

文章编号: 1000 - 7598 - (2007) 增刊 - 0905 - 04

# 复合地基加固路堤的稳定性分析

吴春秋, 肖大平

(中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

**摘 要:**通过对复合地基加固路堤稳定性的极限平衡法和有限单元法的计算结果进行对比分析,揭示出当路堤的稳定性由复合地基决定时,极限平衡法和有限单元法的计算结果存在较大差异。应用岩土有限元软件 Plaxis 中的强度折减法可得到合理的路堤稳定性分析结果。对复合地基中桩体破坏模式的分析认为,桩体发生非剪断破坏之外的弯曲、转动、拉伸等破坏模式是极限平衡法与有限单元法计算结果产生差异的根本原因。由此进一步指出,当处理存在土与结构物相互作用的边坡稳定问题时,极限平衡法的分析结果可能会高估了边坡的稳定性,应慎重判别其合理性。

**关 键 词:**复合地基;路堤;边坡稳定;极限平衡法;有限单元法

**中图分类号:** TU 457 **文献标识码:** A

## Stability analysis of embankment on composite subgrade

WU Chun-qiu, XIAO Da-ping

(Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Based on comparative analyses of slope stability of embankment on composite subgrade by using limit equilibrium method and finite element method, it is revealed that the calculated safety factors by LEM and FEM can be significantly different when the reinforcements in composite subgrade have dominating influence. Embankment stability can be well predicted by strength-reduction method by using plaxis software. It is further investigated that for embankment on composite subgrade the potential failure patterns of reinforcement columns such as bending, rotation and extension, other than direct shearing through reinforcements, made the difference in calculated safety factors by LEM and FEM. Therefore, for embankment stability analysis with interaction between soil and reinforcement in composite subgrade, LEM may overestimate slope stability and its applicability should be checked with caution.

**Key words:** composite subgrade; embankment; slope stability; limit equilibrium method; finite element method

## 1 引 言

在软土地基上修筑路堤,其稳定性和沉降一样是一个需充分重视的问题。排水固结、深层搅拌法、低强度桩复合地基、土工合成材料加筋垫层等地基处理方法都可以被用来解决软土地基上路堤的稳定性和沉降问题,其中深层搅拌法、低强度桩复合地基等复合地基处理技术由于施工速度快、工后沉降小等优点在工程实践中应用最为广泛。Terashi 指出,日本有近 60%、北欧有近 85% 的路堤工程采用了复合地基处理技术来减小沉降、提高稳定性<sup>[1]</sup>。在我国,也有大量用复合地基处理高速公路、

铁路软土地基的工程实例<sup>[2]</sup>。

复合地基加固路堤的稳定性可用 Bishop, Morgenstern-Price 等极限平衡法进行分析,也可用强度折减等有限元法进行分析。极限平衡法考虑的是临界滑裂面的抗剪强度,即以材料发生剪切破坏时发挥的剪切强度作为抗滑力。然而复合地基中的桩体依其强度与桩周土体强度关系的不同,在竖向力和水平力的作用下,可能会出现剪切、弯曲、转动、拉伸破坏<sup>[3]</sup>。由于桩体材料的抗拉强度明显小于其抗剪强度,采用极限平衡法对复合地基加固路堤进行稳定分析时,可能会高估了其稳定性。

本文通过对算例采用极限平衡法、有限单元法

收稿日期: 2007-05-28

基金项目: 中国建筑科学研究院青年基金项目资助 (No.411-0513002-3)

作者简介: 吴春秋,男,1977年生,博士,工程师,主要从事地基基础工程方面的研究与实践。E-mail: wcqdy@tom.com

计算的安全系数进行对比分析，指出当路堤的稳定性由复合地基决定时，极限平衡法和有限单元法的计算结果存在较大差异，极限平衡法得到的安全系数一般会高于有限单元法得到的。进一步分析指出，采用有限单元法能更合理地评价路堤的稳定性。

## 2 算例描述及分析方法介绍

如图 1 所示位于一软土地基上的路堤，几何尺寸及材料参数均标于图中。软土层厚度为 10 m，其下为基岩。路堤高度为 5 m，坡度为 1:2，坡顶有 12 kPa 的均布压力模拟交通荷载。在平面应变分析中，复合地基中的桩体只能被模拟成连续墙的形式。桩体厚 1 m，间距为 2.5 m。所有的材料均用 M-C 模型模拟，其中桩体的抗拉强度假定为凝聚力的 20%，其余材料均不考虑抗拉强度。

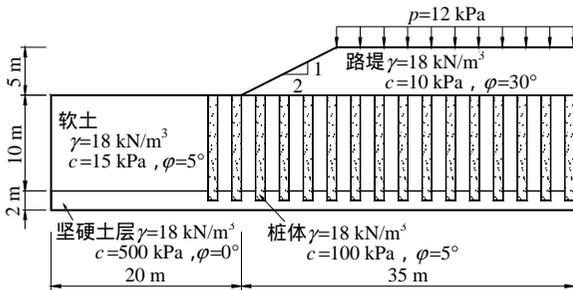


图 1 复合地基加固路堤模型

Fig.1 Model of embankment over composite subgrade

需要说明的是，对应于图中给出的土体强度参数，在未加固时堤坝的稳定性是能满足要求的，设置此算例的主要目的是要考察随着桩体部分材料强度的变化，极限平衡法和有限单元法分析结果的差异。在极限平衡法中，复合地基中的桩体被当作只是强度高于周围土体的土条，当滑裂面经过时，桩体能充分发挥其抗剪强度以提供抗滑力。在有限元分析中，能考虑桩与土的相互作用，能考虑桩周的应力集中，从而能反映出不同于剪切破坏的失稳机制。

极限平衡分析采用 Morgenstern-Price 法<sup>[4]</sup>，有限单元分析采用强度折减法<sup>[5]</sup>，分别采用商业软件 GeoStudio 和 Plaxis 进行计算。两种方法的具体算法参见相关文献，这里不再赘述。Plaxis 是国际知名的有限元岩土分析软件，具有强大的渗流、固结、稳定计算功能，且对土体数值计算中的非线性问题具有很好的适应性，用于边坡稳定分析时能自动地实现强度折减算法<sup>[6]</sup>。在 Plaxis 软件中，通过设置几何厚度为 0 的界面单元来模拟桩土之间的相互作用，通过给界面选取合适的界面强度折减因子的值

来模拟相互作用的糙率。

## 3 LEM 与 FEM 计算结果对比

### 3.1 未加固路堤的稳定性分析

当桩体部分材料强度等于桩周土体强度时，实际上模拟了未加固的状态。由极限平衡法计算的安全系数为 1.339，有限元计算的安全系数为 1.389，二者基本一致。

图 2 为极限平衡法 (LEM) 搜索得到的路堤滑裂面。图 3 为有限元 (FME) 计算中增量位移所反映出来的路堤极限状态下的滑动区域分布图，从图中可以很容易地找到滑裂面的大致位置。从图 2 和图 3 中可以看出，两种方法得到的滑裂面基本相同。由于存在软弱地基，出现的破坏型式为深层滑动。

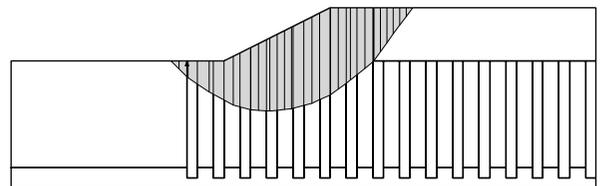


图 2 极限平衡法得到的未加固路堤滑裂面

Fig.2 Slip surface in non-reinforced embankment searched by LEM

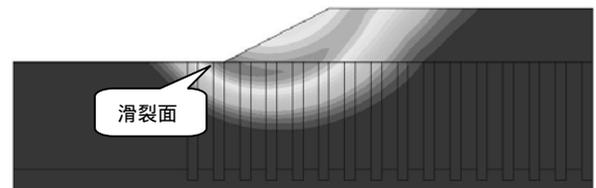


图 3 有限单元法得到的未加固路堤滑动区域分布图

Fig.3 Slip zone in non-reinforced embankment calculated by FEM

上述计算结果证明，对于均质土坡的稳定性分析，极限平衡法能得到和有限单元法相一致的结论，这与其他文献资料的结论是一致的<sup>[7]</sup>。

### 3.2 加固路堤的稳定性分析

逐步增加桩体部分材料的强度，可以模拟地基被加固的情形。在计算中，只变化桩体材料的凝聚力，从与软土相同的 15 kPa 逐步提高到 300 kPa。极限平衡法和有限单元法的计算结果见图 4。从图中可以看出，无论是采用极限平衡法还是采用有限单元法，安全系数具有随着桩体强度提高而增大的趋势。当桩体强度较小时（凝聚力小于 50 kPa）或桩体强度较高时（凝聚力大于 200 kPa），极限平衡法和有限单元法的计算结果接近；当桩体凝聚力取为 100 kPa 时，两种方法计算得到的安全系数相差

最大，极限平衡法计算得到的安全系数要大于有限单元法计算得到的。另外，从图 4 中可以看出，当桩体凝聚力大于 200 kPa 后，无论是采用哪种计算方法，安全系数都趋于稳定，即路堤的安全系数不再随着桩体强度的提高而增大。

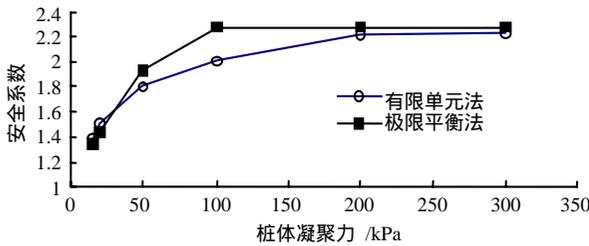


图 4 桩体不同强度对应的安全系数  
Fig.4 Safety factor versus strength of reinforcement columns

图 5 为桩体材料凝聚力大于 100 kPa 后由极限平衡法得到的滑裂面，可见软弱地基被加固达到一定强度后，路堤的破坏由深层滑动发展为浅层滑动。因此，当路基被加固达到一定强度后，路堤的稳定性由上层路堤堆土的材料特性控制，此时通过进一步加固路基来提高路堤的稳定性是无效的。

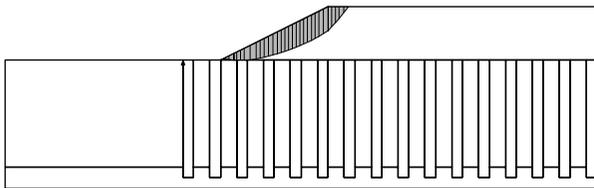


图 5 桩体材料  $c > 100$  kPa 极限平衡法得到的路堤滑裂面  
Fig.5 Slip surface searched by LEM when  $c > 100$  kPa

### 3.3 增加面板后路堤的稳定性分析

为了进一步说明当滑裂面通过加固区域时极限平衡法和有限单元法计算结果的差异，在路堤坡面上增加一个强度足够大的面板，如图 6 所示，阻止浅层滑动的发生。虽然面板是为了说明问题所需而增加的，但在实际中这种情况还是存在的，例如路堤浇筑混凝土护面，又如水工中的面板堆石坝，这

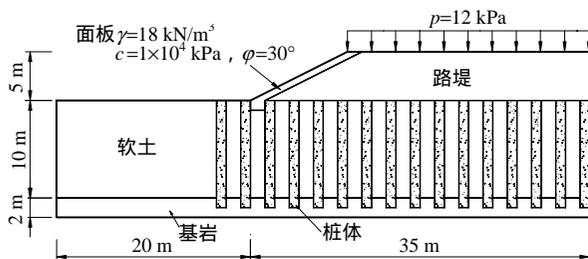


图 6 面板及面板材料  
Fig.6 Concrete face slab and its material parameters

样的计算是具有实际意义的。

图 7 为增加面板后桩体材料的凝聚力从 15 kPa 提高到 300 kPa，极限平衡法和有限单元法的安全系数计算结果。可以看出，当桩体强度较低时（凝聚力小于 50 kPa）极限平衡法与有限单元法的计算结果一致。随着桩体强度的增大，安全系数也随着增大，但极限平衡法的计算结果几乎在成直线增长，而有限单元法的计算结果增长缓慢，趋于稳定。当桩体凝聚力超过 50 kPa 后，两种方法计算得到的安全系数差别越来越大，极限平衡法的计算结果远大于有限单元法的。

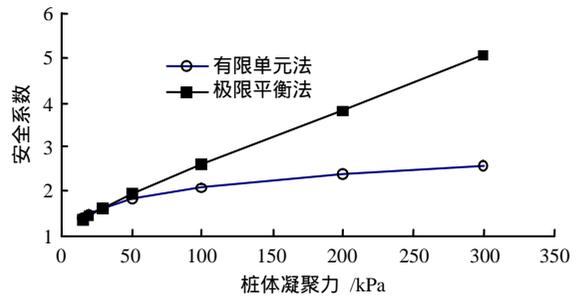


图 7 增加面板后路堤安全系数随桩体强度的变化  
Fig.7 Variation of safety factor with strength of reinforcement columns

图 8 为桩体材料凝聚力  $c=200$  kPa 时，由极限平衡法得到的滑裂面。与图 5 对比，可见由于面板的存在，加固后路堤的破坏型式为深层滑动。

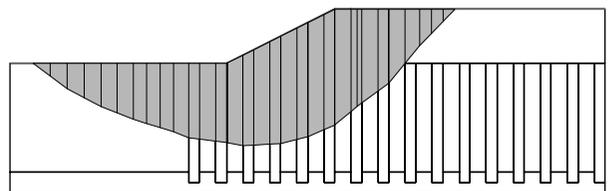


图 8 桩体材料  $c=200$  kPa 极限平衡法得到的路堤滑裂面  
Fig.8 Slip surface searched by LEM for  $c=200$  kPa

## 4 数值计算结果分析

通过以上对比分析可以得出这样一个结论：对修筑于复合地基加固路基上的路堤出现深层滑动时进行稳定性分析，采用极限平衡法和有限单元法会得出存在较大差异的结论。Han 等曾对类似的问题用有限差分法进行过分析，也得出了相似的结论<sup>[8]</sup>。算例中极限平衡法和有限单元法计算结果出现差异的原因正是本文想要指出的。

计算安全系数时，极限平衡法以滑裂面上材料充分发挥抗剪强度来提供抗滑力，并且抗剪强度符合 M-C 强度准则。众多文献，包括文中算例均表明，如果边坡失稳时，材料均发生剪切破坏（例如均质

边坡的情况),采用 M-C 理想弹塑性模型,极限平衡法能得到和有限单元法一致的结论。对于本文算例,当桩体部分材料参数取为与桩周土体一样时,整个路堤相当于一个均质边坡;当桩体材料强度达到一定程度时,整个路堤的稳定性与路基无关,取决于复合路基上的路堤部分,此时路堤的稳定问题也相当于一个均质边坡的稳定问题,因而便出现了图 7 所示两条安全系数曲线两端基本一致的情形。

当出现滑裂面经过复合地基的深层滑坡时,路堤的稳定性由软土路基和其中的桩体强度控制。众多研究表明,复合地基中的桩体在水平和竖向荷载作用下,可能会发生剪切、弯曲、转动、拉伸破坏以及各种破坏型式的组合<sup>[3,9]</sup>。图 9 为桩体部分材料凝聚力等于 100 kPa 时,由有限单元法分析得到的极限状态时路堤内部的剪应变分布。与均质边坡稳定分析结果不一样,由于桩体的存在,极限状态下边坡内没有形成一条贯通的剪切滑动带,而是在桩体前后出现了剪应变集中的现象。很明显,是桩体阻止了剪切带的形成。竖向条带状分布的剪应变说明桩体发生了弯曲、转动。由于 M-C 材料的抗拉强度很小,远小于其抗剪强度,因此,当桩体以弯曲、转动、拉伸等形态破坏时,以抗剪强度理论为基础的极限平衡法不再适用,其计算结果往往会高估边坡的稳定性。由于有限单元法全面满足静力许可、应变相容和应力-应变之间的本构关系,通过对分析对象进行离散,可以模拟各种破坏形态,因此,能更为合理地揭露复合地基中桩体的破坏本质,从而能更为合理地评价路堤的稳定性。

由此可见,复合路基中桩体破坏模式的改变是极限平衡法与有限单元法计算结果出现差异的根本原因。当桩体材料强度逐渐高于周围土体时,桩体的破坏逐渐由剪切破坏为主发展到弯曲、转动、拉伸破坏占主导地位。

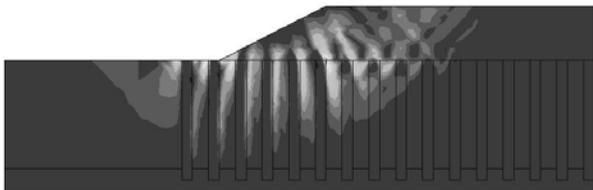


图 9 桩体材料  $c = 100 \text{ kPa}$  路堤内部的剪应变

Fig.9 Distributing of shear strain inside embankment for  $c = 100 \text{ kPa}$

## 5 结 论

(1) 对于均质土坡的稳定性分析,如果采用

M-C 理想弹塑性模型,极限平衡法能得到和有限单元法相一致的结论。

(2) 当存在软弱路基时,路堤失稳会出现深层滑动的情况。当滑裂面经过复合路基时,由于桩体的存在,极限平衡法得到的安全系数高于有限单元法得到的,有限单元法的结论合理。

(3) 复合路基中桩体发生弯曲、转动、拉伸等破坏型式是极限平衡法与有限单元法计算结果产生差异的根本原因。

(4) 极限平衡法以剪切强度为基础,以充分发挥滑裂面经过部位材料的抗剪强度来提供抗滑力,当涉及土与结构物相互作用时,极限平衡法可能会得出不合理的结论,需慎重判别。

## 参 考 文 献

- [1] Terashi M. The state of practice in deep mixing methods[J]. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 2002, (1): 25 - 49.
- [2] 龚晓南. 地基处理技术发展展望[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [3] Kitazume M, Terashi M. Effect of local soil improvement on the behavior of revetment[A]. *Proceedings of Geo-Coast*[C]. [s. l.]: [s. n.], 1991.
- [4] Morgenstern N R, Price V. The analysis of the stability of general slip surface[J]. *Geotechnique*, 1965, 15(1): 79 - 93.
- [5] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(6): 835 - 840.
- [6] Brinkgreve R B J, Vermeer P PLAXIS A. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses[M]. Delft: Balkema, 1998.
- [7] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 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(5): 343 - 346.  
ZHAO Shang-yi, ZHEN Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(5): 343 - 346.
- [8] Han J, Parsons R J, Sheth A R, et al. Factors of safety against deep-seated failure of embankments over deep mixed columns[A]. *Deep Mixing 2005 Conference*[C]. Sweden: [s. n.], 2005.
- [9] Broms B B. Can lime/cement columns be used in Singapore and Southeast Asia[A]. *3rd GRC Lecture*[C]. [s. l.]: Nanyang Technological University and NTU-PWD Geotechnical Research Centre, 1999.