

土工材料加固软土路堤非线性有限元分析

卢树盛¹ 林仕祥¹ 肖诗荣²

(1. 长江勘测规划设计研究院长江岩土工程总公司 湖北 武汉 430010 ;

2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室 湖北 宜昌 443002)

摘要 土工合成材料加筋土工程中,土工合成材料与填料的界面作用特性直接决定加筋土工程的内稳定性,土工合成材料与填料的界面作用特性是最关键的技术指标。应用非线性有限元,选用 Coulumb 摩擦模型来模拟土与土工合成材料之间的切向相互作用,对土工合成材料在路基施工过程的加强作用及其力学效应进行分析,并分析土工合成材料对路堤应力分布、沉降、侧向位移和稳定性的影响。结果表明,使用土工材料加固软土路堤能够有效提高路堤的稳定性。

关键词 土工合成材料 路堤加固 有限元 接触单元

中图分类号 :U416

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)S1-0004-04

土工合成材料作为一种具有加筋、防护和隔离等多种功能的岩土工程材料,近几年在高速公路、铁路的建设中取得很好的效果,尤其在软基上筑堤。大量的工程实践证明^[1-7],土工合成材料加筋软基可以缩短工期,降低造价,提高堤坝稳定。土工合成材料在全世界范围内得到了迅速的发展和广泛的应用,引起了岩土工程界的一场技术革命。

土工合成材料加筋软土地基的计算分析是一个十分复杂的问题,涉及到填料、土工合成材料、垫层材料、地基之间的相互作用等因素。李艳春等^[8]在土工格栅与土相互作用的分析中,采用无厚度 Goodman 单元模拟纵向肋与土的相互作用,采用两结点单元来模拟横向肋与土的相互作用。张道宽^[9]构造的土工合成材料与土相互作用单元是把两个无厚度的接触面单元和模拟土工合成材料加筋的拉杆单元揉和在一起,组成了加筋系统有限元分析的离散结构。介玉新等^[10]等提出计算加筋土工织物的等效附加应力法,把筋材的作用当成外力(等效附加应力)加在土骨架上。

当前对土工合成材料与土相互作用机理的认识还远远不够,土工合成材料加筋机理方面的理论成果仍落后于工程实践,需要进行深入的研究。对于土工合成材料加筋机理的研究,一般基于理论分析、有限元法、离心模型试验和现场观测等方法^[11]。

本文是在以往工作的基础上,结合有限元程序,

以一路堤为例,应用 Coulumb 摩擦模型来模拟土与土工合成材料之间的切向相互作用,对土工合成材料在路基施工过程的加强作用及其力学效应进行分析,并分析土工合成材料对应力分布和路堤稳定性的影响。

1 计算方法

有限元法与传统的极限平衡法相比,有限元法全面满足了静力平衡、变形相容、应力应变之间的本构关系,同时由于是采用数值求解方法,可以不受几何形状不规则和材料不均匀的影响与限制,因此是一种理想的分析路基稳定性、应力、变形的手段。

1.1 整体有限元

本文在应力应变分析中,考虑给定时间增量的有限元方程为

$$\int_v \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} d\mathbf{v} \mathbf{a} = \mathbf{b} \int_v \mathbf{N}^T d\mathbf{v} + \mathbf{p} \int_A \mathbf{N}^T dA + \mathbf{F}_n \quad (1)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为应变矩阵; $\mathbf{C}$ 为弹性矩阵; $\mathbf{a}$ 为节点位移列阵; $\mathbf{N}$ 为插值函数矩阵; $\mathbf{F}_n$ 为节点集中荷载; $\mathbf{b}$ 为作用在二维体上的体积力; $\mathbf{p}$ 为作用在二维体上的面积力。

对于平面应变问题,单元厚度等于常数,则方程(1)可以写成:

$$t \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dA \mathbf{a} = \mathbf{b} t \int_A \mathbf{N}^T dA + \mathbf{p} t \int_L \mathbf{N}^T dL \quad (2)$$

式中 t 为单元的厚度。

采用简化形式 ,有限单元控制方程可以写为

$$Ka = F = F_b + F_s + F_n \tag{3}$$

其中
$$K = t \int_A (B^T C B) dA$$

式中 : K 为单元刚度矩阵 ; F 为单元节点载荷列阵 ; F_b 为单元体力 ; F_s 为边界荷载 ; F_n 为节点集中荷载。

1.2 接触单元模型

接触问题是一种应力集中问题 ,涉及到边界非线性甚至材料或几何非线性等。在土工结构中 ,常常会遇到两种不同材料的接触问题 ,如土工材料与土的接触、土坝混凝土心墙和土的接触、挡土结构中墙与墙后土的接触等。由于两种材料在物理力学性质上差异很大 ,因此 ,在受到外力荷载时 ,两种材料的变形也不一致 ,这样就会在界面上产生较大的变形不一致 ,从而在界面上产生较大的剪应力。本文应用 Coulumb 摩擦模型^[12]来模拟土与土工格栅之间的切向相互作用 ,基本 Coulumb 摩擦模型可表示为

$$\begin{cases} \tau = \mu P + b \\ |\tau| < \tau_{lim} \end{cases}$$

式中 : τ_{lim} 为界面剪应力 ; τ 为实际剪应力 ; μ 为摩擦系数 ; P 为法向压力 ; b 为界面接触内聚力。两个接触面在开始相互滑动之前 ,在它们的界面上会有达到某一大小的剪应力 τ 、法向压应力 P ,当实际剪应力 τ 小于界限剪应力 τ_{lim} ,处于黏合状态(sticking)。一旦剪应力超过此值后 ,两个表面之间将开始相互滑动 ,达到滑动状态(sliding)。接触内聚力代表着法向压力为零时的界限剪应力 ,意味着接触面在无外压下所具有的抗剪强度 ,见图 1。

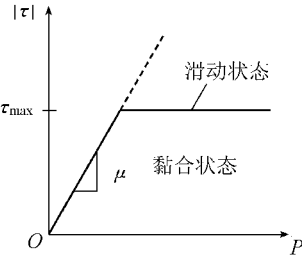


图1 Coulumb 摩擦模型

2 数值算例

2.1 模型建立及参数确定

为了在有限元分析中使问题既得以简化又能反映问题的主要特征 ,在分析时作了如下的处理和简化 ①假定土体(包括路基土、地基软土)为理想弹塑性体 ;②假定土工材料为线弹性体 ;③假定土体、土工材料均为均质、各向同性。外荷载只考虑路堤填土的重力作用。路基两侧施加水平约束 ,底部施加

水平与垂直约束。

假定为平面应变问题 ,并取半结构进行分析 ,其中路基高度为 5 m ,边坡坡比为 1:3 ,路基、地基材料假定为 Mohr-Coulomb 模型 ,物理力学参数见表 1。筋材采用杆单元进行模拟 ,即仅能承受拉伸作用 ,并在筋材两侧设置 Coulumb 摩擦接触单元 ,以模拟土体-筋材的相对运动 ,筋材的拉伸模量取为 1 000 MPa ,回弹拉伸强度为 0 ;土工材料的长 20 m ,宽为单位 1 ,截面面积是 0.004 m²。图 2 为土工合成材料加筋土路基的数值分析模型。

表 1 路基土层物理力学参数

土层名称	密度/ (kg·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	弹性模量/ MPa	泊松比
地基	2 200	20	30	100	0.30
路基	2 000	10	28	50	0.35

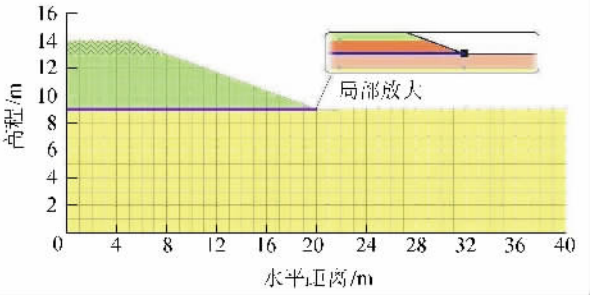


图2 加筋土路基的数值分析模型

分两步进行分析 ,第一步 ,利用有限元软件的挖除功能 ,挖除路基单元 ,仅考虑地基 ,并在地基自重作用下 ,形成初始应力场 ;第二步则模拟路基填筑及筋材的铺设 ,反映填土在自重作用下的沉降及地基在填土荷载作用下的压密。

2.2 主要计算成果

2.2.1 筋体轴向力分析

图 3 说明了随着路基的逐渐加高 ,土工合成材料的最大轴向拉力位置由路基脚趾向路基中心转移 ,并且可以看到土工合成材料的轴向力一直是负的 ,没有出现正向的压力 ,说明轴向力一直是受拉状态 ,并随着路基的逐渐加高 ,拉力也越来越大。

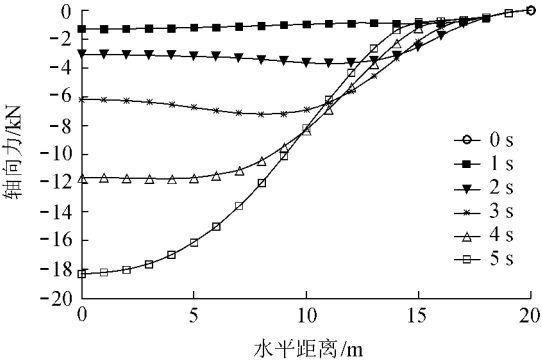


图3 轴向力随路基加高变化曲线

2.2.2 接触单元上、下滑动力力学效应分析

接触单元上部滑动力为负值表示作用在路基上的剪力指向左,也就是说阻止路基向右滑动。接触单元下部滑动力为正意味着滑动剪力对地基防止其向右运动有一个拉力作用。随着路基的增高,从图4可以看出,到第3次滑动力改变方向。图4(a)滑动力在每一步的数值并不一样的原因是土工合成材料吸收了部分应变能。选取同一条轴上的上中下3个关键节点,包括中部的接触点的滑动力进行分析,见图5,即节点267、268、269。节点268的下滑力是2.02 kN,节点269的下滑力是5.60 kN,节点267的阻滑力是7.62 kN,其代数数和为0。接触单元和其上下滑面在任何位置滑动力三者的代数数和均为0。

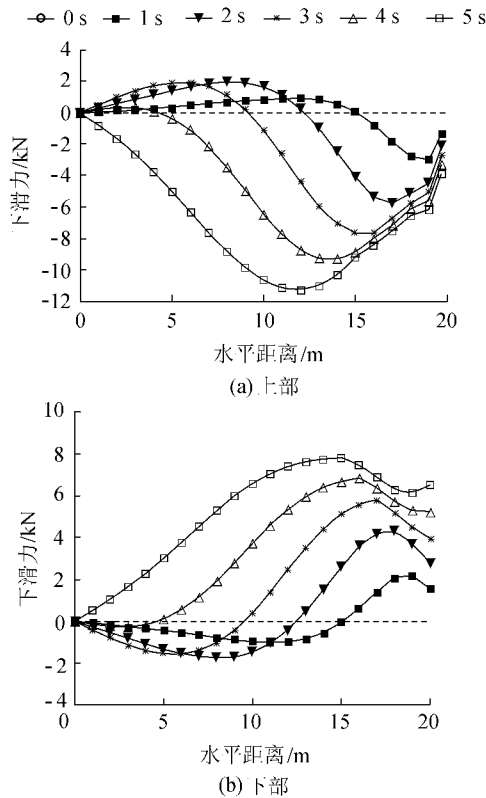


图4 接触单元上下部滑动力变化曲线

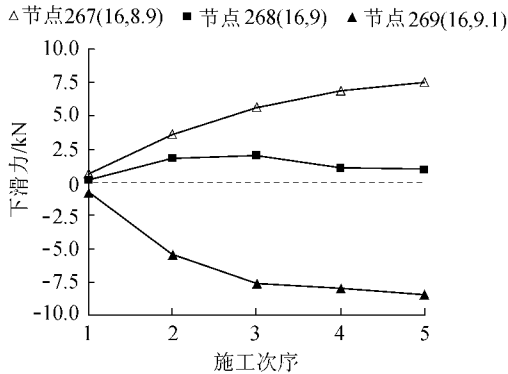


图5 关键点下滑力随路基加高变化曲线

2.2.3 沉降分析

沉降计算结果可以发现加筋能够调整地基的附

加应力,限制土体的侧向变形以及增加路堤本身的变形刚度和整体性等,从而能减小地基的沉降和不均匀沉降。

土工合成材料通过堤防填土产生变形,使其与路基填土相互作用来抑制侧向变形的发展,减小竖向沉降,增强整体稳定性。随着路基的增高,路基的变形逐渐增大,随后趋向稳定,土工织物发挥了更好的作用,抑制了位移的发展。从图6(a)可以看出,水平向位移随着路基的增高而逐渐增大,水平向最大位移发生在第5次加高,位置在距水平向15 m处,最大值为0.042 m;从图6(b)可以看出,竖直向沉降也是随着路基的加高而逐渐增大,最大沉降发生在路基中心,累积最大沉降量为0.29 m,这与实测值稍有差别。原因在于计算的结果是填土和地基土的最终沉降量,包括施工中的瞬时沉降和工后的蠕变变形,土工合成材料在土中受荷载作用具有蠕变性质,加筋土体变形与强度随时间的变化而变化。

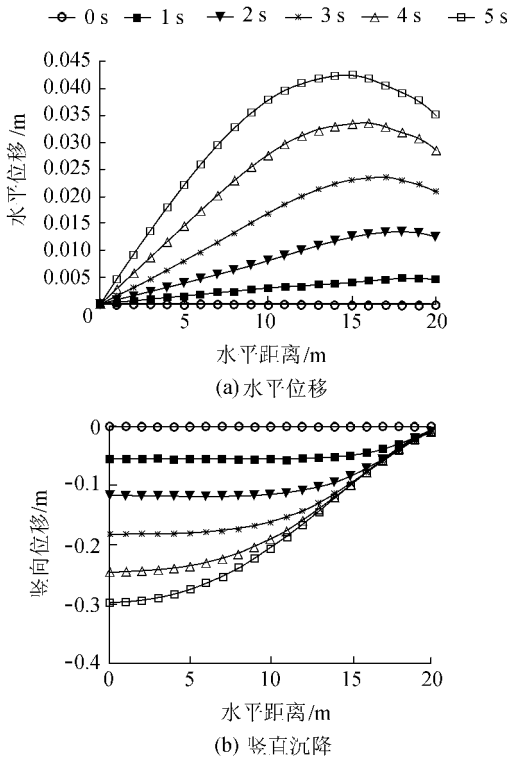


图6 路基水平位移和竖直沉降曲线

2.2.4 稳定性分析

路堤的稳定性是岩土工程界关注的热点问题,土工合成材料的加固补强性能是利用铺设在土中的土工合成材料,由于它的抗拉强度、抗拉刚度及其摩擦作用使土体变形受到约束,依靠土与土工合成材料的相互作用,分散载荷,增大土的抗变形能力,减少沉降量,从而提高土工结构的稳定性和抗应变能力。加筋土堤稳定性包括内部稳定性、外部稳定性和部分稳定性,在设计校核中,各稳定系数应大于某

一规定的安全系数(见交通部公路规范 JTJ/T019—98《公路土工合成材料应用技术规范》)。加筋土堤一般不需要考虑土压力,并一般以圆弧形稳定性校核为准。图 7 为路堤加筋前后稳定性变化,没有加筋路堤的稳定性系数为 1.253,加筋补强后的稳定性系数为 1.420,稳定性提高了 13%,加筋补强效果明显。

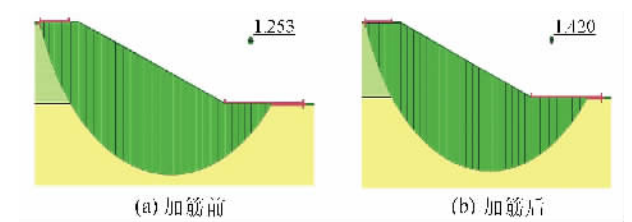


图 7 路堤加筋前后稳定性对比

3 结 论

- a. 土工合成材料加筋能较大地约束侧向位移,减小不均匀沉降,使地基变形均匀,同时减少堤外隆起,均化应力,提高地基的稳定性。
- b. 随着路基高度的增加,路基水平位移先增大后减小,直至趋向稳定,加筋对竖向位移的有一定减小,但不如对水平位移的影响程度明显。
- c. 土工材料与土的相互作用是一个非常复杂的问题,目前为止,尚没有一种完善的接触面模型,针对不同路基情况,应灵活采用不同的接触单元模型,进一步研究接触面的工作机理。

参考文献:

[1] 徐光黎,刘丰收,唐辉明.现代加筋土技术理论与工程

应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.

[2] 顾长存,杨庆刚,张铮.土工格栅加筋软土路堤的数值分析[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(6):677-681.

[3] 马时冬.土工格栅与土的界面摩擦特性试验研究[J].长江科学院院报,2004,21(1):11-14.

[4] 喻泽红,邹银生,王贻荪.土工合成材料加筋边坡稳定性分析中的模量因素[J].岩土工程学报,2004,26(6):787-791.

[5] 唐洪祥,王海清,王大国.土工织物补强软基的整体稳定性计算[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2008,27(4):544-547.

[6] 唐洪祥,王海清.土工织物补强路堤软基的阻滑补强作用机理与整体稳定性分析[J].岩土力学,2005,26(12):1879-1884.

[7] 陈永辉,施建勇,马文斌.土工织物加筋堤坝复合有限元分析方法[J].水利学报,2003(1):28-33.

[8] 李艳春,蒋志仁.弹簧单元模型用于分析土工格栅受力特性[J].中国公路学报,1999(4):38-42.

[9] 张道宽.土工织物加强软土路基的研究[D].北京:铁道部科学研究院,1987.

[10] 介玉新,李广信.加筋土数值计算的等效附加应力法[J].岩土工程学报,1999,21(5):614-616.

[11] 刘汉龙,吴维军,高玉峰.土工织物加固堤防非线性有限元分析[J].岩土力学,2003,24(1):79-87.

[12] ROWE R K, HO S K, FISHER D G. Determination of soil geotextiles interface strength properties[C]. 2th International Symposium On Geotextiles. Alberta: Canadian Geotechnical Society, 1985: 25-43.

(收稿日期 2011-09-09 编辑 熊水斌)

· 简讯 ·

全国第 12 届岩石混凝土断裂、损伤与强度暨大体积混凝土温控与防裂学术会议将在南京召开

由中国水利学会和中国水力发电工程学会岩石与混凝土断裂专业委员会主办、南京水利科学研究院和河海大学承办的全国第 12 届岩石混凝土断裂、损伤与强度暨大体积混凝土温控与防裂学术会议将于 2012 年 3 月 24—26 日在南京召开。会议将邀请高等院校、科研单位、大型工程建设业主单位、设计院所、施工单位和监理单位等参加,以促进这一领域内科研工作者的相互了解、相互交流和协作,进一步促进学科建设和发展。

会议将邀请著名的水工抗震与地震工程的院士、专家就本学科的研究与发展作特邀报告,会议议题包括 ①岩石混凝土断裂、损伤与强度,内容有断裂力学与损伤力学原理、断裂力学和损伤力学的数值分析、断裂准则及复合断裂、断裂力学试验技术、强度及多轴强度、长期强度及疲劳强度、动态断裂与强度、流变断裂与强度、断裂力学与损伤力学的工程应用、混凝土结构物的寿命和安全度评价、工程掩体的稳定分析及原型监测;②大体积混凝土温控与防裂,内容有混凝土配合比设计及其优化、混凝土物理、力学、热学、变形及耐久性能、混凝土工程温控设计及温控标准、混凝土工程结构裂缝扩展、稳定性分析及控制、混凝土工程温度、应力、变形的原型观测;③钢筋混凝土断裂与分析;④大坝安全监测;⑤裂缝监测与诊断;⑥裂缝检测与监测仪器研发;⑦混凝土结构抗震分析。详情见 <http://www.hhu.edu.cn/notes/20111116.htm>。

(本刊编辑部供稿)