

72-78

水下软基处理工程设计及施工——袋装砂井排水固结法

肖耀华

(有色金属江西地质勘察局·南昌市)

TU 753.8

A

概述了南昌大桥引桥工程中采用袋装砂井排水固结法处理软弱地基的经验;介绍了从工程勘察、设计、施工和检测的全过程和取得的技术经济效益。

关键词 软基处理 袋装砂井排水固结法



勘察施工

1 工程概况

南昌赣江大桥是昌九公路重点工程项目之一,全长 5900 多 m。其引桥工程中的沙河子段要横穿一个 3m 水深的养鱼塘,鱼塘底为 7m 左右厚的淤泥和淤泥质土。淤泥呈流塑状,淤泥质土呈流塑—软塑状,淤泥下为一薄层粉细砂,细砂下面为粗砂层,粗砂层含地下水,并具有承压性。

引桥工程穿过该水塘的路段,要修筑高 7.5m、底宽 71m 的路堤,形成能承受动载的一级公路。按计算路堤和车载的荷重为 220.63kPa,河床淤泥的承载能力为 60kPa,因而必须对河床软基进行固结处理。

按引桥工程设计,对该段 14000m²的软基处理应在一年内达到固结度完成 85%,沉降量完成总沉降量的 85%。

2 袋装砂井参数设计计算

准确收集软土层工程地质资料是作好软基处理设计的先决条件。由于前人初勘资料不全,为此作了补充勘察,取得原状软土样,做了静力触探和十字板剪切等测试。还采取专门措施,开挖基坑,人工采取了原状土大样进行三轴剪切试验,为砂井设计取得了准确

可靠的数据。

在软土中设置砂井是为软土提供排水通道,然后堆载预压。软土在堆载的作用下,孔隙水通过砂井渐渐排出,并发生固结,强度逐步提高,达到固化处理的目的。砂井参数包括砂井直径、间距、深度、砂垫层和堆载设计。技术计算主要为固结度计算、地基强度增长计算、稳定性计算和地基沉降计算等。

2.1 砂井直径设计

砂井直径设计要考虑有足够的排水能力。淤泥的渗透系数垂向为 $1.3 \times 10^{-6} \text{cm/s}$,径向为 $2.02 \times 10^{-6} \text{cm/s}$;而砂的渗透系数为 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ 。按本工程设计用袋装砂井,选用透水性好,有足够强度的聚丙烯编织布做成直径为 7cm 的细长袋子,装满粗砂置于软土中形成袋装砂井,保持连续的排水通道。

2.2 砂井间距设计

砂井间距小,孔隙水流向砂井的距离短,排水速度快,反之,固结速率低。下式为砂井地基固结时间 t 与砂井影响直径 d_r (即砂井间距)的关系式:

$$t = d_r \cdot t_r / C_r$$

式中 C_r 为径向固结系数,与土的渗透性、孔隙比、压缩性有关; t_r 为径向固结的时间因素。本工程要求是一年内达到设计要求,砂井间距设计必须满足工程要求。最后确定,先施

本文 1993 年 11 月收到,王梅编辑。

工的路基段并距为 1.6m,晚 6 个月施工的桥台段 0.8m。以等边三角形排列布设,实现同步达到处理效果。

2.3 砂井深度设计

按砂井的排水作用,井深应穿透软土层进入下部砂层,可取得上下两面排水条件。本工程淤泥底部细砂层较薄,下部粗砂层中含有承压水,如砂井进入粗砂层,有可能因连通承压水起反作用。其井深要在实际施工中按软土厚度情况具体确定。

砂井综合设计参数如下:

成孔直径:90mm(89mm $\times$ 4mm 无缝管);砂袋直径:70mm(聚丙烯编织袋);井距:160/80cm;有效影响直径:168/84cm;平均孔深:6.5m;最深孔深:8.5m;布孔形式:等边三角形;布孔面积:14000m²。

2.4 砂垫层设计

施工砂井前先在软土层上铺设一层砂层,将砂井连通起来,成为水平排水通道,砂井排出的水通过砂垫层排至路堤外。砂垫层也作为承托施工设备的基础。本工程设计砂垫层铺厚为 1m,面积超过路堤两边底宽各 3m(图 1)。

2.5 堆载预压设计

在砂井地基上堆载预压是加速软基固化的基本条件之一。本工程是以路堤为加载体。

按工程进度,希望尽快堆筑,但应合理设计堆载速度,以保证工程安全。计算公式有二:

(1)容许堆载公式:

$$[P]=5.25 \times \tau_0 / F$$

式中: τ_0 ——天然地基排水抗剪强度,kN/m²;F——安全系数。

(2)极限高度公式:

$$H_c=5.52 \times C_k / r$$

式中: C_k ——软土快剪粘聚力,kN/m²;r——填土容重,kN/m³。

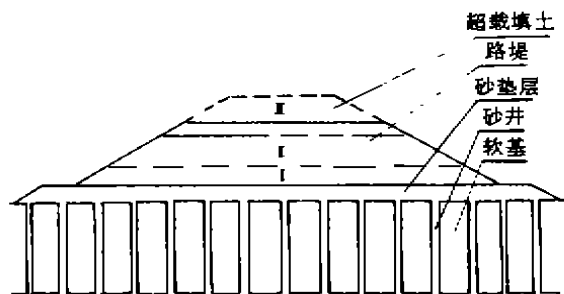


图 1 砂井地基工程剖面图

从上两式可以看出,加载速度应考虑软土抗剪强度 τ_0 或内聚力 C_k 的大小。经综合分析,本设计分 3 级堆载,而且各级堆载之间,保持一定的稳定期,待前期荷载使地基强度增加到足以加下级荷载时方可加下一级荷载。按公式计算的初步加载计划列于表 1。

表 1 设计的加载数值表

加载等级	按抗剪强度		按极限堆载高		安全系数	注
	计算的极限加载量(kPa)	设计的实际加载量(kPa)	计算的极限堆载高(m)	设计的实际堆载高(m)		
1	66.24	54.44	3.37	2.80	1.22	含 1m 砂垫层
2	104.88	62.4	5.04	3.00	1.68	
3	149.04	103.79	7.15	4.99	1.44	

堆载中注意两点:一是第一级堆载安全系数取值最小,考虑在保证稳定的条件下,尽可能多加载,提高初期固结速度,为后期加速堆载创造条件;二是采取超载预压法,即第三级堆载包含了路面和车载,使路基在通车前就承受了通车后的荷载,保证通车后不会因

路基沉降而引起路面破坏,堆载计划进度见表 2。

2.6 固结度

固结度计算可推算出地基强度的增长值和沉降量,进而分析各级荷载下地基的稳定性,校核加载计划。

表 2 堆载计划进度表

项目	砂垫层	1 级堆载	2 级堆载	3 级堆载	注
堆载物高(m)	1.0	1.8	3.0	4.99	含路面和车载折算土 1.29m
堆载施工日(d)	0~90	90~140	140~200	200~270	每组间稳压 20d
堆载体积(m ³)	6850	11052	15540	18021	含路面和车载
堆载重量(kN)	116450	229881	323252	378706	含路面和车载
堆载应力增量(kPa)	17	37.44	62.40	163.79	

砂井地基固结度计算,在太沙基固结理论和巴伦固结理论的基础上,从土的渗透和土的体积连续变化方程而导出的。反映了压力、孔隙比和时间的关系。地基中设置砂井后,在一定的压力作用下,土中水份向砂井流动,经砂井排出。所以砂井地基属于三向固结对称问题。但按此理论推导的固结度计算式是以瞬间一次性堆加荷载条件下得出的,并分别用垂直向排水固结理论公式和水平向排水固结理论公式计算后,再按固结度普遍表达式计算出砂井地基平均固结度。但实际施工中,荷载是逐渐堆积而不是瞬间一次性堆积的。因而近代出现了多种修正的计算法。本工程采用的是修正的计算法,而且采用了 3 种理论方法计算,以便能相互校验和对照。

2.6.1 改进的太沙基法

将实际加载曲线分成多级等速进行,并

$$U'_t = \sum_1^n \frac{q'_n}{P_0} [(t_n - t_{n-1}) - \frac{\alpha}{\beta} e^{\beta t_n} (e^{\beta t_n} - e^{\beta t_{n-1}})]$$

式中: q'_n ——第 n 级荷载的平均加荷速率, kPa/d; t_{n-1}, t_n ——分别为各等速加荷的起止时间,d; α, β ——与砂井直径、淤泥深度和固结系数有关的系数; e ——自然对数。

2.6.3 查诺模图法

认为每一级荷载增量引起的固结度过程是单独进行的,堆载至某一时间的总固结度等于每级荷载作用下固结度之和。

$$U_t = \sum_1^n U_{(t-t_{n-1})} \frac{P_n}{P_0}$$

式中: U_t —— t 时多级荷载等速加荷修正后的平均固结度,%; U ——瞬时加荷条件的平均固结度; t_{n-1}, t_n ——分别为各级等速加荷的起点和终点时间 d; P_n, P_0 ——分别为 n 级的平均加荷增量和 t 时的总荷载, kPa。

2.6.2 改进的高木俊介法

考虑了变速加荷条件,地基垂向和横向的平均固结度值,特点是可以直接求得修正后的平均固结度,因而更为精确。

本工程采用的是冶金建筑研究总院提供的袋径为 7cm 袋装砂井计算曲线图。

以上 3 种方法求得的各级荷载固结度值列于表 3,结果基本一致。堆载与固结度计算值关系见图 2。

表 3 3 种方法所得固结度计算结果表

加载级		砂垫层	1 级	2 级	3 级	合计
堆载高(m)		1.0	2.8	5.8	9.5	9.5
固结时间(d)		30	80	140	210	270
固结度 (%)	改进的高木俊介法	8.1	17	27.8	37.8	90.7
	改进的太沙基法	7.7	16.9	27.7	38.9	91.9
	诺模图法	7.9	17.2	27.5	38.7	90.3

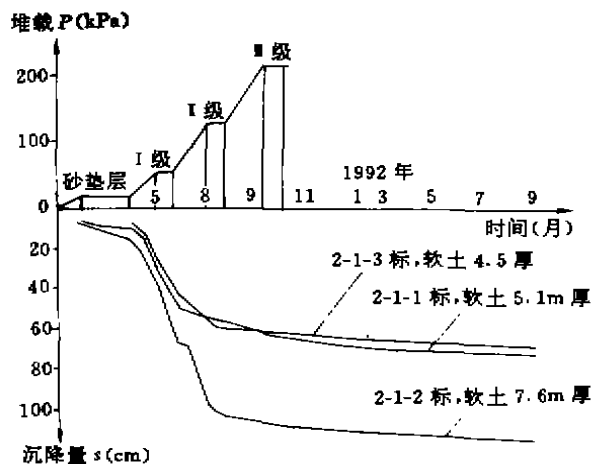


图2 堆载—时间—固结度图

2.7 地基强度增长值

软基在排水固结的同时,抗剪强度随之增长,并出现剪切应变蠕变而导致地基强度衰减。因此应综合计算地基强度增长值。

$$\tau_c = \eta(\tau_0 + \Delta\tau_c)$$

式中: τ_c ——固结至某一时的抗剪强度, kPa;
 η ——蠕变效应等因素影响的折减系数;
 τ_0 ——地基天然抗剪强度, kPa; $\Delta\tau_c$ ——某级堆载固结后的抗剪强度增量, kPa。

$$\Delta\tau_c = \Delta\sigma_z U_s K$$

式中: $\Delta\sigma_z$ ——某深度主应力增量, kPa;
 U_s ——某时固结度(%); K ——系数, 有效内摩擦角的函数, $K = (\sin\Phi' \cdot \cos\Phi') / (1 + \sin\Phi')$, Φ' ——有效内摩擦角(度)。

表4 各级堆载下地基稳定性验算值表

堆 载 级		1	2	3
地基快剪内摩擦角 ϕ_k (度)		4.1	10	15
地基土固结快剪内摩擦角 ϕ_{sk} (度)		11	16	22
快剪法测得的内聚力 C_k (kPa)	地基	12	19	27
	路基	42	42	42
地基土平均固结度 U_{av} (%)		17	52.9	90.7
安全系数 K_{min}		1.88	1.78	1.27

按公式计算各级荷载下地基强度增长值见图3。并看出地基在各级荷载作用下,同一深度的 τ_c 均是上升, τ_c/τ_0 是逐级提高, 增长速率逐级加快。

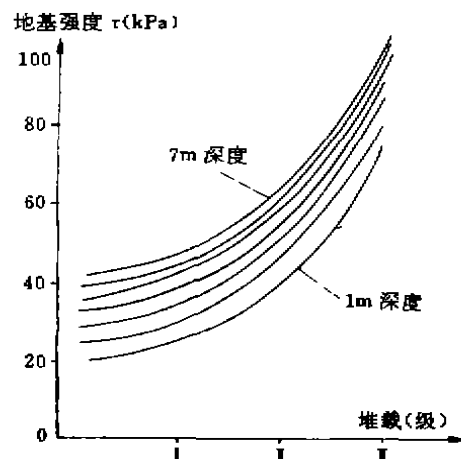


图3 各级荷载下地基强度增长曲线图

2.8 地基稳定性计算

3级堆载能否保证稳定安全, 必须进行稳定性验算。本工程应用的是圆弧滑动面总应力法。假设路堤和地基软土失稳时是沿同一圆弧滑动面滑移。其滑移面求法是, 选定不同的圆心位置, 不同半径 R 的圆弧, 并按条分法计算土体沿此滑动面的安全系数(图4)。重复计算, 直至找到最小安全系数的圆弧, 其最小安全系数大于设计时估算值 1.2 则为安全。计算式略。计算得各级稳定系数见表4。

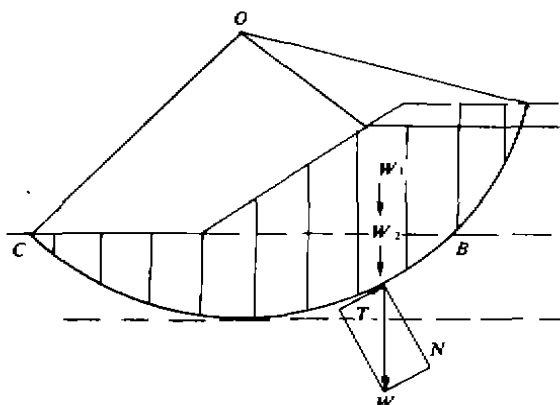


图4 第3级堆载时稳定性分析图

2.9 地基沉降计算

地基在固结过程中,由于水份排出会出现沉降。沉降计算有分层总合法、弹性理论法和三向压缩法等多种。本场地是单一的淤泥,处在河底,路堤两侧又有围堰的堆筑,因而假定为有侧限条件,只有单向压缩的沉降,故采用单向压缩总和法计算。公式如下:

$$S = \alpha P_s H$$

式中: S ——最终沉降量; α ——压缩系数; P_s ——总荷载; H ——地层深度。

堆载9个月后的沉降量为

$$S_t = US$$

式中: U ——9个月后固结度。

因而剩余沉降为

$$\Delta S = S - S_t$$

沉降计算结果列于表5。

表5 软基沉降量计算值表

软土厚度(m)	3	5	7
最终沉降量(cm)	60.9	101.5	132.2
加载210d后沉降量(cm)	57.6	93.4	138.5
剩余沉降量(cm)	3.3	8.1	13.7

从表中计算值看出:堆载预压后剩余沉降只有13.7cm,是总沉降量的9%,可以满足路基工程要求。

3 袋装砂井施工

3.1 施工准备

先在路堤两侧堆筑围堰,隔断水塘,抽干围堰内的水,露出塘底后,铺设砂垫层作为施工工作层。在砂垫层外围挖掘排水沟和集水池,安装排水泵,随时抽排渗入围堰内的积水,保证施工顺利进行(图5)。

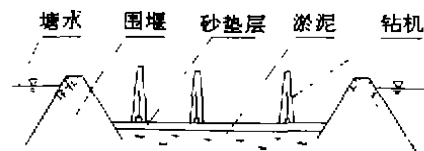


图5 砂井施工场地剖面图

3.2 施工机具

初期设计是用M24型沉管桩机改装后,以静压法一次压制4条砂井的施工工艺。但因地层过软,不能承受重型设备,而后改为轻便的北京-200型钻机,以锤击法制井,用 $\varnothing 89$ 管一次成一井工艺。

初期设计采用砼预制桩尖,但因锤击时砼尖会受冲力而超前下沉,脱离井管,或被击碎造成淤泥进入井管,阻碍砂袋下入。后改为铁板开闭式管底,使用比较理想,沉井深度、砂袋下入质量均达到设计要求。

3.3 砂井材料

砂袋是用聚丙烯编织布缝合成袋径7cm,编织布强度达706N/mm²。砂料为粗砂,平均粒径>0.5mm,细粒模数不小于3.5,含泥量小于3%,装满砂后的平均渗透系数为>7.7×10⁻³cm/s。各项指标均达到设计要求。

3.4 成井施工

成井施工严格按工艺流程进行,即测量定点—钻机就位—悬吊井管对中孔位—调平垫实钻机—锤击沉管。当沉管速度明显变慢,即说明管头已穿过软层遇到细砂层,再进尺0.3m即终孔。紧接着从管口下入砂袋,砂袋比井管长0.3m,即砂袋下到底后,管口留有0.3m。用细绳扎捆袋口后拔出井管,即砂井制成,移机到下一孔位施工。

曾遇有井管下到深度后,管口冒水,砂袋不易下入的问题,说明井管已穿入含有承压水的粗砂层。对此采取了从管口填入粘土球,用塞杆推到管底的方法,封堵地下水,有效地解决了问题。

4 工程监测

工程监测是软基处理中不可缺少的部分。路堤堆载预压施工过程中,监测地基的沉降和位移变化速率,以合理控制施工进度,防止软基变形过快而导致地基破坏,保证工程安全。

本工程在路堤的 K1+840、K1+860、K1+880 等 3 个横剖面上设置有沉降仪和水平位移仪。

沉降监测是用自制的标杆式沉降仪和溢流式沉降仪 2 种,测点设在每剖面的路堤中心、路肩和路脚 3 个部位。每点可分别监测软土表面、3m 和 5m 深处的沉降变化情况。

水平位移仪是用桩标式观测仪以监测地表位移变化情况。观测标同设在沉降监测剖面上。

各种监测仪均在堆载前设置,在堆载预压全过程作了系统的沉降监测。

5 工程效果分析评价

按大桥工程项目监理部要求,对工程效果除了施工过程中进行沉降和位移监测外,在竣工后还施工了 5 个检查孔连续取土样进行室内测试,作了十字板剪切等原位测试。

5.1 软土物理力学性质指标分析

表 6 地基处理后固结度值对比表

测点位置	K1+870(左)	K1+870(中)	K1+850(中)	K1+850(右)
软土顶板标高(m)	施工前勘察孔	14.42	14.18	14.09
	施工后勘察孔	13.47	13.40	13.47
沉降量 S_t (cm)	95.4	77.7	62.26	72.0
最终沉降量 S_f (cm)	99.3	80.2	64.4	73.7
固结度 $U_{\infty}=S_t/S_f(\%)$	96.1	96.9	97.2	97.7
设计计算固结度(%)	92.1	93.3	94.3	93.7

从地基处理前后软土的物理力学性质指标看出,处理后软土的含水量下降,孔隙比减少,压缩性降低,渗透性降低,固结性和内聚力等物理力学性质均得到全面改善。

5.2 十字板剪切试验指标分析

地基处理前后在淤泥中所作十字板剪切测试数据对比结果表明,处理后淤泥质粘土的抗剪强度是处理前的 3.9 倍,淤泥质粉质粘土是处理前的 3.16 倍。

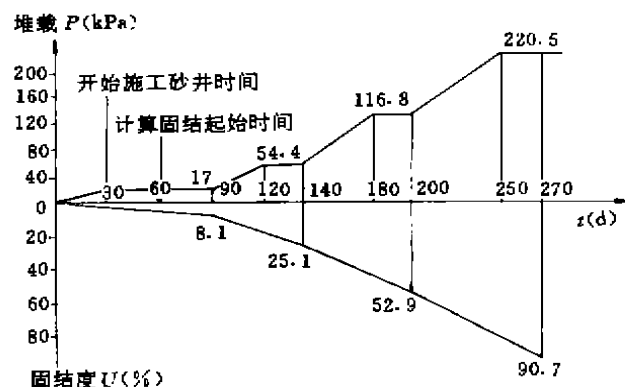


图 6 堆载—时间—沉降图

5.3 地基沉降指标分析

从图 6 可看出,3 个剖面的沉降曲线形状有共同特征,均是第一级堆载的沉降线是陡倾斜,第二级堆载期为缓斜,第三级为平斜。以后的几个月基本呈水平线,这正符合地基固结由快转慢的特性,曲线呈水平表明已达到预期的处理效果。

5.4 固结度指标分析

表 6 为地基处理前后固结度值对比表。处理后的固结度均大于设计计算的固结度值。

岩溶水, 地质勘探, 电, 供水勘测

5.5 水文资料分析

据检测孔的水文观测,路堤内地下水位与鱼塘水位相同,说明路堤内地下水与鱼塘水有水力关系。而钻孔深入淤泥层却未见地下水(路堤段有套管隔离)。可见,淤泥层不受上部地表水影响,也没有下部承压性潜水侵入。说明固结后的淤泥有良好的隔水性,处理效果好。

5.6 稳定性分析

由于堆载分3级进行,各级取的安全系数均较大,并作了稳定性验算,理论上稳定性

是高的。从实测沉降量和位移值看,一级堆载沉降率虽较大,最初达10mm/昼夜,但水平位移未超过3mm/昼夜。第二级以后沉降线转平缓后,基本未出现水平位移。可见施工过程稳定性是高的。

参考文献

- 1 地基处理手册编委会. 地基处理手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
- 2 冶金工业部建筑研究总院主编. 地基处理技术(4). 北京: 冶金工业出版社, 1989.
- 3 卢肇钧, 曾国熙, 叶政青, 蒋国澄编. 地基处理新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.

Desing and Construction of the Treatment Engineering of Under-water Soft Foundations — a Drainage Consolidation Method with the Well Constructed of Sand Bags

Xiao Yaohua

The practical experience treating the soft foundations by a drainage consolidation method with the well constructed of sand bags in the bridge approach engineering of the Nanchang Bridge is briefly described in this paper. The whole process of engineering exploration, design, construction and examination and the technical-economical effect obtained are also given.

78-80

大电厂供水勘测对岩溶水区的地质勘探

张学洲

(电力部华北电力设计院·北京)

P641-72

山西省地表水资源短债,火电厂的供水水源主要靠地下水,其中,地下岩溶水是理想的供水水源之一。该省担负着向京、津、唐电网和本省输送电力的重任。在全国现已装机容量为最大,达235万kW的现代化坑口电厂——神头火力发电厂,当前急需地下岩溶水,作为电厂的补充循环水源。我们通过对电厂水源地——神头泉群的小泊岩溶水区地下岩溶水的研究,攻克了深埋高水头岩溶水的勘探,解决了电厂的供水难题。

1 水文地质条件

水源地位于雁北朔州盆地东北部朔州市小泊村西桑干河源头的河谷地带。盆地为南、

北、西三面环山,东边与走向北东的大同盆地相连,形似簸箕状并向东敞开的新生代断陷盆地。电厂水源地地面标高1057~1044m,其地形总趋势是北西高,南东低。

(1)基底为中奥陶统上马家沟组黄灰、浅灰色厚层灰岩,间夹薄层泥质灰岩,厚度大于116m,一般埋深在200m左右,最大埋深319m。岩溶发育,富水性极不均匀。岩溶水埋藏深,承压水头压力大,一旦揭露,水头高于其顶板约200m,且高出河谷地面10余m。该层7~60m为岩溶极发育的富水段,是开采利用的主要层。

(2)深度215~198m为第三系上新统粘土层,紫红色,坚硬,致密。