

# 软土地基上加筋土路堤稳定的强度折减法分析

祝云琪<sup>1</sup>, 曾四平<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 宝钢工程技术有限公司 冶炼设计部, 上海 201900)

**摘要:** 针对软土地基上加筋土路堤的工程特点, 采用强度折减联合有限差分的方法, 从安全系数和潜在滑动面两个方面入手, 得出了软土地基上加筋土路堤不同时刻的稳定特性, 并分析了加筋层数、填料内摩擦角及地基模量等参数对稳定的敏感性。研究表明, 软土地基上加筋土路堤不同时刻的稳定特性不同, 增大筋材层数、填料的内摩擦角及地基模量, 软土地基上加筋土路堤的稳定性有所增加, 但超过一定阶段后, 其增加程度不再明显。研究成果对软土地基上加筋土路堤的实际工程应用有一定的参考作用。

**关键词:** 软土; 加筋土路堤; 稳定; 强度折减法

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2009)01-0074-04

中图分类号: U416.1+2

## Strength Reduction Analysis for Stability of Reinforced Embankment on Soft Soil

ZHU Yun-qi<sup>1</sup>, ZENG Si-ping<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education,

Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Smelting Design Department,

Bao Steel Engineering Technology Limited Corporation of Shanghai City, Shanghai 201900, China)

**Abstract:** According to the engineering characteristics of reinforced embankment on soft soil, the characteristics of stability of reinforced embankment on soft soil at different times are determined and the sensitivity of stability to layers of reinforcement, inner friction angle of stiffing, and module of ground are analyzed from two aspects of safety and potential sliding surface by means of strength reduction method and finite difference method. It is found that the more layer of reinforcement, the greater inner friction angle and module of ground are, and the more stable reinforced embankment on soft soil is. However, when some stage exceeds, the effect is no longer apparent. Results presented in the text will have an important reference value to practical engineering of reinforced embankment on soft soil.

**Keywords:** soft soil; reinforced embankment; stability; strength reduction method

目前,随着公路建设规模的扩大,经常要在软土地基上修筑路堤,采用加筋的方法对软土地基上的路堤进行处理已得到了广泛的应用,并获得了巨大的经济、社会效益。但当前对软土地基上加筋土路堤的作用机理尚不十分明确,地基滑动、路堤边坡失稳等稳定问题依然普遍存在,理论的滞后严重影响了软土地基上加筋土路堤的工程应用。当前工程界对于路堤边坡的稳定分析方法主要有极限平衡法<sup>[1-6]</sup>,该方法由于概念直观、运算方便,同时又积累了大量可靠的经验,所以是目前应用最广、最成熟的一种稳定分析方法,但这种方法在计算中未考虑土体及筋材的变形,不能反映实际的加筋效果和工作状态,仅是一种近似方法。从 20 世纪 80 年代开始,一种新的稳定计算方法——强度折减法开始得到广泛的应用<sup>[7,8]</sup>,该法以数值分析方法(有限元法、有限差分法等)为基础,通过在计算过程中对土体的强度折减计算直至土体失稳破坏来进行稳定分

析的。该方法不但满足力的平衡条件,而且考虑了材料的应力应变关系、筋材与土体的变形协调等因素,所以更能反映岩土体的实际工作状态。由于强度折减法的一些优越特性,当前强度折减法已得到了比较多的应用,但主要还局限于边坡的稳定分析当中<sup>[9-11]</sup>,很少有人将其运用到软土地基的分析之中。软土由于其压缩性高、渗透性低等特点,在实际工程中通常要考虑其固结特性,本研究采用强度折减法,考虑地基土的固结,以大型有限差分软件 FLAC 为计算工具,得出软土地基上加筋土路堤的稳定特性,并就加筋层数、填料内摩擦角及地基模量等参数进行稳定敏感性分析。

## 1 基本理论

### 1.1 强度折减法基本原理

大多数边坡的滑坡都属于渐近破坏,滑坡的主要

原因是由于土坡在风化、吸水饱和、应变软化等因素影响下, 土体的抗剪强度会逐渐降低。因此通过抗剪强度的折减可以使土坡达到破坏的临界状态, 这时的折减系数定义为土坡稳定的安全系数, 计算时把折减强度参数按如下形式进行折减:

$$c' = \frac{c}{F_s}, \quad \phi' = \tan^{-1} \frac{\tan \phi}{F_s} \quad (1)$$

式中:  $c, \phi$ ——土体能够提供的抗剪强度;  $c', \phi'$ ——维持平衡所需的抗剪强度, 即实际抗剪强度;  $F_s$ ——安全系数。

强度折减法中安全系数可以通过(1)式直接得出, 不需要假定滑裂面的形式或位置, 还可以考虑边坡的渐进破坏过程, 并得到临界滑动面的位置。

### 1.2 有限差分理论

有限差分法采用数学上的离散方法, 它将待解问题基本方程组和边界条件近似转化为差分方程, 把求解微分方程的问题转化成代数方程问题来求解。设  $f(x, y)$  为介质体内的某连续函数, 将介质体用等间距  $h$  且平行于坐标轴的两组平行线织成网格, 如图 1 所示, 在  $x_0$  临近点处,  $f$  均可被展开为泰勒级数, 整理得到一、二阶的差分公式:

$$\begin{cases} (\frac{\partial f}{\partial x})_0 = \frac{f_1 - f_3}{2h} \\ (\frac{\partial^2 f}{\partial x^2})_0 = \frac{f_1 + f_3 - 2f_0}{h^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} (\frac{\partial f}{\partial y})_0 = \frac{f_2 - f_4}{2h} \\ (\frac{\partial^2 f}{\partial y^2})_0 = \frac{f_2 + f_4 - 2f_0}{h^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y})_0 = \frac{1}{4h^2} [(f_6 + f_8) - (f_5 + f_7)] \quad (4)$$

利用上述差分公式, 通过积分得到各个时刻的位移。

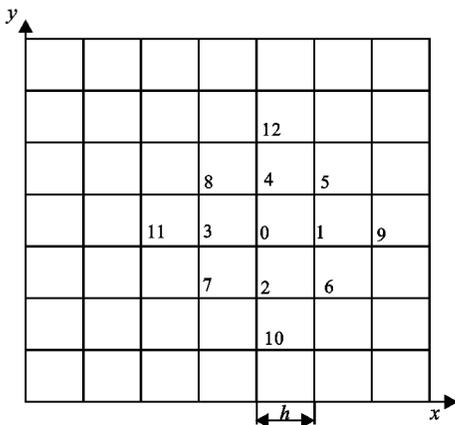


图 1 有限差分网格图

### 1.3 软土地基上加筋土路堤的分析模型

本研究采用筋土分离模型对软土地基上加筋土

路堤的稳定性进行计算, 采用能反映土体流固耦合的 Biot 固结理论来反映不同时段软土地基上加筋土路堤的稳定特性, 选用 Mohr—Columb 屈服准则作为土体的屈服准则, 将筋材视为线弹性体, 采用界面单元来模拟筋土之间的相互作用。

## 2 软土地基上加筋土路堤的稳定特性

### 2.1 数值计算模型

取一软土地基上加筋土路堤, 如图 2 所示。地基宽度取为 50 m, 深度为 12 m, 边坡坡度为 1: 1, 路堤填土高度为 6 m, 路基顶面宽度为 18 m。路基及地基土体参数如表 1 所示, 筋材及筋土界面参数如表 2 所示。将整个施工过程模拟简化为 4 个时段, 即路堤施工期、施工间歇期、路面施工期和工后固结期; 其中, 路堤施工时间为 3 个月, 施工间歇期 2 个月, 路面施工时间为 1 个月, 工后固结期为 10 a; 其中路堤的施工采用分层填筑的方法进行, 共分为 6 层, 并在路堤基底处向上铺设筋材, 共铺设 3 层, 每层间距 0.5 m。路堤的加载—时间曲线如图 3 所示, 由于结构的对称性, 只取整个结构的 1/2 进行研究。采用有限差分软件 FLAC 进行计算, 结构左右边界分别为横向固定约束, 无水平位移; 底部为横向和竖向固定约束, 无水平和垂直位移。为计算简便, 设地表为透水边界, 其余为不透水边界。

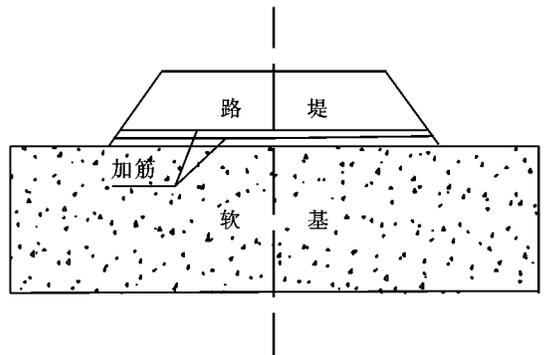


图 2 软土地基加筋土路堤的网格划分

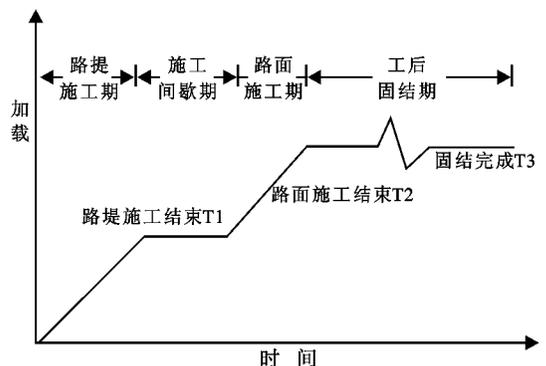


图 3 路堤的加载—时间曲线

表 1 路堤填土及地基土计算参数

| 路基及路堤材料 | 变形模量/MPa | 泊松比  | 摩擦角/(°) | 黏聚力/kPa | 孔隙比  | 渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> ) | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) |
|---------|----------|------|---------|---------|------|---------------------------|--------------------------|
| 地基土     | 2        | 0.35 | 15      | 10      | 0.12 | 5E-9                      | 1 800                    |
| 路堤填土    | 15       | 0.35 | 20      | 10      | —    | —                         | 1 800                    |

表 2 筋材及筋土界面参数

| 筋材厚度/mm | 拉伸屈服强度/MPa | 筋材弹性模量/MPa | 筋土黏聚力/(kN·m <sup>-1</sup> ) | 筋土摩擦角/(°) |
|---------|------------|------------|-----------------------------|-----------|
| 2       | 10         | 2 000      | 1                           | 10        |

软土地基上加筋土路堤的稳定性分析主要是分析其安全系数和潜在滑动面的位置,稳定安全系数是路堤稳定的整体评价,而准确判断潜在在滑裂面的位置可以帮助预判边坡的破坏情况,并且相应地给出其加固措施。

## 2.2 不同时段软土地基上加筋土路堤的稳定性变化

图 4 为不同时刻软土地基加筋土路堤的潜在滑动面及安全系数,从图中可以发现:(1)不同时段路堤的潜在滑动面性状不同,随着施工高度的增加,潜在滑动面由地基向上发展,路堤的稳定性减小,在路面施工结束时,路堤处于最不稳定状态。(2)路基路面施工结束后,随着时间的推移,路堤的稳定性有逐渐提高的趋势,但潜在滑动面位置几乎不变。笔者认为,这是由于在土体固结以及荷载作用下土体压密的综合作用下,地基及路堤土体强度提高所致。

## 2.3 软土地基上加筋土路堤稳定的敏感性分析

本研究中稳定的敏感性分析从筋材的布置、路堤与地基的性质 3 个方面出发,主要讨论了不同筋材层

数、填料内摩擦角及地基变形模量等情况下的潜在滑动面性状及安全系数的变化规律等情况。为简化计算,以路堤施工结束时路堤的稳定性为代表进行敏感性分析,在对各参数进行敏感性分析时,除正在分析的参数变化外,其它参数保持不变。

2.3.1 筋材层数对路堤稳定的影响 表 3 为不同加筋层数条件时的路堤的安全系数。

分析图表可以发现,当不加筋时,潜在的滑动面通过路堤坡脚,安全系数为 1.21,根据《公路路基设计规范》,路堤的安全系数不得小于 1.25,路堤处于不稳定状态,加 1 层筋后,安全系数达到 1.28,路堤处于整体稳定状态,随着筋材的不断加入,安全系数不断增加,潜在滑动面的形态和位置发生了变化,路堤底部变得越来越稳定,潜在滑动面向上滑动,路堤边坡只有可能在上部出现局部失稳,当加筋继续向上增加时,剪切应变率逐渐减小,路堤边坡上部出现局部失稳的可能性也减小,潜在滑动面向地基纵深发展,路堤处于稳定状态,安全系数增加不再明显。

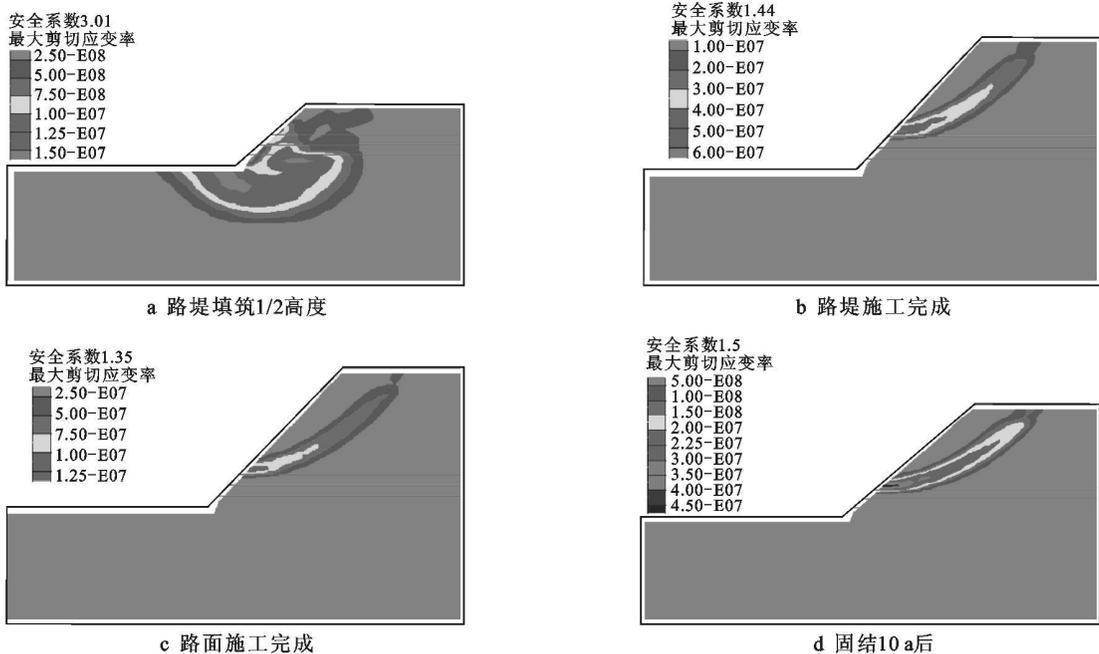


图 4 不同时刻软土地基加筋土路堤的潜在滑动面及安全系数

表 3 加筋层数对路堤安全系数的影响

| 加筋层数 | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 安全系数 | 1.21 | 1.28 | 1.35 | 1.44 | 1.57 | 1.71 | 1.89 | 1.91 |

2.3.2 填料内摩擦角对路堤稳定的影响 其它参数不变,改变路堤填料的内摩擦角,计算路堤的稳定性。路堤的安全系数随内摩擦角变化的情况如表 4 所示,从表中可以发现,路堤的安全系数随内摩擦角几乎呈直线变化,内摩擦角越大,安全系数越大。

表 4 填料内摩擦角对路堤安全系数的影响

| 填料内摩擦角/(°) | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| 安全系数       | 1.12 | 1.28 | 1.44 | 1.61 | 1.78 | 1.96 |

2.3.3 地基模量对路堤稳定的影响 表 5 为不同地基模量时加筋与未加筋时边坡的安全系数。增大地基的模量,路堤的安全系数有所增加,但总体上并没有大的改变,因此当路堤高度不很大时,而地基土体本身强度较大时,加筋效果并不明显,而当路基土的模量较小时,在路堤底部加筋时效果较为显著。

表 5 地基模量对路堤安全系数的影响

| 地基模量/MPa | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|----------|------|------|------|------|------|
| 不加筋安全系数  | 1.13 | 1.21 | 1.27 | 1.3  | 1.33 |
| 加筋安全系数   | 1.42 | 1.44 | 1.44 | 1.45 | 1.45 |

### 3 结论

(1) 不同时段路堤的潜在破裂面性状不同,随着路堤施工高度的增加,潜在破裂面由地基向上发展,剪切应变率增加,路堤的稳定性减小,在路面施工结束时,路堤处于最不稳定状态。

(2) 路基路面施工结束后,随着时间的推移,路堤的稳定性有逐渐提高的趋势,但潜在破裂面位置几乎不变。

(3) 筋材的布置对软土地基上加筋土路堤的稳定影响很大,增加筋材的层数,路堤边坡的稳定性越好,但当筋材超过一定层数时,稳定性不再明显提高;如本研究中当筋材层数超过 6 层后,再增加筋材层数,路堤的稳定性不再明显提高。

(4) 增大填料的内摩擦角,路堤的安全系数呈线性增加。

(5) 当路堤高度不是很大的情况下,而地基土体本身强度较大时,加筋后路堤稳定性变化不明显,而当路基土的模量较小时,在路堤底部加筋时路堤的稳定性有所提高。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 朱湘.软土地基格栅加筋路堤结构性能研究[D].南京:东南大学,2000.
- [2] Jose L B, Antonio S C. Overall stability of geosynthetic reinforced embankments on soft soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, 20: 395-421.
- [3] Rowe R K. An approximate method for estimating the stability of geotextile reinforced embankments[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22: 392-398.
- [4] Gourc J P. Design of fabric retaining walls: displacement method[C]// Austria: Proc of the 3rd Inter Conf of Geotextiles, 1986: 1067-1072.
- [5] Lemonnier P, Soubra A H, Kastner R. Variational displacement method for geosynthetically reinforced slope stability analysis: II. Local stability[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1998, 16: 27-44.
- [6] 刘祖德,陆士强,王钊.土工织物加筋陡坡的极限平衡设计[C]//全国第二届土工合成材料学术会议论文集(沈阳),1990.
- [7] 赵尚毅,郑颖人,时为民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3): 343-346.
- [8] Richard B,陶连金.加筋边坡在坡顶荷载作用下的极限承载力[J].岩土工程学报,2004,26(2): 194-197.
- [9] 宋二详.土工结构安全系数的有限元计算[J].岩土工程学报,1991,17(3): 1-7.
- [10] 迟世春,关立军.基于强度折减的拉格朗日差分方法分析土坡稳定性[J].岩土工程学报,2004,26(1): 42-46.
- [11] 高文华, Richard J B.条形荷载作用下加筋土边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2): 374-380.