

# 双向水泥搅拌法在高填路堤泥炭质土地基中的应用

曾田胜<sup>1</sup>, 许发明<sup>2</sup>, 谭祥韶<sup>2</sup>, 刘吉福<sup>3</sup>, 罗吉庆<sup>1</sup>

(1. 广东省公路建设有限公司, 广东 广州 510600; 2. 中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东 广州 511442;  
3. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507)

**摘要:** 采用双向水泥搅拌法加固泥炭土地基中的某高填路堤, 通过增加搅拌次数和掺灰量保证了泥炭土地基搅拌桩的成桩质量, 通过施工监测和动态设计保证了路堤的稳定性, 监测数据表明工后沉降也可满足规范要求, 并对双向搅拌桩复合地基联合反压护道方案进行经济效益分析。

**关键词:** 双向水泥搅拌桩; 高填路堤; 泥炭质土地基

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)02-0105-06

## Application of bi-directional cement mixing method in high-filled embankment in peaty soil foundation

ZENG Tian-sheng<sup>1</sup>, XU Fa-ming<sup>2</sup>, TAN Xiang-shao<sup>2</sup>, LIU Ji-fu<sup>3</sup>, LUO Ji-qing<sup>1</sup>

(1. Guangdong Highway Construction Co., Ltd, Guangzhou 510600, China;  
2. CRCC Harbour&Channel Engineering Bureau Group Survey&Design Institute Co.,Ltd, Guangzhou 511442, China;  
3. Guangdong Communication Planning & Design Institute Co., Ltd, Guangzhou 510507, China)

**Abstract:** The bi-directional cement mixing method was used to reinforce a high-filled embankment in peaty soil foundation. The improved quality was ensured by increasing the number of mixing times and the ash content, and the stability of the embankment was guaranteed by construction monitoring and dynamic design. The monitoring results show that the post-construction settlements can meet the requirements of specifications. The economic benefit of the composite foundation of bi-directional cement mixing piles combined with loading berm are analysed.

**Key words:** bi-directional cement mixing pile; high-filled embankment; peaty soil foundation

## 0 引言

某高速公路某路段设计标高与原地面标高差超过 11 m, 同时存在泥炭土和淤泥质土, 原初步设计为桥梁。由于土方调配需要, 将桥梁优化为路堤。该段路堤高度超过排水固结适用高度, CFG 桩、素混凝土桩等灌注桩在泥炭土中因扩孔过大而无法成桩, 而广东省交通运输厅发文要求新建高速公路原则上不允许采用管桩复合地基处理, 综合比较后采用水泥土搅拌桩处理。大量工程实践表明, 水泥搅拌桩一般适用于填土高度不大于 6.0 m 的路基, 同时成桩质量难以保证, 特别是高塑性指标、高有

机质和富含腐木路段<sup>[1]</sup>。在应用过程中也发生过一些事故, 许多地方采取慎用、甚至限用等限制, 因此如何保证泥炭土中成桩质量和路堤稳定性是急需解决的问题<sup>[2]</sup>。

本文主要通过介绍了水泥搅拌桩复合地基联合反压护道处理的原理及设计方法, 并通过某高速公路搅拌桩复合地基处理的工程实例<sup>[3]</sup>, 深入分析水泥搅拌桩复合地基的加固机理, 根据路基表面沉降、分层沉降观测和深层侧向水平位移数据对本工程水泥搅拌桩的变形机理进行了分析总结, 为今后类似泥炭质土(富含腐木)的高填路段水泥搅拌桩复合地基设计提供参考。

收稿日期: 2020-02-24

基金项目: 广东省交通运输厅科技项目(科技-2016-01-011)

作者简介: 曾田胜(1970—), 男, 湖南邵东人, 路桥高级工程师, 主要从事高速公路项目管理、施工与科研等工作。E-mail: 39898171@qq.com。

# 1 工程地质概况

本路段地下水位埋深约为 1.3~2.5 m，路段填高为 11.3~14.0 m。周围地表多为稻田、焦林和灌溉沟渠，详见图 1。

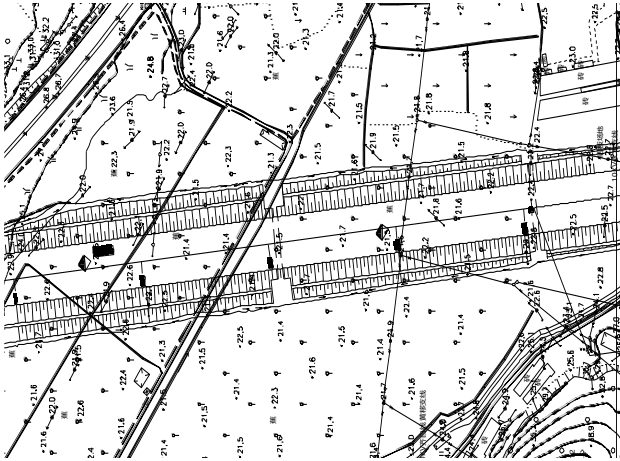


图 1 K20+067~K20+513 路段地形图

Fig. 1 Topographic map of K20+067~K20+513 section

该路段主要地层（见图 2）自上而下有：

①<sub>12</sub> 耕土：层厚为 0.20~0.30 m，锥尖阻力 0.23~1.21 MPa，侧摩阻力 0~36.1 kPa。

②<sub>21</sub> 淤泥质土：层厚为 2.1~6.7 m，锥尖阻力 0.04~0.74 MPa，侧摩阻力 0.5~30.1 kPa。其中 1~3 m 范围内软土层中夹有较多未腐烂的树根（具体详见图 3）。

②<sub>23</sub> 粉砂：层厚为 0.8~2.7 m，锥尖阻力 0.87~3.61 MPa，侧摩阻力 2.3~40.1 kPa。

②<sub>41</sub> 细砂：层厚为 0.8~5.6 m，锥尖阻力 0.87~8.7 MPa，侧摩阻力 0.23~51.6 kPa。

②<sub>51</sub> 中砂：层厚为 0.8~2.1 m，锥尖阻力 1.05~6.82 MPa，侧摩阻力 6.9~31.1 kPa。

②<sub>12</sub> 粉质粘土：层厚为 1.0~2.7 m，锥尖阻力 0.81~3.59 MPa，侧摩阻力 14.1~131.2 kPa。

③<sub>22</sub> 粘土：层厚为 1.2~4.3 m。锥尖阻力 1.7~2.99 MPa，侧摩阻力 40.5~83.6 kPa。

# 2 地基处理情况

首先选择 2 个工点试桩，每个工点试桩 13 根，共 26 根。搅拌桩上部 1~3 m 掺灰量分别采用 85 kg/m、97 kg/m，采用四搅三喷施工工艺；下部 3~7.5 m 掺灰量分别采用 57 kg/m、65 kg/m，采用两搅两喷工艺。水灰比 0.6。抽芯检测表明桩身强度均满足设计要求，桩身完整性良好（见图 4）。

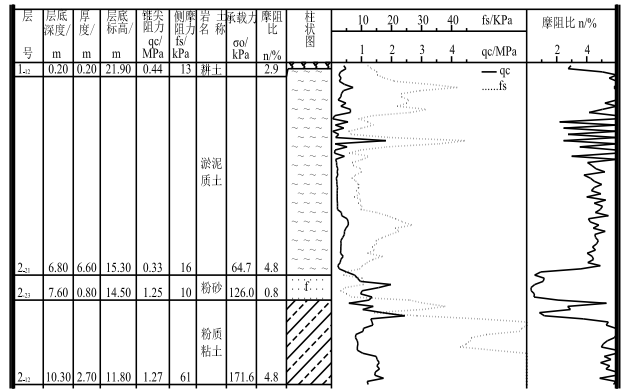


图 2 静力触探试验成果图

Fig. 2 Result of static cone penetration tests



图 3 施工前补勘抽样照片

Fig. 3 Cone samples before construction



图 4 搅拌桩施工质量抽芯检测照片（第 1 批）

Fig. 4 Core samples for construction quality test of mixing piles (The first batch)

经研究决定采用双向水泥搅拌桩复合地基方法进行处理，双向水泥搅拌桩复合地基详细设计参数如下：桩长 7.5 m，桩间距 1.2 m，上部 3.5 m 范围采用三喷四搅、掺灰量 80 kg/m；下部采用二喷二搅、掺灰量 60 kg/m。设计桩身抗压强度 28 d 时 1.2 MPa，90 d 时 1.5 MPa，单桩承载力特征值 200 kN。

另外依据检测方案,于2016年12月30日对1号桩(70 kg/m)进行了复合地基承载力抗压静载试验,得到复合地基极限承载力为303 kPa,设计要求的复合地基承载力特征值为160 kPa,  $303/160=1.894$ ,大于设计值的1.6倍,满足设计要求。可见试桩时水泥搅拌桩成桩质量较好,桩身强度和承载力均完全满足设计要求。

为进一步验证水泥搅拌桩处理方案的可靠性,2017年1月6日和2月16日,在已完成的水泥搅拌桩中随机抽取40根桩进行抽芯及强度检测,抽芯及强度检测结果表明,芯样完整性较好,桩身强度满足设计要求。抽芯检测表明桩身强度均满足设计要求,桩身完整性良好(见图5)。



图5 搅拌桩施工质量抽芯检测照片(第2批)

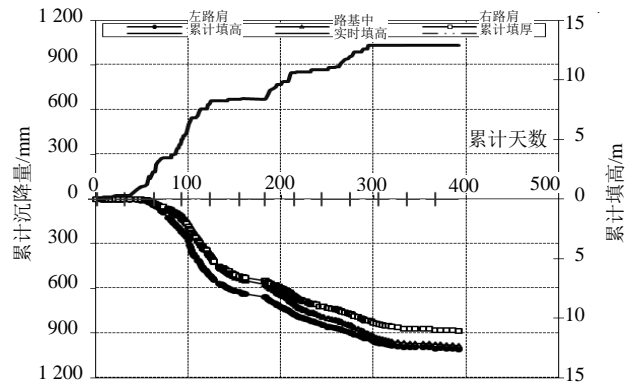
Fig. 5 Core samples for construction quality test of mixing piles (The second batch)

所有水泥搅拌桩施工成桩后进行质量检测,随机抽取了0.5%进行了抽芯检测和0.1%进行复合地基静载试验,完成的140根抽芯桩中,桩身均匀性好的38根、一般的97根、差的5根,合格率96.4%;完成的31根复合地基静载试验桩中,有8根的极限承载力大于设计承载力特征值的1.6倍,有20根的极限承载力大于设计承载力特征值的2倍,有3根因试验过程中变形超过上一级荷载的5倍而根据《建筑地基基础检测规范》的相关规定终止了试验,合格率90.3%。基于上述情况,结合个别试验桩单桩承载力不满足要求(检测出现3根,即9.7%)的实际情况,经设计单位进一步验算,该段路基稳定安全系数为1.443,稳定性可满足规范要求。

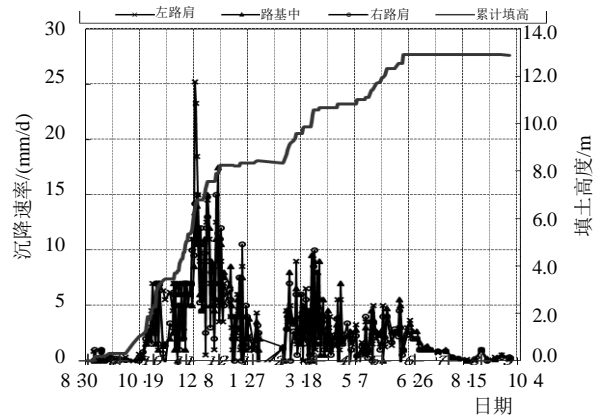
### 3 监测数据分析

#### 3.1 表面沉降

K20+200断面沉降曲线如图6所示。



(a)



(b)

图6 沉降量和沉降速率曲线图

Fig. 6 Curves of settlement and settlement rate

从图6可看出路基填筑至5 m以下,路段沉降变形较小,沉降速率和深层位移速率均未达到预警值,路基整体仍然稳定性较好,但2017年12月中旬填筑到6.5~7.6 m时,沉降速率和深层位移速率迅速增大,几乎天天超出预警值,多次远超预警值(10.0 mm/d),最大达25 mm/d,发现在边坡坡脚位置出现多条裂缝,且坡脚处不断有地下水渗出。在设置反压护道(高3.5 m,宽15 m)后,沉降速率迅速降低,后期施工中均未达到预警值,顺利完成了等载填筑施工。采用累计生成处理法(AGO法)对路基的沉降变形趋势进行分析,具体详见图7。从图7可得采用反压护道后不排水沉降速率增长明显降低,路基填筑的稳定性得到明显增强。

等载预压3个多月后,卸载前,采用双曲线TS法预测最终沉降量,通过最终沉降量计算工后沉降量,K20+200断面左、中、右测点的工后沉降量分别为182 mm、228 mm、186 mm,小于一般路基允许工后沉降量300 mm,最后1个月的月沉降量也分别为6 mm、7 mm和6 mm,接近于沉降速率卸载标准5 mm/月。

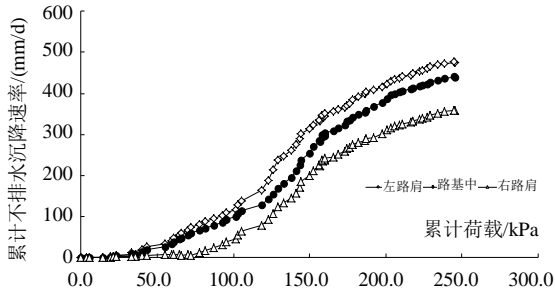
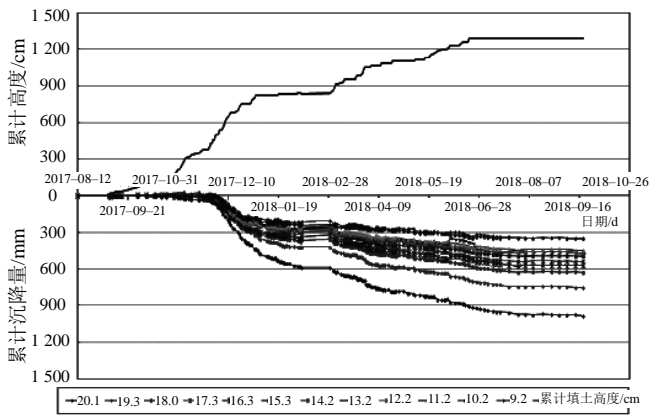


图7 填筑高度-不排水沉降速率关系曲线

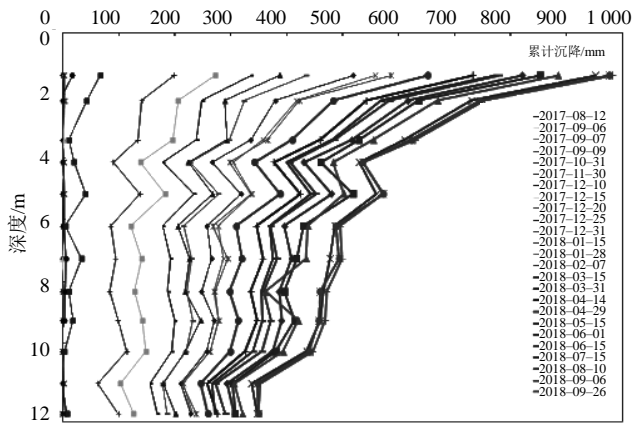
Fig. 7 Cumulative settlement rate varies with cumulative load

### 3.2 分层沉降

K20+200 断面分层沉降曲线如图 8 所示。



(a)



(b)

图8 分层沉降变形曲线图

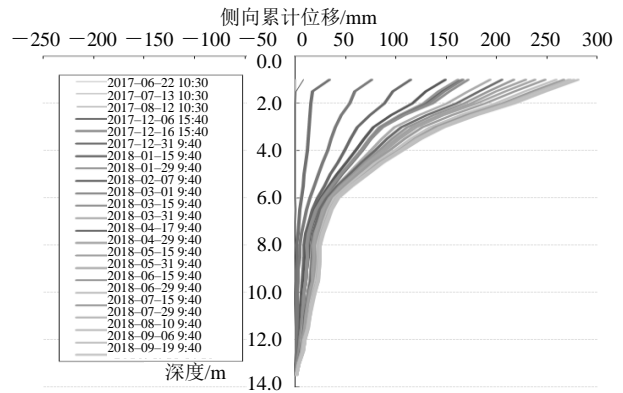
Fig. 8 Curves of layered settlement

从图 8 可看出水泥搅拌桩变形主要发生的浅层 0~5 m 范围内, 0~5 m 的分层沉降量 490 mm, 总沉降量 1 061 mm, 占总沉降量的百分比 46%; 桩底地基也发生较大的压缩量, 压缩量 499 mm, 占总沉降量百分比分别为 47%; 其它部位 (5~7.5 m) 的变形为 73 mm, 占总沉降量的百分比分别为 7%。

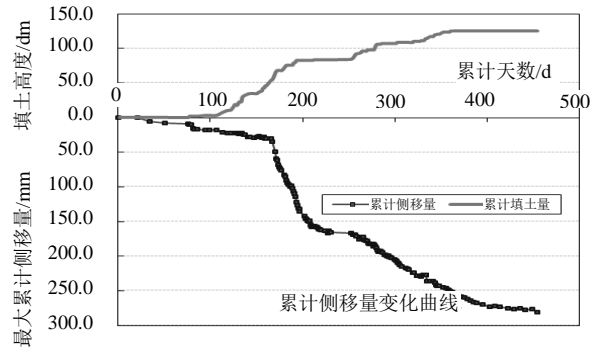
可见水泥搅拌桩变形主要集中在浅层 0~5 m (含腐木软土段) 及桩底地基内。

### 3.3 侧向水平位移

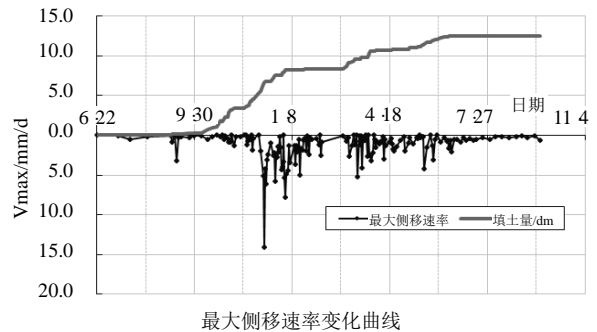
K20+200 断面侧向水平位移曲线如图 9 所示。



(a)



(b)



(c)

图9 深层水平位移曲线图

Fig. 9 Curves of deep horizontal displacement

从图 9 可看出路基填筑至 5 m 以下, 路段侧向位移变形较小, 侧向水平位移速率均未达到预警值, 路基整体仍然稳定性较好, 但填筑到 6.5~7.6 m 时, 沉降速率和深层位移速率迅速增大, 几乎天天超出预警值, 多次远超预警值 (5.0 mm/d)。增设反压护道后, 侧向水平仍然在逐渐增大, 增长速率明显变缓, 侧向水平位移速率均低于 5 mm/d, 路基填筑的稳定性增强。

## 4 搅拌桩复合地基稳定性理论计算分析

采用有限元软件计算水泥搅拌桩+反压护道联合处理的稳定性分析, 各级填筑的安全系数详见表1。

从表1可知, 设置反压护道后, 路基填筑的稳定性大幅提高, 路基安全系数大于1.2, 可满足路基稳定性要求, 工后沉降量也小于允许工后沉降量<sup>[4]</sup> (一般路基段300 mm)。

通车半年后工后沉降仅为20~36 mm, 且采用双曲线法推算的剩余工后沉降量均小于100 mm, 完成可满足高速公路一般路基对工后沉降(300 mm)<sup>[4]</sup>的要求。左右幅桥头过渡路段纵坡平直, 未出现跳车现象, 具体图10和图11所示。

## 5 经济对比分析

水泥搅拌桩+反压护道方案与管桩复合地基处理方案及桥梁方案的经济对比见表2。采用搅拌桩复合地基+反压护道处理方案的造价仅为管桩复合地基处理方法的75.1%, 相对节省造价约522.0万元, 仅为桥梁的56.1%, 节省造价约13320.9万元, 经济效益显著。

## 6 结论与建议

(1) 通过增加搅拌次数和掺灰量可以在泥炭土形成完整性和强度均满足设计要求的搅拌桩。

(2) 按现有规范路堤稳定分析方法得到安全系数与工程实际情况存在一定出入。搅拌桩复合地基路堤高度不宜超过8 m, 否则应采取反压护道等



图10 左幅桥头过渡路纵坡照片

Fig. 10 Photo of left transition road longitudinal slope



图11 右幅桥头过渡路纵坡照片

Fig. 11 Photo of right transition road longitudinal slope

措施。

(3) 路堤主要沉降主要产生在泥炭层和下卧层, 水平位移主要产生在软土层。

(4) 采用水泥搅拌桩复合地基+反压护道处理泥炭土地基高路堤预压3个月可以满足工后沉降要求。

(5) 相对管桩复合地基处理和桥梁方案, 水泥搅拌桩+反压护道联合处理富含腐木泥炭质土的高填软基路段具有很好的经济效益。

表1 路基安全系数

Tab. 1 Safety coefficient of subgrade

分级	时间/月	厚度/m	累计高度/m	无反压护道		有反压护道	
				安全系数	沉降量/m	安全系数	沉降量/m
1	0~2	2.5	2.5	1.524	0.046	2.585	0.062
2	2~4	5.5	8.0	1.056	0.512	1.659	0.569
3	4~6	0.3	8.3	1.037	0.611	1.573	0.678
4	6~8	2.5	10.8	0.991	0.849	1.251	0.898
5	8~10	2.2	13.0	0.875	0.983	1.231	1.005
6	10~12	0	13.0	—	1.061	—	1.123
7		基准期内量沉降		—	1.262	—	1.356
8		工后沉降量		—	0.201	—	0.233

表2 地基处理方案经济效果对比

Tab. 2 Economic comparison of foundation treatment schemes

处理方案	设计参数	项 目	工程量	单价/元	金额/元	备注
搅拌桩复合地基 +反压护道方案	D=1.2, L=7.5	征地费用	13 380 m <sup>2</sup>	7.5	100 350	
		反压护道	46 830 m <sup>3</sup>	7.26	339 986	
		搅拌桩	206 013 m	46.18	9 513 680	
		碎石垫层	23 806.5 m <sup>3</sup>	79.05	1 881 904	
		双向土工格栅	36 017 m <sup>2</sup>	12.25	441 208	
		K20+315 盖板涵	54.0 m	21 620.65	116 751.51	K20+319.65 另增 1.8 m 过水圆管涵
		K20+870 农田灌溉 水渠圆管涵	73.40 m	7 179.92	527 006.128	圆管涵流水面约占 一半
		路基填土	22 969 m <sup>3</sup>	7.26	166 755	
		路面	14 941 m <sup>2</sup>	180	2 689 380	
				总造价		
管桩复合地基 处理法	D=2.2, L=10	管桩	81 724 m <sup>2</sup>	155	12 667 220	
		托板	8 172 块	200	1 634 400	
		碎石垫层	34 233 m <sup>3</sup>	79.05	2 706 119	
		钢塑土工格栅	36 017 m <sup>2</sup>	13.59	489 471	
		涵洞	2 道	321 878.8	643 757.6	明暗各一道
		路基填土	22 969 m <sup>3</sup>	7.26	166 755	
		路面	14 941 m <sup>2</sup>	180	2 689 380	
		总造价			20 997 103	
桥梁		桥梁	10 035 m <sup>2</sup>	2 800	28 098 000	
		总造价				28 098 000

## 参考文献

- [1] GDJTG/T E01-2011 广东省交通运输行业地方标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 刘吉福, 陈忠平, 汪建斌. 超软地基排水固结联合轻质土路堤处理技术及其简易算法[J]. 地基处理, 2019, 1(2): 12-16.
- [3] 中铁建港航局集团有限公司. 高恩高速公路 K20+067~K20+513 路段水泥搅拌桩复合地基加固效果分析报告[R]. 广州: 2018.
- [4] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.