

高陡地形泡沫混凝土轻质路堤承载特性分析

梅岭¹, 翟宇^{1*}, 王新泉², 刁红国²

(1. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212003; 2. 浙大城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015)

摘要:以贵州省铜仁市 G354 石阡香树园至河坝公路改扩建工程中采用泡沫混凝土换填路堤为实例,运用 Midas/GTS 软件对高陡地形泡沫混凝土路堤置换全过程进行数值分析,对置换过程中路堤的应力应变特性及不同设计方案工后沉降进行研究。结果表明:使用泡沫混凝土进行高陡地形路堤置换对控制路堤工后沉降的效果显著,能有效防止地基表面及路面不均匀沉降的发生。

关键词:高陡地形; 泡沫混凝土; 路堤置换; 数值模拟; 沉降

泡沫混凝土是气泡混合轻质土的一种,是由发泡剂通过机械发泡的方式与水泥胶凝材料、水、减水剂等按照一定比例充分均匀混合后经自然养护形成的一种多孔轻质材料。其具有低自重、高强度、自流平、荷载分散、抗冻融等优点^[1-3],在工程应用中的前景非常广泛。Kim^[4]通过对位于 Kyoungsangnamdo 的二级双车道公路扩宽工程中使用气泡轻质土的路段进行现场监测并进行反演分析,估算了该软土路段 120 个月的工后沉降仅为 4.5 cm,远小于 10 cm 允许沉降量;She^[5]等通过现场试验研究了泡沫混凝土在软土地区高速铁路基中的应用,试验表明:采用泡沫混凝土作为路基填充材料时,具有良好的减荷效果;Kadela^[6]等对不同密度(500~1 300 kg/m³)泡沫混凝土的物理性能进行了研究,并通过数值模拟发现干密度为 860~1 060 kg/m³ 泡沫混凝土有作为路面基层的可行性;Tan^[7]等利用泡沫混凝土和 U 形钢作为复合材料,用于煤矿巷道支护有效控制了巷道挖掘过程中的软岩大变形;陈永辉^[8]以浙江申嘉湖杭高速公路为实例,通过数值模拟分析了不同泡沫混凝土路堤置换形式的沉降效果,发现使用“凸”字形置换形式更有利于路堤沉降控制。

目前中国泡沫混凝土在道路建设工程中的应用主要集中在东南部软土平原地区,在中国中西部高陡地形的山区应用尚处于空白阶段,该文结合贵州省铜仁市 G354 石阡香树园至河坝公路改扩建工程中泡沫混凝土的实际应用,运用 Midas /GTS NX^[9] 有限元软

件,对泡沫混凝土高陡路堤承载特性进行研究。

1 工程概况

G354 石阡香树园至河坝公路改扩建工程设计标准为二级公路,K70+405~K70+455 段宽 12.5 m,属于非过境段,位于山脚沟谷区域,为高填方路基,路基中心填高约 18 m,右侧最大坡高约 21 m,分两级填筑,级间设置 2 m 宽平台。原填方路堤已填筑完一段时间,因为原路段地形陡峭且坡脚右下角存在软弱地层,施工机械无法进行碾压夯实作业,路堤于 2018 年 9 月 3 日产生开裂,项目部随即组织工作人员布点位移观测并进行卸载临时处理。

根据钻孔芯样,填方坡脚区存在 5 m 左右的耕植土层,含水率较大,工程特性差,不利于高填方路堤稳定;上游区域原地表下方存在 4 m 左右的含碎石土坡积层,随后进入全、强风化泥灰岩,整体地质尚可。各土层物理及力学参数见表 1。

经分析,原填土路堤发生开裂滑移主要有以下几个方面的原因:

(1) 地层变异较大,厚度不均,呈斜坡地层,易发生滑移。

(2) 路基位于山脚处的沟谷区域,上游山体雨水多汇聚于此,基底耕植土+全风化层达到 10 m,具有高含水量、软塑、吸水易饱和的特点,初步设计未揭示

收稿日期:2020-07-27

基金项目:浙江省教育厅科研项目(编号:Y201941345)

作者简介:梅岭,男,博士,副教授。E-mail:miling530@163.com

* 通信作者:翟宇,男,硕士研究生。E-mail:zhaiyu912@163.com

表 1 各土层参数

土(岩)层	c / kPa	φ / ($^{\circ}$)	弹性模量/ MPa	初始 孔隙比	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	本构关系
泡沫混凝土	356	5	287	0.5	7	M-C
原状素填土	15	28	25	0.4	19	M-C
碎石土坡积层	13	21	25	0.6	18	M-C
耕植土	10	18	5	1.0	18	M-C
全风化泥灰岩	10	23	30	0.6	20	M-C
强风化泥灰岩	28	20	400	0.4	21	M-C
中风化泥灰岩	50	30	1 000	0.3	22	M-C

该典型地质且未提出相应的处治方案。

(3) 最大填高 21 m,路堤荷载较大,施工机械在作业时,不进行地基处理,承载力不足以支撑上部荷载,从而滑移。

现状路堤不稳定区域主要发生在路基右侧的填方边坡区域,根据该路段的地质情况,从路堤减载及坡脚支挡两个角度分别提出了两种可行方案进行比选(图 1)。

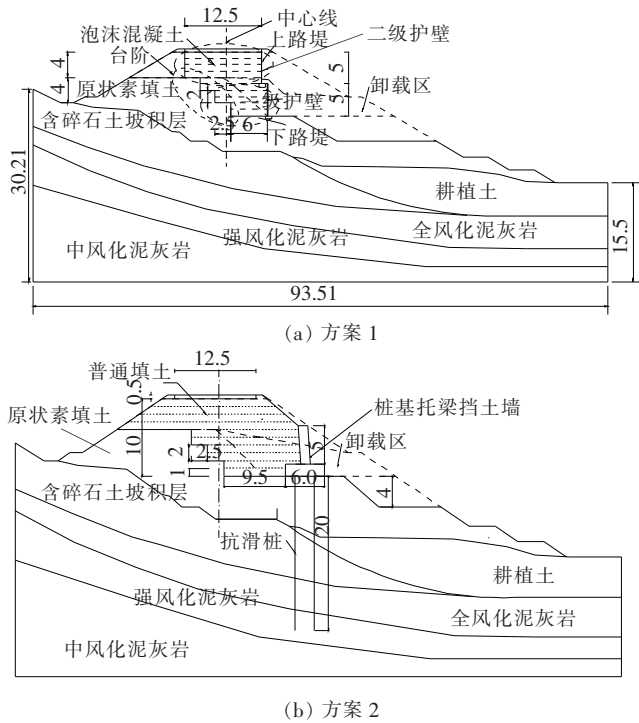


图 1 K70+430 典型断面设计图(单位:m)

方案 1:在现有临时卸载的基础上,采用轻质泡沫混凝土部分换填原路堤填土,路堤分上下两级各 5 m 高,右侧配合设置两级 6 cm 厚板体护壁[图 1(a)]。

方案 2:在现有临时卸载的基础上,采用挡墙支挡,缩短放坡距离,并进一步卸载,降低现状滑塌范围内的填方荷载,同时为保证挡墙及填方路基的稳定,在挡墙

下方设桩基础,即桩基托梁挡土墙的方式保证支护结构承载力要求,增加路堤的抗滑移稳定性[图 1(b)]。

虽然方案 1 需要额外的泡沫混凝土施工班组,但施工速度快、工期短,总体造价估算约 252.4 万元;相比之下方案 2 桩数较多、工期长,桩基不仅承受竖向荷载同时还要抵抗水平推力,对桩基要求较高,造价约为 403.8 万元,远高于方案 1,所以该工程最终采用设计方案 1 进行施工,具体设计情况如图 2 所示。

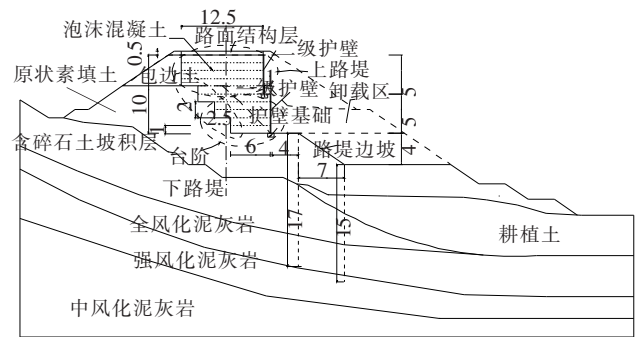


图 2 泡沫混凝土换填方案设计详图(单位:m)

2 模型建立

建立有限元模型前作如下基本假定:

(1) 路堤修筑长度远大于宽度,因此将路堤填筑简化成平面应变问题,方便模型的建立与计算分析。

(2) 地基土和路堤均视为各向同性的理想弹塑性材料。

(3) 地基土、泡沫混凝土和路面结构层之间完全连续接触,土层间竖向位移完全耦合,没有相对滑动、脱离;满足变形协调条件。

(4) 采用普通土体的 Mohr-Coulomb 本构^[10]关系对泡沫混凝土材料进行模拟。

该文使用施工阶段模拟功能严格按照现场工况进

行固结分析,路堤断面网格划分如图 3 所示。现场泡沫混凝土实际浇筑为每层 0.5~0.8 m,为了方便分析,模型中取每层 1 m 进行浇筑,总计 10 层。

3 模拟结果应力分析

3.1 地基表面附加应力特点

为了更直观地反映泡沫混凝土施工过程中地基表面附加应力特征,将对应模型地基面 A~I(图 2,3)应力数据导出,通过折线图来分析路堤填筑过程中应力变化特点(图 4)。

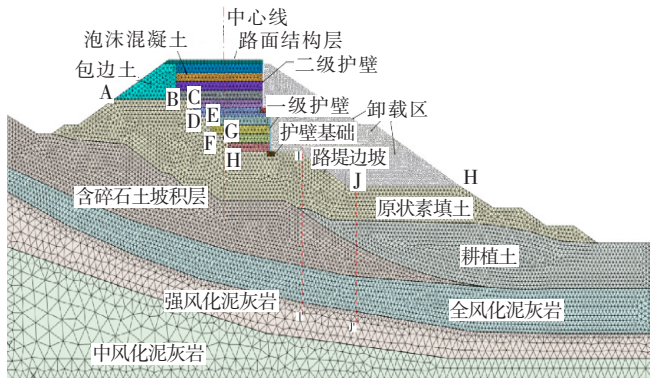


图 3 路堤断面网格划分示意图

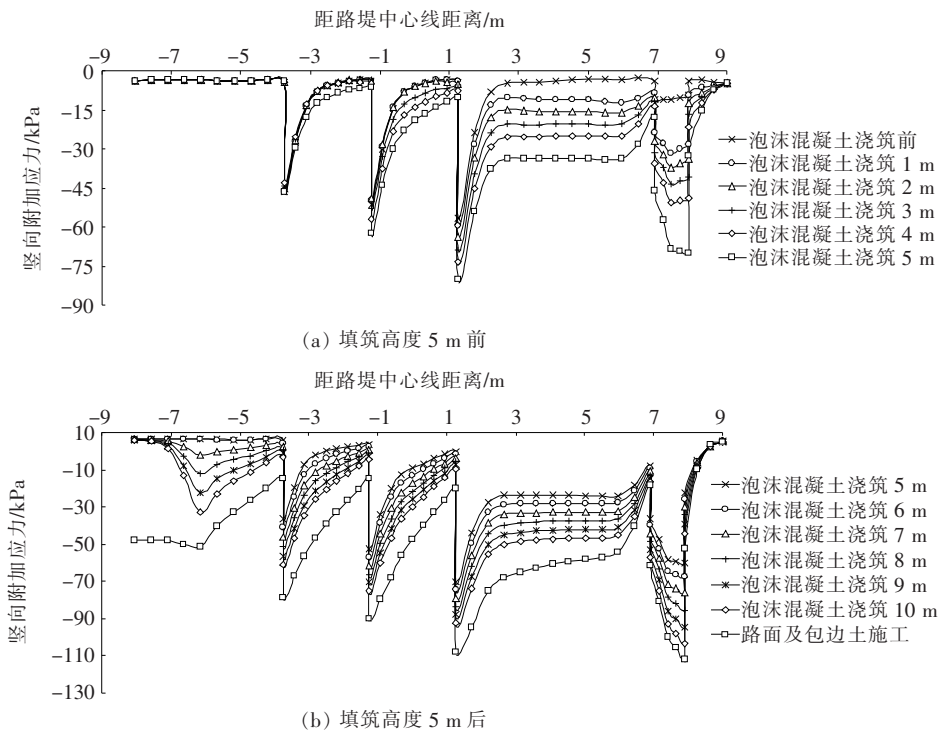


图 4 地基表面竖向附加应力曲线

由图 4(a)可知:泡沫混凝土填筑初期(填筑高度为 0~4 m 时),路堤重心偏右,且泡沫混凝土重度仅为 7 kN/m^3 ,约为普通填土的 $1/3$,所以路堤右幅基底附加应力增长缓慢,但在地基中间第二级台阶面(距离路基中心线左侧 $1.25 \sim 3.75 \text{ m}$ 处)的基底附加应力有先微小减小后缓慢增大的变化且在台阶面的角点处尤其明显,这是因为左侧基底上覆填土卸载后短时间内仍有回弹迹象,当泡沫混凝土浇筑层作用在台阶面时产生了明显的应力置换作用。

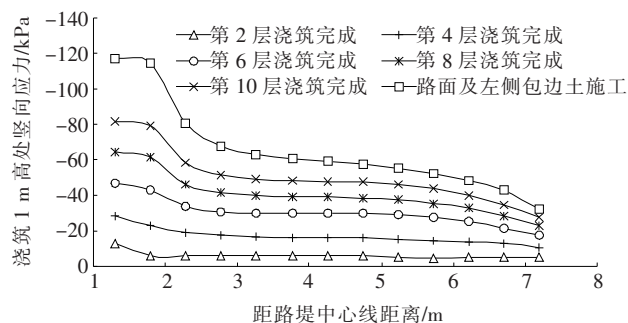
由图 4(b)可知:随着泡沫混凝土浇筑高度的增加,路堤浇筑层重心逐渐向中心线转移,但地基中间台阶面的附加应力增加并不明显,反而左右两侧的地基

表面应力增量明显大于中间台阶面,这主要是因为泡沫混凝土的板体特性表现出了一定的“架越作用”,导致左右两侧的地基台阶面应力增长明显。最后当路面结构层及左侧包边土施工完成后,地基表面附加应力增量较泡沫混凝土填筑期间增长了 3~4 倍,但是路堤护壁基础底部的应力并没有大幅增长,一方面说明泡沫混凝土板体分担了较大部分的应力传递;另一方面,路堤分级浇筑的方式使作用在下路堤右角点的荷载产生偏心作用,避免了路堤右下角点产生过大的应力集中现象。

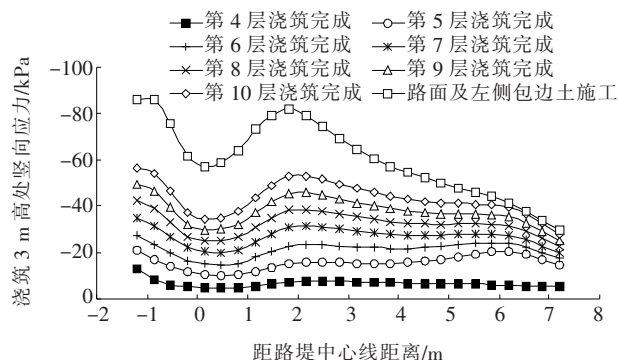
3.2 泡沫混凝土浇筑层间应力特征

施工路段地形陡峭、地层复杂,其中 1~2 浇筑层

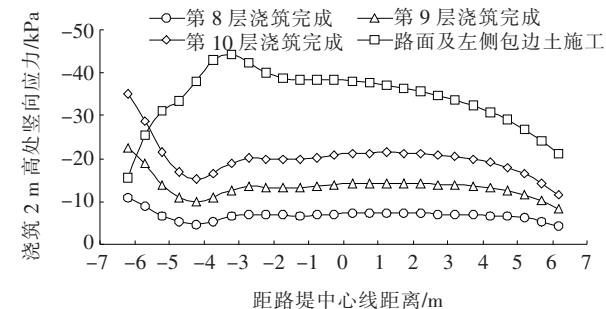
位于台阶下方,3~6浇筑层均与台阶搭接,7~10浇筑层则位于台阶上方,在施工过程中各部分泡沫混凝土浇筑层间应力变化各有差异,因此有必要研究泡沫混凝土施工过程中层间应力的变化特征。分别选取填高1.0、3.0、7.0 m浇筑层为研究对象,并去除各层左右两侧边缘的应力集中点,绘制出应力变化曲线见图5。



(a) 浇筑层1~2层间(填高1.0 m处)竖向附加应力



(b) 浇筑层3~4层间(填高3.0 m处)竖向附加应力



(c) 浇筑层7~8层间(填高7.0 m处)竖向附加应力

图5 不同高度泡沫混凝土浇筑层间附加应力曲线

由图5可知:

(1) 第1层泡沫混凝土浇筑层顶面(高1.0 m处)位于路堤右侧,随着浇筑高度的增加其层间应力分布整体呈中间平稳左高右低的“半马鞍”形分布。随着浇筑高度的增加,荷载重心左移,左侧附加应力增长较为明显;而中间部位由于底层泡沫混凝土的板体良好地分担了上覆荷载,所以中间2~6.75 m的竖向应力整

体仍然呈均匀分布的态势。

(2) 第3~4层泡沫混凝土(填高3.0 m处)与中间地台阶部分搭接,因为两者刚度差异使得其层间应力分布与第1浇筑层大相径庭。由图5(b)可知:随着路堤填高增加,台阶处(距离路基中心线-1.25~1.25 m)因泡沫混凝土板体的“架桥作用”和上部荷载的重心左移,其层间附加应力分布曲线类似于刚性基础在集中力作用下的分布特点,呈现内外角点大、中间小的“马鞍形”分布。

(3) 台阶上方的浇筑层7~8之间的层间应力在路面结构层和左侧包边土施工完成后左侧发生了较大的突变。由图5(c)可知:在路堤浇筑时期,距路基中心线左侧6.25~3.25 m覆泡沫混凝土浇筑层仅有1 m厚,因此该范围内附加应力表现出先大幅减小再小幅增加的“勺形”分布特点。而右侧下覆泡沫混凝土层相对较厚,应力分布较为均匀。但是当路面结构层和左侧包边土重度远大于泡沫混凝土时,使得浇筑层7左角点下方的土体产生了一定的塑性应变从而发生了应力重分布,所以填高7.0 m处的左侧角点应力会发生骤降,这也解释了为何当路面结构层和左侧包边土施工完成后泡沫混凝土浇筑层在左侧台阶面位置(距路基中心线6.25~3.25 m处)的架越作用消失。

4 模拟结果位移分析

4.1 地基竖向位移特征

路堤施工及工后地基表面竖向位移变化见图6。

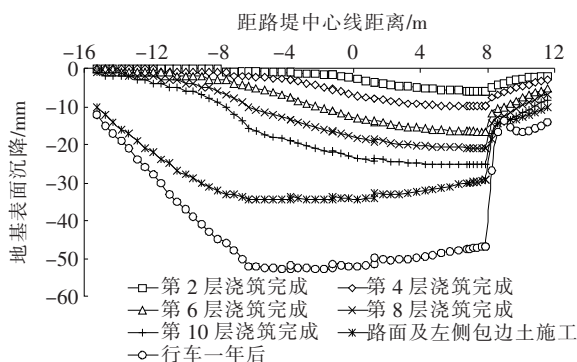


图6 路堤施工及工后地基表面竖向位移变化曲线

由图6可知:路堤底部范围内(距路基中心线-7~7.9 m)的沉降变化较为均匀,且相邻台阶面并没有产生不均匀沉降,说明填筑过程中路堤台阶部分稳定性良好。路面及包边土的施工对路堤重心偏右现象有一定的缓解作用。当填高达到6 m时,可以发现护壁基

础右侧 1 m 范围内不均匀沉降十分明显,说明此处土体已经产生了一定的塑性应变,而当路面通车后,护壁基础右侧 1 m 处沉降值不增反减,结合上文对地基表面应力的分析发现此处存在较大的应力集中现象,导致护壁基础右侧角点下方的土体产生了明显的剪切破坏,实际表现为拉裂现象。

路堤断面施工完成后竖向位移等值线图 7。

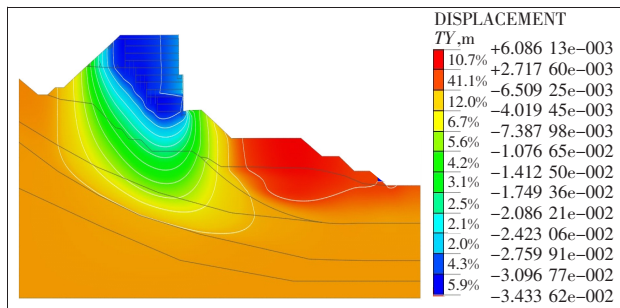


图 7 路堤断面施工完成后竖向位移等值线图

由图 7 可知:路堤右边坡脚右侧地基土产生了正向位移,这是因为坡脚下方耕植土呈软土特性,上游素填土和碎石土在压缩变形的过程中受到底部基岩的阻挠,向外膨胀,从而产生了对耕植土侧向的挤压。

路堤边坡坡脚右侧地基土表面竖向位移见图 8。

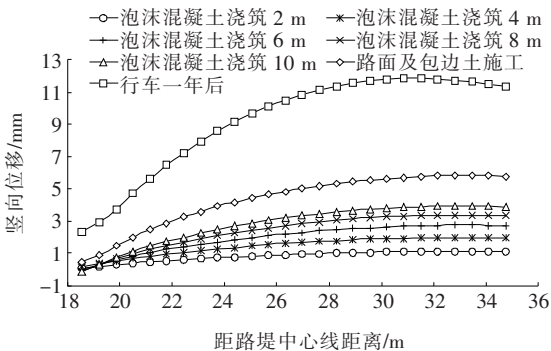


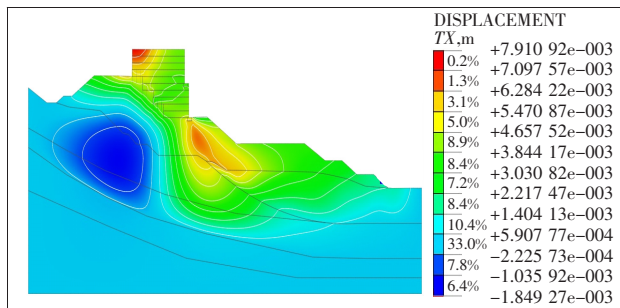
图 8 路堤边坡坡脚右侧地基土表面竖向位移

从图 8 可知:在路堤浇筑阶段,因为泡沫混凝土重度小,同时耕植土上方的原状素填土对路堤边坡坡脚右侧有一定反压护道的效果,对耕植土的上拱有一定的抑制作用,所以土体隆起并不明显;而当模拟行车 1 年后,坡脚右侧的地基土表面竖向位移增加了 3 倍,且沉降曲线呈先增大后缓慢减小再趋于稳定的分布,说明工后车辆荷载对路堤坡脚土体影响较大。

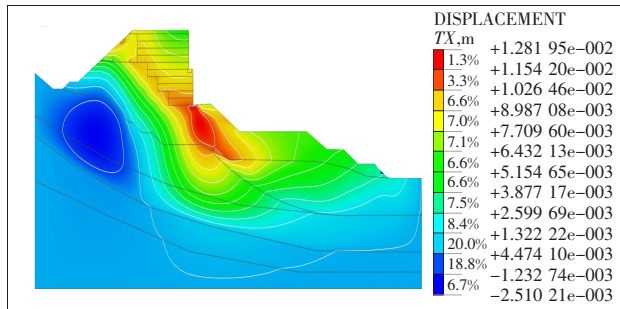
4.2 地基水平位移特征

整体看来,路堤浇筑期,地基土体水平位移沿路堤中心线呈相对膨胀的趋势分布,因为地基左侧碎石土层,土质情况良好,所以向内侧的扩张有限,而路堤右

下方土体处于下游且存在软弱土层,向外膨胀的趋势较明显;但因为泡沫混凝土重度小,此时左右两侧的侧向位移有限(图 9)。当路面结构层和左侧包边土施工后,路堤荷载骤增,地基内土体侧向位移分布与传统填土路堤有很大的差别,地基土向外膨胀的区域扩大至整个路堤正下方,并没有呈现沿路堤中心线向两侧膨胀的趋势,直至到达全风化泥灰岩层内时位移才停止发展,这说明泡沫混凝土换填路堤的整体性优越。



(a) 路堤浇筑完成



(b) 路面结构层和包边土施工完成

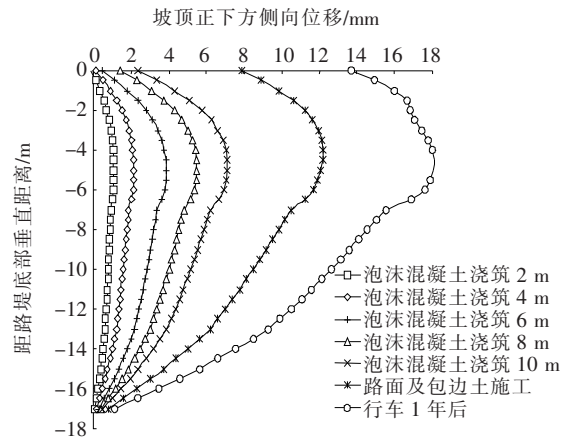
图 9 路堤断面施工过程水平位移等值线图

路堤边坡下方土体侧向位移如图 10 所示。

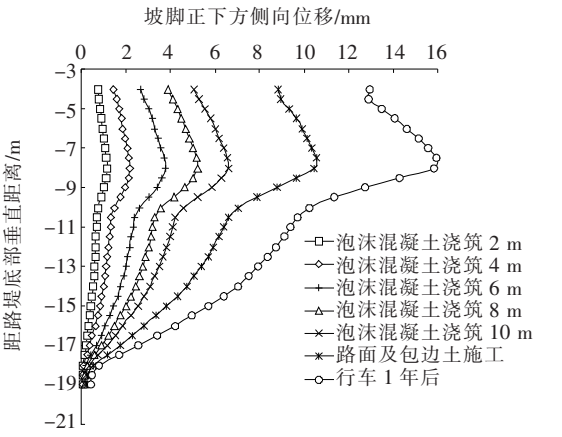
由图 10 可知:坡顶下方土体侧向位移整体呈“月牙形”分布,与路堤底部不同,最大侧向位移位置在地表下方 4~5 m 处;而坡脚下方的最大侧向位移位置则在下方 7~8 m 处,明显下移,虽然最大侧向位移值有所减小且不均匀但变形较为明显。

在路堤填筑时期,地基浅层水平位移变化很小,当填高达到 8 m 时,坡顶下方土体位移曲线在 2~6 m 深度范围内开始出现明显的弯曲,整体曲线慢慢呈“月牙形”分布,当填筑完成时最大位移仅为 7 mm,而路面结构层和包边土的施工完成后下游路堤边坡土体侧向位移增加了近 4 倍。当模拟行车 1 年后,边坡下方地基土侧向位移继续发展,但增幅明显减缓,同时可以发现坡脚下方 8~10 m 位置存在一定的位移突变,说明此深度处地基土体发生了剪切破坏,结合位移云图

不难发现,该位置处于原状素填土与耕植土交界面,耕植土无法承受上游传递的土压力,向外膨胀挤压,但同时受到上方覆盖的素填土阻挠,所以易在土层交界面处发生剪切破坏。



(a) 路堤边坡坡顶下方土体侧向位移(见图2中I-I'段)



(b) 路堤边坡坡脚下方土体侧向位移(见图2中J-J'段)

图 10 路堤边坡下方土体侧向位移

4.3 路堤侧向位移特征

路堤右侧水平位移如图 11 所示。

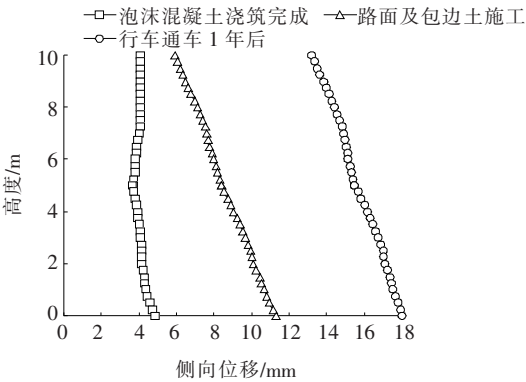


图 11 路堤右侧水平位移

由图 11 可知:路堤浇筑完成时,上下两级路堤整

体位移大致相等,稳定性良好,而当路面结构层及包边土施工后,左下方的地基土压缩明显,此时可以看到下路堤侧向位移增大了 2 倍多,而上路堤侧向位移仅增加了 2~4 mm,因为泡沫混凝土刚度、黏聚力远大于普通填土,整体性优越,结合图 9 不难发现,路堤侧向位移表现为从护壁基础底部随路堤整体小幅度左倾变化,位移曲线平缓,并没有发生局部的突变,说明路堤处于稳定状态。

5 不同设计方案工后沉降分析

两种方案下的地基工后沉降曲线对比见图 12。

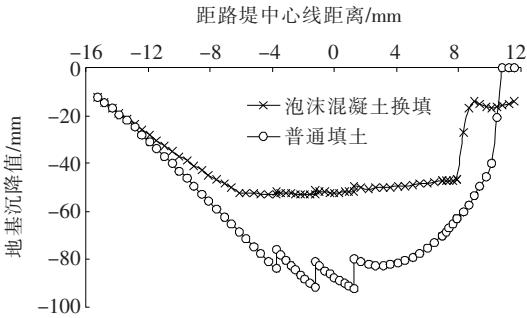


图 12 不同设计方案工后地基土表面竖向位移

由图 12 可以发现:普通填土路堤下地基表面沉降整体呈“凹形”分布,中心部分的沉降远大于泡沫混凝土路堤下的地基沉降,且最大沉降量几乎是泡沫混凝土换填方案的 2 倍。两种方案中地基沉降在两侧路肩处都快速增大,但普通填土方案沉降曲线斜率变化远大于泡沫混凝土换填方案,且可以发现相邻台阶面角点处存在明显的突变,不均匀沉降十分明显,极易造成路面的纵向开裂,而采用泡沫混凝土换填方案在相邻台阶面的沉降值几乎没有变化,在路面正下方处(-6.25~7.9 m)的地基沉降差仅为 5 mm,反观此范围内普通填土方案的地基最大沉降差值达到了 30 mm,是泡沫混凝土换填方案的 6 倍,说明泡沫混凝土对控制路堤变形有良好的协调性,这主要得益于泡沫混凝土重度仅为 7 kN/m³,是普通填土的 1/3~1/4,并且泡沫混凝土刚度远大于普通填土,浇筑时易于成型,能弥补高陡地形带来的负面影响,在上覆荷载的作用下表现出良好的“板体特性”,整体受力较均匀。

路堤顶面的工后沉降对道路运营阶段的安全性尤其重要,现将两种模拟填筑方案 1 年行车荷载作用后的工后沉降数据绘制成折线图作比较(图 13)。

由图 13 不难发现:尽管填高达到了 10 m,泡沫混

凝土换填的路堤顶面沉降曲线很平稳,整体沉降值为 49~53 mm,呈左低右高“渐进性”分布且最大沉降差值仅为 6 mm。而普通填土方案路堤顶面沉降呈明显的“马鞍形”分布,沉降值从左侧路肩向右迅速上升了 44% 后在道路中心线达到峰值,路堤右侧因为桩基托梁挡土墙的作用,沉降变化趋势减缓;普通填土方案的路堤顶面沉降差值最大达到 34 mm,远大于泡沫混凝土换填方案。泡沫混凝土换填路堤沉降主要是因为地基土的压缩引起的,换填路堤本身的沉降值几乎可以忽略不计;而填土路堤方案路堤顶面和底面沉降值相差很大,堤身的沉降值为 10~20 mm 不等,说明普通填土本身因为填筑高度过高,自身产生了较大的沉降,不利于路堤的整体稳定。

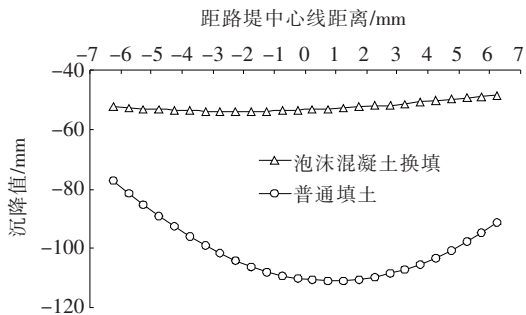


图 13 不同方案路堤顶面工后沉降曲线

泡沫混凝土换填路堤在整体性上有普通填土材料无法企及的优势,能有效避免高陡地形路堤发生局部剪切滑移;因为其刚度大、板体特性明显,对上部荷载的承担与传递较为均匀,在控制路面不均匀沉降方面有很强的协调性。

6 结论

(1) 泡沫混凝土换填路堤具有优越的整体性,其轻质高强的特性避免了施工过程中因为填方体高度分布不均而导致局部应力过大产生路堤倾覆失稳;但路面结构层和包边土的施工容易造成台阶角点处和护壁基础底部的应力集中现象,因此在实际施工过程中应先对台阶面和护壁基础位置的地基土层做 C15 细石混凝土硬化处理,以减小应力集中引起地基土塑性区的发展。

(2) 路堤上下分级的设计方式产生的偏心作用可以将右侧部分荷载通过二级护壁基础传递到下路堤泡沫混凝土浇筑层,缓解路堤右角点下方土体的应力集中现象,提高路堤浇筑过程中的整体稳定性。

(3) 地基土体的侧向变形更大程度受地形及地基土层分布的影响,泡沫混凝土在浇筑过程中对地基内部土体位移的影响很小。

(4) 坡脚右侧的原素填土对下覆耕植土层的反压作用有助于限制其正向位移,因此可以适当增加该范围内的上覆填土高度,对坡脚进行反压。

(5) 尽管高陡地形路堤填方高度达到 10 m,但泡沫混凝土路堤自身沉降极小,相比于传统填土方案能有效控制陡坡台阶面的工后不均匀沉降。

参考文献:

- [1] T. Tian, Y. Yan, Z. Hu, et al. Utilization of Original Phosphogypsum for the Preparation of Foam Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 115(4): 143—152.
- [2] Yu Song, David A Lange. Crushing Behavior and Crushing Strengths of Low-Density Foam Concrete [J]. ACI Materials Journal, 2020, 117(2): 43—52.
- [3] Raj A, Sathyan D, Mini K M. Physical and Functional Characteristics of Foam Concrete: A Review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 221(6): 787—799.
- [4] Kim, T, H, et al. Performance Evaluation of Road Embankment Constructed Using Lightweight Soils on an Unimproved Soft Soil Layer [J]. Engineering Geology Amsterdam, 2013, 160(3): 34—43.
- [5] She, Wei, Du, et al. Influence of Coarse Fly Ash on the Performance of Foam Concrete and its Application in High-Speed Railway Roadbeds [J]. Construction & Building Materials, 2018, 170(2): 153—166.
- [6] Kadela M, Marcin Kozłowski, Alfred Kukieltka. Application of Foamed Concrete in Road Pavement—Weak Soil System [J]. Procedia Engineering, 2017, 193(6): 439—446.
- [7] Tan X, Chen W, Liu H, et al. A Combined Supporting System Based on Foamed Concrete and U-Shaped Steel for Underground Coal Mine Roadways Undergoing Large Deformations [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, 68(1): 196—210.
- [8] 陈永辉, 章亦锋. 泡沫混凝土路堤置换形式数值分析 [J]. 公路, 2014, 59(7): 78—83.
- [9] 中国建筑书店. Midas/GTS 在岩土工程中应用 [J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2 413.
- [10] 苏步云. 泡沫混凝土力学性能及其弹塑性损伤本构研究 [D]. 太原理工大学博士学位论文, 2017.