

The Second Development of the Reinforced Structure Stability Analysis Program Based on PLAXIS

Xiaosong Tang^{1,2}, Zhixiang Liu³, Wei Luo⁴, Yongfu Wang²

¹China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co. Ltd., Chongqing

²Engineering and Technology Research Center of Geological Hazard Prevention and Treatment, Chongqing

³Civil King Information Technology Company Limited, Beijing

⁴GRAPHISOFT Beijing Rep. Office, Beijing

Email: hnm97@163.com

Received: Apr. 27th, 2018; accepted: May 11th, 2018; published: May 18th, 2018

Abstract

The shear features and pullout features have specified application when the reinforced structure becomes unstable due to the different interactions between geosynthetics and filling soil and the combined pull-shear features of geosynthetics interface. In the stability analysis of the reinforced structure the same interface strength indices were used which only consider one of the features of direct shear or pullout, has certain limitation. Based on the PLAXIS program, the second development of reinforced soil slope stability analysis program is carried out in the paper. FEM strength reduction is adopted to obtain the safety factor of stability and search the potential sliding surface. The analysis of loop iteration is formed after the adjustment of interface parameters according to the situation of sliding surface till the interface features of geosynthetics and its interaction between soil are identical. The stability analysis results of calculation examples of reinforced soil slope show that the analytic method can fully reflect the reinforced effects of geosynthetics to assure the reasonableness of stability analysis of reinforced structure.

Keywords

Interface Features, Pull-Shear Combination, Geosynthetics, FEM Strength Reduction, Reinforced Structure

基于PLAXIS的加筋体结构稳定分析程序的二次开发

唐晓松^{1,2}, 刘志祥³, 罗伟⁴, 王永甫²

¹招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆

²重庆市地质灾害防治工程技术研究中心, 重庆

³北京金土木信息技术有限公司, 北京

⁴香港图软亚洲有限公司, 北京

Email: hnm97@163.com

收稿日期: 2018年4月27日; 录用日期: 2018年5月11日; 发布日期: 2018年5月18日

摘要

当加筋体结构发生失稳破坏时, 由于土工合成材料和填土之间作用形式的不同, 直剪特性和拉拔特性具有各自的应用范围, 有时还应综合考虑土工合成材料界面的拉-剪组合特性, 而目前加筋体结构的稳定分析中针对土工合成材料界面通常采用同一界面强度指标, 仅单一的考虑直剪特性或拉拔特性中的一种, 存在一定的局限性。文章基于PLAXIS程序进行了加筋土边坡稳定分析程序的二次开发, 通过有限元强度折减法进行稳定安全系数的求解和潜在滑动面的搜索, 基于潜在滑动面的形态进行土工合成材料界面参数的调整, 从而形成循环迭代分析, 直至土工合成材料的界面特性和其与土体之间的相互作用形式一致。文中加筋土边坡算例的稳定分析结果表明, 该分析方法能充分反映土工合成材料的加筋作用, 从而保证加筋体结构稳定分析的合理性。

关键词

界面特性, 拉-剪组合, 土工合成材料, 有限元强度折减, 加筋

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于加筋体结构是一种较易实现、价格低廉的结构形式, 因此其在各类填方工程中的应用日趋广泛, 其高度和规模也都在不断地刷新纪录[1] [2] [3]。目前, 加筋体结构的稳定分析主要采用极限平衡法与有限元数值方法两种方法[4] [5] [6]。其中以有限元法为代表的数值方法由于能模拟施工过程, 并考虑土工合成材料和填土之间的相互作用, 因此越来越受到重视, 并有望成为未来发展的方向。

加筋体结构由土工合成材料和填土两种性质迥异的材料组成, 因此在加筋体结构稳定分析的研究中, 关于土工合成材料和填土之间界面特性的研究一直是重点和难点。关于土工合成材料和填土界面特性的研究大都基于摩擦加筋理论, 以室内试验的研究方法最为常见, 主要有直剪试验和拉拔试验两种[7] [8] [9] [10]。两种方法由于试验机理的差异, 得到的界面强度、变形特性、界面应力应变关系曲线等均有很大的不同。关于两种试验结果的合理性和适用性的问题, 国内外学者展开了积极的研究, 但始终没有定论。因此, 目前加筋体结构的稳定分析中针对土工合成材料界面通常采用同一界面强度指标, 仅单一的考虑直剪特性或拉拔特性中的一种, 存在一定的局限性, 亟需探寻新思路和新方法解决这一问题。

文章通过分析加筋体结构发生失稳破坏时土工合成材料和填土之间相互作用的形式可以发现, 土工合成材料有时发挥的是抗拉拔作用, 有时发挥的是抗剪切作用, 因此基于室内土工合成材料直剪试验和拉拔试验得到的界面强度指标应区别各自的适用范围。在此基础上, 基于 PLAXIS 岩土有限元计算分析

软件进行了加筋土边坡稳定分析程序的二次开发,通过当前步土工合成材料界面参数赋值→当前步加筋体结构稳定分析→自动搜索潜在滑动面→基于当前步失稳破坏时土工合成材料和土体之间的相互作用形式调整土工合成材料界面参数→下一步加筋体结构的稳定分析的封闭循环进行稳定性的迭代分析,直至土工合成材料的界面特性和其与土体之间的相互作用形式一致,进一步完善了有限元数值方法在加筋体结构稳定分析中的应用。

2. 基于土工格栅和土体之间相互作用的形式研究其界面特性

由图 1 可以看出,加筋体结构发生失稳破坏时,土工合成材料和填土之间的相互作用有以下三种形式:

形式 1: 当土工合成材料位于潜在滑动面后部时,此时土工合成材料和土之间相对变形的形式是土工合成材料相对填土有被拨出的趋势,因此对于这部分土工合成材料的界面特性采用拉拔试验得到的界面强度指标进行模拟显然更合理。

形式 2: 当土工合成材料与潜在滑动面平行时,此时加筋体结构破坏时土工合成材料和土之间相对变形的形式是土体沿土工合成材料界面发生剪切滑移,对于部分土工合成材料的界面特性则采用直剪特性试验得到的界面强度指标进行模拟更为合理。

形式 3: 当土工合成材料位于潜在滑动面内部时,此时土工合成材料通过对周围填土的嵌固和咬合,阻止填土沿土工合成材料界面发生剪切滑移,因此也应采用直剪特性试验得到的界面强度指标模拟这部分土工合成材料的界面特性。

由上述分析可以看出,加筋体发生失稳破坏时,不同部位的土工合成材料和填土之间有不同的作用形式,因此直剪试验和拉拔试验得到的土工合成材料界面强度指标应明确各自的应用范围,综合考虑土工合成材料拉-剪组合的界面特性,这样才能保证加筋体结构稳定分析的合理性。

3. 基于拉-剪组合界面特性的加筋体稳定分析

3.1. 有限元强度折减法基本原理

有限元强度折减法是以岩土体弹塑性理论为力学基础,通过有限元数值模拟求出应力、应变等力学状态,通过强度折减求出极限破坏状态。其基本思想与传统极限平衡法的思想是一致的,先将土体强度参数进行不断折减,而后根据折减后的强度参数进行有限元计算分析直至达到破坏,此时自动搜索得到滑动面位置,并发出破坏信息,此时的折减系数就是强度储备安全系数[11] [12] [13]。对于莫尔-库仑材料,强度折减安全系数可表示为:

$$\tau = (c + \sigma \tan \varphi) / \omega = c / \omega + \sigma \tan \varphi / \omega = c' + \sigma \tan \varphi'$$

其中: c' 和 φ' 为折减 ω 后的岩土体粘聚力和内摩擦角; ω 为折减系数,当到达极限破坏状态时,折减系数 ω 就是强度储备安全系数。对于加筋体结构的稳定分析而言,折减系数 ω 就是加筋体结构的稳定安全系数。

3.2. 加筋土边坡稳定分析程序的二次开发

初始情况下,土工合成材料界面按直剪强度指标赋值,根据有限元数值计算结果的偏应变 γ_s ,如图 2 所示。根据有限元程序后处理输出的偏应变 γ_s 可以看出,最大偏应变贯通整个滑移面,通过二次开发程序的数据处理功能提取每层土工合成材料所在横断面所有单元节点对应的偏应变值,同时程序自动搜索得到对应的偏应变峰值 γ_{smax} (i 表示第 i 层土工格栅所在横断面)及其对应的单元节点的水平坐标值 x_{ij} (j 表示第 i 层土工格栅所在横断面上的第 j 个单元节点),并以该单元节点作为该层土工合成材料剪切区和

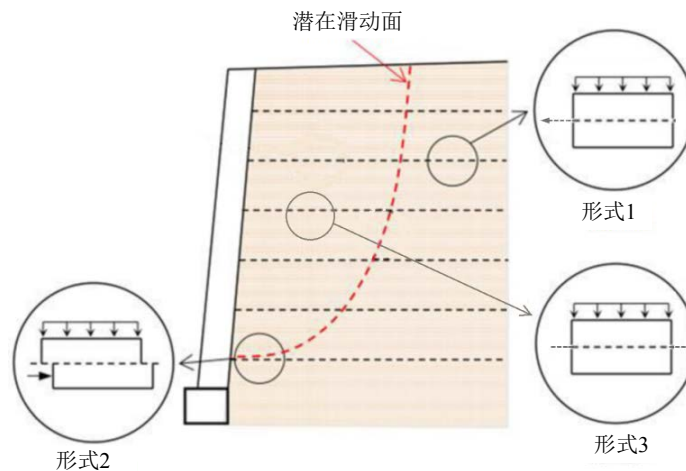


Figure 1. Interactions between geosynthetics and filling soil
图 1. 土工合成材料和填土之间相互作用的形式

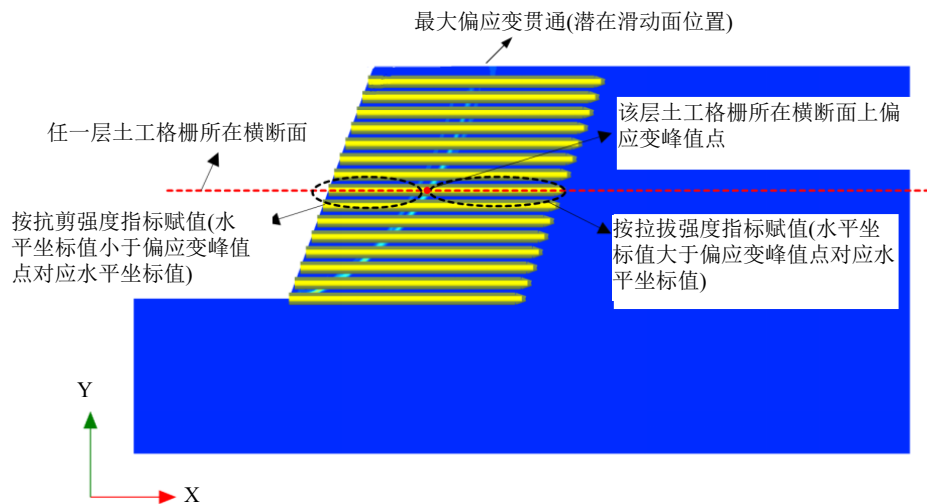


Figure 2. Nephogram of deviant strain γ_s
图 2. 偏应变 γ_s 云图

拉拔区的分界点。在加筋土边坡稳定分析的迭代过程中按如下原则修正界面参数： $x > x_{ij}$ ，界面采用土工格栅拉拔试验得到的强度指标； $x < x_{ij}$ ，界面采用土工格栅直剪试验得到的强度指标； $x = x_{ij}$ ，界面上的该点为属性的跳跃点，由 PLAXIS 程序内部进行处理。其中， x 为该层土工格栅各单元节点的水平坐标值。

基于 PLAXIS 程序二次开发的分析流程如图 3 所示。程序以土工合成材料的界面特性和其与土体之间的相互作用形式一致作为收敛控制条件。同时，通过最后两次稳定性分析得到的稳定安全系数之间的误差 $< 3\%$ 使稳定性的分析结果满足精度要求。

二次开发得到的加筋土边坡稳定分析程序通过可视化界面进行参数录入，如图 4 所示。通过将录入的参数保存至本地数据库，并自动生成能够被 PLAXIS 程序识别的 Python 脚本文件，然后通过 PLAXIS 程序读取 Python 本，从而实现整个稳定分析的自动化。Python 脚本内容涵盖了加筋土边坡稳定分析的全部内容，包括前处理模块中的土体材料、几何模型、土工格栅参数等，模型建立后自动生成对应的填筑工况并自动进行分析。分析完成后通过提取当前阶段的分析结果，并将其作为下一阶段更新界面参数和建立新的分析模型的依据，从而实现自动迭代。当本次计算结果同前一次计算结果满足收敛条件时，程

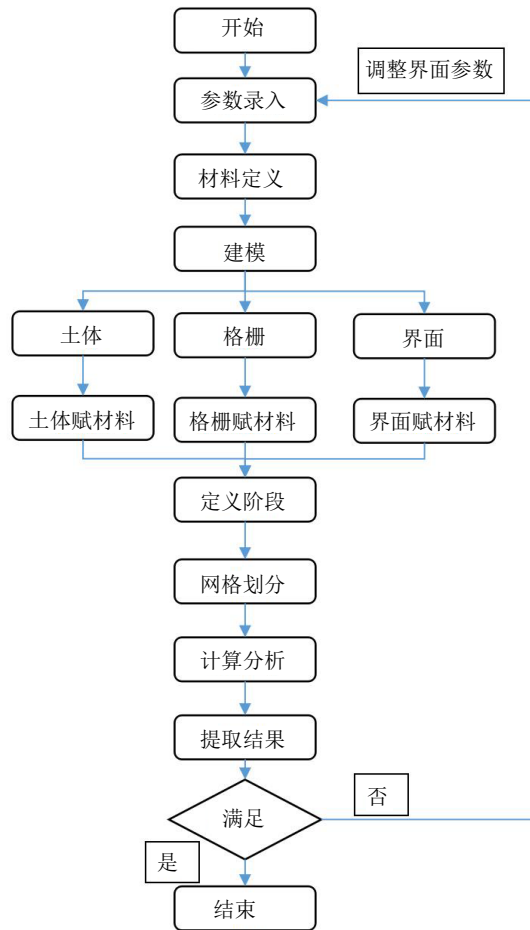
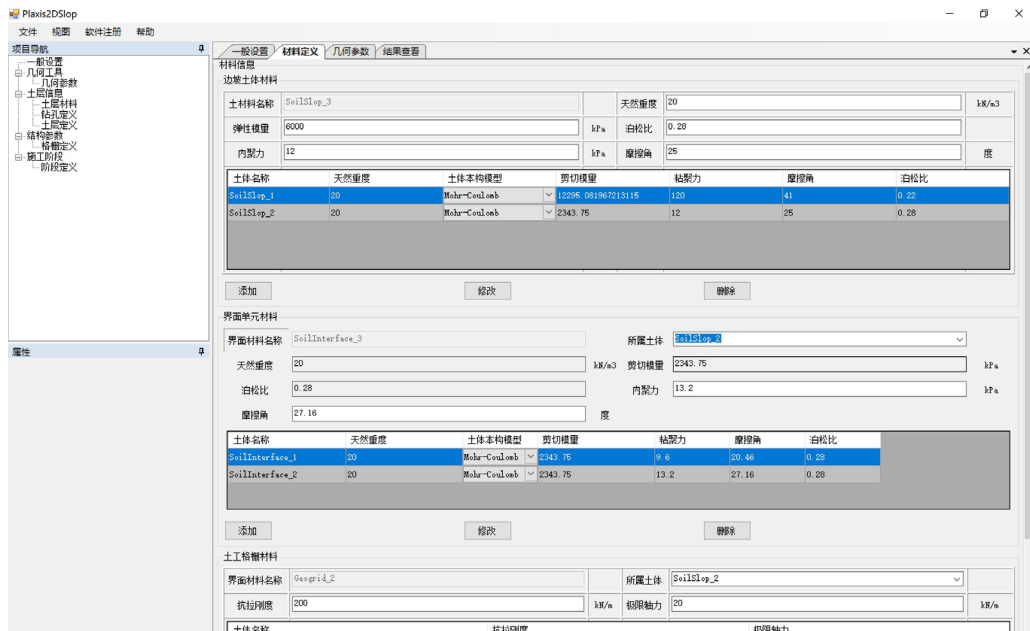


Figure 3. Analysis flow chart of the second development program
图 3. 二次开发程序的分析流程图



(a) 材料属性定义窗口



(b) 几何参数输入窗口

Figure 4. The input window of stability analysis program of reinforced soil slope
图 4. 加筋土边坡稳定分析程序输入窗口

序终止迭代并退出，脚本将每一步迭代的分析模型均进行保存以方便后期进行查看。在脚本运行期间，在 Python 的运行窗口动态显示当前迭代步对应的稳定安全系数，方便工程人员及时跟踪查看。如图 5 所示。

4. 算例

以一高 9 m 的单级土工格栅加筋土边坡为例，坡度为 70°，如图 6 所示。采用二次开发的加筋土边坡稳定分析程序进行分析，取填土内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$ 、粘聚力 $c = 12 \text{ kPa}$ 、重度 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ；地基土内摩擦角 $\varphi = 41^\circ$ 、粘聚力 $c = 120 \text{ kPa}$ 、重度 $\gamma = 20 \text{ kN/m}$ 。根据中华人民共和国交通运输部发布的《公路土工合成材料应用技术规范》(JGT/T D32-2012)中摩擦系数比的定义，界面摩擦系数比 $K = \tan\varphi_{GS}/\tan\varphi_S$ ， φ_{GS} 为界面摩擦角， φ_S 为填土内摩擦角，取直剪试验得到的摩擦系数设为 0.8，拉拔试验得到的摩擦系数设为 1.1。因此，土工格栅界面直剪强度指标为 $c = 9.6 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 20.46^\circ$ ，土工格栅界面拉拔强度指标为 $c = 13.2 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 27.16^\circ$ 。土工格栅的长度取 9 m，土工格栅的轴向抗拉刚度取 200 kN/m，土工格栅竖向间距取 60 cm。

初始情况下通过稳定分析得到加筋土边坡的稳定安全系数为 1.267，通过偏应变云图显示的潜在滑动面位置如图 7 所示。初始情况下土工格栅界面按直剪强度指标赋值，这和目前常规加筋体结构稳定分析方法一致，即针对土工合成材料界面采用同一界面强度指标。从图 7 可以看出，潜在滑动面以内土工格栅的界面特性应为直剪特性，而潜在滑动面以外的界面特性则应为拉拔特性，初始情况界面按直剪强度指标赋值和此时土工格栅与填土之间的作用形式并不一致，这正是常规稳定分析方法的局限和不足，也是文中二次开发程序所要解决的问题。

按前述二次开发程序的分析流程，根据初始情况下分析得到的滑动面位置和以偏应变峰值点判断得到的各层土工格栅材料剪切区和拉拔区的分界点，对剪切区土工格栅界面采用界面直剪强度指标，对拉拔区土工格栅界面采用界面拉拔强度指标，从而得到界面参数修正后下一步稳定性迭代分析的有限元模型，如图 8 所示。

```

Python 3.3.5 Shell
File Edit Shell Debug Options Windows Help
Python 3.3.5 (v3.3.5:62cf4e77f785, Mar 9 2014, 10:37:12) [MSC v.1600 32 bit (Intel)] on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> ===== RESTART =====
>>>
第1次迭代对应的安全系数=1.267
第2次迭代对应的安全系数=1.325
第3次迭代对应的安全系数=1.408
第4次迭代对应的安全系数=1.489
第5次迭代对应的安全系数=1.494
end

```

Figure 5. The safety factor corresponding to the current iteration step is displayed dynamically

图 5. 动态显示当前迭代步对应的稳定安全系数

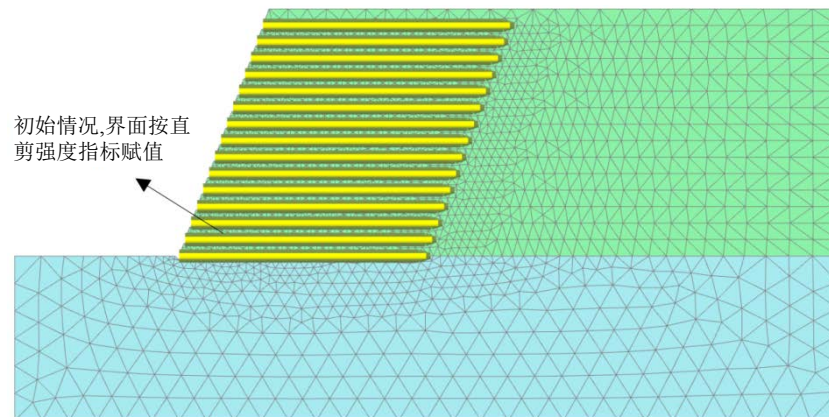


Figure 6. FEM model (preliminary condition, first iteration)

图 6. 有限元模型示意图(初始情况, 第一次迭代)

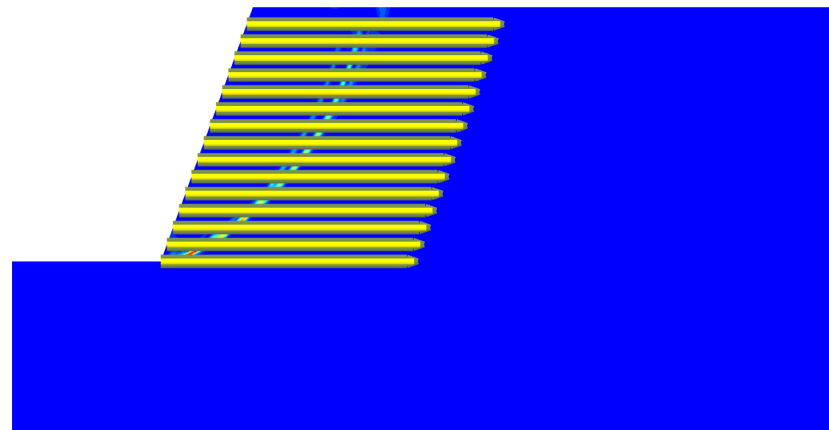


Figure 7. Location of potential sliding surface through stability analysis under the preliminary condition (first iteration)

图 7. 初始情况下稳定分析得到的潜在滑动面位置(第一次迭代)

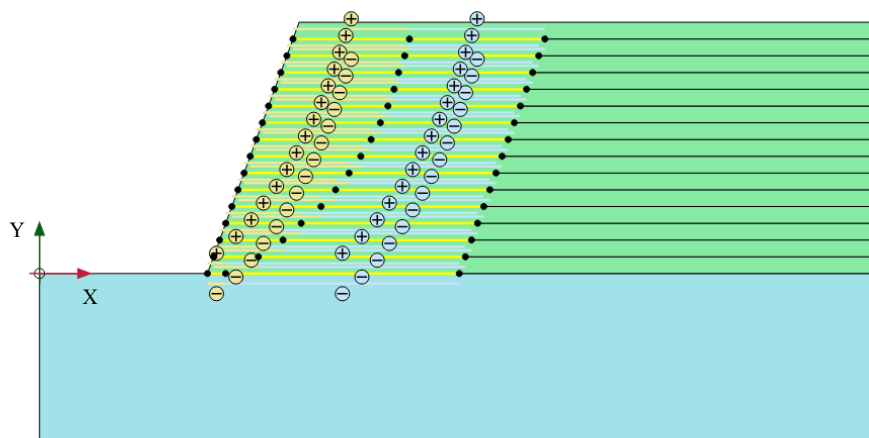


Figure 8. FEM calculation model after the adjustment of interface parameters (second iteration)

图 8. 界面参数修正后的有限元计算模型(第二次迭代)

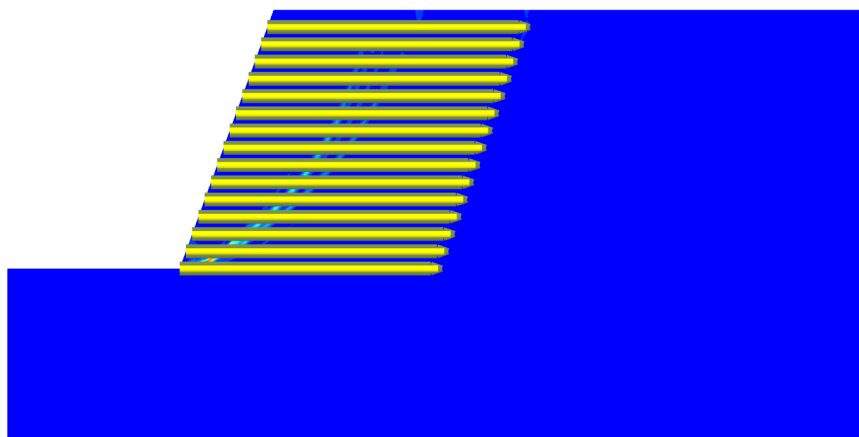


Figure 9. Location of potential sliding surface through stability analysis of the second iteration

图 9. 第二次迭代稳定分析得到的潜在滑动面位置



Figure 10. Location of potential sliding surface through stability analysis of the fifth iteration

图 10. 第五次迭代稳定分析得到的潜在滑动面位置

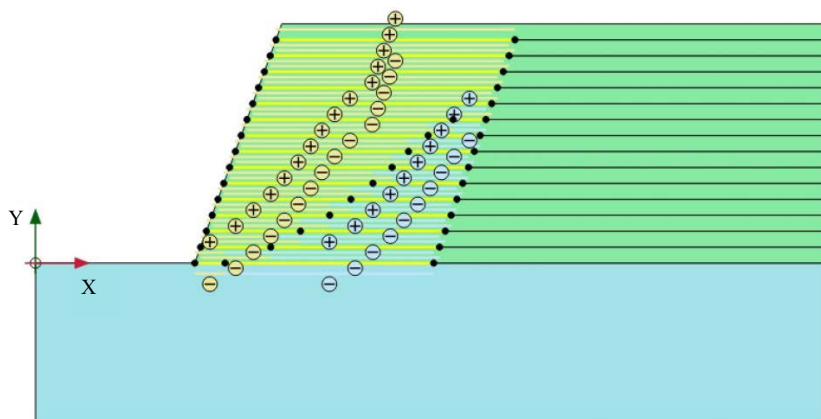


Figure 11. Layout of shear and tension areas of geo-grid after iteration is completed
图 11. 迭代完成后土工格栅剪切区和拉拔区的分布

Table 1. Iteration analysis results of stability
表 1. 稳定性迭代分析结果

迭代次数	稳定安全系数
第一次	1.267
第二次	1.325
第三次	1.408
第四次	1.489
第五次	1.494

第二次稳定分析得到加筋土边坡的稳定安全系数为 1.325, 通过偏应变云图显示的潜在滑动面位置如图 9 所示。

经过二次开发程序进行 5 次迭代运算后, 加筋土边坡稳定分析的结果如表 1 所示, 从表中的计算结果可以看出, 第 4 次迭代计算得到的稳定安全系数 1.489 与第 5 次迭代计算得到的稳定安全系数 1.494 两者之间的误差 $< 3\%$, 因此迭代完成, 最终得到的潜在滑动面的位置如图 10 所示, 对应的土工格栅剪切区和拉拔区的分布如图 9 所示。从图 10 和图 11 可以看出, 迭代分析结束后工合成材料的界面特性和其与土体之间的相互作用形式一致, 潜在滑动面内土工格栅界面为剪切特性, 潜在滑动面外土工格栅界面为拉拔特性。

5. 结论

当加筋体结构发生失稳破坏时, 由于不同部位的土工合成材料和填土之间作用形式各不相同, 因此土工合成材料的界面有的是剪切特性, 有的是拉拔特性, 有的是拉-剪组合界面特性, 以往加筋体结构稳定分析时仅考虑土工合成材料界面剪切或拉拔的单一特性并不合理。基于 PLAXIS 程序进行二次开发的加筋土边坡稳定分析程序, 能够根据土工合成材料和填土之间相互作用的形式自动选择合适的界面特性, 从而保证稳定分析结果更合理。

基金项目

重庆市委重庆市地质灾害防治工程技术研究中心能力提升项目(cstc2014pt-gc0023); 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2016jcyjys00001)。

参考文献

- [1] 杨广庆. 土工格栅加筋土结构理论及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] Leshchinsky, D. and Han, J. (2004) Geosynthetic Reinforced Multitiered Walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **130**, 1225-1235. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:12\(1225\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1225))
- [3] Koerner, R.M. and Song, T.-Y. (2001) Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Walls. *Geotextiles and Geomembranes*, **19**, 359-386. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(01\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(01)00012-7)
- [4] Onur, M.I., Tuncan, M. and Bertan, B.E. (2016) Behavior of Soil Reinforcements in Slopes. *Procedia Engineering*, **143**, 486-489.
- [5] 李广信. 关于土工合成材料加筋设计的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 605-610.
- [6] 魏红卫, 喻泽红, 邹银生. 土工合成材料加筋边坡剪切屈服区特性和破坏模式[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 104-108.
- [7] Mosallanezhad, M., Sadat Taghavi, S.H. and Hataf, N. (2016) Experimental and Numerical Studies of the Performance of the New Reinforcement System under Pull-Out Conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, **44**, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.07.006>
- [8] Balakrishnan, S. and Viswanadham, B.V.S. (2016) Evaluation of Tensile Load-Strain Characteristics of Geogrids through In-Soil Tensile Tests. *Geotextiles and Geomembranes*, **36**, 1-10.
- [9] Abdi, M.R. and Zandieh, A.R. (2014) Experimental and Numerical Analysis of Large Scale Pull out Tests Conducted on Clay Reinforced with Geogrids Encapsulated with Coarse Material. *Geotextiles and Geomembranes*, **42**, 494-504. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.07.008>
- [10] 蔡剑韬. 土工格栅加筋膨胀土拉拔试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(Supp.1): 203-307.
- [11] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座-II 限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332-336.
- [12] 郑颖人. 地下工程稳定与设计的极限分析法[C]//重大地下工程安全建设与风险管理: 国际工程科技发展战略高端论坛文集, 北京: 中国工程院, 2012: 108-117.
- [13] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 91-98.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org