

加筋土边坡稳定性分析的水平条分法

范鹏贤¹ 陈灿寿¹ 黄育²

(1. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏南京 210007; 2. 解放军 73670 部队, 江苏南京 210042)

【摘要】 加筋土是一种新型的经济可靠的边坡加固方式。针对新型加筋土边坡带来的问题和基于垂直条块划分的极限平衡方法的不足,提出了一种严格满足力与力矩的平衡的极限平衡分析方法。基于水平条块的严格条分法将滑体水平的划分成若干条块,边坡中的加筋材料产生的抗力作为附加外力作用于条块上,再应用极限平衡的思想和假设对典型条块的受力状态进行分析。根据极限平衡条件推导了边坡安全系数的隐式表达式,再通过力矩的平衡,求解条间力待系数,进而叠代求解安全系数。说明了利用本文公式计算坡顶极限承载力的方法。该方法计算结果较经典极限平衡法结果稍大。

【关键词】 加筋土;水平条块;极限平衡法;极限承载力

【中图分类号】 TU 457

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2010.02.001

Limit Equilibrium Method for Reinforced Slope Based on Horizontal Slice

Fan Pengxian Chen Chanshou Huany Yu

(1. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China; 2. No. 73670 army of PLA, Nanjing 210042, Jiangsu, China)

【Abstract】 Reinforced soil is a new economical and dependable method of slope reinforcement. Aimed at problems new type reinforced soil slope brought and the shortage of limit equilibrium method based on vertical slice, a rigorous approach based on horizontal slice for limit equilibrium analysis method is presented, in which the reinforcement force was assumed horizontal and failing at its maximum tensile strength. Limit equilibrium method based on horizontal slice divide slide body into horizontal slices, regards the resistance of reinforced material as additional outer forces, and then apply assumptions of limit equilibrium method to analyze forces acting on slices. Status of typical slice is analyzed, and implicit expression is derived by utilize of force equilibrium. The coefficient of interslice force is solved through moment equilibrium, and ultimately the real safety factor is approached iteratively. Bearing capacity of slope is also studied. Case study shows that the result of the method presented is a little bigger than classic limit equilibrium method.

【Key words】 reinforced soil; horizontal slice; limit equilibrium method; bearing capacity

0 引言

极限平衡法是岩土工程中应用最广泛的稳定性分析方法,其原理简单,计算方便,能给出工程易于接受的稳定性指标^[1]。传统的极限平衡法主要是基于垂直条块, Sarma 法^[2]虽然采用了倾斜条块,但条块倾角仍然在竖直方向左右。在处理层状土(如分层碾压路基)和加筋土边坡的稳定性时,由于土层在竖直方向的不均一和加筋材料的拉力(一般为水平拉力),条块间的未知力增加,给基于垂直条块的极限平衡法带来了很大的困难。

为克服土层重度不一,竖向抗剪参数等指标变化的困难,国内外一些学者提出了水平划分条块的

水平条分法^[3-6]。陈昌富等^[4,5]根据成层岩土体的特点,采用水平条分法分析边坡稳定性,并利用遗传进化算法搜索边坡稳定性最小安全系数及其对应的滑动面,取得了较好的效果。王志斌等^[6]采用极限平衡水平条分法,推导了计算其安全系数和极限承载力的理论公式,并与足尺试验模型结果做了对比。结果表明极限平衡水平条分法简单可行,且具有较高的可靠性。

实践已经证明加筋土结构是成功的,但稳定性分析方法仍处于发展阶段^[7,8]。对于加筋土边坡的稳定性分析,现阶段多采用简化设计方法,一般采用传统的圆弧滑动法(简化 Bishop 法或瑞典条分法)

的基本假设。此类方法不考虑边坡加筋后滑动面位置的改变和条块之间的作用力,不能真实反映边坡的工作状态。Shahgholi M 等^[3]初步将水平条分法引入到加筋土挡墙的受力及变形分析中,但其工作并非针对一般的加筋土边坡,假设也过于复杂。

本文基于水平条块划分和力平衡和力矩平衡,通过引入条间力函数,使各典型条块满足严格的极限平衡条件,推导了水平条分法的安全系数计算公式,并给出了安全系数和坡顶极限承载力的迭代计算方法。

1 基于水平条块的严格条分法

为了简化问题,首先对问题作如下几个假设:

- 滑动面是任意的,但滑面出口总在坡趾以上;
- 筋材产生的附加抗力是水平的,已有研究表明,边坡整体安全系数对抗力作用角度的微小变化是不敏感的^[9];
- 边坡达到临界状态时,加筋材料未发生拔出;
- 加筋材料的抗力与边坡按同一安全系数折减;
- 条间切向力与法向力成比例,比例系数与条块的位置成一定的函数关系。

加筋土边坡以及水平条块划分的示意图见图1。典型条块的受力状态的示意图见图2。

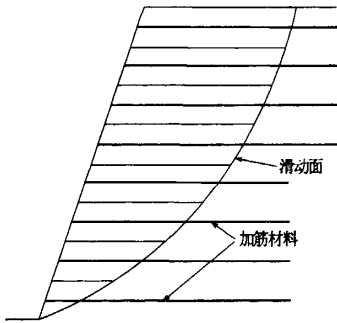


图1 滑体及条块划分

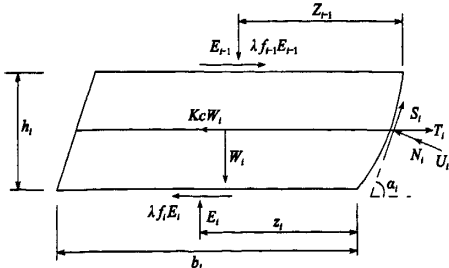


图2 典型条块

典型条块上作用的力主要有

- 条块的自重 W_i ;

- 地震力 $K_c W_i$, K_c 是水平地震影响系数;
- 加筋材料的拉力 T_i ;
- 水压力的合力 U_i , $U_i = u_i b_i \sec \alpha_i$ 。

式中: u_i 是平均水压力, α_i 为滑面倾角;

- 滑动面上有效法向力 N_i ;
- 调用的抗剪强度 S_i , 由莫尔-库仑准则有

$$S_i = (N_i' \tan \varphi_i' + c_i' b_i \sec \alpha_i) / F_s$$

式中: φ_i' 和 c_i' 分别是有效摩擦角和沿滑动面的凝聚力, F_s 是安全系数;

- 条块间法向力 E_i 和 E_{i-1} , 与底面的垂直距离分别是 z_i 和 z_{i-1} ;

- 条块间的剪切力 $\lambda f_i E_i$ 和 $\lambda f_{i-1} E_{i-1}$, f 为条间力函数。

根据力的平衡,将所有的力沿滑面法向和切向分解有:

$$N_i' = (W_i + E_{i-1} - E_i) \cdot \cos \alpha_i + (T_i + \lambda f_{i-1} \times E_{i-1} - \lambda f_i E_i - K_c W_i) \cdot \sin \alpha_i - U_i \quad (1)$$

$$S_i = (N_i' \cdot \tan \varphi_i' + c_i' b_i \sec \alpha_i) / F_s$$

$$S_i = (W_i + E_{i-1} - E_i) \cdot \sin \alpha_i + (K_c W_i + \lambda f_i E_i - \lambda f_{i-1} E_{i-1} - T_i) \cdot \cos \alpha_i \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)得

$$E_i [F_s (\sin \alpha_i - \lambda f_i \cos \alpha_i) - \tan \varphi_i' (\cos \alpha_i + \lambda f_i \cdot \sin \alpha_i)] = E_{i-1} [F_s (\sin \alpha_i - \lambda f_{i-1} \cos \alpha_i) - \tan \varphi_i' (\cos \alpha_i + \lambda f_{i-1} \sin \alpha_i)] + \tan \varphi_i' [W_i (K_c \sin \alpha_i - \cos \alpha_i) - T_i \sin \alpha_i + U_i] + F_s [W_i (\sin \alpha_i + K_c \cos \alpha_i) - T_i \cos \alpha_i] - c_i' b_i \sec \alpha_i \quad (3)$$

式(3)可以简化为下式

$$E_i \Phi_i = \psi_{i-1} E_{i-1} \Phi_{i-1} + F_s A_i - B_i \quad (4)$$

其中:

$$\Phi_i = F_s (\sin \alpha_i - \lambda f_i \cos \alpha_i) - \tan \varphi_i' (\cos \alpha_i + \lambda f_i \sin \alpha_i)$$

$$\psi_{i-1} = \frac{F_s (\sin \alpha_i - \lambda f_{i-1} \cos \alpha_i) - \tan \varphi_i' (\cos \alpha_i + \lambda f_{i-1} \sin \alpha_i)}{\Phi_{i-1}}$$

$$A_i = W_i (\sin \alpha_i + K_c \cos \alpha_i) - T_i \cos \alpha_i$$

$$B_i = \tan \varphi_i' [W_i (\cos \alpha_i - K_c \sin \alpha_i) + T_i \sin \alpha_i - U_i] + c_i' b_i \sec \alpha_i$$

根据端部条件 $E_n = 0$, 再由式(4)可推导出安全系数 F_s 表达式:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (B_i \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \psi_j) + B_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (A_i \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \psi_j) + A_n} \quad (5)$$

上式为隐式方程,两边都含有安全系数,并且包含假设的条件力函数及其待定系数,因此需要用迭代方法求解。

再考虑条块的力矩平衡,对条块右侧基底中心

取力矩:

$$E_i \left(z_i + \frac{h_i}{2 \tan \alpha_i} \right) = E_{i-1} \left(z_{i-1} - \frac{h_i}{2 \tan \alpha_i} \right) -$$

$$\frac{1}{2} \lambda h_i (f_i E_i + f_{i-1} E_{i-1}) + \frac{1}{2} W_i b_i \quad (6)$$

设 $M_i = E_i z_i$, $M_{i-1} = E_{i-1} z_{i-1}$

代入式(6),得

$$M_i = M_{i-1} - \frac{h_i}{2 \tan \alpha_i} (E_i + E_{i-1}) -$$

$$\frac{1}{2} \lambda h_i (f_i E_i + f_{i-1} E_{i-1}) + \frac{1}{2} W_i b_i \quad (7)$$

同样有: $M_n = 0$, 根据力矩平衡方程可以解出比例系数 λ 。

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n [-h_i (E_i + E_{i-1}) / \tan \alpha_i + W_i b_i]}{\sum_{i=1}^n [h_i (f_i E_i + f_{i-1} E_{i-1})]} \quad (8)$$

根据求得的 λ 重新计算安全系数, 如此循环, 即可逐步逼近满足严格平衡条件的解。求解步骤可以表述见图 3。

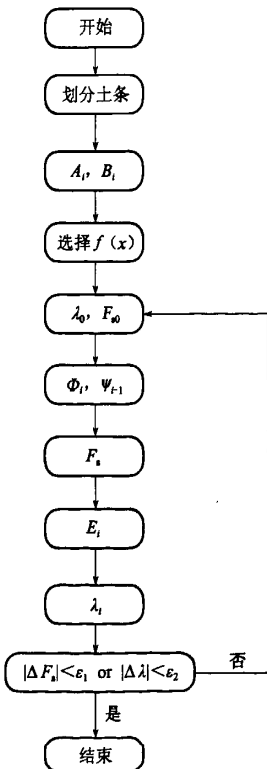


图 3 安全系数计算流程图

2 边坡的极限承载力

加筋土边坡的安全要求, 主要是抗滑稳定, 但是在公路工程中, 坡顶需要承载车辆等作用的荷载, 常

常需要知道边坡在一定的安全系数下所能承受的最大荷载, 即极限承载力。水平条块的思想, 同样可以应用到极限承载力的计算。

只需对边界条件作稍微改变即可求解边坡的极限承载力。在坡顶有荷载的情况下, 坡顶第一个条块上作用的力为 $E_0 = qa$, 力矩为 $M_0 = 0.5qa^2$ (a 为坡顶破裂面的宽度), 在达到极限平衡的时候, 仍然有 $E_n = 0$ 和 $M_n = 0$ 。利用公式(3)和公式(7), 调整荷载密度 q , 使之满足 $E_n = 0$ 和 $M_n = 0$, 即得到边坡的极限承载力 q_{max} 。

3 算例

极限平衡法用于加筋土边坡稳定性分析的例子较少。图 4 是一个 Andrzej Sawicki^[10] 计算过的均匀加筋边坡理想模型, 其物理力学参数为 $c=0, \varphi=30^\circ, \gamma=17 \text{ kN/m}^3$, 加筋材料在每平方米的截面可提供的拉力为 $\sigma=60 \text{ kN/m}^2$ 。假定滑面为平面时, Andrzej Sawicki 计算的极限荷载为 $P=195 \text{ kN/m}^2$, 而假定滑面为二折线时, 计算得到的加筋土边坡的极限荷载为 $P=183.4 \text{ kN/m}^2$, 即在此荷载下边坡达到极限平衡状态, 安全系数为 1.0。

利用本文方法, 假设滑面为圆弧, 固定坡顶滑面入口, 分别在以上两种荷载下搜索最小安全系数, 结果为 0.999 和 1.046, 与文献[3]方法基本吻合, 与文献[3]提到的对比方法也相差在 5% 之内。而如果利用文献[10]给出的直线和二折线作为滑动面(见图 4), 边坡在 $P=195 \text{ kN/m}^2$ 的荷载作用下的安全系数, 结果分别为 1.07 和 1.02, 安全系数比 Andrzej Sawicki 的计算结果稍大。考虑到一般极限平衡法不能完全考虑加筋土边坡中筋材提供的拉力的作用, 给出的安全指标偏于保守, 这个结果是比较合理的。本文方法同样适用于粘性土填料。

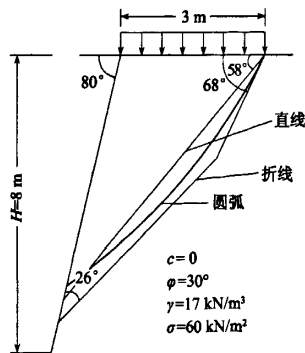


图 4 算例边坡示意图

参 考 文 献

- [1] 任光勇,张忠苗,宋仁乾. 桩身混凝土在竖向荷载作用下的压缩量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2):348-354.
- [2] 陈竹昌. 单桩桩身压缩量的分析计算[J]. 中国公路学报, 1992, 1(5):69-75.
- [3] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1995.
- [4] 何 剑. 后注浆钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6):743-746.
- [5] 叶列平. 混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [6] 郭忠贤,杨志红. 大直径灌注桩承载性状的试验研究[J]. 工程勘察, 2000(2):22-26.
- [7] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.

收稿日期:2010-03-01

(上接第 57 页)

4 结 论

分析了加筋土边坡给基于极限平衡的竖向条分法带来的实际困难,提出了一种新颖的基于水平条块的严格满足力的平衡及力矩平衡的极限平衡方法,推导了安全系数计算公式,并给出了边坡极限承载能力和安全系数的迭代求解方法。算例计算结果表明,本文方法计算的安全系数较经典算例的结果稍大。

该方法虽然还要对实际情况作一些理想化假设,并且安全系数在一定程度上受到条件力函数的影响,但是该法相对于传统的圆弧滑动法和直线滑裂面的极限平衡法,具有较严格的力学基础。该法假设滑动面出口位于坡趾以上,适用于地基承载力较好的陡边坡的稳定性分析。如果对本文方法进一步改进发展,有望为加筋土边坡稳定性分析提供一个新的途径。

参 考 文 献

- [1] Zhu D Y, Lee C F, Jiang H D. Generalized Framework of Limit Equilibrium Methods and Numerical Procedure for Slope Stability Analysis[J]. Geotechnique, 2003, 53(4): 377-395
- [2] 范鹏贤,郭志昆,朱大勇. 牛顿法计算 Sarma 法边坡安全系数[J]. 防灾减灾工程学报. 2006, 28(3): 274-278.
- [3] Shahgholi M, Fakher A, Jones C J F P. Horizontal slice method of analysis[J]. Geotechnique, 2001, 51(10): 881-885.
- [4] 陈昌富,杨 宇. 边坡稳定性分析水平条分法及其进化计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2004, 31(3): 72-75.
- [5] 陈昌富,杨 宇,龚晓南. 基于遗传算法地震荷载作用下边坡稳定性分析水平条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1919-1923.
- [6] 王志斌,李 亮,杨小礼. 水平条分法在贴坡高填方路堤稳定性分析中的应用[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 29-34.
- [7] 肖成志,刘 波,栾茂田. 土工合成材料及其加筋结构的研究现状[J]. 岩土工程技术, 2008, 22(2): 79-84.
- [8] 乔丽平,王 钊. 加筋土挡墙和陡坡研究现状[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2004, 26(4): 317-320.
- [9] Ennio M. Palmeira, Jose H. F., Antonio R. L. da Silva. Backanalyses of geosynthetic reinforced embankments on soft soils[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1998, 16: 273-292.
- [10] Andrzej Sawicki. Mechanics of Reinforced Soil[M]. Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 2000.

收稿日期:2009-12-16