

# 高速公路吹填砂填筑路基设计与施工研究

刘霞, 蔡湘运

(新邵县公路管理局, 湖南 邵阳 429000)

**摘要:** 就湖区高速公路吹填砂路基修筑关键技术进行研究, 提出填筑路基的吹填砂应使用中、细砂, 含泥量不大于 15%; 为及时排除吹砂水, 采用沟渠排水的方式构建临时排水系统、袋装砂+黏土的包边形式排除路基内部水, 并分层修筑纵横向拦水坝; 进行吹填砂横断面方案和高填土路基方案设计, 确定包边土厚度为 1 m, 采用平行四边形边坡形式, 坡度为 1:1.5, 路基填筑高度不大于 8 m; 采用袋装砂+黏土的包边形式, 以同步施工和后包边相结合的方式 进行包边土施工。

**关键词:** 公路; 路基; 吹填砂; 排水系统; 包边土

中图分类号: U418.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)04-0089-05

中国湖区、江河沿岸的地质普遍为 I 级堆积阶地, 地形平缓, 路线位置多覆盖淤泥质土层, 非常不利于路基填筑。吹砂填筑技术可有效解决湖区和海边路基填料缺乏的问题。在欧、美等发达国家, 用砂来填筑路基已有许多成熟经验, 一些欧洲国家甚至用砂来填筑高等级公路路面底基层。在国内, 武英(武汉—英山)、乐温(乐化—温家圳)、中江(中山—江门)、京珠(北京—珠海)及哈尔滨绕城高速公路等部分路段在路基施工中均采用了吹砂技术。吹填砂工艺填筑高等级公路路堤具有施工快、节约成本、不受外界环境影响、利于保护国土资源等优点, 在中国多个地区得到了应用。但由于没有相关规范控制施工质量, 大多修筑里程较短, 且在排水设计和边坡设计等方面还不够成熟。该文结合湖区某高速公路工程, 研究吹填砂路基修筑技术, 为湖区高等级公路吹填砂填筑路基工程应用和推广提供参考。

## 1 砂的可用性试验研究

吹填路基适用于缺土多砂、可用吹填方式填筑

路基的地区。吹填路基材料以中、粗砂为宜, 根据 JTJ 017-96《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》, 其含泥量不大于 15%。但实际吹填时, 中、粗砂很难吹上来, 即使吹上来, 砂已离析, 无法保证路堤压实度, 而采用中、细砂作为吹填砂则没有这些问题。对该高速公路附近某河东支和中支河砂进行取样, 通过筛分试验计算得到河砂的细度模数(见表 1、表 2), 通过击实试验(筒容积 997 cm<sup>3</sup>; 击锤质量 4.5 kg; 落距 45 cm; 每层击数 27 次)得到河砂的最大干密度和最佳含水率(见表 3~6), 并对含泥量进行测量。

表 1 湖区某河中支取样河砂筛分试验结果

孔径/ mm	累积留筛 土质量/g	小于该 孔径的 土质量/g	小于该孔 径土质量 百分比/%	占总土 质量百 分比/%
0.250	0	200	100	100
0.075	176	24	12	12

注: 筛前总土质量为 200 g; 小于 2 mm 土质量的占比为 100%。

表 2 湖区某河东支取样河砂筛分试验结果

粗筛分析				细筛分析				
孔径/ mm	累积留筛 土质量/g	小于该孔径的 土质量/g	小于该孔径土 质量百分比/%	孔径/ mm	累积留筛 土质量/g	小于该孔径的 土质量/g	小于该孔径土 质量百分比/%	占总土质量 百分比/%
40	—	—	—	2.000	268	831	100.0	75.6
20	0	1 099	100.0	1.000	423	676	81.3	61.5
10	6	1 093	99.5	0.500	692	407	49.0	37.0
5	54	1 045	95.1	0.250	867	232	27.9	21.1
2	268	831	75.6	0.075	1 083	16	1.9	1.5

注: 筛前总土质量为 1 099 g; 小于 2 mm 土质量为 831 g。

表3 湖区某河东支取样河砂击实试验结果(干密度)

试验次数	筒加土质量/g	筒质量/g	湿土质量/g	湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
1	5 020	3 300	1 720	1.73	1.61
2	5 080	3 300	1 780	1.79	1.63
3	5 155	3 300	1 855	1.86	1.68
4	5 226	3 300	1 926	1.93	1.70
5	5 248	3 300	1 948	1.95	1.67

注:最大干密度=1.706 g/cm<sup>3</sup>。

表4 湖区某河东支取样河砂击实试验结果(含水率)

试验次数	盒+湿土质量/g		盒+干土质量/g		盒质量/g		水质量/g		干土质量/g		含水率/%		平均含水率/%
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
1	61.57	61.85	58.18	58.44	11.57	11.85	3.39	3.41	46.61	46.59	7.3	7.3	7.3
2	61.86	61.83	57.52	57.48	11.86	11.83	4.34	4.35	45.66	45.65	9.5	9.5	9.5
3	65.48	66.36	60.59	61.37	15.46	16.38	4.89	4.99	45.13	44.99	10.8	11.1	11.0
4	65.78	66.33	59.71	60.36	15.99	16.32	6.07	5.97	43.72	44.04	13.9	13.6	13.7
5	66.91	66.69	59.60	59.70	16.90	16.63	7.31	6.99	42.70	43.07	17.1	16.2	16.7

注:最佳含水率=13.60%。

表5 湖区某河中支取样河砂击实试验结果(干密度)

试验次数	筒加土质量/g	筒质量/g	湿土质量/g	湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
1	5 259	3 304	1 955	1.96	1.81
2	5 338	3 304	2 034	2.04	1.85
3	5 397	3 304	2 093	2.10	1.89
4	5 461	3 304	2 157	2.16	1.94
5	5 470	3 304	2 166	2.17	1.92

注:最大干密度=1.945 g/cm<sup>3</sup>。

表6 湖区某河中支取样河砂击实试验结果(含水率)

试验次数	盒+湿土质量/g		盒+干土质量/g		盒质量/g		水质量/g		干土质量/g		含水率/%		平均含水率/%
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
1	66.88	66.72	63.48	62.22	16.88	16.63	3.40	4.50	46.60	45.59	7.3	9.9	8.6
2	66.42	66.04	61.81	61.42	16.39	15.97	4.61	4.62	45.42	45.45	10.1	10.2	10.2
3	66.86	65.54	61.96	60.65	16.63	15.46	4.90	4.89	45.33	45.19	10.8	10.8	10.8
4	66.95	66.38	61.72	61.13	16.93	16.32	5.23	5.25	44.79	44.81	11.7	11.7	11.7
5	65.00	65.49	60.08	58.70	14.98	15.20	4.92	6.79	45.10	43.50	10.9	15.6	13.3

注:最佳含水率=12.30%。

试验结果显示:1) 该河东支取样河砂的最大干密度为 1.706 g/cm<sup>3</sup>,最佳含水率为 13.6%,含泥量为 5.4%,细度模数为 0.88,属于粉砂,易吹填。但由于粉砂颗粒较均匀、塑性指数低、粘性小、保水能力差,最佳含水率控制较困难,施工时要考虑压实工艺,控制砂的含水量,保证压实质量。2) 中支取样河砂的最大干密度为 1.945 g/cm<sup>3</sup>,最佳含水率为 12.3%,含泥量为 4.2%,细度模数为 2.9,属于中砂,可用于吹填路基。但中、粗砂需考虑吹填难度,吹填

时适当加大吹填设备的功率。

## 2 吹填砂路基排水系统设计

路基排水设计遵循排水、疏水、预防相结合的原则,并与边坡防护、路面排水系统、地基处理等措施相协调,从而保证吹填砂路基的稳定性。

### 2.1 临时排水系统设计

吹填砂过程中,水是输送砂的关键介质,而排砂管总体积的 80%以上是水,因而吹填砂施工前的关

键是建立临时排水系统。该项目采用沟渠排水的方式构建临时排水系统(见图1),并根据需要设置泄水管(管口包透水土工布)和抽水泵,及时排除吹砂留下的水,避免影响路基的稳定性和周边环境。临时排水系统可减轻水土流失,且不容易改变水文状态,对当地河道、灌溉系统的影响较小。

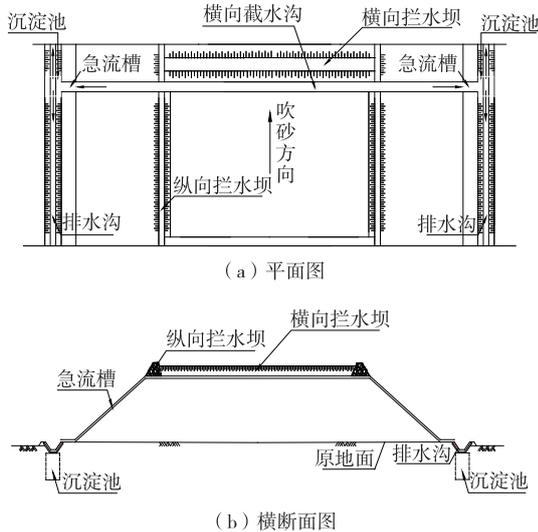


图1 临时排水系统设计

吹填砂路基施工、预压和运营过程中,边坡排水设计对路基稳定性起着很重要的作用。施工中可根据需要对高填方的坡面设置泄水管,用于排除聚集在包边土中的水。该项目在路基边坡顶部设置纵向拦水坝,在距路基坡脚2 m处设置排水沟,并在适当位置设排水口,水口大小视吹砂设备功率而定,排水口处两侧拦水坝用袋装砂包或塑料薄膜加固处理。排水沟连接到附近的排水系统,施工中产生的水先流到排水沟,经沉淀、过滤后排入附近的沟渠或当地排水系统,避免污染水源、农田等。

## 2.2 拦水坝及路基内部排水设计

吹填砂之前,在路基设计宽度以外修筑拦水坝。第一层采用挖沟或清顶填筑,并在路基坡脚外侧填筑,保证路基坡脚的密实度。其断面尺寸根据每层吹填厚度而定,厚度不大于1 m时,坝的宽度为80 cm,只要能满足自身稳定性即可。包边用的砂袋作为拦水坝的一部分起到相应的作用。从第2层开始,拦水坝用吹填砂修筑,内部用塑料薄膜铺设,避免冲刷。

由于吹砂过程中水量较大,需要一定的含水量才能使砂达到一定的密实度,但会造成路基积水,如果不能将水及时排除,路基底部会在水长时间浸泡

下软化,甚至出现边坡坍塌、路面塌陷的情况。该项目采用袋装砂+黏土后包边的方式进行路基内部排水,解决砂土结合部位水难以排除的问题。

## 3 吹填砂路基断面设计及经济性分析

### 3.1 横断面设计

(1) 厚度设计。规范要求包边厚度为0.4~1 m,实践中有的项目包边土的最小厚度放宽至0.75 m甚至0.5 m。考虑到该项目为湖区公路,又处在降水量和强度较大的地区,为避免坡面因水流冲刷导致边坡破坏,在试验路修筑中包边土厚度采用1 m,并根据试验路情况在后续大面积施工中对包边土厚度进行优化。

(2) 边坡设计。边坡主要有平行四边形和梯形两种形式,平行四边形包边土两侧坡度相等(见图2),而梯形包边土外侧坡度较小。对于砂类土,在地基状况良好的情况下,边坡坡度宜为1.0:1.5;对于高填土的软土地基,如条件允许,应尽可能将边坡坡度放至1:2。但实际上由于土地资源缺乏,很难将边坡放至1:2。该项目采用平行四边形边坡形式,坡度为1.0:1.5(见图3)。对于部分高填方路堤,为保证边坡稳定,同时节省占地面积、不破坏生态平衡,采用图4所示边坡结构。

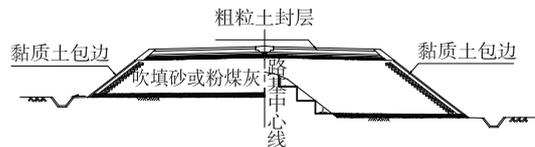


图2 吹填砂路基横断面整体设计

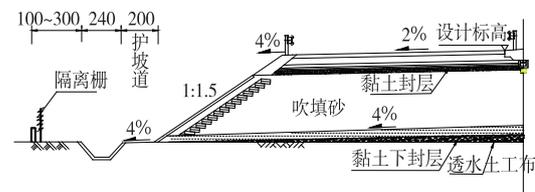


图3 吹填砂路基横断面设计(单位:cm)

(3) 吹填高度。对于吹填砂路基,边坡高度取多少较合理还没有定论。根据该项目黏土、砂土的实测粘聚力和内摩擦角,采用FLAC/SLOPE5.00进行边坡稳定性分析,同时考虑实际环境因素,得出吹填砂路基高度不超过8 m。

### 3.2 包边土施工设计

(1) 包边土施工。吹填砂包边土施工方法有同步施工、基本同步施工、后包边施工3种。其中:同

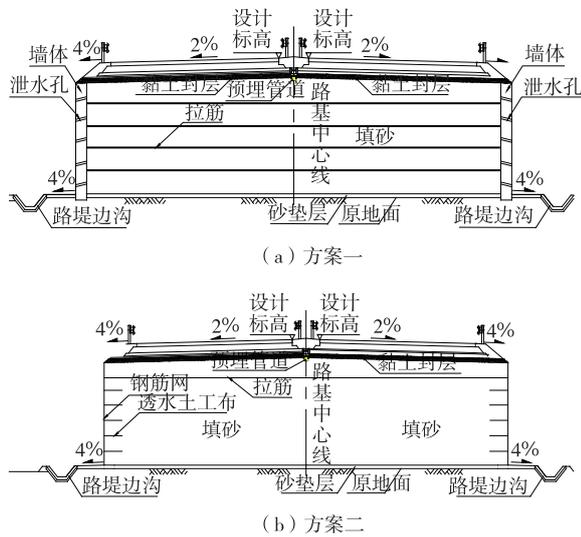


图4 高填方路基包边示意图

步施工法有利于施工组织,造价低,路基压实度、标高、平整度及工期易控制,路基不容易产生开裂现象;基本同步法具有同步施工的大部分特点,只是砂土和黏性土的结合面不易压实;后包边法可较好地解决压实度的问题,不会引起路基不均匀沉降,且由于砂土和黏性土施工相隔时间较长,前期施工能充分利用机械和人力,加快施工进度,但后包边的弃方非常大。该项目采用同步施工和后包边相结合的方式,先修建拦水坝,砌筑砂袋,砂袋起包边作用并作为拦水坝的一部分,在分层吹填的一层结束且压实度达到要求后进行下一层施工,吹填结束后进行包边土施工,包边土施工完成后对路基两侧包边黏土进行压实。碾压方法与普通路基一样,其关键是控制含水率,对薄弱部分充分压实,保证填筑质量。

(2) 包边形式。试验路修筑中采用黏性土进行包边,要求其液限小于50%,塑性指数小于26%,同时填料的强度和粒径达到要求。黏性土具有较大的粘结性、稳定性,砂土具有水稳定性好但失水后干稳定性差的特点,考虑到施工和排水难度,采取土包砂的填筑方法,即采用砂土填芯,码砌砂袋+黏土包边的方式,以发挥两种材料的优点(见图5)。堆码砂袋不仅起到包边与拦水坝的作用,台阶式的堆码对路基和边坡的稳定也起到重要作用,还可减少包边土施工时界线划分等工序。



图5 包边形式

### 3.3 经济效益分析

与一般路基相比,吹填砂路基能解决筑路土源缺乏、运输费用大等难题,有利于保护国土资源,节省成本。以加压次数分段,对每个施工段进行吹砂、填砂、填土概预算分析,结果见表7。

由表7可知:1) K46+000—K50+789段不适宜吹砂,因为吹砂的距离较大,其成本比普通填土高。2) K50+789—K90+199.75段吹砂成本为128 006 129元,填砂成本为115 181 474元,填土成

表7 不同路基填筑方案的经济性比较

加压次数	按加压次数分段	填方量/ 万 m <sup>3</sup>	吹砂成本/ 元	填砂成本/ 元	填土平均 运距/km	填土成本/ 元
5	K46+000—800	13.477			9.6	
4	K46+800—K49+100	59.283	29 203 800	24 023 629	8.6	28 396 624
3	K49+100—K50+789	25.984			9.9	
2	K50+789—K52+000	24.321			11.4	
1	K52+000—K54+200	29.018	26 755 995	27 118 296	13.0	35 598 322
0	K54+200—K57+285.42	48.525			15.8	
0	K57+285.42—K63+043.42	80.897	24 901 851	23 389 677	20.2	35 417 028
0	K63+043.42—K66+783	27.231	9 271 006	10 091 721	24.9	13 926 351
1	K71+877—K75+500	69.007	22 272 946	17 924 564	6.8	26 757 634
0	K75+500—K77+198	15.923			4.2	
1	K79+734—K85+133	87.751	22 926 720	18 906 296	7.1	28 095 480
0	K85+133—K88+200	57.468			10.6	
1	K88+200—K90+199.75	28.986	21 877 611	17 750 920	11.5	28 410 591

本为168 205 415元,适宜吹填。在施工图设计中确定的各取土场满足取土方量需求且土质满足路堤填料要求的前提下,该段采用吹砂填筑可节约成本近4 000万元,采用填砂可节约近5 300万元,具有较好的经济效益。

### 4 结论

(1) 修筑高等级公路的吹填砂应以中、细砂为主,其含泥量不大于15%,并严格控制其含水量。

(2) 可通过沟渠排水的方式构建临时排水系统排除吹砂留下的水,并分层修建拦水坝,采用袋装砂+黏土的包边形式排出路基内部水。

(3) 吹填砂路基横断面和高填土路基设计中,包边土厚度取1m,采用坡度为1:1.5的平行四边形边坡,吹填砂路基高度不大于8m。采用袋装砂+黏土的包边形式,以同步施工和后包边相结合的方式进行包边土施工。

(4) 在湖区填筑路基,与填土修筑相比,吹填砂填筑可显著节约成本和工期,具有较好的经济效益。

### 参考文献:

[1] 李战国,张务民,潘凤文,等.滨海吹填砂和淤泥路基的固化及施工研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012,36(2):252-256.

[2] 胡波,汪稔,胡明鉴,等.水力吹填砂地基强夯处理试验研究[J].岩土力学,2007,28(增刊1):89-92.

[3] 常亮,李新凯,韩学生.基于灰色理论的吹填砂路基沉降预测研究[J].公路交通科技(应用技术版),2018(2):52-54+57.

[4] 刘颖,员伟峰,张宏强,等.冀东油田场地地基处理方式的优选应用[J].中国石油和化工标准与质量,2016,36(18):75-77.

[5] 陶涛,陈志明,徐永福,等.吹填海砂路基包边土厚度确定方法研究[J].中外公路,2016,36(1):32-36.

[6] 齐延方.填砂路基压实施工技术在高速公路施工中的应用[J].交通世界,2016(18):30-31.

[7] 闫纲彪.高速公路工程软土路基施工技术研究[J].交通世界,2016(14):6-7.

收稿日期:2019-11-11

\*\*\*\*\*  
(上接第88页)

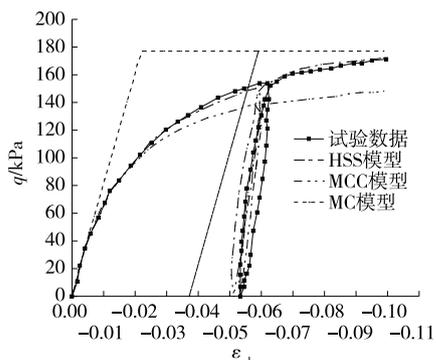


图8 本构模型模拟与试验应力-应变曲线对比

体应力-应变曲线拟合较好,随着应变的增大,其硬化效果不显著,计算的应变值比试验值小;小应变硬化模型及修正剑桥模型均属于非线性弹塑性模型,应力-应变皆为曲线关系,且卸载刚度比摩尔-库伦模型的卸载刚度大;HSS本构模型子程序的模拟结果与试验结果一致,初次加载时偏应力与应变成明显的双曲线关系,重加载再次剪切屈服时拟合效果也一致。

### 4 结论

(1) 摩尔-库伦为典型线性弹塑性模型,小应

变硬化模型及修正剑桥模型为非线性弹塑性模型。

(2) 采用修正剑桥模型对土体进行拟合,初期与土体应力-应变曲线拟合较好,随着应变增大,其硬化效果不显著,计算应变值比试验值大。

(3) 小应变硬化模型的模拟结果与试验所得粉质黏土应力-应变曲线一致,可用于粉质黏土的数值模拟和理论计算。

### 参考文献:

[1] 李军强.膨胀土地区滑坡整治[J].公路与汽运,2006(2):77-79.

[2] 赵园园,左人宇,陆钊,等.基坑数值分析中本构模型的对比应用[J].低温建筑技术,2015,37(8):102-105.

[3] 谢晓峰.修正剑桥模型在基坑开挖对周边环境评价数值模拟中的应用[J].广东土木与建筑,2015(3):25-28.

[4] 周宇,吴龙梁,赵明,等.基于小应变本构模型的桩锚桩撑组合支护深基坑三维数值分析[J].施工技术,2017(19):60-63+67.

[5] 梁发云,贾亚杰,丁钰津,等.上海地区软土HSS模型参数的试验研究[J].岩土工程学报,2016,39(2):269-278.

收稿日期:2019-10-18