

文章编号:1671-6833(2009)03-0039-05

平坦地基上山区高填方路堤变形及稳定性分析

陈涛^{1,2}, 郭院成¹, 谢春庆³

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国人民解放军空军 94353 部队, 河南 商丘 476100;
3. 成都军区空军勘察设计院, 四川 成都 610004)

摘 要: 山区地形地貌多变, 地基条件复杂, 高填方路堤的不均匀变形和失稳破坏时有发生. 针对山区高路堤的基本特点, 利用有限元法分析了平坦地基上高填方路堤的工程特性及不同填方高度、软弱地基厚度、填筑速率、压实度下山区高路堤的弹塑性固结问题, 得出山区高路堤变形与破坏问题的规律. 利用此规律可以较为全面地认识山区高路堤的变形与破坏形态, 有效地指导实际施工.

关键词: 道路工程; 山区高填方路堤; 变形; 稳定性; 有限元法

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

0 引言

随着我国西部山区机场、公路、铁路等工程建设的迅速发展, 将不可避免地遇到大量的深挖高填地段, 如果处置不当, 高填方路堤将会出现诸多与变形及稳定性相关的工程病害, 如路面开裂、填方路堤滑塌失稳等^[1-4]. 可以说, 变形与稳定是山区高填方路堤修筑中首先遇到而且必须研究解决的两大基本问题^[5].

变形与稳定是相互关联的. 目前用于计算稳定性的极限平衡法及用于沉降计算的分层总和法难以将两者有机地结合起来. 而以有限元为代表的数值分析方法, 从材料的基本应力-应变关系入手, 可较全面地分析各种情况下、不同时刻路堤所处的变形与破坏状态, 它是寻求路堤变形破坏规律、合理加固处置位置、指导实际施工的良好手段^[4-7].

由于西部山区高填方路堤堤身较高, 原始地形变化较大, 影响路堤稳定的因素较为复杂, 并且路堤填料多为大粒径土石混合料(以石料为主), 这些特点构成了与平原地区路堤的显著区别^[5]. 笔者针对山区高路堤的上述基本特点, 利用有限元法分析了平坦地基上高填方路堤的工程特性及不同填方高度、软弱地基厚度、填筑速率、压实度下山区高路堤的弹塑性固结问题, 得出山区高路堤变形与破坏问题的规律, 以期对山区高填方地基的具体施工提供有效指导.

1 计算模型及参数

采用的计算模型为图1所示二维平面应变模型. 由于对称性, 对其左侧一半模型进行考虑. 路堤顶部宽度为30 m, 坡比1:1.5, 路堤每10 m高设一宽为2 m的馬道. 原地面地基分为二层, 按10 m厚度考虑, 且第一层软弱地基; 路堤填料按统一压实度考虑.

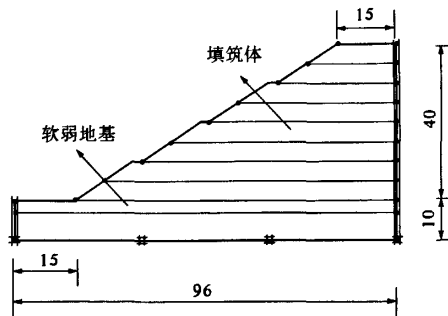


图1 山区平坦路堤的基本形态(单位:m)

Fig.1 Flat embankment in mountainous area(m)

根据山区路堤填料和地基土特性, 参照西部山区典型土性参数^[8], 计算分析时选取了表1所示的计算参数(表中百分数为压实度). 分析时假定岩土材料为各向同性的理想弹塑性体, 填筑体与地基之间完全连续接触, 忽略了上部路面及交通荷载的影响, 材料模型采用摩尔-库仑模型. 边界条件为左右两侧采用法向约束, 底边边界对其

收稿日期:2009-01-16; 修订日期:2009-03-27

作者简介:陈涛(1979-), 男, 河南信阳人, 郑州大学博士研究生, 主要从事机场、道路工程地基处理方面的研究.

水平与垂直方向进行约束,顶面与路堤坡面为自由面.计算分析运用非相关联流动法则,采用 15 节点的三角形单元进行网格剖分.初始应力场按地基自重应力考虑,并采用分步建造技术逐步激活路堤单元,以真实模拟路堤的分步填筑施工力学行为.稳定系数应用强度折减算法进行计算.

表 1 计算参数

Tab. 1 Calculation parameters

土类	容重/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透 系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	黏聚 力/ kPa	摩擦 角/ ($^{\circ}$)	杨氏 模量 /MPa	泊松比
软弱 土 1	18.5	0.002	18.0	25	8	0.30
地基 土 2	21	0.000 1	40.0	35	20	0.22
填料 (98%)	22	0.010	5.0	45	40	0.23
填料 (95%)	21.6	0.013	5.0	40	35	0.24
填料 (93%)	21.1	0.015	5.2	38	28	0.25
填料 (90%)	20.8	0.020	6.0	35	20	0.26

2 高填方路堤变形与稳定性有限元分析

2.1 填方高度为 40 m 时的变形及稳定性分析

对填方高度为 40 m 时的变形及稳定性进行分析,后述其它工况的分析与其类似.原地基厚度 10 m,第一层软弱地基厚度为 3 m,下部为基岩;填筑体压实度为 93%.地下水位在原地面下 1 m.填筑速率为 0.25 m/d,即 20 d 填筑 5 m,填筑施工分 8 个阶段,施工期为 300 d.每个阶段含 2 个填筑施工步骤,即先填筑 5 m(工期 20 d),然后进行 20 d 的施工间歇期,最后一个阶段填筑完毕后,进行 360 d 的工后固结期.

(1)路堤的竖向沉降变形特性

最终路堤的竖向沉降变形基本以路堤中心对称分布,大致在路堤中心下 2 m 处最大,沉降值为 99.48 cm,沿横断面方向,依次减小.路堤填筑过程中,路堤坡趾处发生了隆起现象,其最大值可达 4.5 cm.

选择路堤对称轴上与原地面交界处一特征点,图 2 为该点竖向变形与时间之间的关系曲线.可见,该点的竖向变形在路堤每个施工阶段填筑时发展较快,而在间歇期变形速率较小.路堤大致在第 500 d 沉降基本稳定,此时工后沉降约为 3 cm,最终沉降约为 46 cm.可见就山区土石混合料填筑路堤而言,路堤沉降以施工期瞬时压缩沉降为主,而工后沉降只占较小比例.

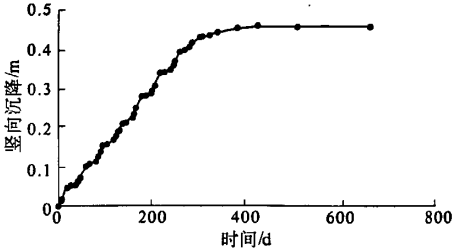


图 2 特征点竖向沉降随时间变化曲线

Fig. 2 Curve of vertical settlements with time of the cahacter point

堤顶的差异沉降是控制施工质量的重要因素,在路堤顶面,路堤中心点处竖向沉降最大,路堤边坡顶点竖向沉降最小.这两点的竖向沉降随时间变化曲线如图 3 所示,堤顶的工后差异沉降 7.1 cm.

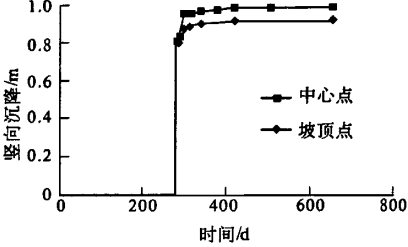


图 3 堤顶特征点的沉降曲线

Fig. 3 Curve of vertical settlements of the character point in embankment peak

(2)路堤的侧向位移

侧向位移也是考察路堤变形与破坏的重要参量之一.最终路堤的侧向位移如图 4 所示,在紧贴软弱层上面左中部位置侧向位移较大(向坡脚方向),最大为 13.7 cm,在坡顶处出现“回缩”现象(向路堤中心方向),最大为 8.5 cm.

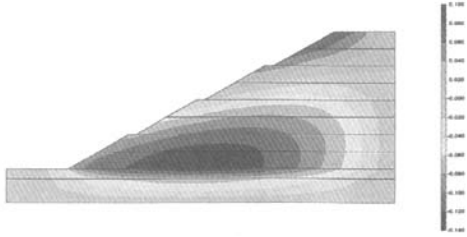


图 4 路堤的侧向位移

Fig. 4 Lateral displacements of the embankment

(3)路基的孔隙水压力

路堤对称轴上距地面 3 m 深处的超静水压力消散规律如图 5 所示.由图 5 可见,超静水压力随填筑过程陡增,而后在固结期超静水压力又迅速消散,在填筑至 20 m 时,超静水压力最大,达到 49.8 kPa,在工后固结期,随着时间的推移逐渐变

小,在 380 d 时变为 2.05 kPa,基本消散。

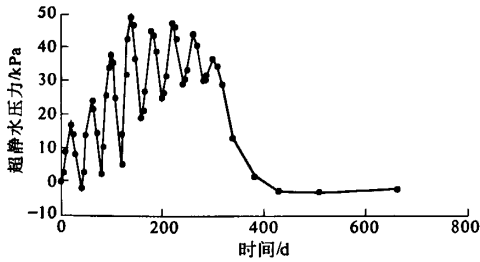


图 5 特征点超静水压力变化曲线

Fig.5 Curve of excess pore pressures of the character point

(4)路堤的塑性区分布

伴随施工进度路堤塑性区的发展情况如图 6 所示。

由图 6 知,随着路堤的逐层向上填筑,其塑性区有从坡面向坡内、从上部路堤向下部地基、沿着地基从坡脚向路堤中心逐渐发展扩大的趋势,在工后固结期,塑性区逐步消散,最终只有少量分布于坡面和堤顶,可见高填方工程完工后一般要设置一定的工后固结期。

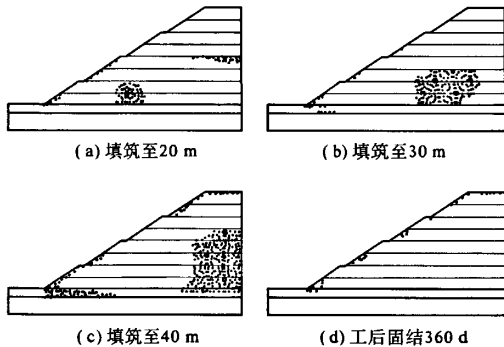


图 6 伴随施工进度塑性区的发展情况

Fig.6 Development of plastic area with construction

(5)路堤的稳定系数

路堤的最大沉降和稳定系数随填筑步骤的变化曲线如图 7 所示,随着填筑施工步的开展,路堤

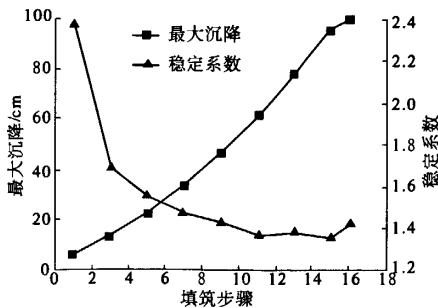


图 7 路堤的最大沉降和稳定系数随填筑步骤的变化

Fig.7 Variation of maximal vertical settlements and stability coffeicent with construction stages

最大沉降值逐步增大,开始呈线性增长,在工后(第 15 步以后)增长较缓;稳定系数随着填筑施工步的开展逐步降低,而在工后随着孔隙水压力的消散,稳定系数有一定幅度提高。

路堤填筑完毕后的最大可能滑裂面如图 8(a)所示,稳定系数为 1.37;工后固结 1 年后路堤的最大可能滑裂面如图 8(b)所示,最终稳定系数为 1.42。

路堤填筑完成后经过一定时间的工后间歇期,路堤边坡的最大可能滑裂面会向上发生一定的转移,其稳定性大为增加,最大增幅接近 11%,尤其在填筑完成后的开始阶段,其稳定性增加较快。由此说明工后间歇时间对路堤的稳定性具有很大影响,因此在高路堤填筑完成后应给予一定的时间让其固结稳定。

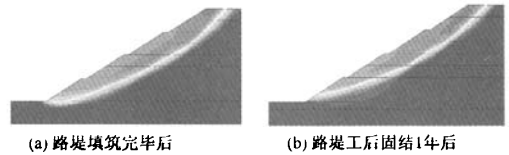


图 8 路堤最大可能滑裂面

Fig.8 The utmost sliding crack surface of the embankment

2.2 不同填方高度时的变形及稳定性分析

下面分析填方高度分别为 10 m、20 m、30 m 时的情况,其它分析条件与填方高度为 40 m 时一致,不同高度的最终沉降变形及路堤填筑完毕后最大可能滑裂面如图 9。

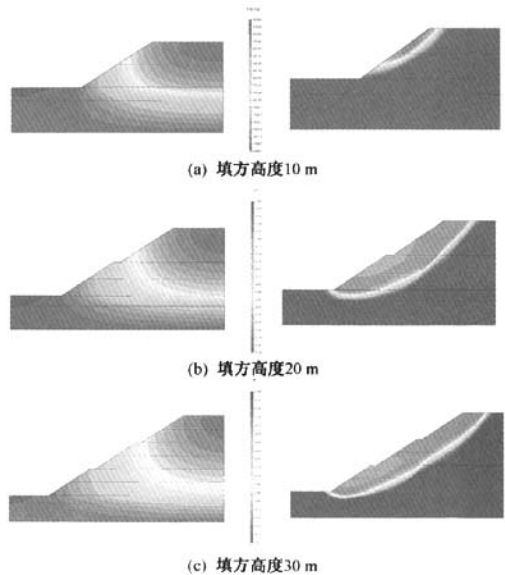


图 9 不同填方高度时的沉降变形及最大可能滑裂面

Fig.9 Pictures of the final settlementand utmost sliding crack surface of different embankment heights

从图 9 的沉降变形图中可以看出,平坦地基上高填方路堤沉降一般呈对称分布,在路堤中部沉降最大,在路堤边缘沉降最小.由图 9 及图 10 可知,近似圆弧滑动是高路堤的主要滑动破坏形式;随着填方高度的增加,路堤的最大可能滑裂面由路堤边坡坡面位置向内部及下方逐步扩展,剪出口位于下卧软弱地基内.不同填方高度时的计算结果如表 2.

表 2 不同填方高度时的结果对比
Tab. 2 Results of different fill height

填方高度 /m	总沉降 /cm	路堤沉降 /cm	差异沉降 /cm	侧向位移 /cm	稳定系数
10	15.66	3.36	2.40	2.73	1.58
20	37.65	13.65	4.25	6.18	1.52
30	65.84	30.84	6.04	9.94	1.46
40	99.48	53.48	7.10	13.70	1.42

由表 2 知,地基总沉降和路堤沉降都随着填方高度的增加而增加,而且路堤沉降所占的比重越来越大,填方高度为 10 m 时,路堤沉降占填方高度的 0.336%,占总沉降的 21.46%;填方高度为 40 m 时,路堤沉降占填方高度的 1.337%,占总沉降的 53.76%.所以在高填方地基中,要考虑路堤填筑体自身的沉降变形.

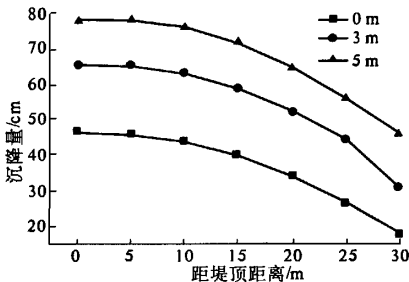


图 10 不同软弱土层厚度路堤中心沉降量
Fig. 10 Settlements of embankment center with different soft soil thickness

工后沉降及差异沉降对路堤服务质量有很重要的影响.由表 2 知,随着填方高度的增加,差异沉降逐步增大,高填方路堤在施工过程中,应当在

路堤中部做适当超填,降低差异沉降值,减小对路面结构的影响.同时随填方高度的增加,路堤稳定系数几乎呈线性降低.

2.3 不同软弱土层厚度时的变形及稳定性分析

由于山区路堤特殊的地形地貌,即使相同路段下路堤的下部地基土层厚度也可能存在比较显著的差异.下面通过调整原地基下软弱土层厚度(设为 0、3、5 m),来研究填方高度为 30 m 时,不同软弱土层厚度下路堤变形及稳定性的变化情况.图 10 为不同软弱土层厚度下路堤中心距顶面不同距离下的沉降量,可见软弱土层厚度越大,沉降变形越大.相应各地基软弱土层厚度的安全系数分别为 1.54(0 m)、1.46(3 m)、1.42(5 m),可见软弱土层厚度越大,稳定系数越低.由此可见,原地基软弱土层是影响山区高填方路堤变形及稳定性的重要因素,必须对其进行地基处理.

2.4 不同填筑速率的变形及稳定性分析

路堤的填筑速率对其变形级稳定性也有较大影响.下面就填方高度为 10 m 时,分析不同路堤填筑速率对路堤变形及稳定性的影响.填筑速率取以下四种情况:一次性填筑(0.5 m/d)、分阶段填筑(0.25 m/d)、分阶段填筑(0.5 m/d)、分阶段填筑(1 m/d),分阶段填筑时第一阶段填筑 5 m 后均进行 20 d 的施工间歇期,则四种情况的填筑施工工期分别为:20 d、60 d、40 d、30 d.

不同填筑速率的影响结果见表 3.由表 3 可知,一次性填筑时产生的工后沉降、差异沉降及侧向位移最大,对工程质量带来不利影响;填筑过程中的最小安全系数小于分阶段填筑过程中的最小安全系数.因此,实际工程中采用一次性填筑有可能因较小的安全系数而导致路堤失稳.对于分阶段填筑,随着填筑速率增大,工后沉降及差异沉降变大,这是因为路堤的填筑速率快,施工期固结沉降时间短,一部分沉降要在工后完成,工后沉降及差异沉降也就相应较大.从减少路堤工后沉降及侧向位移考虑,本研究路堤施工最好采用分阶段填筑,填筑速率为 0.25 m/d.

表 3 不同填筑速率时的变形及稳定性结果
Tab. 3 Results of settlements and stability coefficients with different filling rate

填筑形式	填筑速率 m/d	总沉降 /cm	工后沉降 /cm	差异沉降 /cm	侧向位移 /cm	稳定系数			
						20 d	30 d	60 d	360 d
一次性填筑	0.5	15.74	2.91	2.54	2.83	1.4	1.45	1.52	1.54
分阶段填筑	0.25	15.66	2.09	2.41	2.73	2.01	—	1.57	1.58
分阶段填筑	0.5	15.67	2.41	2.42	2.82	—	2.12	1.55	1.56
分阶段填筑	1	15.79	2.72	2.47	2.79	—	1.52	1.54	1.55

2.5 不同填筑体压实度时的变形及稳定性分析

在高填方路堤施工中,对巨粒土填料的压实度都有明确的要求。下面分析高度为40 m时,路堤填料采用不同压实度(压实度分别为90%、93%、95%、98%)时的变形及稳定性情况。

表4表示的是不同压实度时路堤的变形及稳定性情况,可见随着压实度的增大,路堤沉降、总沉降及路堤沉降占总沉降比例都显著降低;路堤稳定系数显著提高。因此,在路堤施工中,要严格控制路堤的压实质量。

表4 不同压实度时路堤的变形及稳定性情况

Tab.4 The deformation and stability results of different compaction degree

压实度 /%	总沉降 /cm	路堤沉 降/cm	路堤沉降占 总沉降 比例/%	稳定 系数
90	119.12	73.81	61.96	1.38
93	99.48	53.43	53.76	1.42
95	91.35	44.83	49.07	1.46
98	86.31	39.12	45.32	1.58

3 结论

(1)山区平坦地基上高填方路堤沉降一般呈对称分布,在路堤中部沉降最大,在路堤边缘沉降最小。在高填方地基中,要考虑路堤填筑体自身的沉降变形。随着填方高度的增加,堤顶差异沉降逐步增大,路堤稳定系数几乎呈线性降低。

(2)工后固结时间能促进路堤塑性区逐步消散,并且有助于提高路堤的稳定性,在山区高路堤填筑完成后应给予一定时间让其固结稳定。

(3)近似圆弧滑动是高路堤的主要滑动破坏形式;原地基软弱土层是影响山区高填方路堤变形及稳定性的重要因素,必须对其进行地基处理。

(4)高填方路堤的填筑速率对其变形及稳定性有一定的影响,因此,在施工中应先确定合理的填筑速率,同时要严格控制路堤压实质量。

(5)山区斜坡地基上高填方路堤的变形及稳定性分析是下一步进行研究的内容。

参考文献:

- [1] 郑 治,曾 忠.西部地区高填方路堤沉降病害调查与分析[J].公路交通科技,2005,22(9):107-110.
- [2] 刘 宏.四川九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究[D].成都:成都理工大学硕士学位论文,2003.
- [3] 刘涌江,邓卫东,杨 青,等.高速公路路堤稳定性与沉降变形规律研究[J].公路交通技术,2005,(5):16-20.
- [4] 邓卫东.山区公路路堤边坡破坏形态分析[J].公路交通技术,2005,(5):1-5.
- [5] 闫澍旺,崔 激.复杂条件下山区高路堤弹塑性固结问题的有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):474-479.
- [6] 蒋 鑫,邱延峻,魏永幸.基于强度折减法的斜坡软弱地基填方工程特性分析[J].岩土工程学报,2007,29(4):622-627.
- [7] 王琛艳.高填方路基沉降变形规律计算分析与研究[D].重庆交通学院硕士学位论文,2005.
- [8] 谢春庆.四川康定机场工程地质详细勘察报告[R].成都:成都军区空军勘察设计院,2001.

Analysis of Deformation and Stability of High Embankment in Flat Ground of Mountainous Area

CHEN Tao^{1,2}, GUO Yuan - cheng¹, XIE Chun - qing³

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. The Air Force 94353 Army of the PLA, Shangqiu 476100, China; 3. Survey and Design Institute of Chengdu Military Command Air Force, Chengdu 610041, China)

Abstract: The asymmetric deformation and stability loss of high embankment happened frequently in mountainous area. Based on the main features of high embankment in mountainous area, finite element analysis is made on the engineering behaviors of high embankment in flat ground under complex conditions with the consideration of different fill heights, different soft soil thicknesses, different filling speeds and different compaction degrees. The relations between deformation and stability of high embankment are obtained. The results are helpful for understanding the deformation and stability of high embankment, and can provide reference to construction.

Key words: highway engineering; high embankment in mountainous area; deformation; stability; finite element method