

文章编号: 1004- 4574(2007)01- 0081-07

堤坝滑坡区土性试验和灾害治理

何开胜

(南京水利科学研究所 土工研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:对某泵站进水渠堤坝滑坡区内外的土体进行了静力触探试验和十字板强度试验,比较了滑坡区软土的天然强度和滑坡后强度,确定了滑动面深度。对施工期的边坡稳定进行了圆弧滑动和非圆弧滑动计算,结果表明边坡稳定受含有机质夹层的非圆弧滑动的控制,当使用快剪强度指标、井点降水失效时,边坡处于失稳的临界状态。最后,对堤坝滑坡提出并实施了真空预压治理方案,方案实施后进行了效果检测,确定软土强度已超过稳定要求值,加固效果明显。

关键词:堤坝; 滑坡; 治理; 真空预压

中图分类号: TU413.6+2 文献标识码: A

Tests of soil in landslide area of embankment and disaster control

HE Kai-sheng

(Geotechnical Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract Firstly CPTs and vane strength tests are performed for soil at landslide area of intake canal embankment of Taipa River pump station, then the natural strength of soft clay and its strength after slide is compared, giving the depth of sliding surface. Secondly, the slope stability in construction period is calculated with circular arc and non-circular arc sliding surface and the results indicate that the slope stability is controlled by the non-circular sliding surface including organic interlayer. The slope is in unstable state when quick shear test strength indexes are used and drainage by well point is invalid. Finally, a vacuum-preloading control plan is proposed and implemented. The inspecting result shows that the soft clay strength exceeds stability request value. The treatment effectiveness is outstanding.

Keywords embankment; landslide; control; vacuum-precompression

太浦河泵站工程位于江苏吴江市境内太浦河南侧,功能是抽引东太湖水供应上海市,设计流量 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 投资 2.76 亿元。泵站进水渠为梯形明渠,全长 487.7 m,原地面高程在 +5.0 m 左右,堤顶设计高程 7.0 m,渠底高程 -2.5 m,渠底宽 70 m,渠道边坡 1:3 在高程 3.2 m 处设置宽 5 m 的马道^[1]。各土层物理力学指标如表 1,其中最软弱层为淤泥质粉质粘土₃,它厚度变化较大,含有机质薄层。

泵站渠道用下挖、上填相结合来形成,开挖时采用轻型井点降水,开挖渠道的弃土就堆在堤顶。进水渠开挖成形、堤顶堆土 1.3 m 时均未出现边坡失稳。但衬砌坡面块石时,突然发生了已开挖边坡的滑动破坏。滑坡范围沿堤轴线方向长约 62 m,滑坡引起的坡身土体向堤脚外推移了 30 m。堤脚的滑动面为自然状态,未出现隆起现象。滑坡区位置、范围和土层分布如图 1 所示。此后 1 个多月,在此滑坡区下游约 20 m 处又

收稿日期: 2004- 10- 30 修订日期: 2007- 01- 04

基金项目: 国家计委高技术应用部门发展项目资助

作者简介: 何开胜 (1963-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事软土地基处理、土工数值分析和灾害防治研究。E-mail: ksh@nhri.cn

出现了一次范围较小的滑坡。

表 1 各土层物理力学指标

Table 1 Physical mechanical indices of soil layers

层号	土类	w %	$\rho / (\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	e	w _l %	w _p %	C _q /kPa	$\Phi_q / ^\circ$	C _{cq} /kPa	$\Phi_{cq} / ^\circ$	k / (m · s ⁻¹)
1	粉质粘土	34.4	1.87	0.95	41.5	24.5	16	13	8	29.3	
2	粉质壤土	35.2	1.87	0.97	33.6	23.0	14	15	19	26.6	3.0×10^{-6}
	(所含有机质土)	67.9	1.59	1.89							
3	淤泥质粉质粘土	45.9	1.78	1.23	39.4	23.5	13	5	13.6	13.7	8.6×10^{-6}
	(所含有机质土)	83.7	1.55	2.29							

本工程滑坡后采用探地雷达进行了滑坡面探测,结果显示软土层中含有较完整的有机质夹层,推断了夹层位置,确定本次滑动面为沿有机质夹层发生的非圆弧滑动面,如图 1 所示^[2]。

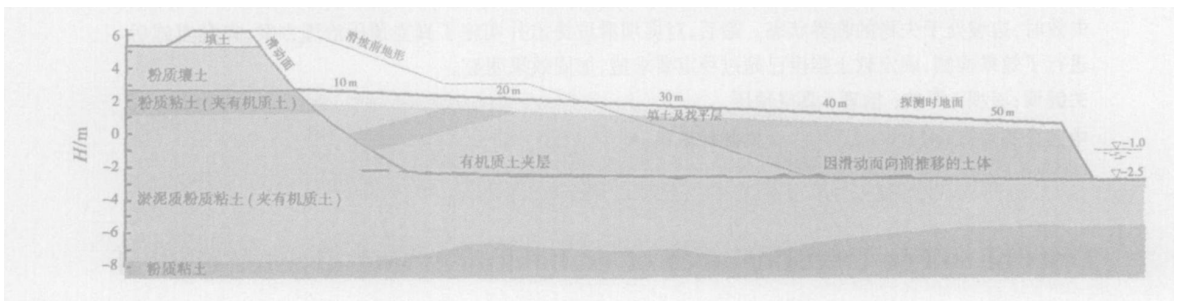


图 1 滑坡面地质雷达成果推断图

Fig 1 Deductive diagram of ground penetrating radar gain on landslide surface

1 滑坡区土性原位试验

1.1 试验内容和位置

考虑到滑坡处 3 土层较厚,强度低,并夹有机质土,为检查滑坡区 3 土层及其附近土层的强度状态和滑弧位置,为滑坡处理方案设计提供基本资料,进行了 7 孔十字板强度和 9 孔静力触探试验,位置如图 2^[3]。

1.2 试验结果和分析评估

图 3 为滑坡区一个典型横断面的比贯入阻力 p_s分布和淤泥质粉质粘土层 3 的分布范围。从各孔静力触探曲线可以得出:

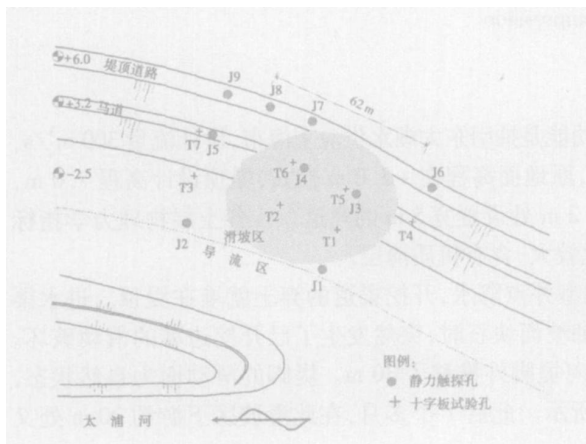


图 2 滑坡区域和试验点位置

Fig 2 Landslide area and location of test sites

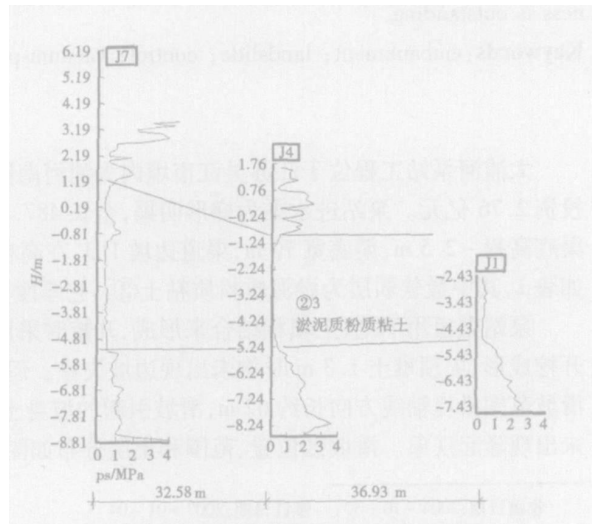


图 3 静力触探曲线和软土层横剖面

Fig 3 CPTs curve and cross section of soft clay layer

(1)淤泥质粉质粘土₃的原状土 p_s 平均值。J6、J7、J8、J9孔为堤顶道路上位于滑坡体以外处土层的触探曲线。这部分钻孔处没有开挖,只有部分填方,若不考虑填方对地基土的扰动和固结影响,则其下土层的试验值可视为天然地基在未扰动以前的比贯入阻力 p_s 。滑坡体下游J7、J8和J9孔中₃土层的 p_s 平均值分别为527 kPa、511 kPa和517 kPa,结果非常接近,三者之平均为518 kPa,此值即为₃层原状土的 p_s 平均值。

(2)滑坡体内曾受很大扰动的土层现时 p_s 值。J3、J4孔位于滑坡体内,结果可视为₃土层受滑坡扰动很大后的比贯入阻力,平均值分别是221 kPa和170 kPa。可见,₃土层扰动后的 p_s 值只有原状样的43%和33%。此值一方面反映了土体扰动后强度显著降低,另一方面也包含有效上覆压力的降低引起的土强度降低,在室内三轴试验中表现为围压 σ_3 降低引起的土强度降低。

(3)滑坡体边缘受局部扰动的土体 p_s 值。此处土层因受滑坡体的部分扰动以及开挖卸荷影响,比原状土 p_s 值略小。J5、J1和J2孔中₃土层的 p_s 平均值分别为439 kPa、398 kPa和235 kPa,是原状土 p_s 值的85%、77%和45%。此值在中间马道处较大,在开挖最深的渠底较小。这除与测点距滑坡体的远近有关(愈近时强度折减愈大),还与渠底开挖引起的卸载较大也有一定的关系。

(4)滑动面位置。位于滑坡体内的J3和J4孔试验结果表明,J3孔在-2.05高程处 p_s 达到一个明显小值,为118 kPa。J4孔在-2.44高程处 p_s 达到一个极低值,仅15 kPa。据此判断滑动面经过J3和J4的-2.05和-2.44高程。

图4为7孔十字板试验结果,从中可以看出:

(1)淤泥质粉质粘土₃的原状土不排水强度。从滑坡区外T7和T3孔试验,可得₃土层7点平均不排水强度为21.7 kPa。

(2)滑坡体内受很大扰动的土层现时不排水强度。T1、T2、T5、T6位于滑坡体上,受滑坡引起的很大扰动,₃土层的19点十字板不排水强度平均值为16.4 kPa,是原状土样强度的75%。

(3)软土层₃的灵敏度。滑坡体外T7土体现时强度为17.1~27.9 kPa,平均21.7 kPa,十字板试验时经充分扰动后,强度变为5.2~14.9 kPa,平均10.4 kPa,灵敏度为2.1,表明该软土层灵敏度不高。

需要指出的是,本次试验是在开挖和填方基本完成时对滑坡区域内外做的部分试验,因存在开挖卸荷引起的土强度降低和堤顶压载引起的扰动和固结,现时试验得出的强度指标与原天然地基强度已有所差别。

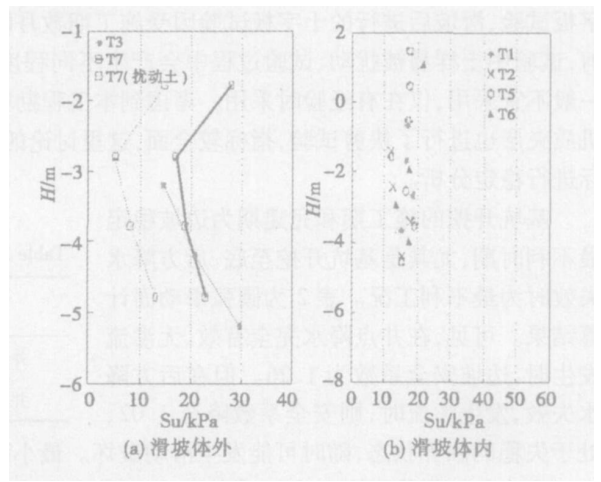


图4 软土层₃十字板强度曲线

Fig. 4 Vane strength curve of soft clay layer₃

2 施工期边坡稳定计算和滑坡原因

2.1 稳定计算方法

土坡稳定计算方法通常用毕肖普法,它考虑了土条间的水平向和垂直向作用力。简化毕肖普法仅考虑土条间的水平向作用力,其稳定安全系数计算公式为^[4]

$$F = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{c' b_i + (1 - r_u) \gamma h_i b_i \tan \phi'}{\cos \theta_i + (\sin \theta_i \tan \phi')} / F}{\sum_{i=1}^m (W_i \sin \theta_i + C W_i a_i R)}$$

式中 r_u 为孔隙压力比,定义为总的孔隙水压力和总的上覆压力之比, $r_u = \rho_w h_{iw} / \gamma h_s$, ρ_w 为水容重。当已知渗流浸润线位置时,可逐点输入测压管水位高度来计算。

本次计算采用多种土质堤坝的转动平衡分析计算机程序 REAME。程序可以处理很多土质组成的任何形状的边坡,可根据给定的测压管水面线或孔隙压力比考虑渗流的作用,既可用简化 Bishop 法也可用瑞典条分法求安全系数。

2 2 计算参数和计算结果分析

计算按滑坡后重新勘探的土层剖面进行,即以图 3所示横断面为基础。考虑到滑坡体范围内土层层位因滑动而有所下陷,实取土层层位以滑坡体后方的 J7静力触探孔为准,土层断面如图 5

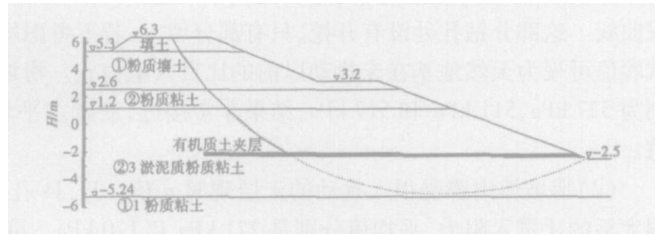


图 5 稳定分析计算的土层分布和滑动面位置

Fig 5 Soil layer distribution and location of sliding surface from stability

考虑本工程堆载地基下未打设排水板,施工期短,滑坡又在基坑开挖施工期发生。这期间,土体不仅没有因固结而增加强度,

而且基坑开挖相当于围压 σ_3 减小,会使土体强度降低。此外,开挖卸荷后,土层将产生负的孔隙水压力,挖后初始强度较高;以后一定时间内逐渐吸水膨胀,负孔隙水压力逐渐消失,抗剪强度逐渐降低。因此,开挖工程应采用卸荷条件下试验的抗剪强度指标。填方加荷工程则不同,其土层强度随土体固结而逐渐增高。

本工程因无卸荷条件下试验的 c, φ 值,较理想的稳定计算指标应是原位十字板强度,但勘察阶段未做十字板试验,滑坡后进行的十字板试验因受施工期数月的井点降水和堤顶堆载作用,强度可能偏高。对直剪快剪,试验中土样易被扰动,试验过程中会产生不同程度的排水固结(因人和设备而异),常使试验结果分散,一般不宜采用,仅在有经验时采用。考虑到本工程勘察阶段不仅对各土层进行了快剪试验,而且对软土中有机质夹层也进行了快剪试验,指标较全面,这里讨论的是边坡临界状态而非安全系数取值,因此,采用快剪指标进行稳定分析。

基坑开挖的施工期和完建期为边坡稳定最不利时期,尤其是基坑开挖至底,后方降水失效时为最不利工况。表 2为圆弧滑动面计算结果。可见,在井点降水完全有效、无渗流发生时,边坡安全系数为 1.26,但在后方降水失效,发生渗流时,则安全系数降至 1.02,

表 2 基坑开挖期边坡稳定安全系数(快剪指标)

Table 2 Safety factors of slap stability in excavation of foundation pit

计算情况	圆弧滑动	非圆弧滑动
井点降水完全有效	1.26	1.22
井点降水完全失效	1.02	1.01

处于失稳的临界状态,随时可能发生滑动破坏。最小稳定安全系数对应的滑弧位置如图 5所示。

考虑本工程软土中含有有机质夹层,也可能发生沿软弱夹层面产生的非圆弧滑动。为此,按极限平衡法,采用圆弧滑动面的后部圆弧,当遇有机质夹层时转而按夹层面滑动,算得无渗流时边坡安全系数为 1.22,后方降水失效时安全系数为 1.01,比圆弧滑动面略低。结合前述物探分析和当时施工情况,可确定:边坡在正常使用下是稳定的,但在大雨后陆上降水失效,发生渗流时,会产生沿有机质夹层的非圆弧滑动,这与滑坡前址处土体无隆起、坡面土体水平前移达 30m的现场景象相吻合。

2 3 滑坡原因分析

2 3 1 设计选用的强度指标

当初设计院根据勘察报告,采用固结快剪强度指标,对进水渠选取 9个计算剖面进行了瑞典圆弧滑动法稳定计算。结果表明,各种工况下边坡稳定计算安全系数为 1.21~ 1.60,最小安全系数位于当前滑坡处,最危险圆弧滑动面与淤泥质粘土层底面相切。完建期堤防的抗滑稳定能满足堤防工程设计规范要求^[5],即正常运用条件下安全系数 $k > 1.30$ 非常运用条件下 $k > 1.20$ 。

在整个泵站基坑开挖过程中,除本滑坡区外,还曾出现两个问题:一是西北角翼墙部位在开挖接近设计基面时,出现细微的流砂,经加大排水、加快局部施工,及早封底处理后,监测表明封底后一切正常。二是西南边坡的一个观测点曾在同一天内沉降及倾斜变化均超过规范允许值,对该区域暂停施工 3d 待稳定后继续施工,监测表明,工程安全。这些均表明本工程边坡基本处于滑动的临界状态。

笔者认为,土坡稳定分析时选用土层强度指标要尽量与实际工程受力状态和固结程度相符。对渗透性很小的淤泥质软土层,最好用十字板强度。对施工期,宜采用快剪或十字板指标,若打有排水板则适当考虑土强度因固结引起的增加;只有在土体完全固结完毕时才能使用固结快剪指标;实际工程中土层基本处于快剪和固结快剪之间,用固快指标时安全系数应取较大值,用快剪指标时则可适当降低。例如,港口工程地基规范就曾规定边坡稳定的最小安全系数为^[6-7]:用快剪指标时 1.0~ 1.2 用十字板剪或固结快剪指标时 1.1~ 1.3 校核施工期的稳定性,取低值。本工程未打排水板,开挖和堆土施工历时短,软土强度低、渗透性小,

施工期基本未固结,因此不能采用固快强度指标,只能使用快剪指标或十字板强度。

施工完建期通常是边坡稳定最不利工况。这时,河道开挖和新建挡墙已完成但未通水,边坡前后水头差大、土体强度低、坡面约束程度低。不少堤坝在新建完成后,自身并不存在稳定方面的问题,但由于坡后弃土过多或适逢连续雨天,积水过多等原因,土层含水量增大、强度降低、地基附加应力增大、渗透压力增加等,使边坡工作环境恶化,发生滑动破坏。本工程就是一个示例:如果井点降水完全有效,使用快剪指标得到的安全系数虽然满足规范要求,但考虑井点淤堵及长时间连续降雨等影响,当井点完全失效时的安全系数则达不到规范要求,处于滑坡临界状态,随时有滑动的趋势。

2.3.2 滑坡原因

综合前述内容,分析本工程滑坡原因主要有以下4点。

(1)滑坡处₃层淤泥质粉质粘土在本工程中最为深厚,施工过程中其实际强度指标比设计计算采用的固快指标偏低,这是设计稳定而实际发生滑坡的主要原因。用快剪指标计算的安全系数基本与现状相符。

(2)滑坡前1d下雨,雨水渗入土坡,使土体基本处于饱水状态,引起强度降低。此外,堤后小水沟内积水上升,浸润线抬高,堤身渗流和堤后水压增大,增加了不安全性。

(3)太浦河电站的进水渠属于挖、填结合型,新开挖的渠道属卸荷过程,堤防回填高约1.3m,属加荷过程。渠道的开挖和回填几乎同时进行,时间短促,使土体内产生超静孔隙水压力,强度降低。此外,常有施工机械在堤顶行走。

(4)本工程开挖后的渠底完全切进了₃软土层,使位于坡脚的滑动面出口处无任何镇压土层,失去了最有利于稳定作用的抗滑力矩,使失稳得以形成。

3 滑坡治理和效果检测

3.1 滑坡治理方案设计

对滑坡的处理一般采用减小边坡坡度、堤顶减载、堤脚压载的办法,由于进水渠的河道断面及堤顶高程必须满足过流和防洪要求,这些方法均不适用。只能采用软基处理,通过提高软土层的物理性能和强度指标,来提高稳定安全系数。为此,建设单位咨询南京水科院等科研和设计单位,考察滑坡现场,研究治理方案。经充分讨论,认为可采用的方案有水泥土搅拌桩和真空预压法。本工程为I级堤防,重要性大,考虑到搅拌桩成本较高,施工质量难以保证,且只是局部加固,风险较大。而真空预压法虽需时较长,但属整体加固,且成本低,质量可靠,风险小。因此,确定采用塑料排水板真空预压法治理本滑坡。

加固范围是沿堤纵向穿过滑坡区并向二侧各外延约20m,沿堤横断面方向穿过滑坡区并向二侧分别外延5m和15m。加固处理前,先对滑动土体及其四周部分土体进行削坡,再顺势找平,形成微倾的地面。然后打设塑料排水板,间距1.3m,在滑坡区两侧各18m范围内,间距依次为1.5m,2.0m,2.5m。本工程加固对象主要是₃层淤泥质粉质粘土,以渠堤稳定为控制条件的,排水板的长度根据最危险滑动面深度确定,再考虑适当的安全系数,最终选取排水板底高程为-9.00m。

滑坡加固设计图如图6所示。根据太沙基固结理论,在固结系数为 $3.14 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 时,预压70d就可达到88%的平均固结度,土体不排水强度达到31kPa,井点降水失效时安全系数仍达到1.30满足稳定要求。

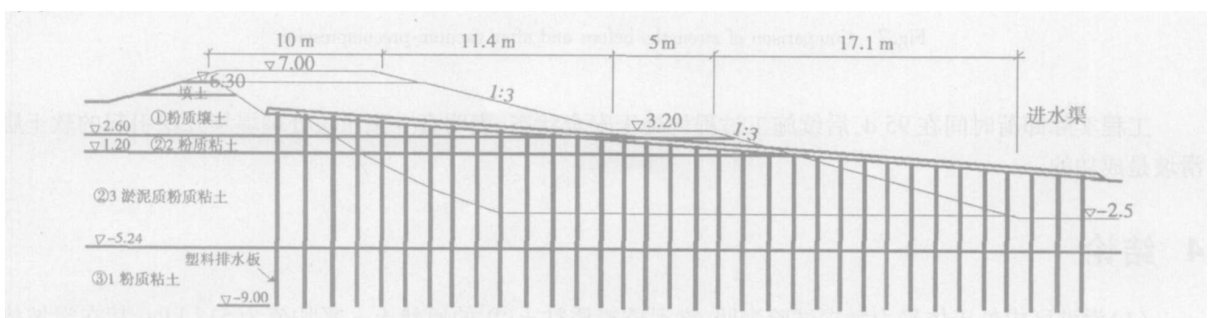


图6 进水渠设计断面和真空预压加固设计

Fig 6 Planned section of inflow channel and design plan of vacuum preloading

施工时布置 6 台射流真空泵, 每台泵的平均作用面积约 900 m^2 , 预压期间膜内真空度不小于 80 kPa , 对滑坡体范围, 土体固结 70d 后进行现场十字板试验, 当强度指标达到相应设计要求后方可开始进行回填土施工和二次开挖, 恢复原设计边坡。

3 2 安全监测结果

为了保证施工期间渠道安全, 在真空预压期间进行了地表沉降和深层水平位移等监测。

(1) 表面沉降。预压 60 d 后, 最大沉降发生在 J5 点, 为 322 mm , 最小沉降发生在 J9 点, 为 136 mm , 平均沉降值为 224 mm 。

(2) 水平位移。加固区 3 根测斜管水平位移指向加固区内, 主要发生在 8 m 深度内, 最大值约在 2 m 深度, 分别为 66 mm , 47 mm 和 53 mm 。抽真空初期水平变形速率较大, 30 d 以后变形趋缓。

3 3 加固效果检测

为了检测加固后滑坡区土体强度状况, 在真空预压历时 70 d 我们对加固区进行了 3 孔十字板试验和 1 孔静力触探试验, 试验结果如图 7^[8]。

从真空预压区内的静力触探曲线可以看出: 3 层淤泥质粉质粘土加固后的比贯入阻力 p_s 达到 1409 kPa ($-0.6\sim-5.4\text{ m}$ 区域的平均值), 为加固前该处 p_s 值 (221 kPa) 的 6.4 倍, 加固效果明显。同时也应看到, 上部 5 m 土层强度增加很大, 下部 5 m 强度增加不多, 衰减迅速, 这与真空预压时间不长, 真空度向下传递深度还较浅有关。

从真空预压区内的十字板试验曲线可以看出: 加固后软土强度上面高, 往下渐小; 坡脚处又较坡顶处小。预压后淤泥质粉质粘土不排水强度最大 74 kPa , 最小 21.9 kPa , 平均值为 47.3 kPa , 而该区域内预压前的不排水强度仅有 16.4 kPa , 现强度为预压前的 2.9 倍, 达到了设计要求的 31 kPa 强度值, 基本可以终止真空预压过程。为了加强真空度在土层深处的作用, 提高深层软土的加固效果, 建议继续抽真空至恒压时间达到 90 d 时再卸荷。

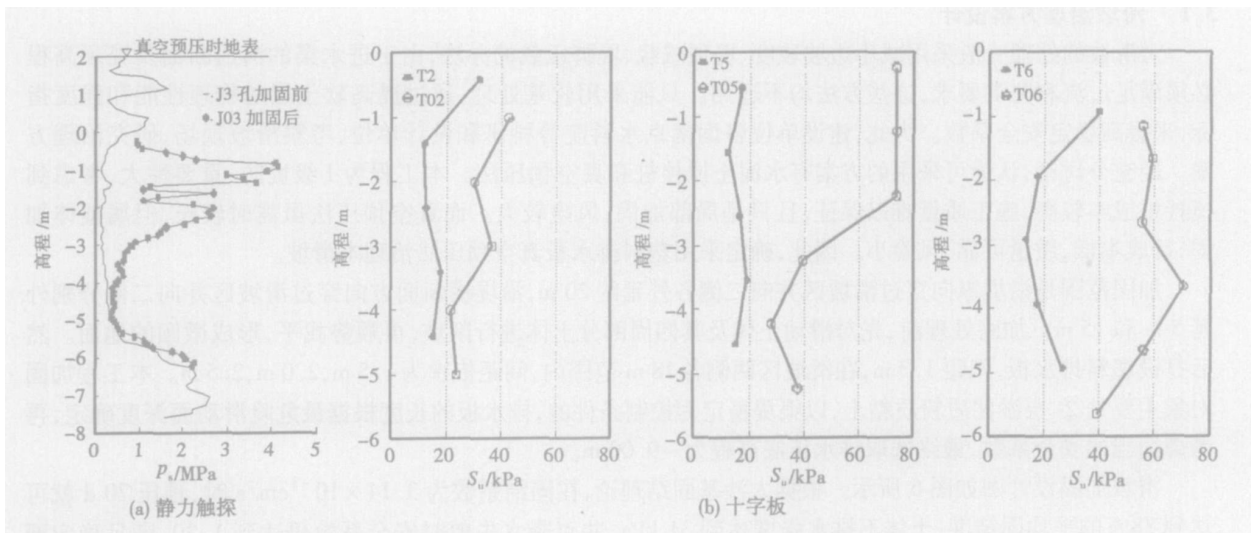


图 7 真空预压前后强度比较

Fig 7 Comparison of strengths before and after vacuum pre-compression

工程实际卸荷时间在 95 d, 后续施工过程均处于安全状态, 表明真空预压法处理堤坝开挖引起的软土层滑坡是成功的。

4 结论

(1) 滑坡区内外土体静力触探试验表明, 淤泥质粉质粘土 3 的原状土 p_s 平均值为 518 kPa , 其在滑坡体内受滑坡扰动后的 p_s 值只有原状土的 $43\% \sim 33\%$ 。 p_s 最小值仅有 15 kPa , 位于高程 -2.44 处, 确定为滑动面经过的位置。

(2) 滑坡区内外土体十字板试验表明, 淤泥质粉质粘土₃的原状土不排水强度平均为 21.7 kPa, 其在滑坡体内受滑坡扰动后的强度为原状土的 75%。软土层₃的灵敏度为 2.1。

(3) 土坡稳定计算结果表明, 边坡稳定受含有机质夹层的非圆弧滑动控制。使用快剪强度指标时安全系数为 1.22, 但若井点降水失效时则降为 1.01, 处于失稳的临界状态, 这是本次滑坡的主要原因。

(4) 土坡稳定分析时选用土层强度指标要尽量与实际工程受力状态和固结程度相符。本工程未打排水板, 开挖和堆土施工历时短, 软土强度低、渗透性小, 施工期土体基本未固结, 采用固快强度欠妥, 宜用快剪或十字板强度。

(5) 针对前述滑坡事故, 提出了真空预压治理方案和加固效果检测。结果表明, 预压 70 d 后, 淤泥质粉质粘土₃的 p_s 值达到 1409 kPa, 为加固前的 6.4 倍; 十字板强度平均 47.3 kPa, 为预压前的 2.9 倍, 达到设计要求的 31 kPa, 加固效果明显。

参考文献:

- [1] 郑海龙. 太浦河泵站工程深基坑的设计与施工 [J]. 上海水务, 2003(1): 35-37.
- [2] 何开胜, 王国群, 章为民, 贾学天. 堤坝滑坡灾害的探地雷达应用研究 [J]. 水利水电科技进展, 2005(2): 36-39.
- [3] 何开胜. 太浦河泵站滑坡体土性试验和评估 [R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2002.
- [4] 黄仰贤. 土坡稳定分析 [M]. 包承纲, 王清友, 等译. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [5] 水利部水利水电规划设计总院. GB50286-98 堤防工程设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1998.
- [6] 中华人民共和国交通部. JTJ219-87 交通部港口工程技术规范——地基 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [7] 天津港湾工程研究所. JTJ250-98 港口工程地基规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [8] 何开胜. 太浦河泵站滑坡体真空预压加固后土性原位检测试验报告 [R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2002.