

⑬

一种提高地基加固处理设计可靠性的方法

45-48

倪 军

徐光明

TV223

(河海大学设计院 南京 210098)

(南京水利科学研究院 南京 210024)

摘要 提出一种提高地基加固处理设计可靠性的方法,它包括常规的稳定分析计算和土工离心模型试验。按照这一方法,对一塌滑后灰坝地基加固处理设计方案分别进行极限分析和模型试验,通过对天然地基上坝体填筑过程的模拟,清晰显示了由于坝基淤泥层软弱且层底面向下游倾斜导致了坝体向下游侧位移过度发展形成塌滑失稳。通过对坝基处理后坝体修复过程的模拟,预测出水泥搅拌法和挤密砂桩法的加固效果。结果表明,坝基加固区形成的水泥土比挤密砂桩形成的复合地基更能有效阻止坝体侧向位移向下游的发展,从而提高了地基加固处理的可靠性。

关键词 地基加固 极限分析 离心模型试验 深层搅拌法 挤密砂桩法

可靠性

建筑物坍塌后的加固处理设计受多方面因素的影响和制约,施工场地和地基条件是两个最主要的因素。受场地限制,往往需采用一些新的加固处理方法。然而由于这些较新的处理方法仍处于发展阶段,设计计算理论不够成熟,当它们被应用到较为不利的工作场合时,设计的不确定性可能大为增多,这时就迫切需要能有一个来自不同角度不同途径的验证。现场试验当然是一种很好的选择,它可以直接检测设计的可靠性,然而它是一项十分耗时、费力、花费很大的工作,且往往仅能对个别方案设计的可靠性进行检测。

目前还有一种物理方法——土工离心模型试验,同样可以帮助设计人员能事先对多种可能的方案设计进行模拟预测,对它们的加固效果进行比较,同时加深对它们在设计条件下的性状表现和加固机理的认识,最终对地基加固处理设计的可靠性作出较为全面的检测^[1,2]。这时地基加固处理的设计程序可大致用图 1 表示。下面就是按照这一设计程序对一塌滑后的灰坝的地基所进行的加固设计和可靠性试验分析研究。

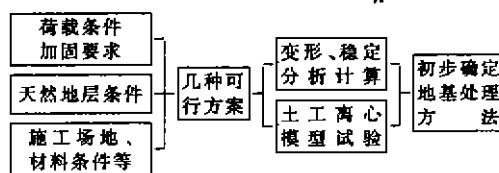


图 1 地基处理设计程序

1 坝基处理设计

某灰库位于长江一级阶地上,灰坝拟由 4m 高的初级坝就地取土加高而成,设计坝高 8m。施工前坝基未做加固处理,上坝速率较快,在加高至 6~7m 时出现多次塌方,中断施工。工程检验勘测发现,坝基持力层是强度低、压缩性高的淤泥,最大层厚 9m,层底面向下游倾斜,其承载力仅 40~50 kPa,图 2 为塌滑段的断面图。

为了确保灰库建设继续进行,拟先对坝滑段的坝基软土进行加固,然后修复填筑灰坝。根据现场施工条件,初步优选了两种处理方法。

1.1 水泥搅拌法

该法通过特制搅拌机械在加固区将软土和

第一作者简介:倪军,男,工程师,从事工业与民用建筑设计。

水泥强制拌和,利用固化剂水泥和软土之间所产生的一系列物理-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地基。

考虑到该工程是属于抢险修复工程,坝体在加固施工期的安全最为关键,因此设计和试验研究选用的水泥土强度定为 55 kPa。经计算,加固宽度为 8.4 m,深度为 12 m,即加固区底部落在强度较高的亚粘土层中,见图 2。为了使渗透水流畅通排出以降低浸润线,考虑在坝体和坡脚布置了排水结构物。

1.2 挤密砂桩加堆土预压

挤密砂桩采用振动法施工,与桩间土一起形成复合地基;另外砂桩是很好的排水通道,堆土预压能加快地基的固结,使土的强度提高。

挤密砂桩桩径为 0.5 m,桩距为 1.0 m。经计算,挤密砂桩复合地基宽度为 20 m,深度为 12 m,即桩长需 12 m,这样加固区置换率约为 0.2。复合地基的强度指标 c_{sp} 为 4.8 kPa, φ_{sp} 为 16.5°。加固设计见图 3。

下面对“水泥搅拌法”和“挤密砂桩加堆土预压法”分别做进一步的离心模型试验研究和稳定分析。

2 土工离心模型试验

2.1 土工离心模型试验方法

与数值分析方法不同,土工离心模型试验方法是一种物理模型方法。这种土工离心模型,不同于普通的小比尺物理模型。在普通重力场(重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$)中的小比尺模型,模型各点的应力水平比原型(即所模拟的实际工程)低许多,土的许多特性如应力应变关系非线性以及内摩擦角的应力依赖性不能得到真实反映。但当这种小比尺模型放入离心机,让其承受 n 倍重力加速度(ng)的离心加速度惯性力场作用时(n 为模型的几何比尺),模型土体中的应力水平大大提高,使得模型与原型在对应点处的应力状态相同,与应力水平密切相关的土的特性都能得到如实反映,因而模型所表现出的性状就

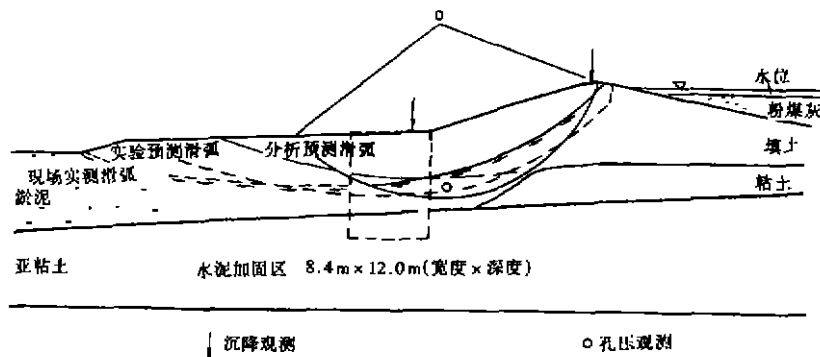


图 2 灰坝坍塌段面及水泥搅拌法方案设计

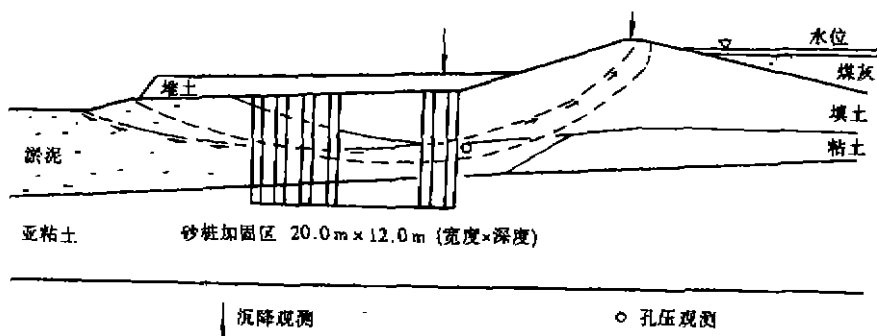


图 3 挤密砂桩加堆土方案设计

与原型相同。

根据固结理论,土体达到某一固结度,超静孔隙水压力消散所需的时间与排水距离的平方成正比。对一般软粘土来说,其透水性很小,土层中超静孔压产生后,往往需要几年甚至几十年才能完全消散完毕。如果用离心模型试验模拟这一过程,由于模型消散时间为原型的 $1/n^2$,仅需几十小时甚至更短时间内就能完成。因此可以很方便地利用土工离心模型观察和研究各种设计条件下或现场真实条件下原型可能出现的种种性状,事先作出预测。

土工离心模型试验是依据模型相似律来制作模型进行试验和分析结果的。简单归纳起来它可分为几何相似要求,内部模型材料性质相似要求和外部受力条件相似要求以及性状反应相似关系,与本次试验相关的相似律内容已列于表 1。

表 1 模型相似律

内容分类	物理量名称	符号	模型与原型比例
几何量	堤高	H	$H_m/H_p = 1:n$
	加固区面积	A	$A_m/A_p = 1:n^2$
	孔隙比	e	$e_m/e_p = 1:1$
	含水量	w	$w_m/w_p = 1:1$
	密度	ρ	$\rho_m/\rho_p = 1:1$
材料性质指标	强度指标	c_u	$c_{um}/c_{up} = 1:1$
	加速度	g	$g_m/g_p = n:1$
外部条件	荷载	p	$p_m/p_p = 1:1$
	时间	t	$t_m/t_p = 1:n^2$
性状反应	超静孔隙水压力	u	$u_m/u_p = 1:1$
	位移	δ	$\delta_m/\delta_p = 1:n$

2.2 模型试验结果

模型试验是在南京水科院 NH-89 型 50 g 土工离心机上完成的。依据该机的容量和规格,结合塌坝灰坝剖面情况,选定模型比尺为 1:125,即 $n = 125$ 。模型土料取自灰坝现场,按照表 1 模型律的要求制作模型。试验中对模型进行下列内容测试:堤顶处沉降、加固区坡脚处沉降和软土层中的孔隙水压力(见图 4)。另外,在灰坝断面布置有变形观测标志,用闭路电视监测坝体变形发展过程。

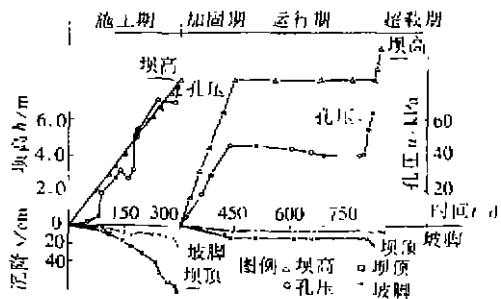


图 4 坝顶、坝脚沉降及孔压与时间关系曲线 (水泥搅拌法方案)

试验时模型土性指标和试验结果分别列于表 2 和表 3。下面对试验结果再作一些描述和分析。

表 2 模型土性指标

土 层	容重/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	强度指标
天然和坝体	填土层(1)	$c_u = 12.5 \text{ kPa}$
	淤泥(2)	$c_u = 7.5 \text{ kPa}$
	粘土(3-2)	$c_u = 24.8 \text{ kPa}$
	亚粘土(6-2)	$c_u = 30.0 \text{ kPa}$
加固区	挤密砂桩	$c_p = 4.8 \text{ kPa}$
	复合地基	$\varphi_{sp} = 16.5^\circ$
	水泥土复合地基	$r_u = 55 \text{ kPa}$

表 3 模型试验结果和稳定分析一览表

工 期	稳定安全系数	
	土工离心模型试验	稳定分析计算
加 固 前	0.88	0.91
加固后	挤密砂桩法	1.09
	水泥搅拌法	1.18

2.2.1 天然地基上坝体的稳定性

每组试验前先进行天然地基上坝体施工期模拟。两组模型试验施工期结果大体一致。

当坝体在天然地基上填筑至 5m 时,孔压陡然上升,坡脚处沉降显示开始隆起(见图 4)。当坝高继续升高时,隆起随之发展,坝体中向下游的水平位移开始逐渐明显;当坝体填筑至设计高度时,量测到最大水平位移达 40cm。此时堤顶处发现有较深的裂缝,并与坝体剖面呈现的一条明显的滑移线相联。严重变形破坏后的坝体高约 7.0m。因此设计坝高时的安全系数是 0.88。

将现场实测的滑动面位置图与试验测得的裂缝和滑移线重叠后发现,两个滑弧非常接近(见图 2),它表明模型试验方法的可靠性。

2.2.2 地基用水泥土和挤密砂桩处理后坝体的稳定性

塌坝后的坝体分别用水泥土和挤密砂桩对坝基软土进行处理,然后进行修复,继续填筑坝体,它们的性状分别如下。

坝基经水泥搅拌桩处理后,经过一定龄期将坝体填筑至设计高度,其坝脚处没有再出现隆起,测得的孔压也较小。

为了实测坝基加固后灰坝的安全度,我们进行了超载填筑试验^[3]。提高离心机转速,将离心加速度从 125g 迅速增至 166.3g,坝高从 8m 升高至 10.6m。在这一过程中,坝高 9.6m 时,水泥土又开始发生隆起,随后有滑移迹象,水泥土中也发现有裂纹。由此得到的安全系数为

$$F_s = n_f/n$$

式中 n 为模型的设计加速度水平(等于模型的几何比尺), n_f 是模型破坏时的加速度水平。这是因为模型从 n_g 增加至 n_fg 超载过程中,地基和坝体土没有发生排水而增加抗剪强度,故坝基的承载力未发生变化,仅是被发挥至极限,因而能确定坝基加固后的极限坝高,其值为 9.6m,坝基加固后灰坝的稳定安全系数达 1.2。

同样,坝基经挤密砂桩处理后,填筑成的坝体不再向下游侧斜滑移,但仍有一定的变形,说明加固力度还不够,稳定安全系数约 1.0。其加固效果没有水泥土处理的效果好。其原因是挤密砂桩形成的复合地基整体抵抗变形的能力不理想,而搅拌形成的水泥土的模量大,能有效阻止坝体向下游侧向变形,不致于让水平位移发展过大而产生滑动。

3 稳定分析计算结果

由于坝基淤泥的透水性极差,最可能发生不排水剪破坏,故计算坝体的稳定安全系数时,天然土层用不排水剪强度指标,加固区则用复合地基土抗剪强度。总应力分析法^[4]计算参数和结果分别见表 2 和表 3。

比较模型试验和稳定分析求得的坝体安全系数,两者虽有些差异,但仍较接近。所设

计的两种处理方法中,水泥土加固后坝体的安全系数,试验和计算两方面都是安全的;而坝基经挤密砂桩加固后,阻滑效果不明显,坝体安全度不够,没有达到理想的加固效果。

4 结 语

a. 本文提出了一种提高地基加固处理设计可靠性的方法,它不仅包括常规的极限平衡稳定分析计算,而且加入了土工离心模型试验,从而能帮助设计人员事先从不同角度对加固效果进行预测,加深对所选择的处理方案在设计条件下的性状表现的直观认识,从而提高加固工程设计的可靠性。

b. 由于土工离心模型与原型在对应点处的应力状态相同,与应力水平相关的土的特性都能得到如实反映,因而模型所表现出的性状就与原型相同,因此可以在模型中观察各种设计条件下或原型真实条件下原型可能出现的种种性状。本项试验研究观测的天然地基上灰坝滑移线与原型滑裂面几乎重合,证明了本文方法的可靠性和正确性。

c. 综合离心模型试验和稳定计算这两种不同途径的分析结果,天然地基上灰坝设计坝高的安全系数小于 1.0,经挤密砂桩和水泥土对坝基加固后,这一系数分别提高到 1.0 和 1.2,用水泥土对软基作加固处理能满足设计要求。

参考文献

- 1 Steenfelt J S. Centrifugal modeling and limit analysis — reciprocity or adversity?. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(11): 987 ~ 990
- 2 徐光明,章为民. 第二届国际软土工程会议模型专题综述. 水利水电科技进展, 1997, 17(1): 38 ~ 41
- 3 Avgherions P J, Schofield A N. Drawdown failures of centrifugal models. In: Papers subcommittee of the Organizing Committee for the 7th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering ed. Proc of the 7th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering(2), Mexico, 1969. 497 ~ 505
- 4 Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7): 577 ~ 596

(收稿日期: 1997-07-10 编辑: 许宇鹏)