

堤防水泥土搅拌桩复合地基稳定分析及应用研究^{*}

顾长存¹, 刘胜松²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 南京 210098; 2. 江苏省水利厅, 南京 210029)

摘要: 提出将水泥搅拌桩运用于堤防工程的地基加固, 以提高堤防工程的稳定性。分析了水泥搅拌桩的作用机理和水泥土搅拌桩复合地基承载特点, 采用面积加权法计算复合土层的抗剪强度, 在此基础上进行了复合地基堤防整体稳定计算。结合某河道整治工程实例, 探讨了堤防地基水泥搅拌桩的加固效果, 评价了不同工况下堤防的稳定性。研究表明, 采用水泥搅拌桩加固堤防地基, 可以有效提高地基的承载力和堤防的稳定性, 且施工快捷, 运用效果较好, 可为类似工程提供参考。

关键词: 水泥搅拌桩; 复合地基; 整体稳定

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2005)03-0330-05

0 引言

水泥搅拌桩技术属深层地基加固方法。该法是用水泥作为固化剂, 通过特制的搅拌机械在加固区将软土和固化剂强制拌和, 形成比原状土强度提高 10~15 倍的水泥土, 桩土共同作用形成复合地基。从 20 世纪 70 年代就已在建筑、交通行业广泛运用, 适用于各种成因的饱和软土, 成桩深度可达 30 m。它具有技术可靠、适用面广、施工速度快、环境污染小、造价低等优点。

堤防工程在本世纪初才开始大量运用水泥搅拌桩于长江堤防加固工程中, 主要用于挡土和防渗, 并取得了较好效果。目前采用水泥搅拌桩加固堤防地基的工程实例不多, 且缺少水泥搅拌桩在堤防中的整体稳定计算机理和工程实践经验。本文采用 Pribe^[1]提出的面积加权法计算复合土层的抗剪强度, 用瑞典圆弧滑动法计算水泥搅拌桩复合地基堤防整体稳定性, 并以某河道整治工程实例, 探讨了堤防地基水泥搅拌桩的加固效果。

1 水泥土搅拌桩工作原理

水泥土搅拌桩复合地基加固土体的作用主要表现在以下几个方面(文献[1])^[2]:

1.1 桩体的作用

水泥土强度随着龄期增长而增大, 7 天时强度

可达标准强度的 30% 以上, 30 天强度可达 60% 以上, 用高压三轴仪进行剪切试验表明: 水泥土的抗剪强度随抗压强度的增加而提高, 其粘聚力 C_p 一般为无侧限抗压强度的 20%~30%, 内摩擦角 φ_p 为 20°~30°。在等量的变形的条件下, 地基中应力按材料的模量进行分配, 因此桩体产生应力集中现象, 大部分荷载将由桩体承担, 桩间土上的应力减少。这样就使复合地基的承载力较原有的地基有所提高, 沉降有所减少。随着桩体刚度的增加, 其桩体作用的发挥更加明显。

1.2 加固体垫层作用

桩和桩间土形成的复合地基, 在加固深度范围内形成的复合层可起到类似垫层的换土、均匀地基应力和应力扩散的作用。在桩体没有穿透整个软弱地层时, 垫层的作用大为明显。

1.3 桩间土挤密和固结作用

在成桩过程中, 由于振动、排土、搅拌等, 都对桩间土起到一定的密实作用。虽然水泥土桩会降低土的渗透系数, 但它同样会减少地基的压缩系数, 而且通常后者的减少幅度较前者大。因此, 加固后的固结系数大于加固前与地基土的固结系数, 同时由于桩侧摩阻力的影响, 进一步加强了桩间土的固结作用。

* 收稿日期: 2004-12-27; 修回日期: 2005-03-28

作者简介: 顾长存(1963-), 男, 副教授。主要从事岩土工程方面的研究。Email: changcungu@126.com

1.4 加筋作用

资料表明,水泥土的容重与软土容重相近,增加量一般不超过天然软土的3%,水泥土的比重比天然土的比重增加不超过4%,因此水泥搅拌桩施工后对土体的容重增加较少。水泥土搅拌桩复合地基桩体对原状土的加筋作用,能提高复合地基的抗滑能力,增加地基的稳定性。

2 堤防水泥搅拌桩复合地基稳定计算

2.1 水泥搅拌桩复合地基稳定计算方法

堤防的整体滑动稳定分析,规范^[3]只考虑堤防边坡的稳定计算,而对软土地基堤防的深层滑动未有规定,通过对滑动面的观测、分析,其仍可近似的作为圆弧形,故工程上仍采用圆弧滑动法计算复合地基或土体的稳定性。考虑到软土地基地质条件的复杂性以及堤防填筑时填土较高、填土施工较快等特点,可采用偏于保守的瑞典条分法,计算中假设圆弧滑动面经过加固区(复合土体)和未加固区(原状土),如图1所示。计算所得稳定安全系数较毕肖普法偏低10%~20%,较准毕肖普法偏低8%~13%^[4]。瑞典条分法安全系数计算的基本公式为:

$$F = \frac{\sum S_i + \sum (S_j + P_i)}{P_T} \quad (1)$$

式中 i, j 表示区分土条底部滑裂面是在地基土层内或在填土内的分条编号,即按地基滑裂面而分别设定的土条编号;

P_T 为各土条在滑弧切线方向的下滑力总和;

S_i 为地基滑弧上的抗滑力;

S_j 为堤防内滑弧上的抗剪力。

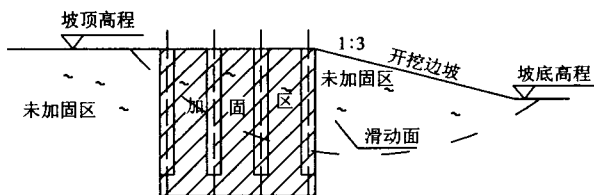


图1 稳定计算模型

Fig.1 Model of stability calculation

难点在于由两种不同性质的材料组成的复合低地基,它的应力传递过程和应变协调难以分析,须讨论复合体的强度指标确定。

2.2 复合地基强度指标确定

复合地基整体圆弧滑动稳定分析时,工程上习惯将复合地基土体作为具有复合抗剪强度指标 C_p 、 φ_p 的土体,按照常规方法计算。复合指标可近似的通过共同协调面积比法,即 Pribe 方法求得,表达式为:

$$\tan \varphi_p = \omega \tan \varphi_p + (1 - \omega) \tan \varphi_s \quad (2)$$

$$C_p = (1 - \omega) C_s \quad (3)$$

式中 C_s 、 φ_s 为原土的抗剪强度指标;

ω 为考虑置换率与应力集中的参数, $\omega = m\mu_p$, 一般 $\omega = 0.4 \sim 0.6$ 。

Pribe 给出的公式中 $\omega = m\mu_p$, 表明 C_p 不仅与置换率有关,还与土中应力有较大关系。土的粘聚力是受土质、形成条件、扰动程度、含水率变化等多因素的影响,只要应力变化不明显改变土的性状,可将粘聚力近似的视为与应力无关的常值,因此,通常可将式(3)改为仅与置换率有关的表达式,即

$$C_p = (1 - m) C_s \quad (4)$$

如此处理,是比较合理的。

稳定分析程序比较成熟,当求得加固区复合土体的抗剪强度指标后就可以很方便地计算出加固后堤防的整体稳定安全系数,加固区的范围、深度则由稳定要求反复试算求得。

3 工程实例

3.1 工程概况

3.1.1 基本情况

某河道整治工程为城市防洪工程的一部分,包括河道疏浚和河道两岸堤防。该工程河道长1057.3m,左岸现状为农田,地面高程3.8~4.5m,地基土质松软,承载力低,规划后的建城区需回填加高至6.3m。原河道蜿蜒曲折,整治后的河岸线平顺圆滑,基本沿老河岸线布置,局部河段截弯取直,堤线穿过老河道和面积开挖拓浚段,设计河道断面为复式断面,在4.0m高程设一平台,4.0m以下至河床为干砌石斜坡,坡比1:3,4.0m以上为直立挡墙,20年一遇设计水位为7.0m,防浪墙顶高程7.3m,工程等级为4级,堤防断面见图2。

3.1.2 工程地质条件

根据地质勘察,地基土自上而下分层及部分土层物理力学指标见表1。

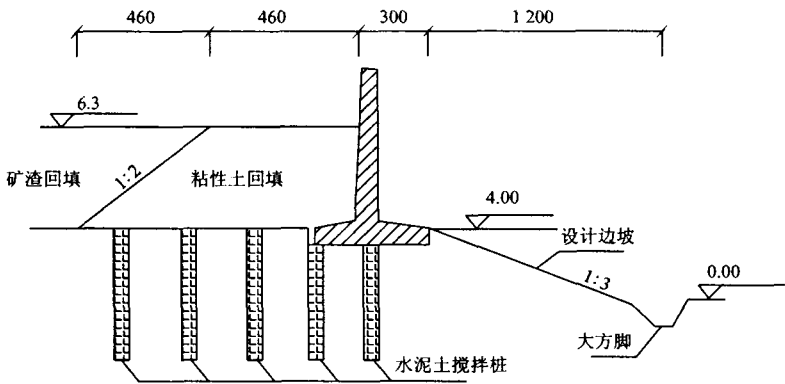


图 2 设计计算断面

Fig. 2 Cross section of design and computation

表 1 地基土物理力学指标

Tab. 1 Physical parameters of foundation soils

土 名	性 状	层底标高 /m	厚度 /m	含水量 /%	孔隙比	快剪		固快	
						C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
1 粉质粘土	可塑、中等压缩性		0.6~3.3	33.5	0.933	15.3	6.6	17.9	16.7
2-1 淤泥质粉质粘土	饱和、流塑	-4.2~0.1	1.9~5.9	46.0	1.292	8.0	4.0	5.1	20.6
2-2 淤泥	饱和、流塑	-18.0~-4.1	4.0~15.4	61.4	1.712	14.6	3.8	14.3	12.9
3 含砾淤泥	饱和	-23.5~-6.0	0.6~9.2						
4 砂砾石	稍密、饱和	-26.3~-15.1	2.4~8.6						

3.2 稳定分析

3.2.1 设计方案选择

由于地基软弱,填土施工较快,若地基不加固,其稳定安全系数为 0.80~0.84,小于规范要求值 1.15,且滑弧半径小,滑弧底面一般出现在 2-2 淤泥层或 3 含砾淤泥层,因此地基必须进行加固。

根据该工程具有地质情况复杂、堤身回填快的特点,若采用超载预压法加固地基,则需较长的预压时间;若单纯采用土工布加筋处理,又难以将安全系数从 0.80 提高到 1.15。因此,经比较分析后采用水泥搅拌桩加固地基并与土工布加筋配合使用,施工方便、快捷。

3.2.2 具体方案及计算结果

水泥搅拌桩平面上采用梅花形桩式布置,初步拟定水泥掺入量为 15%,面积置换率 m 取 15%,则有表 2 所列的水泥搅拌桩加固区各层复合地基土的抗剪强度。

表 2 加固区复合土体抗剪强度

Tab. 2 Values of shearing strengths of composite soils within strengthened zone

土层名称	7 天强度		30 天强度		90 天强度	
	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
1 粉质粘土	22.0	8.6	31.0	8.6	43.0	8.6
2-1 淤泥质粉质粘土	15.8	6.4	24.8	6.4	36.8	6.4
2-2 淤泥(3 含砾淤泥)	18.9	6.2	27.9	6.2	39.9	6.2

稳定计算时先假定加固区宽度、加固区位置及加固区深度,根据计算得出的安全系数及滑弧深度调整上述参数,力求得到满足要求的最小加固区范围,计算结果见表 3。其中:A. ZK₁、ZK₇、ZK₅ 分别代表 3 个不同地质剖面的稳定;B. 情况 2 中 90 天断面为 30 天断面的后期加高;C. 加固区宽 8.1 m,桩尖高程一般在砂砾石、碎石粘土层的顶面,且不低于-18.0 m 高程。

该工程总桩数为 5 780 根,桩基投资 365 万元,

表 3 水泥搅拌桩加固后稳定计算结果

Tab. 3 Results of stability calculation after being strengthened with cement agitation pile

项 目		安全系 数 K	滑弧底高 程 Y/m	滑弧半 径 R/m	桩尖高 程 Z/m	备注
情况 1 (地面加高段)	ZK_1	1.152	-9.4	28.8	-12.8	$K>[1.15]$
	ZK_7	1.187	-9.8	30.2	-11.6	
	ZK_5	1.151	-19.6	34.4	-18.0	
情况 2 (河道加高段)	30 天	1.178	-5.6	14.7	-18.0	$K>[1.15]$
	90 天	1.152	-19.8	28.1	-18.0	

占工程总投资的 35%。

3.3 工程运用效果

3.3.1 试桩及取芯

施工按设计要求采用水泥喷浆搅拌法,施工前先现场试桩及取芯检测试验,水泥掺入量为 15%时水泥土 30 天龄期平均抗压强度达到 1.07 MPa,且芯样连续,达到了设计要求。因此实际施工时水泥掺入量为 15%,并掺入了适量的粉煤灰、木质素磺酸钙等外加剂。

3.3.2 低应变动力检测

对水泥搅拌桩成桩质量的检验通常采用开挖检查、轻便触探、钻孔取芯等方法。这些方法只能对少数桩身质量进行检测,且费用较高、过程繁琐。结合相关工程经验^[5],该工程采用低应变动测法对桩身质量检测,动测桩数为总桩数的 3%,检测结果表明,水泥土标准龄期(90 天)强度达 1.2~1.4 MPa,Ⅰ类桩(桩身完整)占 63.2%,Ⅱ类桩(基本完整)占 35.3%,Ⅲ类桩(桩身明显缺陷)占 1.5%,但位置分散,不会对工程整体稳定造成影响,对于位于桩体较深处的缺陷不作处理,其中 1 根桩在桩顶以下 1.5 m 处出现缺陷,采取桩身挖除,回填 C₁₀素砼措施处理。

通过近年的大潮考验,工程安全稳定,表明稳定计算方法可行,工程质量可靠。

4 结语

水泥搅拌桩可以与桩间土形成复合地基,提高堤防加固区复合土体的抗剪强度,增强整体抗滑稳定性,提高地基承载力,因此水泥搅拌桩对新建堤防和老堤的稳定加固效果均较好。

采用共同协调面积比法确定复合土体抗剪强度,试算确定加固区位置、范围和桩间距等参数,以瑞典条分法进行水泥搅拌桩复合地基堤防稳定计算是可行的,可为类似工程提供参考。

低应变动力检测法检测水泥搅拌桩桩身质量方便、费用省,但在现行规范中未予明确,其适用性还有待于进一步论证。

参考文献:

[1] 曾国熙等.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1988

[2] 龚晓南.复合地基[M].杭州:浙江大学出版,1992

[3] GB50286—98,堤防工程设计规范[S]

[4] 周金鹏.粉喷桩加固高速公路软土地基的机理与设计[D].南京:南京理工大学,2003

[5] 牛志荣,李 宏等.复合地基处理及工程实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.6

Study of Application of Cement Mixing Pile to Dike Stabilization

GU Chang-cun¹, LIU Sheng-song²

(1. Geotechnical Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Department of hydraulic of Jiangsu, Nanjing 210029, China)

Abstract: Composite foundation formed by cement agitation piles is used in strengthening dike foundation for improving the stability of dike project. The strengthening mechanism of cement agitation piles is analyzed along with the way in which composite foundation bears external loadings. The weighted area method is adopted to calculate the shearing strength of composite soil, with which the composite foundation stability is calculated. In connection with a case example of a river repair project, improving effect of cement agitation pile is discussed and the dike stability under different working condition is evaluated. The results of study indicate that cement agitation pile can improve effectively the bearing capacity of foundation and the stability of dike, and takes a short construction time and performs well after construction. Thus this procedure of dike stabilization can serves as a reference for other similar projects.

Key words: cement agitation pile; composite foundation; stability as a whole