足规范要求。

表5 复合抗剪强度指标

岩土名称及层号	$k_1/$ ( $kN \cdot m^{-1}$ )	$k_2/$ ( $kN \cdot m^{-1}$ )	$k_3/$ ( $kN \cdot m^{-1}$ )	$k_1/$ ( $kN \cdot m^{-1}$ )	$k_3/$ ( $kN \cdot m^{-1}$ )	水泥土桩体		复合地基	
						粘聚力 $c/kPa$	内摩擦 角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 $c/kPa$	内摩擦 角 $\varphi/(^\circ)$
填土								21.20	22.55(22.76)
淤泥②	1 748.05	1 308.33 (2 453.13)	1 630.43	512.89 (627.73)	118.96 (223.04)	87.53	22	24.73	17.32(15.82)
粉质黏土③								36.63	20.51(20.06)

注: 括号内为浅层粉喷桩相应参数。

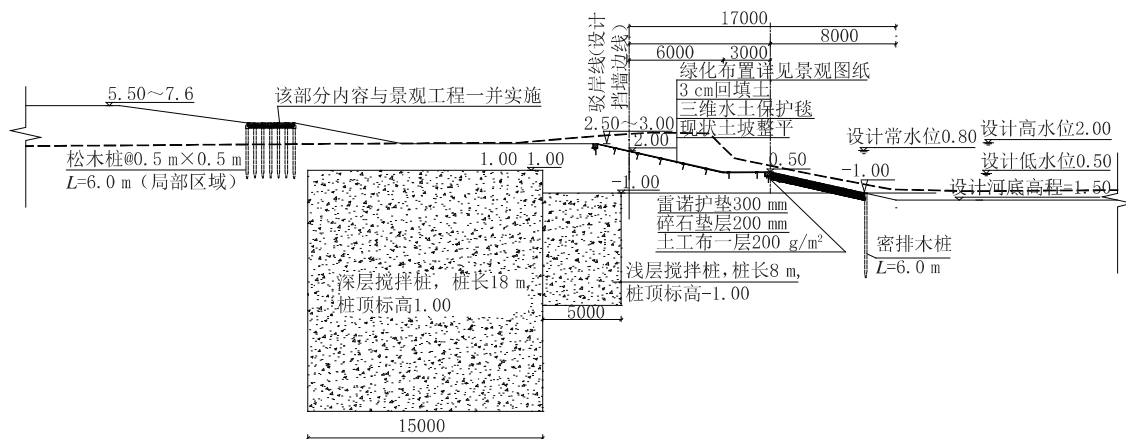


图1 河道断面图(单位:mm)