

土工格栅加筋路堤有限元分析

马希磊 李致朋 许夏伟

(交通运输部天津水运工程科学研究所,天津 300456)

【摘要】 通过有限元软件 ANSYS 对土工格栅加筋路堤进行模拟,阐述了加筋土的加筋作用原理。通过一个工程实例分别对不加筋、仅加砂垫层、加一层土工格栅砂垫层、加两层土工格栅砂垫层四种不同的加筋路堤进行了计算。分析了不同加筋方式下加筋土路基竖向位移、侧向位移、竖向应力、剪应力和筋材拉力的规律。

【关键词】 土工格栅;有限元分析;加筋路堤;ANSYS

【中图分类号】 TU 472.34

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2011.03.007

The Finite Element Analysis of Geogrid Reinforced Embankment

Ma Xilei Li Zhipeng Xu Xiawei

(Tian Jin Research Institute For Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

【Abstract】 In this paper, geogrid reinforced embankment is simulated with the finite element software ANSYS, expound the role of reinforced soil reinforcement principle. Four different geogrid reinforced embankments included unreinforced embankment, sand cushion embankment, one layer of geogrid embankment, two layers of geogrid embankment are calculated with an engineering example. Analyse the impact of reinforced soil on subgrade's lateral displacement, vertical displacement, vertical stress, shear stress and tension of reinforcement under different reinforced methods.

【Key words】 geogrid; finite element analysis; reinforced earth embankment; ANSYS

0 引言

目前土工格栅加筋路堤的加筋机理还不是十分清楚,理论上的滞后限制了工程实践水平的提高。因而加强计算理论和加筋机理的研究是工程中迫切需要解决的关键课题。

加筋土加固软基路堤的理论研究方法,目前可以分为极限平衡法和有限元法两大类。极限平衡法把加筋土视为刚塑性体,不考虑土体到达峰值前的变形形态,也不考虑筋材的变形及筋材与土之间的相互作用,对其破裂面进行各种假设,再利用库仑破坏准则求解作用于加筋土体上的极限平衡荷载;有限元法则可以考虑筋材的应力应变特性,也可以考虑筋材与土之间的相互作用效应,只要模型和参数选择得当,就可以达到足够的精度。因此用有限元法分析加筋土结构是一种更为精确的方法^[1]。

本文通过有限元软件 ANSYS,对一个工程实例进行分析验证。采用分离式分析法,把加筋土体看成由填土和筋材两种不同性质的材料组成,

两者通过界面相互影响、相互作用。在筋土之间设置接触面单元^[2]。接触面参数通过直剪试验得出。

1 工程实例验证

南京市滨江大道道路工程是显示南京城市特色的一条城市一级道路,规划全程 15.5 km,北起三叉河大桥,南至长江三桥后村立交。我方所监测工程为滨江大道三期,从纬九路到长江三桥,共长 7 km。其中 EK1+260—EK1+460 段采用加筋土地基处理方式。路堤提高 6 m,堤顶宽 25 m,边坡坡率 1:1.5,所铺砂垫层厚度为 0.5 m,土工格栅铺设在砂垫层中间,为双向经编土工格栅。该工程于 2008 年 10 月开始施工,我方对其进行了沉降和水平位移观测,共观测三个断面 EK1+300、EK1+350、EK1+400。仪器布设情况见图 1。

本段为长江下游河漫滩地区,覆盖层主要是长江冲、淤形成的新近沉积土层。其场地内的土层自上而下依次为:

①层素填土:灰褐色,稍湿,软塑,土质较松散,以亚粘土为主,含少量植物根系,层厚 0.6~2.7 m,含水率 29.1%,液性指数 0.36,压缩模量 2.85 MPa。层底标高为-2.1~-3.2 m。

②层淤泥质粘土—亚粘土:灰褐色,软塑,上部为淤泥质亚粘土,含少量贝壳片,层厚 3~20 m,含水率 31.4%,液性指数 0.44,压缩模量 2.66 MPa。层底标高为-24.10 m。

③层粉细砂:灰色,饱和,中密,下部密实,质均,主要成分为石英、长石等。层厚 25~32.3 m,含水率 28.3%,压缩模量 9.20 MPa,层底标高为-34.4~-28.5 m。

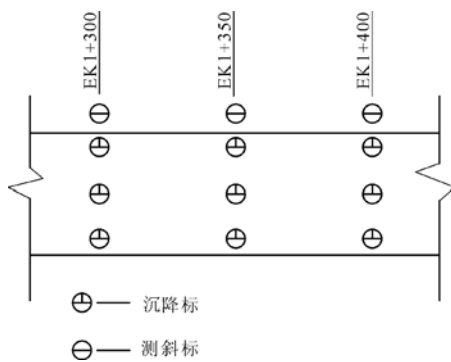


图1 监测设备平面布置图

2 数值分析计算模型的建立及验证

由于加筋路堤的变形主要集中在地基土的上部区域,因此将所计算模型的软基宽度取100 m,厚度取 12 m。一般路堤的荷载主要包括有:路堤自重、路堤上部路面结构重以及车辆荷载。本文将路堤的自重作用看作体力施加于路堤结构上,将路堤上部路面结构及车辆荷载的作用看作面力,均匀施加于路堤顶面。高速公路按照其路面上行车荷载为 I 级荷载,取 $q=40 \text{ kPa}$ ^[3],将其简化

为均布荷载作用于路堤顶面。由于路堤的纵向尺度远远大于横向尺度,故可在分析中按平面应变问题处理,由于路堤为对称结构,建立有限元分析模型时取一半结构,模型底面垂直及水平位移设为零,侧面水平位移设为零。

路堤填土和地基土的本构关系采用非线性弹性 D-P 模型;土工格栅采用线弹性模型^[4],用 ANSYS 中的 link1 线性单元进行模拟;在土与加筋材料的接触面处设置接触单元,接触面单元采用 Goodman 无厚度四节点单元进行模拟,以模拟土与加筋材料的相互作用特性^[5]。其应力和位移的相互关系式为:

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \delta_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W_s \\ W_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: τ 、 δ_m 分别为接触面上的切向应力和法向应力; K_s 、 K_n 分别为接触单元的切向和法向单位长度刚度系数; W_s 、 W_n 分别为切向和法向相对位移。其中 K_s 根据直剪试验,由式(2)确定, K_n 按经验一般取为 10 倍 K_s 。

$$K_s = \frac{\partial \tau}{\partial W_s} = k_i \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{R_f \cdot \tau}{\sigma_n \cdot \tan \varphi + c}\right)^2 \quad (2)$$

式中: P_a 为大气压力; γ_w 为水的重度; k_i 、 n 与 R_f 为参数,由试验确定。

考虑计算结果的精度及模型尺寸,网格划分的高度和宽度均取 50 cm。路堤土和路基各土层及土工格栅的计算参数通过室内试验得出。砂垫层和土工格栅的界面作用指标通过 DHJ-30 型大型直剪仪试验得出。所用参数见表 1—表 3。

由于 EK1+390、EK1+450 断面所布设沉降监测点破坏较早,数据已不完整,因此只将 EK1+420 断面实测值与计算值做比较,见表 4 和图 2。

表1 土体单元计算参数

| 土体类型 | 重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 弹性模量 E/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 粘聚力 c/kPa | 泊松比 ν |
|-------|---|---------------------|---------------------------|--------------------|-----------|
| 路堤 | 18.3 | 3.7×10^4 | 30 | 15 | 0.3 |
| 素填土 | 17.8 | 2.85×10^3 | 18 | 16 | 0.4 |
| 淤泥质粘土 | 17.5 | 2.66×10^3 | 14 | 18 | 0.4 |
| 砂垫层 | 18.0 | 5.4×10^4 | 40 | 0 | 0.25 |

表2 土工格栅单元计算参数

| 弹性模量 E/kPa | 单位宽度横截面积/ m^2 | 极限拉力/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$ | 泊松比 ν |
|---------------------|------------------------|---|-----------|
| 1.8×10^5 | 0.002 | 42.8 | 0.3 |

表3 接触单元计算参数

| $K_s/(\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$ | $K_n/(\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$ | 似摩擦系数 | 粘聚力 c/kPa |
|--|--|--------|--------------------|
| 35 000 | 350 000 | 0.4473 | 2.77 |

表4 EK1+420断面实测累积沉降量与计算值比较

| 结果 | 累积沉降量/cm | | |
|-----|----------|----------|----------|
| | EK1+420左 | EK1+420中 | EK1+420右 |
| 实测值 | 55.2 | 67.9 | 56.6 |
| 计算值 | 56.8 | 69.7 | 58.4 |

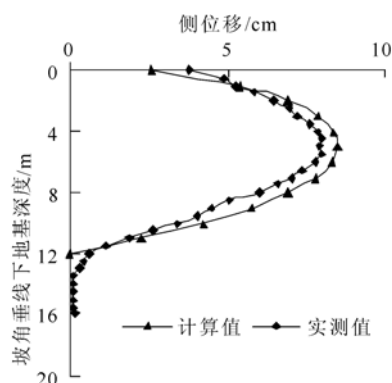


图2 EK1+420断面水平位移实测值和计算值比较

通过以上分析可见有限元计算结果和现场实测结果吻合较好,本文所建立计算模型合理可行。

3 不同加筋方式加筋路堤的有限元分析

通过以上分析,验证了本文所用计算模型的合理性。采用以上模型和计算参数对土工格栅加筋路堤进行计算,分析不同加筋方式加筋土对路基应力场、位移场的影响,从而得出一些有益结论以指导实践。

对于土工格栅加筋路堤,本文分为无砂垫层、仅设砂垫层、一层土工格栅加筋砂垫层、两层土工格栅加筋砂垫层四种不同的工况。

3.1 竖向位移计算结果及分析

路基顶面的沉降曲线成锅底形,路堤中心沉降最大,向两边逐渐减小,见图3。加筋后,地基的竖向位移有较大幅度减小。加0.5 m厚砂垫层时最大竖向位移减小了1.21 cm,与不加筋相比,减小了1.6%;加一层土工格栅砂垫层时最大竖向位移减小了4.45 cm,与不加筋相比,减小了6%;加两层土工格栅砂垫层时最大竖向位移减小了5.52 cm,与不加筋相比,减小了7.4%。

可见加筋砂垫层能有效减小路堤的竖向位移。关于加筋土能减小路堤竖向位移的原因,总结为以下三点:①筋材和砂之间的摩擦作用约束了土体的侧向变形,相当于增加了一个围压,在围压作用下,竖向变形减少;②砂垫层加入土工格栅后,刚度增大,类似柔性的筏板基础,对路堤土压力有很好的扩散作用,减小了堤底附加应力,堤底附加应力减小,路基沉降变小;③路堤加载后,筋材随地基发生锅底状变形,形成网兜效应,对筋材上面的土有兜起

的作用,承担了部分竖向荷载,使下层结构的负担得以减轻,起到了减小沉降的作用。

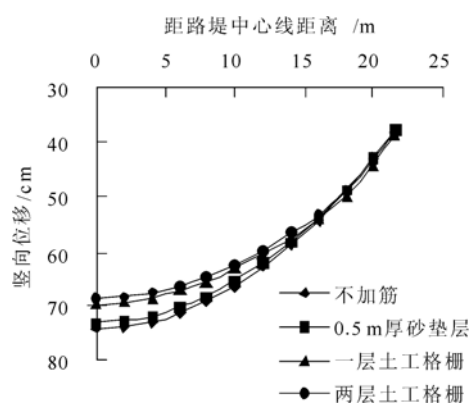


图3 堤底沉降曲线

3.2 侧向位移计算结果及分析

无砂垫层时最大侧向位移为11.13 cm,加0.5 m厚砂垫层时最大侧向位移为10.72 cm,与无砂垫层相比减小了3.68%;加一层土工格栅砂垫层时最大侧向位移为8.77 cm,与不加筋相比减小了21.20%;加二层土工格栅砂垫层时最大侧向位移为8.13 cm,与不加筋相比减小了26.95%,见图4。可见加筋砂垫层能较大程度地减小水平位移,有效抑制了路基侧向挤出破坏。

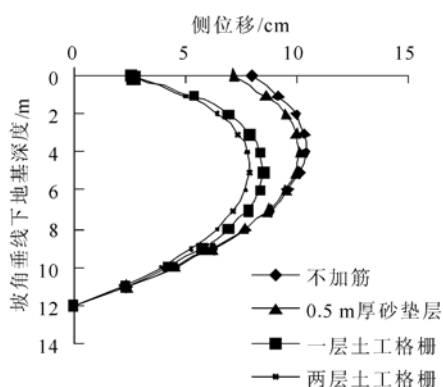


图4 坡脚垂线下各点侧位移沿深度变化图

通过图4还可以看出,一层土工格栅砂垫层路堤最大侧向位移与无砂垫层路堤相比减小21.20%;二层土工格栅砂垫层路堤最大侧向位移与无砂垫层路堤相比减小26.95%。由以上数据可以看出,重复的增加筋材层数并不能起到倍数的加筋效

果。加筋砂垫层路堤存在一个合理的加筋层数。根据工程现场经验,一般以2~3层为宜,不宜超过3层。

通过图4还可以看出,不加筋时路基的最大侧向位移发生在地面下3m处,加筋后最大侧向位移发生在地面下5m处。加筋后,最大侧向位移的影响范围有向深处发展的趋势。一般情况下,地基深处的抗剪强度大于浅处的抗剪强度,最大侧向位移向路基深处发展,意味着危险滑动面向地基深处发展,危险滑动面越深,地基越不易发生破坏。加筋土对侧向位移的这种作用在一定程度上增大了地基的稳定性,这种作用作为一个能够增加路堤稳定性的因素,在传统的稳定分析中是没有体现的。传统极限平衡法仅考虑筋材的拉力作用,不考虑筋材与土之间的相互作用及加筋对地基应力场的影响,因此往往在计算中低估筋材对边坡稳定性的贡献。加筋路堤按圆弧滑动法或水平滑动法核算的安全系数比不加筋时仅增加了2%~4%,远不能反映实际的加固效果。实际工程中,加筋土能使路堤的试验高度提高30%以上,甚至1倍^[6],理论和实际相差较大,理论研究中不能全面地考虑加筋土的各种作用。在以后的研究中应加强这方面的研究,全面地反映加筋土对路堤稳定性的作用。

3.3 竖向应力计算结果及分析

无砂垫层、仅设砂垫层、一层土工格栅砂垫层、两层土工格栅砂垫层等不同路堤的堤底竖向应力分布曲线见图5,通过以上曲线可以看出,竖向应力的分布为锅底状,靠近路堤中心堤底压力较大,向边缘逐渐变小。加筋后堤底竖向应力有所减小,但减小幅度不大。

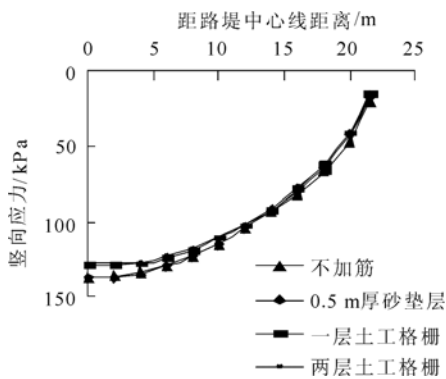


图5 堤底竖向应力分布曲线

3.4 剪应力计算结果及分析

无砂垫层、仅设砂垫层、一层土工格栅砂垫

层、两层土工格栅砂垫层等不同路堤的堤底剪应力分布曲线见图6。从图中可以看出,最大剪应力发生在坡角处,路堤中心处剪应力较小。无砂垫层时最大剪应力为16.42 kPa;仅设砂垫层时,最大剪应力为14.52 kPa,比不加筋时减小了11.57%。加入一层土工格栅加筋砂垫层时,剪应力明显减小,最大剪应力为8.19 kPa,比不加筋时减小了50.12%。加入两层土工格栅加筋砂垫层时,剪应力比一层土工格栅加筋砂垫层有所减小,但减小幅度较小。

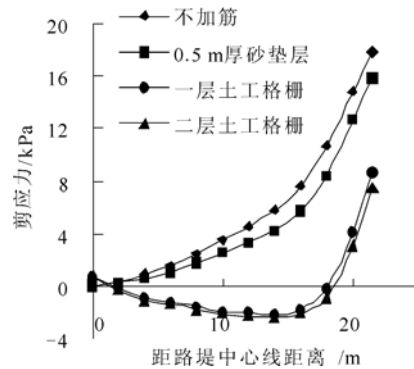


图6 堤底剪应力分布曲线

通过图6还可以看到,加入土工格栅加筋砂垫层后,剪应力减小明显,在2~18m范围内剪切应力的方向发生了改变。文献[7-8]也得到了同样的结果。

本文认为加筋后剪应力方向发生变化是由于加筋路堤中剪切影响带^[9]的作用。加筋土中,筋材在基底压力的作用下,发生锅底状变形,筋材受到指向路堤中心方向的拉力作用,产生指向路堤中心的变形。由于筋材和砂、土之间的摩擦力和嵌锁力,在筋材拉伸变形的带动下,筋材周围土层产生指向路堤中心的应力场和位移场,筋材周围一定范围内的土体发生剪切变形,筋材拉力的高应变梯度场向周围土体传递,在筋材周围一定范围内形成了一条剪切影响带^[10-11]。在剪切影响带应力场较大的区域,筋材拉力所引起的向内的剪应力大于土压力引起的向外的剪应力,这时便表现为加筋后剪应力方向发生改变,剪切影响带示意图见图7。剪切影响带具有一定范围,在此范围内,剪切影响带能起到约束土体侧向变形、减小地基剪应力、提高路堤稳定性的作用。本文所计算剪切影响带的影响深度为6m,关于剪切带影响深度问题将在其他文章中详细说明。

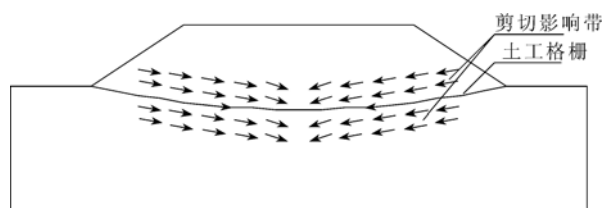


图7 剪切影响带示意图

3.5 筋材拉力计算结果及分析

一层土工格栅加筋砂垫层与两层土工格栅加筋砂垫层的筋材拉力分布曲线见图8。由图中可以看出,筋材拉力分布和筋材变形相一致,也呈锅底形,路堤中心最大,向路肩两边逐渐减小。由图中还可以看出,一层土工格栅加筋砂垫层时筋材拉力最大,两层土工格栅加筋砂垫层时上下两层筋材拉力都比一层时有所减小,且下层筋材的拉力大于上层筋材的拉力。可见增加加筋层数能均化筋材拉力,提高筋材拉力储备能力,对提高路堤的稳定性有较大作用。

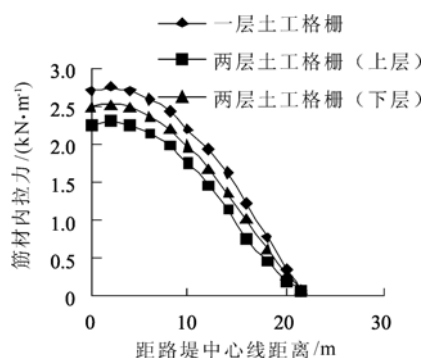


图8 筋材拉力分布曲线

从图中还可看出,路堤正常工作时,筋材最大拉力只有 2.78 kN/m,而本文所用筋材的极限拉力为 42.8 kN/m,即筋材拉力仅发挥了 6.49%,剩余的 93.5%的抗拉能力只能作为储备,而不能在路堤平时运行中发挥作用,筋材在一个比较低的应力水平上工作,所起的加筋作用有限。现在许多学者都在研究这个问题,现在比较流行的做法是在施工时对筋材施加一个预张拉力,让筋材在一个较高的应力水平上运行,以发挥良好的加筋效果^[12],工程实践证明比较成功。

4 结论

1)通过对加筋路堤有限元分析认为:加筋能减小堤底竖向位移和竖向应力,有效限制侧向位移,减小剪应力,增加地基稳定性。当只加砂垫层时,加筋效果有限。加一层土工格栅时加筋效果较好。加两

层土工格栅时,加筋效果有更进一步的提高,但提高幅度有限。因此认为:土工格栅和砂垫层具有良好的协同工作性,加筋效果不止是两种结构加筋效果的简单叠加,而是发挥了更好的加筋效果,土工格栅和砂垫层搭配使用是一种有效的加筋形式。

2)加筋后,最大侧向位移的影响范围向地基深处发展,是增加地基稳定性的一个重要因素。

3)提出了剪切影响带的概念。由于剪切影响带的作用,加筋后基底处剪应力方向会发生改变。剪切影响带约束了土体侧向变形,减小了地基剪应力,提高了路堤稳定性。

4)两层土工格栅加筋砂垫层时上下两层筋材拉力比一层时有所减小,增加加筋层数能均化筋材拉力、提高筋材拉力储备能力,提高了路堤的稳定性。加筋路堤中筋材应力水平较低,一般采用预应力法提高筋材应力水平。

参 考 文 献

- [1] 陈永辉,施建勇,赵维炳,等. 土工织物加筋结构的研究进展[J]. 水利水电科技进展,1997,17(3):25-28.
- [2] 闰彭旺, Ben Bar. 土工格栅与土相互作用的有限元分析[J]. 岩土工程学报,1997,19(6):56-60.
- [3] GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 2001.
- [4] 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):438-443.
- [5] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [6] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [7] 甘 英. 加筋砂垫层加固软基路堤的有限元分析[D]. 昆明:昆明理工大学,2005.
- [8] 毛林峰. 土工合成材料加筋路堤软基有限元分析[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
- [9] 张 嘎,张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报,2003,25(2):150-153.
- [10] 包承刚. 土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报,2006(9):1735-1744.
- [11] 蔡正银,李相菘. 无黏性土中剪切带的形成过程[J]. 岩土工程学报,2003,25(2):129-134.
- [12] 徐少曼,林瑞良. 预应变土工织物加筋堤坝软基的模型试验与分析[C]. 全国第四届土工合成材料学术会议论文集,1995.

收稿日期:2011-01-19