

# 固化技术在软土地基中的应用研究

陈海雄<sup>1</sup>, 刘龙武<sup>2</sup>, 张健<sup>1</sup>, 姚木<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>

(1. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 针对某项目地基土体软化、外运土方困难的问题, 提出一种软土地基固化技术。该技术利用现场软土作为回填土料, 通过第 1 次原位掺入石灰、第 2 次掺入水泥使其砂化、第 3 次掺入水泥和水玻璃压实硬化, 使地基承载力满足设计要求。

**关键词:** 公路; 软土地基; 固化技术; 地基承载力; 应急处理

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0071-03

地基土体在长期的雨水浸泡及机械作业影响下易发生软土化现象, 土体内部含水量高, 具有高压缩性、高灵敏度、高流变性和低承载力等特点。现有软土地基处理方法有置换法、排水固结法、灌入固化法、托换法、振密或挤密法、加筋法、纠倾与迁移法等, 其中置换法在地基表层和浅层软土处理方面具有独特优势。但常规置换法存在如下缺点: 1) 弃土、压实需在晴天进行, 雨季时难以快速施工, 导致工期延长、费用增加; 雨季时就地取材或从附近获取合适含水率填土难以实现, 若采用砂、碎石、粉煤灰、干渣等作为回填料, 会增加成本。2) 城市内施工对环保要求高, 特别是流塑状态软化土在运输和弃置过程中需格外小心, 避免罚款和不良评价。为克服上述缺点, 该文以水泥为主要胶体材料, 对某项目施工场地的软土按照特定方法处理、混合后形成固化土, 以该固化土作为回填料, 采用路拌法将其压实, 得到满足设计强度要求的地基层。

## 1 工程背景

### 1.1 气候和地质情况

(1) 气候特征。某项目所在地雨量较充沛, 降雨时间分布不均匀, 3—5 月平均降雨天数为 52.8 d, 约占全年总降雨天数的 35%; 夏季降水不均, 旱涝无定; 秋冬雨水减少。年最小、最大降雨量分别为 1 018.20、1 751.20 mm, 平均 1 394.60 mm。

(2) 水文地质特征。场地内地下水主要为上层滞水、孔隙水及岩溶裂隙水。上层滞水主要分布于松散填土层中, 填土层为弱~中等透水层, 富水性一般, 水量贫乏, 水位及水量随季节变化。孔隙水主要分布于第四系冲积细砂、粗砂、圆砾、卵石层中, 为强透水层。该强透水层综合厚度大, 富水性好, 水量丰

富, 略具承压性, 承压水头为 1~6 m。场地内地下水位变化幅度为 6~8 m。

(3) 各层岩土情况。开挖至基底标高后发现基底以下有粉质黏土、细砂、粗砂、圆砾、卵石和中风化灰岩, 地层种类多, 软硬不均, 且各地层的厚度变化极大。当地下水和地表降水丰富时, 粉质黏土、细砂、粗砂、圆砾、卵石极易受施工扰动影响, 强度变化幅度大。

### 1.2 地基软土化分析

该项目地基开挖时, 因数月长时间降雨, 地下水位和河面标高大升高, 已无法通过抽排水来降低水位, 基坑内聚集的雨水和渗入的地下水难以向外排出。同时开挖面以下存在细砂、粗砂、圆砾、卵石等透水性较强的土层及相对密度低、对湿化扰动十分敏感的粉质土层, 基坑底部长期处于饱水环境, 在桩基础和抗浮锚杆施工时, 在机械扰动下基坑表层出现松软化现象。加上为赶工期, 长期冒雨快速进行基础施工, 受打桩机、锚索机、吊车等施工机械扰动及地下水、雨水浸泡, 土体普遍形成 0.5~1.0 m 厚淤泥层。此外, 由于地表水和地下水横向流动, 坑壁在多次动水扰动下极易坍塌, 导致临时增设的排水沟、集水坑部位出现 2.5~3.0 m 厚淤泥层, 整个场地地基土承载力无法满足设计要求(见图 1)。



图 1 基坑施工现场

该项目工期紧张,加之降雨频繁,卸土场经常关闭,淤泥无法外运,而场内北区桩基、锚杆施工占用场地,南区堆放大量场内倒运的新土,雨水湿润后无法过车,场内临时堆放不可行。因此,原设计方案“软弱地基层清除后填 C15 砼”无法实施。经研究,确定采用固化土处理软土地基施工方案。

## 2 固化土处理软土地基施工方法

### 2.1 施工方案

#### 2.1.1 掺灰工艺

实际工程中,水泥固化土通常采用厂拌法和路拌法。厂拌法使用专门的拌合设备将一定量水泥与原料土拌合后运至工地,即集中拌合。路拌法在施工现场以不同方式(人工或机械)将一定掺量的水泥、石灰、原料土利用挖掘机进行拌合,然后摊铺、压实。厂拌法能保证拌合的均匀性,节约劳动力,但不能保证时刻有大规模的供给料投入,费用比路拌法高。路拌法操作简单,无需外运,就地作业,通常用于二级或二级以下公路。路拌法施工填料的均匀性不及厂拌法,但可通过前期的试配和试压选取合适的强度折减系数指导现场施工,使其满足设计强度要求。该项目软土地基固化土采用路拌法施工。

路拌法施工中常采用“3 次掺灰”拌合法:第 1 次掺灰是在流塑状态软化土区域原地掺入一定量生石灰,生石灰与软土中的水反应,在消耗水的同时释

放大量热量,加速生石灰消耗土壤中的水,最终使土体从流塑状态转变为可塑状态。第 2 次掺灰加入 3% 的水泥,使软化土“砂化”,达到均匀焖料的效果。水泥的水化反应不但可以消耗软土中的水,进一步降低其含水量,而且水泥水化反应生成的胶结物质能降低软土的密实度,起到强度增强作用。第 3 次掺灰加入一定量水泥和水玻璃,形成水泥固化土,为实现地基土强度快速增长提供拌合土料。

#### 2.1.2 材料和机械设备

(1) 材料。填料的土源为“就地取材”的地基软化土,主要胶凝材料为水泥,利用生石灰降低土体含水量,采用水玻璃增强回填土料的和易性(见表 1)。这些材料需进行以下处理或达到以下标准时才能使用:1) 用挖掘机挖出经雨水浸泡至饱水状态的软土,堆放在基坑周围。2) 生石灰数量根据试验段情况确定;生石灰的有效氧化钙和氧化镁含量需满足相关要求;要求生石灰粒径不大于 37.5 mm,以免后期拌合过程中不能进行完全熟化反应;生石灰存放期间进行覆盖,并尽量缩短存放时间。3) 使用 42.5 水泥,存放水泥的仓库应封闭,以免水泥受到污染而变质。水泥存放时不能直接接触地面,需垫起,距离地面至少 30 cm;也不能接触墙壁,应保持 3 cm 的距离;堆放高度不能超过 10 袋。露天堆放的水泥应用防雨篷布覆盖严实,板要垫高并采取防潮措施。

(2) 机械设备。地基加固处理的常用夯实方法

表 1 材料要求

材料名称	要求	目的
回填料	取自现场浸泡的软土	节约成本;受条件制约
第一次掺灰(石灰)	土料达到可塑状态	原位掺灰,降低软土含水率
第二次掺灰(水泥)	3% 含量的 42.5 普通硅酸盐水泥	进一步降低软土含水率,使软土砂化
掺拌剂	掺入不超过 7% 的水泥和适量低浓度水玻璃	提高土体的抗剪强度和施工和易性
第三次掺灰(水泥+水玻璃)		

有重锤夯实、机械碾压和平板振动等,对于高含水率的回填土以上方法都难以实施。该项目地基换填中以不同型号挖掘机配合施工为主(见表 2),挖掘机既起到开挖、拌合的作用,又兼具压实功能。回填土料中的水泥强度在 28 d 龄期前随着养护龄期的增长而增长,呈幂函数形式变化,而且在常用水泥掺量(5%~20%)内就能有效抑制非病害土的软化,起到加固土体的效果,其后期强度也远高于地基承载力要求。因此,非压密状态的固化土也能达到设计要求的承载力。

表 2 施工机械设备

设备名称	设备型号	数量/台
1 <sup>#</sup> 挖掘机	中型	3
2 <sup>#</sup> 挖掘机	小型	1
排水泵	中型	3

#### 2.1.3 回填、压实质量要求

填土前检查水泥固化后地基土是否达到硬塑状态,若没有,则不能进行地基土回填。建筑工程中常以砼强度达到 1.2 MPa 以上作为达到硬塑状态的判断标准。但试验研究发现水泥固化土在常用水泥

掺量(5%~20%)内的7 d无侧限抗压强度只有1~3 MPa,28 d强度也只有2~5 MPa。因此,不能以砼的评价标准作为水泥固化土能否进行下一步施工的判断依据。该项目采用常规液塑限联合测定仪中76 g锥体的落锥深度小于2 mm作为达到硬塑状态的判别标准。

确认固化后的软土达到回填土要求后,对坑槽进行清理,确保无杂物。坑槽回填前做好基础标高的清理,同时清理其中的杂物、砂子等。整个施工过程中都要检查回填质量,不能有杂物。

对回填料分层进行摊铺,每层厚度控制在250 mm。摊铺到一定厚度后进行压实、拍实,并用挖掘机找平。

## 2.2 工艺流程

采用固化土进行软化土地基回填时,按照由深到浅、从两边到中间分层对称压实的施工顺序,分层压实控制厚度为250 mm,以2个压实分层组成1个作业层。施工流程:地表封水→降水→原位第1次掺灰→开挖+第2次掺灰拌合→静置砂化→第3次掺灰拌合→第1层压实→静置硬塑化→重复压实分层施工,直至完成全部压实填筑。

## 2.3 施工要点

该项目软土地基处理范围较大,各处深浅不一,按照面积不超过800 m<sup>2</sup>分为20个大区,每个大区又按照深度划分为4~6个小区,按照由深到浅、一端到另一端的顺序完成施工。

(1) 地表封水。用挖掘机挖出待处理区域深层的软土淤泥,使土坑呈漏斗形,并在侧边打截水沟截断外部的地表水。

(2) 降水。在待处理区域设置一处以上用于降水的井点,将潜水泵置于土坑底部最低点,用潜水泵降低区域外部的地表水。

(3) 原位第1次掺灰。开挖区降水完成后,考虑到土体内部含水量高且不能用物理方法进行处理,在加入水泥固化前加入适量生石灰降低含水量。在开挖区内流塑状态软化土区域原地掺入适量生石灰,通过生石灰与软化土中水的熟化反应及放热加速降低土中含水量,生石灰掺量以将流塑状态软化土变为可塑状态为准,通过落锥试验判别。

(4) 放坡开挖。开挖施工前,采取措施将基坑内地下水位降至拟开挖下层土方的底部以下不小于0.5 m。基坑开挖的分层厚度控制在1 m以内,严禁超挖。

(5) 第2次掺灰。在堆置在拌合堆场的软塑状态软土中按土灰重量比掺入3%的水泥,用挖掘机进行第1次水泥拌合。拌合完成的土样静置6 h以上。

(6) 第3次掺灰。将完成2次掺灰且静置6 h以上的土样,按土灰重量比掺入不超过7%的水泥,并适当掺入低浓度的水玻璃改善土的和易性。

(7) 分层压实。用挖掘机将经3次掺灰的水泥固化土回填至开挖区底部,每次虚铺厚度控制在300 mm。通过挖掘机履带碾压和挖斗下侧拍实3~5遍完成水泥固化土的回填施工。

(8) 静置。将分层压实后的固化土地基静置1 h以上,静置结束时间以固化土压实层达到硬塑状态为准,判断标准为液塑限联合测定仪76 g锥体的落锥深度小于2 mm。如果静置超过3 h后固化土样未达到该标准,则对余下的固化土料进行翻晒降水,每0.5 h翻晒1次,翻晒2次后测量落锥深度,直至落锥深度小于2 mm。

(9) 重复步骤7、步骤8,对余下未回填的区域进行回填、分层压实,直至整个区域全部用符合强度要求的水泥固化土回填压实。

## 3 质量控制措施

(1) 施工期间安排专人查看近期天气预报并作好记录。如果需在雨季施工,则在施工区域内做好防排水,同时用尼龙布覆盖未硬化的已换填地基,防止雨水直接冲刷。

(2) 为取料、投料方便,施工中一般将施工用料放置在施工现场或施工现场周围,应对料堆进行遮盖,以防雨淋。条件允许的情况下,可专门搭建存放施工用料的仓库。

(3) 现场所用回填料现拌现用,严禁提前拌合。天气晴朗、温度较高时,用料前将软土提前翻晒,使土料各处含水率基本一致,否则影响压实度。

(4) 该项目地基含水量高,排水沟的作用重大,需每隔一定时间对排水沟进行检查、维修、疏通,确保其排水畅通。

(5) 处理层底部的承载力需高于140 kPa,否则需加大处理深度;压实层24 h后的承载力应大于160 kPa。

## 4 结语

该项目所用填料为“就地取材”的地基软化土,

(下转第76页)

中的压实及强度形成,建议根据气候、温度和湿度等外界条件适当增加拌合水量,并在运输时加以遮盖,减少水分散失。

## 5 工程应用

### 5.1 试验路铺筑

采用维特根 KMA200 设备进行混合料拌合,拌合后混合料由自卸汽车运输到施工路段。碾压方案为 1 台 12 t 双钢轮压路机静压 0.5 遍+振压 1.5 遍+1 台 22 t 单钢轮振动压路机强振 3 遍+弱振 2 遍+1 台双钢轮压路机弱振 2 遍+2 台胶轮压路机碾压 8 遍,碾压结束后检测压实度,不小于 98%,满足设计要求。碾压完成后采用封闭交通自然养生的方式,养生时间为 7 d。

### 5.2 试验路观测

随着时间的发展,泡沫沥青稳定基层的强度持续增长,可持续 1 年多。基层表面弯沉反映路面结构的承载能力,试验段竣工 4 d 后测定冷再生基层顶面弯沉,结果见图 1。

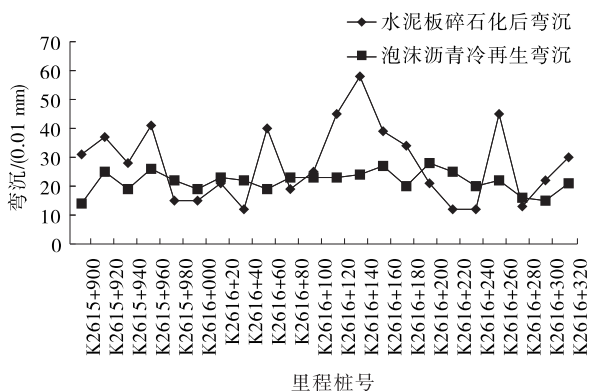


图 1 试验路底基层和冷再生底基层顶面弯沉检测结果

由图 1 可知:冷再生泡沫沥青混合料摊铺 4 d 后的弯沉与原水泥砼路面碎石化后弯沉相比得到较大改善,再生泡沫沥青混合料弯沉平均值为 21.6 (0.01 mm),代表值为 27.7 (0.01 mm) < 65 (0.01 mm),符合规范要求。而且冷再生基层的强度会随时间而增大。

## 6 结语

泡沫沥青厂拌冷再生混合料可用于面层和水稳基层。通过泡沫沥青稳定处理,可增强待稳定材料的强度、稳定性及耐久性等,与就地热再生相比,可保证再生材料的质量,较好地控制路面标高,更重要的是将原路面铣刨可对下承层出现的病害进行及时处理,防止病害扩展。

### 参考文献:

- [1] 王育平,丁小维,张燕.厂拌冷再生技术应用废旧再生材料在路面改造工程的实践:基于泡沫沥青材料[J].工业技术创新,2020,7(6):135-140.
- [2] 王莹.泡沫沥青厂拌冷再生技术在高速公路改扩建工程中的应用[J].北方交通,2019(8):51-54.
- [3] 赵玉霞.浅析泡沫沥青厂拌冷再生的应用[J].中国建材科技,2019,28(3):34-36.
- [4] 赵馨鑫,张烨.泡沫沥青厂拌冷再生在福州三环路大修中的应用[J].黑龙江交通科技,2018(4):77-78+80.
- [5] 王莹.浅谈厂拌冷再生泡沫沥青混凝土的技术应用[J].北方交通,2015(8):82-85.
- [6] 李峰.沥青路面再生混合料耐久性性能研究[J].公路与汽运,2019(5):89-94.

收稿日期:2021-05-21

(上接第 73 页)

主要胶凝材料为水泥,采用生石灰降低土体含水量,添加水玻璃增强回填土料的和易性;地基换填以不同型号挖掘机配合施工为主,挖掘机既起到挖掘、拌合的作用,又兼具压实功能。该固化技术适用于工期短、换填工程量大、地基上部荷载不大的情况,是一种应急处理方式。

### 参考文献:

- [1] 乔峰,薄景山,王亮,等.中国软土及其动力学特性研究的概况[J].世界地震工程,2019,35(4):150-161.
- [2] 骆俊晖,米德才,刘先林,等.软土工程特性研究与评价

[J].中外公路,2017,37(6):42-46.

- [3] 郑刚,龚晓南,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(2):127-146.
- [4] 刘松玉,周建,章定文,等.地基处理技术进展[J].土木工程学报,2020,53(4):93-110.
- [5] 龚晓南.地基处理技术及发展展望[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [6] 王楚发.高速铁路路桥过渡段地基加固技术研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [7] 许森.水泥土无侧限抗压强度影响因素研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.

收稿日期:2021-03-11