

# 路基软土地基处理施工技术

吴高中

(中铁十六局集团五公司, 河北 唐山 063000)

**摘要:**在我国,无论公路、铁路、机场、还是房建,软土地基几乎无处不在,尤其是公路和铁路,由于线路较长,少则上百 km,多则上千 km,穿越的地域范围很广,线路通过软土地基的几率更大,对于软土地基如果没有行之有效的处理措施和办法进行处治,将会对公路或铁路路基留下永久的后患。根据以往施工经验及复合地基理论,针对湖北省荆宜高速公路第五合同段 K63 + 450 ~ K63 + 700 软土地基性质及分布范围,分析了粉喷桩及换填法处治软土地基的作用机理,并从费用进行了比较,选择能适用本段软土路基工程特点的一种软土处治办法。

**关键词:**软土地基;水泥土;粉体;换填法

**中图分类号:** TU447 **文献标识码:** A

## Technology of construction for soften soil sub-grade

WU Gao-zhong

(The 5th Engineering Department of 16th Engineering Bureau, Tangshan 063000, China)

**Abstract** There are many highways, railways, airports and buildings in soften soil sub-grade in China, because highway and railway are longer, and pass a lot of area which may contain much soften soils, if treatment method for soften soil sub-grade is not reasonable, many trouble will exist in the highways and railways over a long period of time. According to the properties and distribution of the soften soil on Jingzhou-Yichang highway line, and combining with our ability, this paper analyzed the mechanism of powder deep mixing and replacement method, compared the cost of the construction method with other ones, and finally chose one right treatment for the soften soil sub-grade.

**Key words** soften soil sub-grade; cement stabilized soil; silt soils; replacement method

## 1 工程概况

湖北荆宜高速公路第五合同段 K63 + 450 ~ K63 + 700 路基填方段原地形地貌为三面环山中间夹一狭长稻田,该处为周围山体受多年雨水冲刷长期淤积形成,且为四周高水位渗水集中最低点,排水困难。路堤覆盖整个稻田地基,地下水位高——常水位 BM133.486,与现地面标高相同。经现场探坑、触探并进行土样分析,发现本段地基土属饱和性粘土,含水量为 36.6%,此种土层最小层厚为 8.5 m,地基承载力在 20 ~ 69 kPa 之间,且为不均匀分布。该段路基填方最大填土高度为 11 m,设计要求清除表面软土 0.5 m 并换填碎石土。本合同段施工工期为 18 个月。

根据以上地质情况,按原设计方案,施工不能满

足路基设计要求。为避免路基产生长期不均匀沉降,保证本段路基填土质量,针对该段软土性质及施工总工期要求,提出合理的地基处理措施——软土地基处理施工技术措施的选择,以满足设计要求。

## 2 施工技术措施方案的选择

根据以往软土地基处理的施工经验,对换填法及加固土桩处治地基法两种技术处理措施进行理论分析,结合本标段工程特点,选择适用于本段路基地质情况及满足工期要求的施工处治方法。

### 2.1 两种处治方法的作用机理分析

#### 2.1.1 换填法

当软弱地基的承载力和变形满足不了建筑物的要求,而软土层的厚度又不很大时,将基础面下处理范围内的软弱土层部分全部挖去,然后分层换

填强度较大的砂(碎石、素土、灰土、高炉干渣、粉煤灰)或其它性能稳定、无侵蚀性的材料,并压(夯、振)实至要求的密实度为止。本标段软土层厚 8.5 m,地下水位高(接近地表标高),且为四周高水位渗水集中最低点,换填法基本适用但排水较困难。

2.1.2 粉喷桩处理软土路基的作用机理

粉喷桩处理软土路基是用于加固饱和粘性土地基的一种新方法,它是利用水泥(或石灰)等材料作为固化剂,通过特制的搅拌机械,在地基深处将软土和固化剂(粉体)强制搅拌,由固化剂和软土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、水稳性和一定强度的水泥加固土,从而提高地基强度和增大变形模量。

由于粉体喷射搅拌法(粉喷桩法)采用粉体作为固化剂,不再向地基中注入附加水分,反而充分吸收周围软土中的水分,因此加固后地基的初期强度高。

用水泥加固软土时,水泥颗粒表面的矿物很快与软土中的水发生水解和水化反应,生成氢氧化钙、含水硅酸钙、含水铝酸钙及含水铁酸钙等化合物。当水泥的各种水化物生成后,有的自身继续硬化,形成水泥骨架;有的则与周围具有一定活性的粘土颗粒发生反应,使较小的土颗粒形成较大的土团粒,并且由于水泥水化生成的凝胶粒子能产生很大的表面能,形成坚固的联合,从而使水泥土的强度大大提高。随着水泥水化反应的深入,溶液析出大量的钙离子,当其数量超过离子交换的需要后,在大碱性环境中,能使组成粘土矿物的氧化物一部分或大部分与钙离子进行化学反应,逐渐生成不溶于水的稳定结晶化合物,增大水泥土的强度。

从水泥土的加固机理分析,由于搅拌机械的切削作用,实际上不可避免的会留下一些未被粉碎的大小土团,在拌入水泥后将出现水泥浆包裹土团的现象,而土团间的大孔隙基本上已被水泥颗粒填满。所以,加固后的水泥土中形成一些水泥较多的微区,而在大小团内部则没有水泥,只有经过较长时间,土团内的土颗粒在水泥水解产物渗透作用下,才能逐渐改变其性质,因此在水泥土中产生强度较大的和水稳性较好的水泥土区和强度较低的土块区。两者在空间上相互交替,形成一种独特的水泥土结构。由此可见,搅拌越充分,土块被粉碎的越小,水泥分布到土中越均匀,则水泥土结构强度的离散性越小,总体强度也越高。

从粉喷桩处治软土作用机理来看,并结合本标段软土地基性质、分布范围及工程工期要求,采用粉

喷桩处治方案较为适宜。

2.2 方案比较

2.2.1 换填法

(1)沿本段稻田周围挖环向排水沟,截断四周山体向稻田的渗水,降低稻田地下水位。

(2)从 K63+450 向 K63+700 方向依次挖掘,边挖掘边采用抽水机排积水。

(3)将深度为 8.5~12.0 m 的软土层全部清除完毕(承载力达到 100 kPa 为止)。

(4)分两步进行回填:首先回填砂砾 0.6 m 稳定层,然后按路堤填筑方法直接进行回填土。

(5)工程数量:113 725 m<sup>3</sup>;其中回填土 106 144 m<sup>3</sup>,回填砂砾 7 581 m<sup>3</sup>。

2.2.2 粉喷桩加固地基

按湖北荆宜高速公路设计文件要求,填土地基承载力达到 100 kPa,按复合地基理论并结合以往施工经验,确定粉喷桩施工具体参数。

复合地基承载力的确定

$$f_{spk} = mR_k^d/A_p + (\alpha - m)f_{sk}$$

式中: $f_{spk}$ 为复合地基承载力标准值,取 150 kPa; $m$ 为面积置换; $A_p$ 为桩的截面积; $f_{sk}$ 为桩间天然地基土承载力标准值; $\beta$ 为桩间土承载力折减系数, $\beta = 0.4$ ; $R_k^d$ 为单桩竖向承载力,按工地试验室试配。

结合以往施工经验确定如下施工具体参数。

桩位按正方形布置,桩径为  $\varnothing = 50$  cm;间距为  $a = 1.5$  m;桩长  $l_1 = 10$  m; $l_2 = 8$  m。

垫层:桩顶施作砂垫层,垫层层厚 0.5 m。

沿本段稻田周围挖环向排水沟,截断四周山体向稻田的渗水,降低稻田地下水位,施工具体参数见上述,其中粉喷桩材料 32.5 R 普通硅酸盐水泥,每延长 m 水泥用量约 50 kg。

桩位偏差: $< 50$  mm,桩底超深 0.1~0.2 m,复合地基承载力达到 100 kPa。

工程数量:加固地基 12 635 m<sup>3</sup>,桩长总计 52 999 延长 m,砂垫层 6 318 m<sup>3</sup>。

2.3 两种处理措施经济比较

2.3.1 按以上施工措施粉喷桩经济费用估价

粉喷桩 51.43 元/延长 m,桩长总计约 52 999 延长 m,费用约为 2 725 486 元;砂垫层 136.94 元/m<sup>3</sup>,砂垫层用砂量约 6 318 m<sup>3</sup>,费用约 865 170 元,施作粉喷桩费用总计约 3 590 656 元。

2.3.2 换填处理经济费用估价

清除原地基废料:18.65 元/m<sup>3</sup>,清除数量约为 113 725 m<sup>3</sup>,费用合计约 2 120 971 元。

回填适用性材料 20.75 元/m<sup>3</sup> ,回填数量约 113 725 m<sup>3</sup> ,费用合计约 2 359 794 元.

换填处理费用总计 (加上抽水及弃料用地费用) 约为 4 774 765 元.

为保证该段路基工程质量 ,同时为节约投资 ,根据以上经济比较 ,认为对本段路基软土地基采用粉喷桩加固地基处理措施较为适宜.

3 喷粉搅拌桩施工工艺<sup>[1 2]</sup>

3.1 基本原理

喷粉搅拌桩的原理是通过水泥水解、水化反应所生成的水泥水化物与土颗粒发生离子交换、团粒化作用、碳酸化反应以及硬凝反应等一系列物理 - 化学作用 ,形成有一定强度和稳定性的水泥加固土.

水泥加固土的强度取决于被加固土的性质(含水量、有机质含量及烧失量等)和加固所使用的水泥品种、标号、掺入量以及外加剂等.加固土的抗压强度随着水泥掺入量的增加而增大 ,其强度标准值宜取试块 90 d 龄期的无侧限抗压强度 ,一般可达 500 ~ 3 000 kPa.

3.2 施工机械选择<sup>[3 4]</sup>

搅拌桩的机具设备包括 PH-SA 型喷粉搅拌机、空压机、翻拌车、起吊装置、储灰罐等配套以及各种控制仪表等.本方案采用 PH-SA 型深层搅拌机 ,该机主要由电动机、减速器、搅拌部分、输浆部分、横向系板、导向滑块、外壳等组成.

3.3 粉喷桩关键施工工艺

3.3.1 关键技术

关键技术是喷粉 ,即将粉体成桩固化剂(本工程为水泥干粉)用压缩空气输送到钻头并射到土层中去.喷粉直接关系着成桩的质量.

喷粉操作一般在喷气操作后进行 ,其操作程序是 :开通喷粉球阀和蝶阀、关闭喷气阀 ,按下无级变速器电机启动按钮 ,使旋转供料器运料到喷射管 ,喷入土层.以上操作要求迅速连贯 ,一气呵成.

3.3.2 操作方法

(1)对正桩位 ,调平桩机机身 ,保证桩的垂直度 ,启动主电机下钻 ,待搅拌钻头接近地面时 ,启动空压机送气 ,继续钻进.钻到设计孔深时 ,停止钻进 ,钻头反转 ,但不提升.实际工作中 ,钻孔深度  $D$  由深度尺盘按  $D = H + a_1 + a_2$  确定.其中  $H$  为设计加固深度 ; $a_1$  为搅拌钻头喷射口与地面齐平时深度尺盘的读数 ,可事先调整为  $a_1 = 0$  ; $a_2$  为机身调平后 ,桩机

横移槽距地面的高度.(2)打开送料阀门 ,关闭送气阀门 ,喷送加固粉料.确认加固粉料已到桩机后 ,提升搅拌钻头.为便于控制成桩质量 ,一般不得使用Ⅲ档提升.提升到设计标高时 ,停止喷粉.停止喷粉深度应结合搅拌提升的速度确定 ,见表 1.打开送气阀 ,关闭送料阀 ,但空压机不要停机 ,搅拌钻头提升到桩顶时 ,停止提升 ,在原位转动 2 min ,以保证桩头均匀密实.(3)搅拌钻头在钻至设计桩底深度时进行第二次搅拌.将搅拌钻头提出地面 ,停止主电机、空压机 ,填写施工记录.(4)移动桩机到下一个桩位.

表 1 提升的速度  
Tab.1 Velocity of hoisting

提升档位	I	II	III
设计停粉深度/m	0.55	0.60	0.65

3.3.3 操作要点

(1)机身调平以钻杆是否垂直为依据 ,实际操作时在机身设置激光对中仪进行控制.钻头钻至设计深度 ,应有一定的滞留时间 ,以保证加固水泥干粉到达桩底 ,一般在开工前通过观察确定滞留时间.当用 30 m 送料管时 ,滞留时间为 2 ~ 4 min.

(2)粉喷或喷气时 ,当气压达到 0.45 MPa 时 ,管路可能堵塞 ,此时应停止喷粉 ,将钻头提升至地面 ,切断空压机电源 ,停止送气 ,查明堵塞原因 ,予以排除.整个制桩过程一定要保证边喷粉、边提升连续作业.在空气湿度大、粉体流动性差、喷气压力大、单位桩长喷粉量大时 ,应开通灰罐进气球阀 ,以对罐料加压.如出现断粉 ,应及时补喷 ,补喷重叠长度不能小于 0.5 m.粉喷桩搅拌下沉时尽量不用水冲下沉.当遇较硬土层下沉太慢时 ,方可适量冲水.采用水冲下沉时 ,喷粉提升前 ,必须将喷粉管内的水排净 ,同时 ,还应考虑冲水成桩时对桩强度的影响(土层含水量增加 10% ,水泥土的强度降低 10% ~ 15% ).

(3)桩顶设计标高与地面标高接近时 ,地面以下 1 m 范围内喷粉、搅拌、提升宜用慢速 ,当喷粉即将出地面时 ,宜停止提升 ,搅拌几秒 ,以保证桩头均匀密实.

(4)喷粉开始时 ,应将电子秤显示屏归零 ,使喷粉过程在电子计量显示下进行.喷粉搅拌时 ,记录人员应随时观察电子秤的变化显示 ,以保证各段(通常以 1 m 为一个单位)喷粉均匀.

(5)粉体固化剂入罐时必须过筛 ,以保证入罐固化剂粒径最大不超过 0.5 cm ,没有纸屑、石块等杂物.水泥采用 425R 普通硅酸盐水泥 ,掺入比为 15% .

3.4 工艺流程 (图 1)

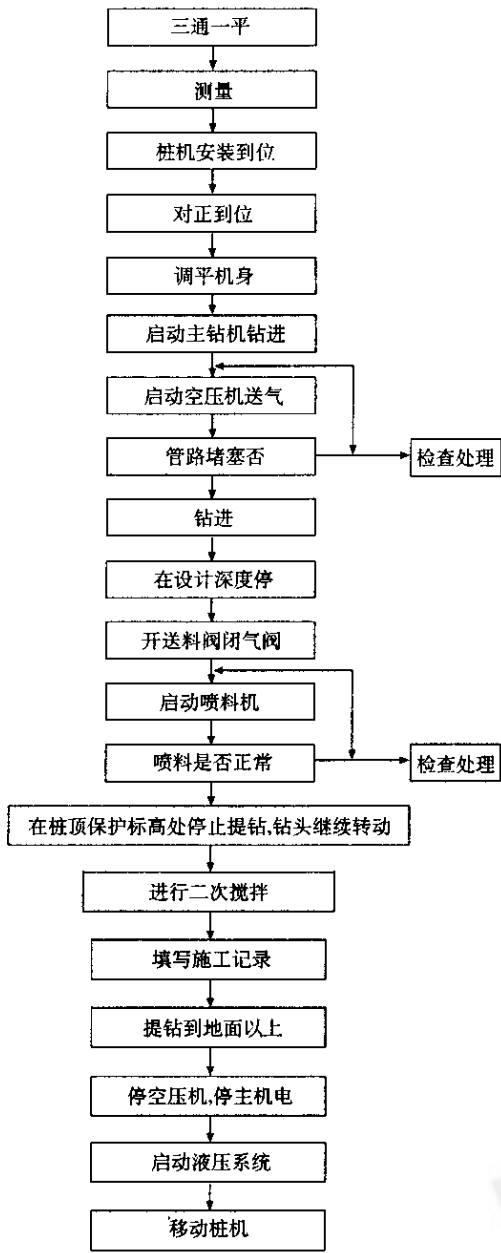


图 1 水泥喷粉搅拌桩施工工艺流程图

Fig.1 Technological process for powder deep mixing method

3.5 搅拌机施工质量问题及防治<sup>[4]</sup>

3.5.1 桩体搅拌不均匀

产生的原因包括 施工工艺不合理 施工机械中途发生故障而造成喷粉不连续,使软粘土被扰动,无水泥浆拌合,搅拌机提升速度不均匀.对以上问题,首先应选择合理的施工工艺,注意对施工机械的保养和检查,使其正常工作;其次,应保证足够的搅拌时间(一般不少于 2 min)增加拌合次数,保证桩体均匀,不使浆液沉淀,另外还应提高搅拌转数、降低钻进速度,边搅拌边提升;再次,喷粉设备要定好,单

位时间内喷粉量应该相等,不能忽多忽少,更不能中断.拌制固化剂时加水,以防降低强度.

3.5.2 喷粉不正常

施工中如喷粉突然中断,则可能是因为以下原因:空压机故障;喷粉口堵塞;管路中有硬结块或杂物堵塞管路.因此,施工前应进行试运转.另外,除了加强对机械的管理外,应在喷粉口设单向球阀,并在喷粉口上方设格栅板,防止堵塞,保证连续喷粉.空压机与管路用完后应清洗干净,防止杂物进入.

3.5.3 抱钻、冒浆

在粘土中施工时,土颗粒之间粘接力较强,不容易拌合均匀,如工艺选择不当则会出现抱钻;有些非粘性土质,其上覆压力较大,持浆能力差,容易出现冒浆.

施工时应针对不同土层选择适用工艺,搅拌机入土前应在桩位处注水,浸湿搅拌头,如地表为软粘土时,还可加适量砂子,改变土中粘度,防止抱钻.对于冒浆的现象,应采取输水搅拌、输浆搅拌工艺顺序,并将搅拌旋转速度提高,钻进速度降低,使拌合均匀.

3.5.4 桩顶强度低

桩体施工完毕后,常出现桩顶加固体疏松、强度较低,这主要是因为地基表面覆盖压力小,在拌合时土体上提,不易拌合均匀.对此,可将桩顶标高 1 m 以内作为加强段,进行一次喷粉复拌,并适当提高水泥掺量.在设计桩顶标高处,应考虑凿除 0.5 m,以保证桩顶强度.

3.6 施工注意事项<sup>[5]</sup>

对将要进行喷粉搅拌桩施工的场地事先加以平整,彻底清除地上、地下和空中的一切障碍.场地低洼时,应回填粘性土料,不得回填杂土,如果地表过软时,应采取防止施工机械失稳的措施.在边坡附近施工时,则应考虑施工对边坡的影响,并要采取确保边坡稳定的措施.施工中实际使用的固结剂和外掺剂,要经过加固土室内试验的检验后方能使用,固化剂需严格按照预定的配比拌制.水泥倒入集料斗时应加筛过滤,以免水泥内的杂物损坏空压机.空压机输送水泥必须连续,一旦因故中止,要立即通知操作工,严防断桩.为保证喷粉搅拌桩桩位的准确度和垂直度,需使用定位卡,并注意起吊设备的平整度和导向架对地面的垂直度.桩机钻至设计孔深时,应用低速慢转,钻机原位钻动 1~2 min 后再开始送料,以免下部形成空桩,加大路基后期沉降.

在确定加固料已喷至孔底时,按 0.5 m/min 的

速度反转提升,当提升到设计停灰标高即地面以下 0.5 m 后,应慢速原地搅拌 12 min.

各类管线接头必须接好扎牢.控制搅拌机的电器设备需加设防雨措施,严防漏电事故发生.输灰管道必须定时冲洗,以防输灰管堵塞.

为保证桩顶部搅拌均匀,桩上部 3 m 应复搅,其速度控制在 0.8 m/min.如第一次喷粉段不能满足设计要求,应进行复喷.喷粉桩机设有自动计量装置,包括指示压力、喷粉速度和喷粉量,以保证粉喷桩桩身质量.如由于爆管、停灰、堵管等现象造成断桩现象,应进行接桩,其搭接长度不得小于 1 m.

### 3.7 质量控制

(1)现场采用静载试验评价粉喷桩成桩质量.检验数量为 4 组 12 个点,其中 6 个点为单桩承载力试验,6 个点为单桩复合地基承载力试验,单桩设计承载力为 8 t,复合地基设计承载力为 110 kPa,检验以 90 d 龄期强度为标准.

#### (2)施工允许偏差

桩身垂直度偏差:不大于 1%;桩位偏差:不大于 50 mm;桩径偏差:不大于 2 mm;桩顶标高:应超过 500 mm;桩底标高:应超过 100~200 mm.

## 4 结 语

2003 年 12 月,测试组对已完成的软土路基加固

工程进行了静载试验工作.静载试验采用堆载法,加载用慢速维持荷载法.现场测试顺利,结论如下:

(1)单桩竖向承载力极限值不小于 120 kPa,满足工程设计要求.

(2)复合地基:各  $Q \sim S$  曲线均较为平稳, $S \sim \lg t$  曲线尾部没有出现向下弯曲.各试点荷载板面积复合地基竖向极限承载力不小于 400 kPa,复合地基竖向极限承载力不小于 220 kPa,满足工程设计要求.

(3)采用粉喷桩处理软土路基比换填法节约投资约 120 万元,经济效益较为明显.

### 参考文献:

- [1] 交通部第一公路总公司.公路施工手册——桥梁[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [2] 叶书林,韩杰,叶观宝.地基处理与托换技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [3] JTJ041-2000,公路桥涵施工技术规范[S].
- [4] 史佩栋.实用桩机工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [5] JTJ-071,公路工程质量检验评定标准[S].

[责任编辑 任晶钰]

(上接第 20 页)

## 3 结 语

流态混凝土,特别是在高强度、大流动性条件下,由于水泥用量多,单位用水量,砂率高产生裂缝的潜在危险大,对此必须引起足够重视.混凝土的裂缝是不可避免的,混凝土裂缝的形成是一个复杂的问题,裂缝的控制是一个综合性的问题.随着我们对混凝土裂缝的深入研究,材料科学的不断发展和建筑技术水平的不断提高,相信混凝土的裂缝会在我们的控制之中.

### 参考文献:

- [1] 徐铮澄.商品混凝土裂缝的原因与防治[J].混凝土,2002(5):11-15.
- [2] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [3] 冯乃谦.商品混凝土在施工应用中的开裂与对策[J].混凝土,2000(9):3-7.
- [4] GB50204-92,混凝土结构工程施工及验收规范.

[责任编辑 李艳]