考虑织物摩擦及抗拉作用的稳定分析方法

胡成海　　洪昌华
（浙江中达建设集团公司）　（萧山市第二建筑工程公司）

一 前 言

土工织物加筋堤坝软基由于其效果显著，已经在工程中得到广泛应用。传统的对加筋体系进行稳定分析的方法有两种，即“瑞典法”和“荷兰法”。这两种方法的共同特点是在圆弧滑动法的基础上，直接将土工织物受拉而产生的抗滑力加到滑动面上土体的抗滑力中去。这两种方法的概念明确，简单方便，所以大量地应用于土工织物加筋软基后的稳定分析中。但是这两种方法求出的安全系数经常比实际小很多。如三茂铁路基塘软基高路堤[1]，计算安全系数为 0.794；青岛前湾港防波堤[2]，计算安全系数为 0.801；黄浦港试验堤[3]，计算安全系数为 0.907；然而这些堤坝建成后的运行却证明稳定，加筋是成功的。这些安全系数的计算值都只比未考虑筋材力时的值提高很小，一般为 2%~6%[4]。可见这两种分析方法均未能充分体现织物加筋的作用。本文下面提出一个综合考虑织物加筋效应(抗拉作用和摩擦作用)的稳定分析方法。

二 土工织物对加筋体系的稳定作用

如图 1 所示为用土工织物加筋后的堤坝在濒临滑动破坏时的示意图。图示为变形后织物拉力和滑弧相切(荷兰法)。分析可以知道，在土工织物与滑动面交点处，土工织物发挥出的拉力阻止土体相对滑动。并且在土工织物和土体的交界面上有摩擦作用(这种摩擦作用和织物中的拉力相平衡，防止织物被从土中拉出)。这种摩擦作用将会改变地基中各点的应力状态，表现在变形上，界面摩擦力可以减小土体的侧向位移，阻止土体的侧向滑动。

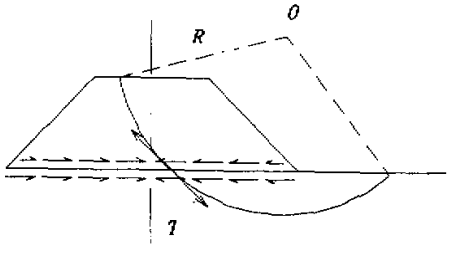


图 1　加筋体系的受力分析

很明显，前述的荷兰法或瑞典法实际上只考虑了土工织物的抗拉作用产生的抗滑力矩，而没有考虑土工织物发挥的摩擦作用，从而使计算出的稳定安全系数偏小。因此本文

提出同时考虑织物这两种作用的计算方法。

设计合理的软基加筋工程，土工织物可以依靠界面摩擦力锚固在土内(即产生自锚固作用)[5]。这里讨论的正是在土堤濒临破坏时界面上还没有达到摩擦强度的情况下的摩擦力分布。

通过大量的有限元分析发现，土工织物与土之间摩擦力的分布形式为如图 2 所示的三角形。在堤轴线上和堤脚处为零，最大摩擦力出现在距堤趾 D 处。由于 D 值很小，一般只有(1/15~1/20)B，所以为简化计算起见，摩擦力采用图 3 所示的分布。摩擦力的峰值由平衡关系采用下式计算：

$$f_{\max}=\frac{2T}{B} \tag{1}$$

式中，B 为堤底宽度；T 为织物所发挥出来的拉力（确定方法下详）。

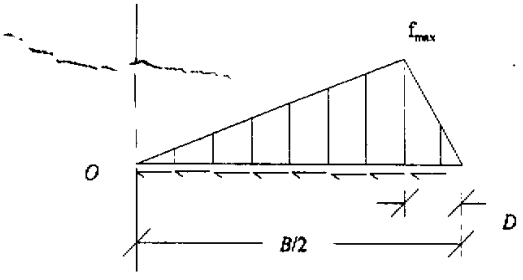


图 2　织物界面摩擦力的分布

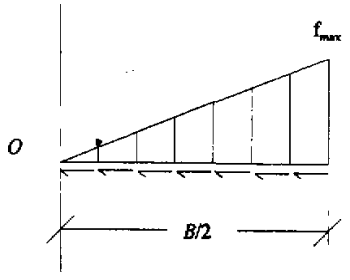


图 3　摩擦力分布的简化

三　新的稳定分析方法

本分析方法是对刘吉福等[6]提出方法的改进。把堤体的重量以及织物与土体之间的摩擦力当作外加荷载，就可以算出地基内各点的应力状态。结合极限平衡稳定分析方法计算安全系数，这就考虑了土工织物引起地基土体中应力状态的改变对稳定的影响。如图 4 所示为织物加筋地基所受荷载示意图，堤坝按垂直梯形荷载考虑，织物的水平摩擦力按三角形分布考虑。

文献[6]采用有限元法计算各土条中点的应力状态。为了使本法更加实用化，本文采用弹性理论公式来计算地基土体各点的应力状态。虽然假定土体为线弹性体计算出的位移和沉降与实际相差比较大，但是求出的应力分布还是比较符合实际情况的。

根据 Fronlich 建议的对 Flamant 解答的修正，并取应力集中系数v=3，可以得到竖

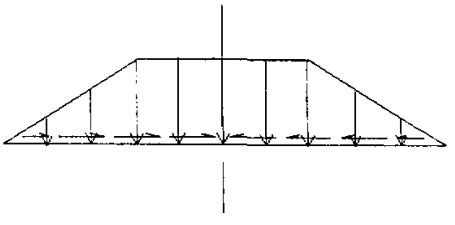


图 4　加筋地基所受到的荷载

直线荷载作用下半无限体地基内的附加应力分布(如图 5 所示)。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_z &= \frac{2\bar{p}z^3}{\pi(x^2+z^2)^2}\\ \sigma_x &= \frac{2\bar{p}x^2z}{\pi(x^2+z^2)^2}\\ \tau_{xz} &= \frac{2\bar{p}xz^2}{\pi(x^2+z^2)^2}\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

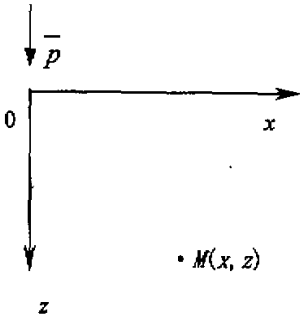


图 5

根据 Öhde 建议的对 Cerruti 解答的修正，并取应力集中系数v=3，可以得到水平线荷载作用下半无限体地基内的附加应力分布(如图 6 所示)。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_z &= \frac{2\bar{Q}xz^2}{\pi(x^2+z^2)^2}\\ \sigma_x &= \frac{2\bar{Q}x^3}{\pi(x^2+z^2)^2}\\ \tau_{xz} &= \frac{2\bar{Q}x^2z}{\pi(x^2+z^2)^2}\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

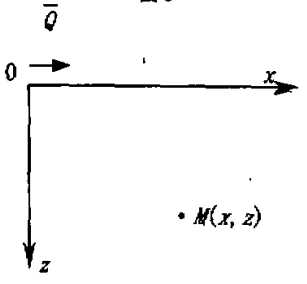


图 6

将式(2)和式(3)按不同的形式积分，可以得到所需要的不同荷载分布形式(垂直均布荷载、垂直三角形分布荷载、水平三角形分布荷载)下地基中任一点的附加应力[5]。文献[5]中这些公式已经制成表格，使用时可以方便地查用。

考虑织物抗拉作用和摩擦作用的稳定分析方法的具体步骤如下：

(1)假定一个滑弧的位置(圆心和半径)；

(2)将滑弧内土体分成若干垂直土条(N 条)，求出每个土条底部中点的坐标；

(3)查表或按公式求出土条底部中点由提身垂直荷载和织物摩擦作用的水平荷载产生的附加应力，并叠加上该点的原有地基自重应力，求得这点的应力σ_{xi}，σ_{zi}和τ_{xzi}；

(4)求这一点的沿半径方向的法向应力σ_{ni}和沿圆弧切线方向的τ_{si}(图 7)；

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{ni} &= \frac{\sigma_{xi}+\sigma_{zi}}{2} + \frac{\sigma_{xi}-\sigma_{zi}}{2}\cos 2\alpha_i - \tau_{xzi}\sin 2\alpha_i\\ \tau_{si} &= \frac{\sigma_{xi}-\sigma_{zi}}{2}\sin 2\alpha_i + \tau_{xzi}\cos 2\alpha_i\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

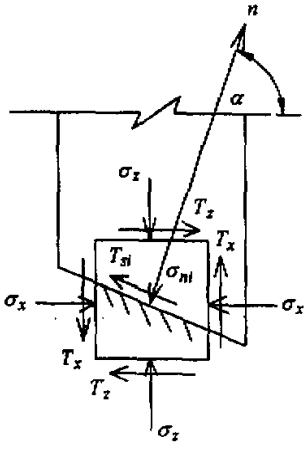


图 7　土条中点各应力分量之间的关系

(5)用 Bishop 的安全系数定义求稳定安全系数。其中土工织物的拉力在圆弧面上所起的抗滑作用按荷兰法或瑞典法一样的方式来考虑，即将T(荷兰法)

或$T\sin\alpha + T\cos\alpha \cdot \mathrm{tg}\,\delta$(瑞典法，其中$\alpha$是织物和滑弧交点法线方向与水平面的夹角，$\delta$为织物和土界面上的摩擦角)直接加入到土体在滑动面上所能动用的抗剪强度中去。式(5)所示为按荷兰法计入织物拉力的计算公式。

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{N}(c_i l_i + \sigma_{ni} l_i \mathrm{tg}\varphi_i) + T}{\sum_{i=1}^{N}\tau_{si} l_i} \tag{5}$$

式中，l_i是第i土条所占的圆弧长度；c_i，φ_i是第i土条底部中点所处土层的抗剪强度指标。

(6)重复以上步骤按优化方法(如二分法)寻找最危险滑弧和最小安全系数。

步骤(5)中的T应该是当加筋土堤处在极限状态时织物所发挥的拉力。很多文献在分析时用抗拉强度代入[4]，或用实测拉力值代入计算加筋的贡献[5](而这些工程大多是取得成功的)，这从物理意义上来说是不合理的。不过这样做引起的误差并不很大。在不同的加筋条件下，织物发挥的拉力究竟有多大，迄今并无明确的答案。本文如下所分析的一个实例中，T是按实测值代入计算的。

四　稳定分析实例

为了验证本文所提出的稳定分析方法的合理性，对三水—茂名铁路基塘软土地基上的土工织物加筋路堤进行了稳定计算。如下所用的资料来源于文献[3]。1983 年 6 月决定三茂铁路年底铺轨到北江，其中有两段在软土地基上的高路堤成为控制工程。这里只对 2#试验堤进行稳定分析。2#工点只用了 43 天就填至设计高度 9.2m，后来还加高了 1.5m，模拟列车重量予以预压，试验证明路堤是稳定的。地层情况如下表：

表 1　三茂铁路基塘软土地基地层参数

地　层	厚度 (m)	含水量 ω(%)	容重 γ(kN/m³)	孔隙比 e	无侧限抗压强度 q_u(kPa)	不排水抗剪强度 φ_u(°)	c_u(kPa)
砂粘土	1～3	24.7	17.2～18.6	0.97	46.0		
泥炭土，软粘土	5～7	103～439	10.9～13.8	3.25～5.14	9～14	0	5～14

本工程用了两层土工织物加筋。当填至 8.3 m 时，实测得土工织物的拉力为每层 17.5 kN/m，两层共是 35 kN/m。由于织物是铺在砂垫层内，所以在计算时土工织物与砂垫层的摩擦角δ取为 30°。

采用本文所述的方法，对路堤高度为 9.2 m 时，分不用土工织物和铺设两层土工织物的情况进行了稳定分析，计算的结果见表 2。从表中可见，荷兰法(或瑞典法)计算出的稳定安全系数与不考虑织物加筋作用时求得的安全系数相差很小。说明这两种方法没能完全表达织物加筋对稳定作用的贡献。而按本法求出的安全系数是 1.089。实际填土时，在堤高 8.3 m 时，由于填土过快，产生了大变形，最大地基水平变形达 40.5 cm/d，最大沉降达 41.9 cm/d，说明地基已产生了局部破坏，只是因为两层土工织物承受了拉力，才保持

了填土的整体性，阻止路堤的整体滑动破坏。同时因为土工织物的作用，地基应力得到调整，又恢复到临界状态以及稳定状态[3]。计算的结果也表明了这一点，说明按本法求得的安全系数更符合实际情况，比荷兰法或瑞典法更能体现织物加筋对土堤整体稳定的贡献。

表2 不同稳定分析方法的计算结果对比

无织物	织物加筋		
（Bishop 方法）	瑞典法	荷兰法	本文方法*
0.663	0.720	0.7224	1.089

注：织物的拉力发挥的稳定作用按荷兰法计算，即式(5)。

五 结 语

在进行堤坝下软基的稳定分析时，土工织物的加筋效应主要包括两个方面，即土工织物的抗拉作用以及织物与土体之间的摩擦作用。现行的加筋稳定分析方法只考虑织物的抗拉作用一项，因而计算结果与实际相差很远。本文提出的分析方法考虑了织物的摩擦作用使地基内的应力场发生改变的效应，因而能充分体现加筋材料对地基稳定的贡献，计算结果比较接近实际

参文献考

[1] 乔正寿：《土工织物与砂井综合处理软土地基——基塘软土地基的高路堤试验总结》，见《全国第一届土工合成材料学术会议论文集》，天津，1987.

[2] 曾锡庭：《青岛前湾港工作船港地防波堤现场试验与分析》，1991.

[3] 乔正寿：《土工织物加固软土路堤的稳定分析》，见《全国第七届土力学及基础工程学术会议论文集》，中国建筑工业出版社，1994.

[4] 俞仲泉等：《土工织物加固堤坝软基的试验研究》，河海大学，1992.

[5] 洪昌华：《堤坝下软基土工织物加筋效果的非线性分析》[硕士学位论文]，福州大学，1997.

[6] 刘吉福，龚晓南等：《一种考虑土工织物抗滑作用的稳定分析方法》，见《地基处理》，1996.7(2).