

关于“土工合成物加强软土地基的极限分析”一文的讨论

吴景海

(天津市市政工程研究院, 天津, 300074)

陈 环

(天津大学, 天津, 300074)

在软土地基上修建路堤, 在路堤底部铺设土工合成材料加筋垫层, 一些工程实践表明可显著提高路堤的稳定性, 但用圆弧滑动法计算时, 计入土工合成材料的拉力产生的抗滑作用, 一般安全系数只能提高 2% ~ 3%。因为计算安全系数提高很小, 目前已经成为限制土工合成材料加筋垫层推广应用的关键问题。看到沈珠江院士在《岩土工程学报》1998 年第 4 期上发表的文章“土工合成物加强软土地基的极限分析”(以下简称“原文”), 感到很受启发。“原文”用极限分析法计算, 土工合成材料可提高极限荷载 23.4%, 很受鼓舞, 但学习过程中, 发现一些问题理解不深, 特提出请教。

1 关于加筋作用模式

“原文”提出土工合成材料加固软土地基时, 在软土地基表面产生一个限制软土地基滑动的指向路堤轴线的水平剪力, 制约了软土地基的挤出破坏。这点对我们有很大的启发, 沿此思路进一步研究, 可能挖掘出土工合成材料加筋垫层的真实作用, 这是所有关心土工合成材料加筋垫层发展的人们都企盼解决的问题。但是土工合成材料加筋垫层对软土地基产生指向路堤轴线的水平剪力必须具备以下 2 个条件: ①土工合成材料相对不动, 软土地基产生向外挤出的趋势; ②土工合成材料不被拔出和拉断。

“原文”式(6)表明土工合成材料的拉力等于其底面剪应力的合力 T_1 与顶面剪应力的合力 T_2 之和, 即 $T = T_1 + T_2$ 。 T_1 为土工合成材料限制软土地基向外挤出的剪力; T_2 由路堤内的土压力传递而来, 等于路堤某一竖直面上的水平土压力之和。

根据“原文”提供的数据, 对于 3 m 高的路堤, $T_2 = \frac{1}{2} \gamma K_a H^2 = 0.5 \times 16.7 \times 0.4 \times 3^2 = 30 \text{ kN/m}$ 。按上述数据计算, 5 m 和 10 m 高的路堤的 T_2 分别为 84 kN/m 和 334 kN/m, 而实际路堤填土的重度 γ 不止 16.7 kN/m³, 至少也应达 18 kN/m³, 这样相应于 3, 5, 10 m 高路堤的 T_2 应分别为 32, 90, 360 kN/m。按连云港最软土的抗剪强度只有 8.8 kPa 考虑, “原文”计算出的 $T_1 = 49.4 \text{ kN/m}$, 如果按软土的抗剪强度 22.6 kPa 考虑, “原文”计算出的 $T_1 = 126 \text{ kN/m}$ 。土工合成材料的拉力 T 等于 T_1 与 T_2 之和, 所以土工合成材料的拉力就很大了。

目前, 国内生产的无纺土工织物的极限抗拉强度为 20 ~ 30 kN/m, 延伸率为 40% ~ 60%; 编织土工织物的极限抗拉强度为 30 ~ 60 kN/m, 延伸率为 10% 左右; 单向土工格栅的极限抗拉强度为 30 ~ 110 kN/m, 延伸率为 10% 左右。再考虑土工合成材料的长期蠕变, 则上述的土工合成材料在路堤工程中, 都将被拉断而破坏。但是使人费解的是国内外一些工程实测的资料表明土工合成材料的应变仅为 2% ~ 5%, 发挥的拉力仅为极限抗拉强度的 5% ~ 20%^[1-3], 即土工合成材料远未达到极限抗拉强度。可见, 这些实测结果与“原文”计算结果的出入很大, 目

前还得不到合理的解释。

2 安全系数

“原文”根据极限分析的原理, 提出一种基于滑块平衡的分析方法。算例表明土工合成材料加筋垫层可提高极限荷载 23.4%, 即安全系数提高 23.4%。但是大量的工程计算已经证明极限分析法的安全系数与圆弧滑动法的安全系数相差很大。港工地基规范在修订时, 用极限分析法和圆弧滑动法分别计算了 10 项重力式码头, 安全系数的比较见表 1。如果将极限分析法计算出的安全系数提高 23.4% 近似折算成圆弧滑动法的安全系数提高值, 应为 $23.4 \times 1.33/4.95 = 6.3\%$, 可见, 相应圆弧滑动法的安全系数提高值也是很小。

表 1 安全系数比较

Table 1 Comparison of factor of safety

计算方法	安全系数平均值	均方差	变异系数
汉森公式	4.95	1.06	0.214
简单圆弧滑动法	1.33	0.20	0.150

3 破坏方式

土工合成材料加固软土地基通常有 4 种破坏方式, 分别是水平滑动、侧向挤出、圆弧滑动和过量沉降, 如图 1 所示, 侧向挤出不是唯一的破坏方式^[4,5]。

如果土工合成材料与路堤的界面抗剪强度不足, 路堤内的主动土压力会导致路堤沿土工合成材料的顶面发生水平滑动破坏; 如果土工合成材料与软土地基的界面抗剪强度不足, 就会导致软土地基发生侧向挤出破坏。水平滑动和侧向挤出破坏方式的主要控制参数是直剪试验中土工合成材料与土的界面抗剪强度。

在路堤荷载作用下, 土工合成材料就会限制路堤底面和浅层软土与土工合成材料的相对位移, 土工合成材料产生拉力。如果土工合成材料的拉力超过拉拔试验的抗剪强度, 土工合成材料就会拔出; 如果土工合成材料的拉力超过抗拉强度, 土工合成材料就会拉断, 一旦土工合成材料拔出或拉断, 就会发生圆弧滑动破坏。如果软土地基压缩性过大, 就会发生路堤和土工合成材料整体过量沉降。

土工合成材料加固软土地基工程中, 土工合成材料的主要作用: ①土工合成材料与软土地基的界面摩擦作用, 界面摩擦改变浅层软土的应力和应变状态, 限制侧向变形, 阻止侧向挤出, 增加侧向压力, 减小剪应力, 相当于提高浅层软土的抗剪强度; ②应力扩散和均匀化作用, 土工合成材料一方面使路堤的荷载扩散到较大的面积上, 另一方面使路堤中心处的垂直应力减小, 坡脚处的垂直应力增大, 出现非梯形近似矩形的压力分布, 所以软土地基表面竖向压力减小, 作用面积增大, 分布趋向均匀^[6,7]。

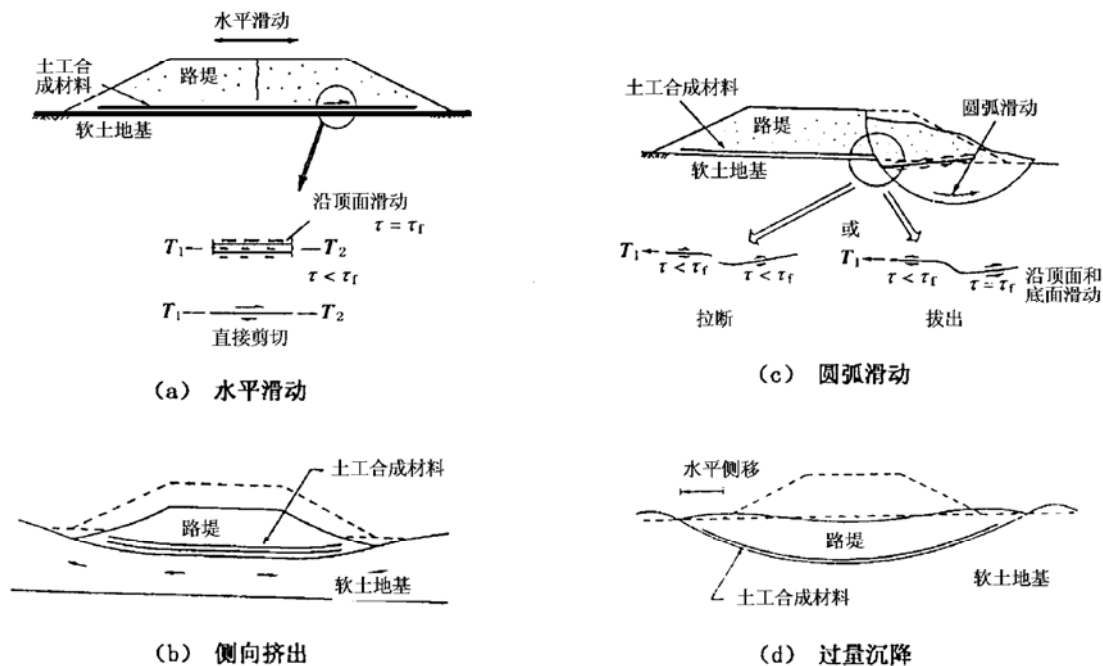


图1 可能的破坏方式

Fig.1 Kinematically admissible failure modes

4 几处笔误

“原文”可能有以下几处笔误：

①图8中， T 应为 T_1 ；

②图9中， T 应为 T_2 ；

③图9中， $T_2 = \frac{1}{2} \gamma K_a H^2 = 0.5 \times 16.7 \times 0.4 \times 3^2 = 30$

kN/m，平均剪应力为 $30/5 = 6$ kPa。

参 考 文 献

- 徐少曼等. 提高土工织物加筋效果的新途径. 岩土工程学报, 1997, 19 (2): 49 ~ 55
- Rowe R K, Soderman K L. Stabilization of very soft soils using

high strength geotextiles: The role of finite element analyses. Geotextiles and Geomembranes, 1988: 53 ~ 80

- Bergado D T, etc. Performance of full scale embankment on soft Bangkok clay with geogrids reinforcement. Proc. 5th Int Conf on Geosynthetics, Singapore, 1994
- 张道宽. 加筋垫层与砂井加固软基的应用研究. 地基处理, 1991, 2 (2): 1 ~ 9
- Rowe R K. Reinforced embankment on soft cohesive deposits. Application of Geosynthetic Technology, Jakarta, Indonesia, 1992
- 赵九斋等. 土工织物加固路基和天然路基对称破坏及其分析. 岩土工程学报, 1991, 13 (2): 73 ~ 81
- 刘吉福等. 一种考虑土工织物抗滑作用的稳定分析方法. 地基处理, 1996, 7 (2): 1 ~ 5

对“土工合成物加强软土地基的极限分析”讨论的答复

沈珠江

南京水利科学研究院土工所, 南京, 210024)

吴景海和陈环先生对“原文”提出了3点讨论意见, 并指出原文中的一些笔误, 笔者对此表示感谢。现就讨论中提出的问题集中两个方面作一答复。

1 关于“极限分析”一词的理解

笔者在60年代初提出散粒体极限平衡理论, 把极限分析理解为极限平衡方程的求解方法, 包括用特征线法求数值解和用极值原理求近似解。后来, 以陈惠发为代表的西方学者把极限分析只理解为用极值原理求近似解, 而且把以库仑理论和瑞典圆弧法为代表的古典分析方法称之为极限平衡方法, 并把它与极限分析方法对立起来。笔者已多次证明, 包括“原文”中图6的证明, 基于力

矢和力矩平衡的古典方法与极限分析中的可动解法是等价的。“讨论”在表1中列出了汉森公式与圆弧法计算结果的差别是不难说明的。第一, 作为一种可动解, 必须假定不同的滑动面, 求安全系数的极小值。许多公式的提出者没有这样做, 所得的安全系数自然偏高。其次, 圆弧法中选定的可动速度场是刚性旋转运动。对此可以有两种理解, 其一是圆弧法中采用了剪胀角为零的非正交流动法则。已经证明, 由非正交流动法则得出的安全系数大大低于基于正交流动法则的结果。其二是认为圆弧法的基础是笔者