

# 软基路堤加筋垫层与竖向加固桩作用模式数值分析

王超, 甘先永, 张文杰, 张亚芳

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 软土地基的承载力和稳定性一直是国内外重点关注的问题, 但多停留在试验与理论研究 and 施工方法, 对软土地基加固作用模式的研究较少。为研究加筋垫层与竖向加固桩作用模式, 文中采用有限元软件对加筋垫层与竖向加固桩复合增强软基路堤进行数值分析。结果表明, 加筋垫层与竖向加固桩复合增强软基路堤具有较高的刚度和抗剪切破坏能力, 能提高软土路堤的极限承载力和限制土体侧向变形的能力, 特别是对软土地基的水平位移有明显约束作用; 加筋垫层与竖向加固桩可降低软基路堤沉降, 提高软基路堤的稳定性。

**关键词:** 公路; 软基路堤; 加筋垫层; 竖向加固桩

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)05-0087-04

软基的常用处理方法有填土预压、换填土、砂井、深层搅拌法、强夯法、粉喷桩法, 其中加筋垫层与竖向加固桩双向增强软基具有工艺简便、施工步骤少、造价较低、适用多种软基处理等特点, 在高速公路路基加固等工程中得到广泛应用, 取得了较好的补强效果。针对这种方法, 赵明华等提出了一种简易双向复合地基沉降计算方法, 刘金等提出了减沉复合疏桩基础设计、沉降计算模式, 魏星给出了交通荷载作用下软基沉降简化评价方法。但对于加筋垫层与竖向加固桩双向增强复合地基的理论研究尚不成熟, 尤其是在数值分析方面没有完善的方法。该文利用有限元软件分析加筋垫层与竖向加固桩复合增强软基路堤稳定性和减少沉降的作用机理, 为沿海地区软基施工及后期养护提供理论依据。

## 1 设计方法与作用模式分析

### 1.1 加筋垫层在软基路堤中的作用模式

如图 1 所示, 桩承土工合成材料加筋垫层利用加筋垫层较强的抗拉与抗剪性能, 当加筋垫层位于软基路堤中基层与土基之间时, 能有效阻止垫层断裂和剪切破坏, 确保垫层的完整性和整体刚度。加筋垫层的作用机理: 在荷载作用下, 筋带与土颗粒界面的摩擦作用限制颗粒之间的运移, 改善垫层的整体性能; 而筋带内部产生较大的内应力, 抵消部分荷载, 并将荷载均匀分配到地基土中, 起到换填作用, 提高软土路堤的极限承载力。此外, 加筋垫层在软基路堤中还能产生排水和阻断滑裂面的效果。

目前确定筋材所受拉力进而确定筋材的方法主

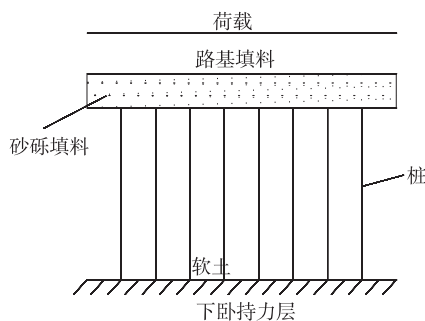


图 1 加筋垫层加固桩复合地基组成示意图

要有 Catenary 方法、Carlsson 方法和英国 BS8006 方法。

(1) Catenary 方法。该方法按下式计算筋材应变  $\epsilon_r$  及内部产生的拉力  $T_r$ :

$$\epsilon_r = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 16 \frac{\Delta S_r^2}{b_n^2}} + \frac{b_n}{8 \Delta S_r^2} \ln \left[ \frac{4 \Delta S_r^2}{b_n^2} + \sqrt{1 + 16 \frac{\Delta S_r^2}{b_n^2}} \right] - 1 \quad (1)$$

$$T_r = \frac{1}{2} (\sigma_{sr} - \sigma_s) b_n \sqrt{1 + \frac{b_n^2}{16 \Delta S_r^2}} \quad (2)$$

式中:  $\Delta S_r$  为筋材最大挠度;  $b_n$  为桩帽的净间距;  $\sigma_{sr}$  为筋材上平均垂直应力;  $\sigma_s$  为作用于筋材下部的平均垂直应力(土的抵抗力)。

(2) Carlsson 方法。根据该方法, 二维平面内筋材最大挠度按下式计算:

$$\Delta S_r = \sqrt{\frac{3 \epsilon_r}{8}} b_n \quad (3)$$

(3) 英国 BS8006 方法。英国 BS8006 标准中

计算桩帽间筋材拉力的公式如下:

$$T_r = \frac{\rho(\gamma H + q)(b-a)}{2a} \sqrt{1 + \frac{1}{6\epsilon_r}} \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为土拱率;  $\gamma$  为最大挠度;  $H$  为填土高度;  $q$  为路堤表面的均布荷载;  $b$  为桩帽中心之间的间距;  $a$  为桩帽的宽度。

文献[1]在上述3种计算方法的基础上提出 Winkler 弹性地基梁理论, 并提出如下加筋垫层微段法分析公式:

$$M_1 + dM_1 + B\tau_d dx \frac{h}{2} + \frac{1}{2}Bpdx^2 - M_1 -$$

$$T_1(-dw_1) - Q_1 dx - B\tau_u dx \frac{h}{2} -$$

$$\frac{1}{2}Bk_s w_1 dx^2 = 0 \quad (5)$$

式中:  $M$ 、 $T$ 、 $Q$  分别为截面弯矩、拉力与剪力;  $B$  为桩纵向中心距离;  $p$ 、 $h$  分别为均布荷载、加筋垫层厚度;  $\tau_u$ 、 $\tau_d$  分别为加筋垫层与上下土体界面的摩擦力;  $w$  为加筋垫层的竖向变形, 即双向增强复合地基的沉降;  $k_s$  为桩间土弹簧的刚度系数。

## 1.2 竖向加固桩复合增强软基模式

在复合增强加筋地基中, 加固桩还具有挤密和振密的作用。软土地基在松散状态时颗粒的排列位置很不稳定, 在竖向加固桩作用下重新排列而趋于较稳定状态, 孔隙比减小, 密度增加。上部荷载通过垫层传递给桩体, 在复合增强地基中, 桩体刚度远比桩周软弱土大得多, 在刚性基础均匀变形的情况下引起桩四周土体振动, 在挤压和振动作用下, 土的结构逐渐破坏, 土颗粒重新排列, 向具低势能的位置移动, 导致孔隙水排出、土体孔隙比降低, 密度得到提高。

由于加固桩的作用, 土体应力集中在桩体上部, 大部分荷载由桩体承担, 而桩间土上应力相应减少, 竖向加固桩在软基中也起到减小沉降和抵抗滑移的作用。加固桩作用下复合地基承载力按下式计算:

$$E_{sp}A_e = E_pA_p + E_s(A_e - A_p) \quad (6)$$

式中:  $E_{sp}$  为复合土层压缩模量;  $A_e$  为单桩承担的处理面积;  $E_p$  为桩的压缩模量;  $A_p$  为单桩的截面积;  $E_s$  为桩间土的压缩模量。

如图2所示, 纵向宽度为  $B$  的水平加筋垫层可视为一弹性地基梁, 垫层下桩与桩间土也可认为是不同刚度的弹簧。桩的刚度系数  $k_p$  为:

$$k_p = k_s + \frac{k_p}{dB} \quad (7)$$

式中:  $d$  为桩径。

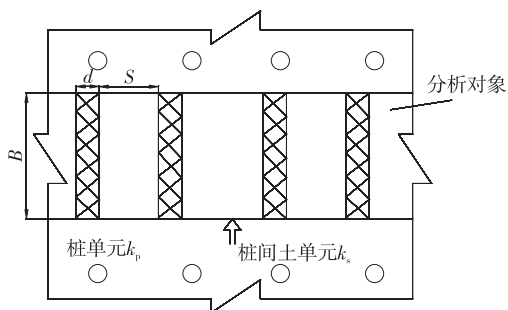


图2 双向增强复合地基沉降计算模型示意图

## 2 算例分析

### 2.1 有限元建模

基于上述理论, 利用有限元软件建立图3所示软基路堤模型。由于路堤具有对称性, 建立以半路堤为平面轴对称的模型, 水平方向为  $X$  轴, 垂直方向为  $Y$  轴。路基高6 m、长40 m, 路堤高4 m, 桩长4 m, 坡度为1:1.5, 垫层高0.5 m。在桩承加筋垫层路堤中, 桩体的变形很小, 采用弹性模型模拟桩体; 常用土体采用 Mohr-Coulomb 模型模拟; 加筋垫层中的土工格栅采用 Plaxis 有限元软件中的格栅单元模拟, 只承受拉力而不承受压力; 垫层材料采用实际中砂、砾碎石等无黏性材料。

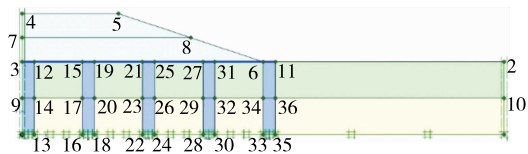


图3 加筋垫层与竖向加固桩复合增强软基路堤模型

### 2.2 变形网格

受路堤土重量和车辆荷载的作用, 路肩部会出现向下的变形位移。在软基表面铺设加筋垫层和打入竖向加固桩后, 桩土发生差异沉降。如图4所示, 路堤上部的抗压变形明显减小, 桩与桩之间的网格变形较为规律, 桩体发生较明显的横向偏移现象, 坡脚处的隆起变形较小, 非桩基承载路堤填土处沉降量较大, 最大总位移为363.93 mm。与未打入加筋垫层与竖向加固桩时比较, 加筋垫层与加固桩有效

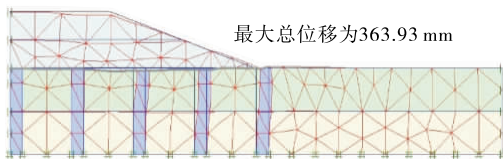


图4 网格形变场分布

减少了土体的横向位移,坡脚无明显变形迹象。

### 2.3 破坏演化

图5为软基路堤的变形位移矢量云图。从中可看出:加载瞬时路堤内部形成一个不连续的滑动面,从路面表面开始缓慢向路堤内部延伸,中间暂未贯通;随着时间的推移,滑动面渐渐贯通,由于竖向加固桩的作用,滑动面扩展趋势变缓。此外,由于最外侧加固桩的设置,滑动面的反射被阻断,减弱了坡脚的剪切破坏。竖向加固桩还有效阻断了滑动面向路基边缘处的延伸,使变形位移被阻隔在坡脚外侧。

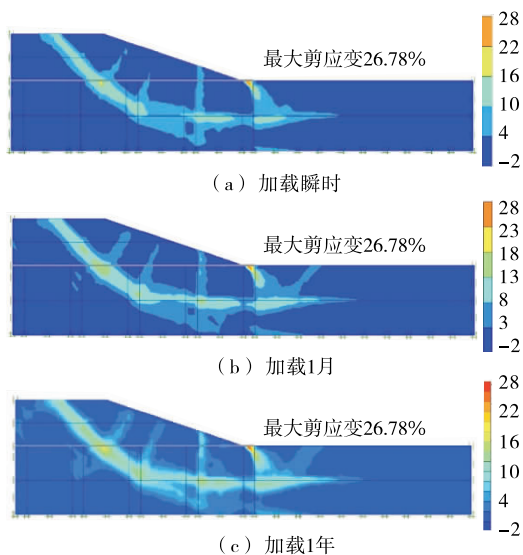


图5 软基路堤变形位移矢量云图(单位:%)

### 2.4 软基路堤应力应变分析

为探索桩和加筋垫层对软基的保护作用,对土体应力偏转情况和破坏点分布情况进行模拟分析,结果见图6、图7。

软基路堤加载瞬间,在垫层与加固桩的调节作用下,主应力主要分布在桩上部与桩内侧,路基边缘处的主应力分布较少,图6中桩土差异沉降与应力矢量方向发生变化印证了这一点。图6(a)、图7(a)

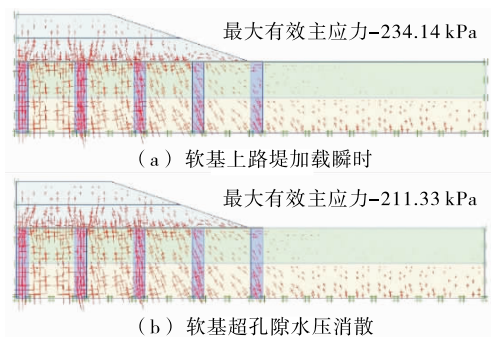


图6 主应力矢量分布

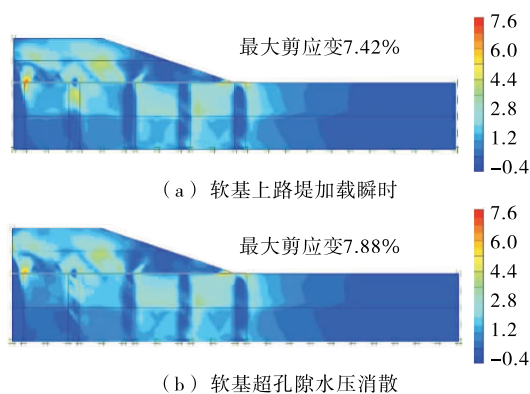


图7 变形位移矢量云图(单位:%)

表明:由于土体抗剪强度的存在,桩和土形成模量差异,桩周围填土自重荷载被部分转移到桩顶范围内填土上,路堤内部的变形位移主要集中在竖向加固桩的桩帽处与最外侧加固桩的内侧,路堤差异沉降形成的应力拱将荷载进行重分配,竖向加固桩承担了大部分荷载。

在软基超孔隙水压消散时,主应力的分布情况和变形位移情况与软基路堤加载瞬时的分布情况相似。图8表明:加载瞬时的摩尔-库伦点主要分布在路堤的上部结构和桩内部,坡脚处的拉伸截断点较多,且向路基边缘处延伸;在软基超孔隙水压消散时,摩尔-库伦点由路基上部结构分散到桩,坡脚处的拉伸截断点明显减小。

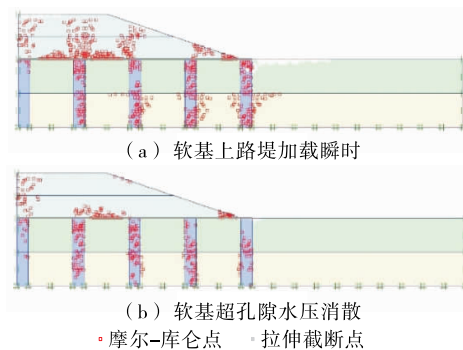


图8 塑性平衡点分布

上述结果表明,加筋垫层与竖向加固桩的作用阻止了土体内部滑动病害及应力拱的形成,加速了超孔隙水的消散,在交通荷载及雨水等多种因素作用下,双向增强复合地基有效发挥了作用。

### 2.5 软基路堤超孔隙水压消散分析

一般而言,超静孔隙水压力与土体骨架上有效应力成线性关系,超静孔隙水压力随着有效应力的增大而增大。软土路基开挖时,路基土受到施加在路基表面填土的荷载作用,土中附加应力瞬时增加,



导致土体中水无法及时向外排出而在土壤中形成超静孔隙水压力。如图9所示,土壤固结沉降缓慢消散。路基区超孔隙水压分布较集中,路基中心线处超孔隙水压最大,沿着路基中心线逐渐向路基边缘减小,孔隙水压力集中在坡脚处,消散前后的最大超静水压力分别为 $-9.69$ 、 $-988.18 \times 10^{-3}$  kPa。

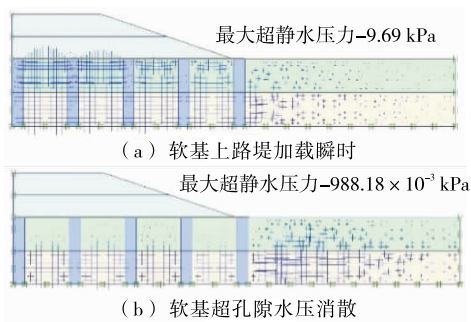


图9 孔隙水压力消散分布

图10为软基路堤加载瞬时与孔隙水压消散时的超静孔压云图。从中可看出:加载瞬时的超静孔压主要集中在桩与桩之间,且急剧增大;孔隙水压消散时,超静孔压由路基中心向路基边缘消散,主要集中在路基边缘处,这主要是由于竖向加固桩发挥了作用。

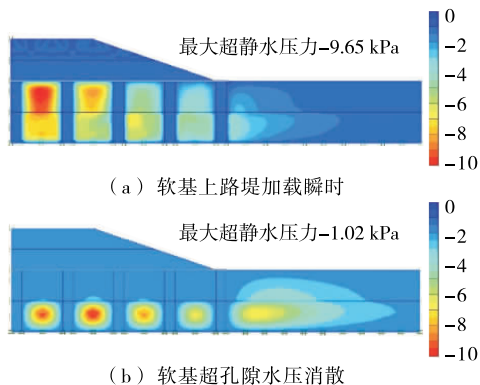


图10 超静孔压矢量云图(单位:kPa)

### 3 结论

(1) 加筋垫层具有较高的刚度和抗剪切破坏能力,能提高软土路堤的极限承载力,限制土体的侧向变形,尤其是对软基的水平位移有明显制约。

(2) 软基土质较软,在软基上修建路堤会形成较明显的地基沉降。随着路基土体固结,竖向加固桩上部承受主要荷载,加上竖向桩和加筋垫层对软基的双向作用,地基的强度折减明显减小,阻止了土体内部滑坡现象的发生,路基内部不会发生坍塌、滑

移等病害。孔隙水压力由于加固桩的作用加速扩散,有效阻止了路基内部土体由于荷载的作用而发生土体液化的现象。

(3) 加筋垫层与竖向加固桩体系具有减少软基路堤沉降与提高软基路堤稳定性的功能,用于加固处理软基可加快路堤填筑速度,在工程上具有较好的实践意义。

### 参考文献:

- [1] 赵明华,张玲,赵衡.双向增强复合地基沉降计算方法研究[J].岩土力学,2011,32(9).
- [2] 尹礼文.搅拌桩复合地基加固软土地基的工程应用[J].装饰装修天地,2016(5).
- [3] 刘金砺,邱明兵.软土中群桩承载变形特性与减沉复合疏桩基础设计计算[J].岩土工程学报,2008,30(1).
- [4] 陈国臻.用多排预应力管桩治理软土路基滑坡设计研究[A].第十四届中国科协年会软土路基工程技术研讨会论文集[C].2012.
- [5] 原方,张大伟,张明.桩网复合地基工后沉降预测方法研究[J].路基工程,2007(5).
- [6] 刘雄美.软弱路基填土中地基超孔隙水压力变化探讨[J].甘肃科技纵横,2016(1).
- [7] 谭慧明,刘汉龙.桩承加筋路堤中路堤与褥垫层共同作用理论分析[J].岩土力学,2008,29(8).
- [8] 赵明华,张玲,马缤辉.基于Winkler假定的土工格室加筋体受力分析[J].水利学报,2008,39(6).
- [9] 吕伟华,邵光辉.刚性桩网加固拓宽路堤性状数值分析[J].林业工程学报,2016,1(2).
- [10] 周娟.加筋垫层路堤有限元分析[J].山西建筑,2016,42(15).
- [11] 赵明华,张玲,邹新军,等.土工格室一碎石桩双向增强复合地基研究进展[J].中国公路学报,2009,22(1).
- [12] 李彰明.软土地基加固的理论、设计与施工[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [13] 刘三豆.公路软基处理方案技术决策的Bayes判别分析法[J].公路与汽运,2016(2).
- [14] 冯仲仁.高速公路软基处理智能决策支持技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2003.
- [15] 张军学.公路工程软基处理方法及路基填筑施工要点[J].交通世界,2018(14).
- [16] 韩冰.高速公路软基处理决策问题智能化技术的研究[D].武汉:武汉理工大学,2004.