

不良地质下高液限黏土路基改扩建粉喷桩 处治数值分析*

廖造成¹, 黄博², 陈佳², 谢继登³

(1.湖南省莲株高速公路建设开发有限公司, 湖南 株洲 412000; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

3.保利长大工程有限公司, 广东 广州 510000)

摘要:为研究软土地基上含圆管涵高液限黏土路基改扩建差异沉降,通过室内试验及改良试验,分析高液限黏土作为路基填料的工程特性,确定路基结构,并利用 ABAQUS 软件建立软土地基上设置涵洞的高液限黏土路基改扩建模型,探究粉喷桩处理后不同填土加载高度下填土应力及路基沉降变化情况。结果表明,40%碎石改良高液限黏土满足路床(96区)填筑要求;随着填土加载高度的增加,周围土体会对涵洞产生应力集中,涵洞对路基有应力分散的作用;新路基的填筑会导致老路基的附加沉降;经过粉喷桩处理后,新老路基差异沉降为 2.7 cm,软土地基处置恰当。

关键词:公路;高液限黏土;路基改扩建;粉喷桩;软土地基

中图分类号:U 416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2021)02-0070-04

道路改扩建工程在自重荷载和行车荷载作用下很容易产生新老路基沉降差,若沉降差过大,新老路基相接位置的路面会产生裂缝、破损等现象。在高液限黏土地基上进行道路改扩建,新老路基差异沉降处治尤为重要。何颖通过红黏土物理性能试验,得出压实度及承载比(CBR)是评价高液限黏土路基施工质量的两个重要指标,并根据现场实际沉降模拟预测了未来路基沉降变化规律。戴良军等探讨了高液限黏土用作路堤填料的可行性,通过不同掺砂量高液限黏土填料试验,提出施工含水率应介于天然含水率与最佳含水率之间。张军辉利用加筋路堤离心模型试验模拟改扩建工程,对软弱地基提出处理建议。孟学清提出了加大新旧路基之间拼接设计、增强新老路基的协调性、加强加宽部分地基处理等处治措施。欧彩云通过对粉喷桩处理软土路基机理的分析,得出采用粉喷桩处理软土路基可减轻或避免路基在施工中及工后的横向不均匀沉降。赵建通过对粉喷桩加固软土地基方案的有限元分析,得出粉喷桩体的应力分布和复合沉降变形规律。章海明对软土路基沉降量及差异沉降进行有限元分析,得出增设粉喷桩群可控制路基的差异沉降。该文以某高速公路加宽改造为背景,利用 ABAQUS 软件对高液限黏土路堤填筑和软弱地基处治进行研究,

分析粉喷桩处治后各级填筑加载高度下填土应力及路基沉降。

1 高液限黏土的工程特性及改良

1.1 高液限黏土的工程特性

某高速公路沿线以红黏土及次生红黏土分布最广,属于软土地区。该高液限红黏土粒径小,粒径在 10 mm 以上的(含 10 mm)通过百分率为 100%,粒径 0.075 mm 的通过百分率为 86.06%。黏聚力决定高液限黏土的强度,它在含水率很低的情况下易被压碎,在含水率高的情况下土体抗剪强度很小,整体稳定性差。高液限黏土的物理力学性质见表 1。

表 1 土的物理力学性质指标

项目	试验结果	项目	试验结果
液限/%	53.9	天然含水量/%	30.10
塑限/%	24.5	最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.74
塑性指数	29.40	最佳含水率/%	19.40

高液限黏土在含水率低的情况下其干密度对击实功较敏感,在含水率高的情况下其干密度受击实功的影响较小。因此,在施工压实度能达到标准的前提下,高液限黏土适宜在偏湿的状态下进行碾压,以减少不必要的碾压次数,提高工作效率。该高液

* 基金项目:湖南省交通运输厅科技计划项目(201707);广西壮族自治区玉林市科学研究与技术开发计划项目(玉市科 201925002;玉市科 201925003)

限黏土含水率在最佳含水率~最佳含水率+5%时, CBR 值均在 4.3 以上,能满足上下路堤的要求,并且适当的碾压同样能达到理想的压实度。高液限黏土仅限于上、下路堤填筑使用,工程中对公路路基填料最小强度要求见表 2。

表 2 高速公路高液限土路基填筑最小强度、压实度和最大粒径要求

层位	路面底面以下深度/cm	填料最小强度 CBR/%	压实度/%	填料最大粒径/cm
上路堤	80~150	4	94	15
下路堤	150 以下	3	93	15

在用高液限红黏土作为路基填土时必须严格控制填筑碾压时的含水率,碾压前进行翻土晾晒,确保含水率在保证路基强度与稳定性的范围内。

1.2 高液限黏土的改良

高液限黏土不能直接用于路床填筑。该高速公路改扩建时,为充分利用高液限黏土,对高液限红黏土掺碎石进行改良,改良效果见图 1。

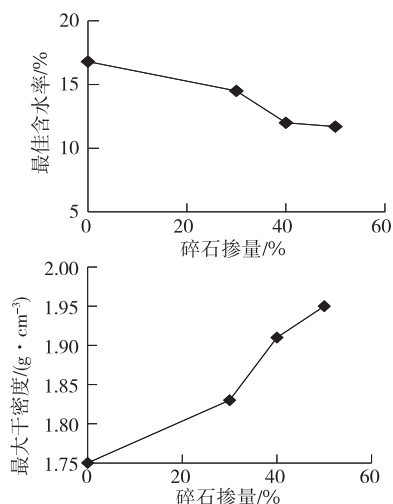


图 1 掺碎石高液限黏土重型击实试验结果

由图 1 可知:掺入碎石后,碎石粗颗粒在高液限黏土土体中形成骨架,土体填充在其中,密实度增加,干密度增大。掺碎石量过少时,碎石无法充当骨架作用;掺碎石量为 40% 时,压实度迅速上升,干密度迅速增大;掺碎石量为 50% 时,压实度上升趋势变缓。从工程安全性和经济性出发,掺 40% 碎石对高液限黏土进行改良处理,满足路基设计规范的要求(压实度不小于 96%, CBR 值不小于 8%, 裂缝宽度不超过 5 mm)。

综上,高液限黏土只要满足规范要求就能用于上路堤(94 区)和下路堤(93 区)填筑;而路床(96

区)填筑如需利用高液限黏土,则需掺 40% 碎石。

2 有限元模型建立

2.1 路基结构

该高速公路宽度为 27 m,设计行驶速度为 100 km/h,路面材料为沥青砼,原为双向四车道,现因交通量需求改为双向六车道。路基拓宽方式为双侧拓宽,两侧各拓宽 7.5 m,路基高度 9 m。地基分两层,第一层为 11.5 m 深软弱土,第二层为 8 m 深粉质黏土。新路基分为 3 层,93、94 区(0.7 m)为低液限黏土,96 区(0.8 m)为高液限黏土+40% 碎石。软土地基上设置圆管涵,圆管涵洞外径 1.5 m,壁厚 0.1 m,涵顶填土高度 8 m。软土进行桩处理,桩体直径 0.5 m,长度 11.5 m,间距 1.0 m(见图 2)。

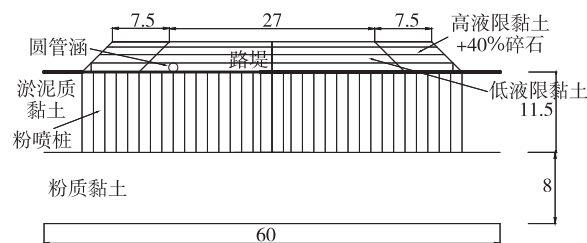


图 2 有限元计算模型几何尺寸(单位:m)

2.2 计算区域与边界条件

使用 ABAQUS 建立路基三维有限元分析模型,路基区域以外取 2 倍路基宽度,即 $21 \text{ m} \times 2 = 42 \text{ m}$ 。路基内部设置涵管,外径 1.5 m,壁厚 0.1 m。为模拟涵管对路基的影响,路基沿线路方向取 3 倍涵管外径厚度,即 $1.5 \text{ m} \times 3 = 4.5 \text{ m}$ 。粉喷桩直径为 0.5 m,长度为 11.5 m,间距为 1.0 m,桩体网格单元使用八节点线性六面体单元(C3D8)。

2.3 网格划分

以路堤中心与水平地面为原点,取结构一半为研究对象。侧面约束水平向位移,地面约束竖向位移。网格单元使用八节点线性六面体单元(C3D8),映射网格划分(见图 3)。

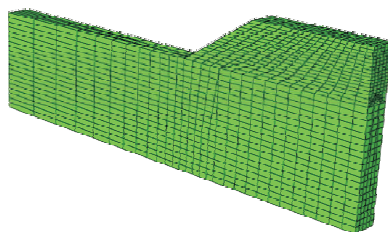


图 3 路基拓宽三维网格划分

2.4 材料属性

路基填料及地基土都使用 Mohr-Coulomb 模型、非关联流动法则,桩及圆管涵选用理想线弹性模型,模型参数见表 3。地基土固结过程使用 ABAQUS 提供的流体渗透/应力耦合模块进行模拟,回弹模

量、黏聚力和内摩擦角由土工试验和地质勘察报告确定,泊松比按规范选取。

3 数值模拟结果分析

在开挖台阶的基础上对软土进行粉喷桩处治,

表 3 软土地基改扩建模型参数

土层类型	容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	回弹模量/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	泊松比
老路基	20.0	30.0	35.0	35	0.25
粉质黏土	18.9	16.0	19.0	26	0.32
软土	16.9	8.0	8.5	15	0.17
低液限黏土	19.5	22.6	25.0	33	0.27
高液限黏土+40%碎石	19.8	25.0	27.0	34	0.28
粉喷桩	25.0	120.0	—	—	0.30
圆管涵	25.0	120.0	—	—	0.30

对模拟对象进行加载,填土加载高度分别为 1.6、3.2、4.2、5.2、6.2、7.2、8.2、9 m,模拟加载过程中软土

地基上圆管涵的应力变化。图 4 为各级加载高度下竖向应力云图。

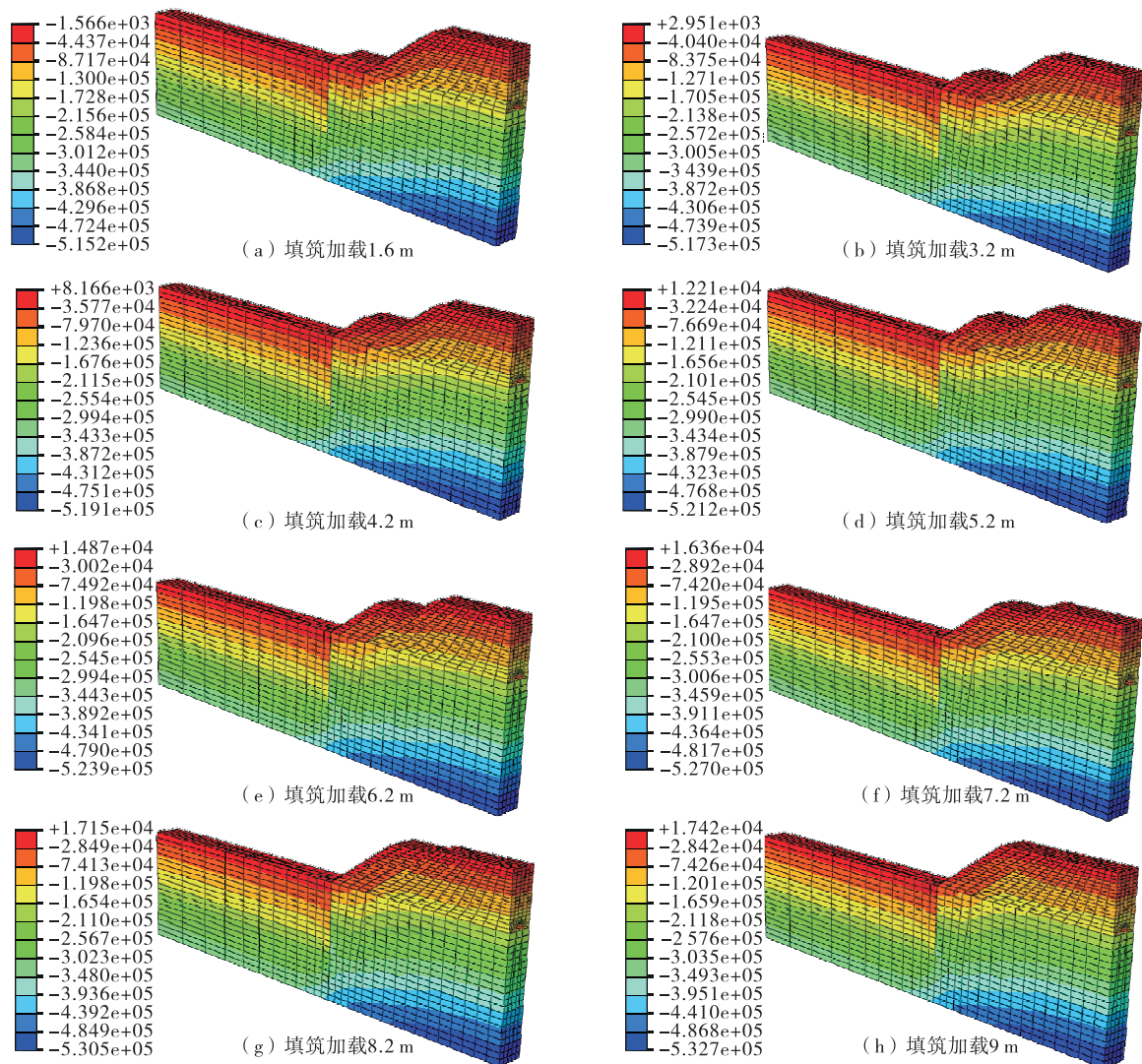


图 4 各级加载高度下竖向应力云图(单位:N)

由图4可知:加载到1.6 m时,填土顶端区域数值为负,说明填土受到由于自重引起的压应力;加载到3.2 m时,填土顶端区域数值变成正,说明填土顶端受到拉应力。加载高度为1.6 m时,由于加载高度小,填土顶端区域受到压应力;加载高度为3.2~9 m时,填土顶端拉应力变化很大,涵洞附近应力值变化很大,说明周围土体对圆管涵产生应力集中;新老路堤的压应力变小,且变化缓慢,涵洞对周围土体有应力消散的作用。随着填土高度的增加,最大沉降发生在涵顶的路基区域,而且沉降随高度增加而增加,老路堤地基固结已基本完成,相对于新路堤地基沉降小很多。填土高度增加时,填料对老路堤边坡产生的附加应力越来越大,使老路堤产生附加沉降,形成离路中心越远则沉降越大的趋势。

如图5所示,经粉喷桩处理后,路基顶部沉降从路基中线至拓宽路基路肩处逐渐增大,且随着加载高度增加,拓宽路基部分沉降增加幅度增大。这是因为随着填料加载高度的增加,靠近新老路堤的地基产生的附加沉降增大,原有路基仅在拓宽路基边载作用下产生很小的竖向位移。总体来说,经粉喷桩处理后,路基沉降整体较小。加载高度为3.2 m时,由附加应力引起的附加沉降为5 mm;加载高度为4.2 m时,差异沉降为6 mm;加载高度为5.2 m时,差异沉降为7 mm;加载高度为9 m时,差异沉降达15.1 mm。随加载高度增加,路基差异沉降增大。加载高度为1.6、3.2、4.2、5.2、6.2、7.2、8.2、9 m时,对应路基最大沉降分别为2.7、5、7.2、9、11.8、15.2、18.5、22.3 mm。

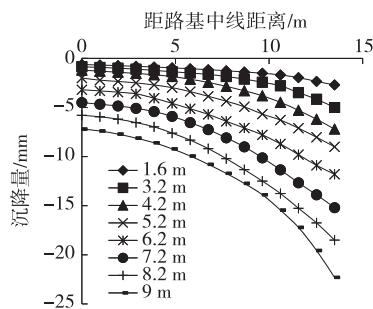


图5 不同加载高度下新路基沉降曲线

如图6和图7所示,随加载高度增加,地基最大沉降增加。填土高度为3.2 m时的差异沉降为 $2.0 - 0 = 2.0$ cm,4.2 m时的差异沉降为 $2.4 - 0.1 = 2.3$ cm,5.2 m时的差异沉降为 $2.8 - 0.2 = 2.6$ cm,6.2 m时的差异沉降为 $3.3 - 0.4 = 2.9$ cm。按此规律,每加载1 m,施工沉降为0.3 cm,加载到9 m时,新路

基已施工完毕,差异沉降为 $3.5 - 0.8 = 2.7$ cm,软土地基处理恰当,满足工程要求。

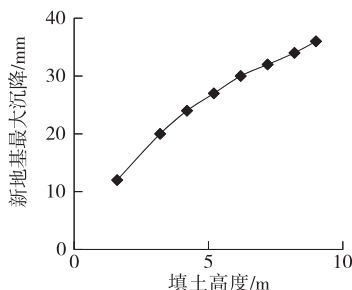


图6 不同加载高度下新地基最大沉降

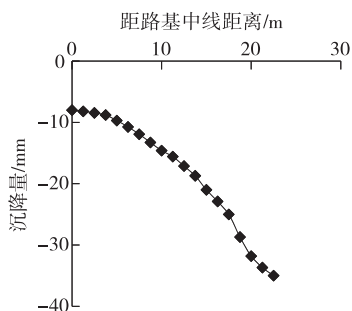


图7 不同加载高度下新路基最大沉降曲线

4 结论

(1) 高液限红黏土的最佳含水率为19.4%, CBR值在4.3以上,能满足上下路堤的填筑要求。在偏湿状态下进行碾压,可提高工作效率。

(2) 对高液限红黏土掺加40%碎石进行改良可满足路基填筑要求,填筑时应控制好含水率,必要时在碾压前进行翻土晾晒。

(3) 随填土高度增加,周围土体对涵洞产生应力集中,涵洞对路基有应力分散的作用;经过粉喷桩处理后,路基差异沉降为2.7 cm,软土地基处理恰当。

参考文献:

- [1] 何颖.高速公路红黏土路基沉降变形分析及施工控制研究[D].长沙:长沙理工大学,2013.
- [2] 戴良军,朱大勇.高液限土路基填筑技术研究[J].长安大学学报(自然科学版),2016,36(1):45-50.
- [3] 张军辉.软土地基上高速公路加宽变形特性及差异沉降控制标准研究[D].南京:东南大学,2006.
- [4] 孟学清.高速公路加宽改建路基差异沉降机理分析及控制措施[J].公路,2014(7):103-106.
- [5] 欧彩云.粉喷桩处理软土路基的现场试验研究[J].中国水运(下半月),2014,14(1):352-353.
- [6] 赵健.用粉喷桩复合地基加固软土方案的有限元分析

(下转第77页)

通过两方案对比分析,方案二即清方减载方案的造价节省,施工快速,实施后已经过两个雨季考验。图8为施工完成后边坡。



图8 施工完成后边坡

5 结论

(1) 滑坡是一种地质现象,是内外地质作用下斜坡演化过程中变形破坏的产物。地质过程机制分析就是分析斜坡变形、破坏基本规律,研究滑坡形成的基本地质力学模式,通过追溯斜坡演化全过程,对斜坡稳定性发展趋势作出评价和预测。机理分析是定量计算的基本前提,切忌脱离实际盲目计算。

(2) 河谷斜坡变形破坏的基本地质力学模式为“弯曲—倾倒—拉裂”,滑坡成因是斜坡岩体向河谷方向弯曲、倾倒、拉裂而产生的岩质滑坡,滑坡形成后堆积于古河床卵石层上。路堑边坡开挖产生主裂缝,是古滑坡整体复活的迹象,但前缘未产生挤压剪出裂缝,处于蠕动挤压阶段,综合判断目前滑坡处于欠稳~基本稳定状态。

(3) 古滑坡下覆卵石层为滑坡天然排水廊道,有助于滑坡长期稳定。采用工程地质比拟法,可采用滑动面以上残留土体被动土压力作为支挡设计的依据。通过比拟自然稳定滑坡的坡形、坡率,采取造

价节省的清方减载方案进行处置,并取得了成功。

(4) 当前仍是山区公路建设高潮,公路工程由于建设周期短、地质复杂多变,加上前期地质勘探工作不足,施工、运营过程中边坡滑坡稳定问题较突出。工程地质比拟法是一种可在短时间内摸清山体基本地质情况从中找出设计所需参数,并指导设计的一种捷径,特别在应急抢险时其优势明显,运用恰当可起到事半功倍的效果。

参考文献:

- [1] 黄润秋.中国西南岩石高边坡的主要特征及演化[J].地球科学进展,2005,20(3):292-297.
- [2] 黄润秋.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):434-453.
- [2] 成永刚.藏区高速公路高位堆积体病害分析与防治[J].水利与建筑工程学报,2018(5):18-22.
- [4] 王兰生,张倬元.斜坡岩体变形破坏的基本地质力学模式[C]//水文工程地质论丛.北京:地质出版社,1983.
- [5] 徐邦栋.高壑坡设计及病害分析与防治[M].北京:中国铁道出版社,2011:137-139.
- [6] 徐邦栋.滑坡分析与防治[M].北京:中国铁道出版社,2001.
- [7] 王恭先,成永刚.滑坡的识别监测与避灾防治[M].北京:地质出版社,2019.
- [8] 张倬元,王仕天,王兰生,等.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1981.
- [9] 李海光.新型支挡结构设计与工程实例[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [10] 徐邦栋,马骥.确定滑坡推力的工程地质比拟法[J].水文地质与工程地质,1979(1):18-23.

收稿日期:2020-07-09

(上接第73页)

- [J].路基工程,2009(2):7-8.
- [7] 章海明.高速公路软土路基沉降及处治数值分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):211-215.
- [8] 段凯.高液限黏土的工程性质及其填筑技术研究[D].长沙:湖南大学,2013.
- [9] 李方华.高液限土填料改良的最佳掺砂砾石比试验研究[J].岩土力学,2010,31(3):785-788.
- [10] 谭继标.粉喷桩加固公路软土路基施工技术及其质量控制[J].科技风,2019(9):115.
- [11] 郭绍良.高速公路高液限黏土路基改良及施工技术探讨[J].华东公路,2016(1):77-78.

- [12] 罗斌,赵雄.碎石改良高液限红黏土的试验研究[J].公路工程,2009,34(2):131-134.
- [13] 刘观仕,孔令伟,李雄威,等.高速公路软土路基拓宽粉喷桩处治方案分析与验证[J].岩石力学与工程学报,2008,27(2):309-315.
- [14] 蒋鑫,蒋怡,梁雪娇,等.软土地基高速公路路基拓宽改建全过程变形特性数值模拟[J].铁道科学与工程学报,2015,12(5):1039-1046.
- [15] 杨红菊,朱志铎.高速公路拓宽工程中的软土地基处理[J].路基工程,2008(5):183-184.

收稿日期:2020-04-29