

基于面向对象技术的几何建模及其在边坡稳定分析中的应用

张鲁渝^{1, 2}, 郑颖人², 张建民³

(1. 中国航空港建设第九工程总队, 四川 成都 611430; 2. 中国人民解放军后勤工程学院, 重庆 410016; 3. 清华大学水利系岩土工程研究所, 北京 100084)

摘要: 重点介绍的二维图形建模前处理器 2D-GMS 是 ZSlope 前处理器的升级版, 其主要功能是几何建模。由于采用面向对象技术及创新的图元关系约束机制, 2D-GMS 具有模型自动校验技术, 有效降低了由于工程师疏忽导致的错误率, 提高了可靠性。就荷载建模方面, 将 2D-GMS 与 Geo-Slope、Slide 进行了对比, 结果表明: 2D-GMS 荷载建模功能特色鲜明, 操作简便, 具有一定的优势。

关键词: 几何建模; 前处理器; 边坡; 稳定分析

中图分类号: TU201.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)01-0129-06

作者简介: 张鲁渝(1974-), 男, 博士, 从事边坡稳定分析及岩土本构方面的研究。E-mail: zly1974@tom.com。

2D geometric modeling based on object-oriented techniques and its application in slope stability analysis

ZHANG Lu-yu^{1, 2}, ZHENG Ying-ren², ZHANG Jian-min³

(1. The 9th General Team of Airport Construction of China, Chengdu 611430, China; 2. Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China; 3. Geotechnical Research Institute, Tsinghua University, Beijing 10084, China)

Abstract: A 2D graphical model preprocessor (2D-GMS) is given for geometrical modeling in numerical analysis tools, which is the update of the preprocessor of ZSlope developed earlier. Based on the object-oriented techniques and the creative graphic-element-relation restriction mechanism, the 2D-GMS can verify the geometrical constraints of the established models automatically, reducing the error probability due to the engineers' carelessness and improving the operational reliability. This paper provides the comparison of functions of load modeling among 2D-GMS, Geo-Slope and Slide. The results show that the function of load modeling in 2D-GMS is of more efficiency and reliability than that in Geo-Slope and Slide to a certain degree.

Key words: geometric modeling; preprocessor; slope; stability analysis

0 引言

在岩土工程领域, 计算机辅助分析软件已渗透到勘察、设计、施工、检测及工程管理等各个环节, 从业者的工作方式已经并正在发生深刻的变革。然而不可忽视的是, 学术界仍存在重理论研究、轻实用工具开发等令人担忧的现象。以边坡工程领域为例, 国内理论水平与国外相比差距并不明显, 然而一旦涉及设计分析软件, 特别在几何建模、科学数据可视化等方面, 其总体研发水平则捉襟见肘^[1]。这种结构性失衡导致的后果不容小视。一方面, 国内基础建设如火如荼, 而另一方面, 业界却因科技成果的转化存在断层而错失产业升级的大好机遇。岩土工程是一门实践性很强的学科, 在充分肯定经验重要性的前提下, 加大

软件开发力度, 不仅具有重大的现实意义, 而且顺应了行业发展的趋势。

不可否认, 软件带给业界巨大便利的同时, 也存在诸多缺陷, 其可靠性受到严重质疑^[2]: “……不正确的结果一样可以在屏幕上显示, ……看上去也是如此这般地赏心悦目”。为此, 相当一部分从业者进退维谷。Crilly 就国外常用 9 款岩土工程分析软件进行了一次测试^[3], 输入违背常识的数据, 以观察各软件的反应, 测试结果见表 1、图 1。

上述问题的解决绝非一朝一夕, 它既需要政策层面的鼓励与导向, 也需要从业人员的艰辛努力。鉴于

此, 近年来笔者先后研发了边坡稳定分析软件 ZSlope^[4]及二维图形建模前处理器 2D-GMS (2D Geometric modeling system), 这是一次有益的尝试。本文将重点介绍 2D-GMS, 它是 ZSlope 前处理器的升级版, 因全面采用面向对象技术及创新的图元关系约束机制, 2D-GMS 具有模型自动校验技术, 有效降低了由于工程师疏忽导致的错误率, 提高了可靠性。文中将 2D-GMS 与国外知名边坡设计分析软件 Geo-Slope、Slide 的荷载建模功能进行了对比, 结果显示: 2D-GMS 荷载建模功能特点鲜明, 操作简便, 具有一定的优势。

表 1 输入数据说明^[3]

Table 1 Description of the input data		
工况类型	特点	举例
不可能	违反自然法则, 不满足理论适用条件, 没有物理意义	$\gamma, \varphi', s_u, E < 0, jk_n, Jk_s < 0, \varphi' > 90, \nu > 0.5$
不真实	超过已有认知和实践水平	$\varphi' > 60, \gamma > 3500 \text{ kg/m}^3, E_{\text{soil}} > E_{\text{rock}}$

注: γ 为岩土材料的密度, φ' 为内摩擦角、 E 为弹性模量, s_u 为不排水剪切强度。

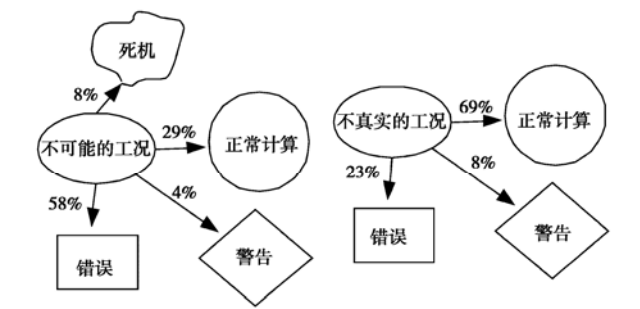


图 1 国外 9 款岩土工程软件不当输入时的结果^[3]

Fig. 1 Results of a survey of 9 foreign commonly used geotechnical modeling programs and their response to impossible and implausible input data

1 Slide 及 Geo-Slope 荷载建模

力学模型通常涉及各种荷载。岩土工程中, 常见荷载元素有集中荷载、分布荷载、锚杆、土钉等。本文将以边坡工程为例, 首先介绍 Geo-Slope、Slide 在荷载几何建模方面的特点。

Geo-Slope 由 Fredlund D G 教授开发, 1977 年正式推出^[5], Slide 由加拿大 Rocsincence 公司于 1996 年推出^[6]。它们功能强大, 前、后处理器可视化程度高。然而尽善尽美不容易, 对于 Geo-Slope 6.0、Slide 5.0 而言, 笔者个人认为, 其主要问题表现在 3 个方面, 均与图形建模相关。

(1) 荷载与坡面的相对位置无法自动调整

从几何空间上看, 荷载必须作用于坡面上, 在 Geo-Slope 或 Slide 中, 新创建的荷载均遵守上述规则, 然而当设计人员对已建模型进行修改时, 例如改变坡面线节点坐标, 此时对于 Slide, 见图 2, 无论是集中荷载、锚杆还是分布荷载, 其作用点均与坡面线脱离, 这显然与实际不符, 见图 3, 4, 这种情况 Slide 居然可以给出“正常”解答。对于 Geo-Slope, 当坡面线节点坐标改变时, 分布荷载作用点可自动调整, 并始终保持在坡面线上, 见图 5, 6, 但集中荷载和锚杆作用点仍与坡面线脱离。

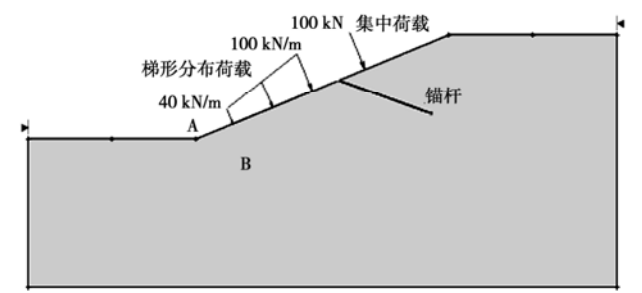


图 2 已创建的 Slide 坡体模型

Fig. 2 Slope model created by Slide

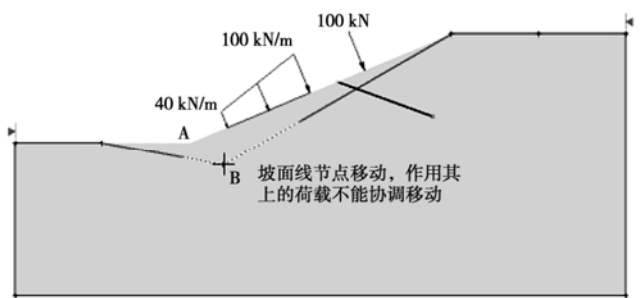


图 3 改变坡面线节点坐标

Fig. 3 Modifying the coordinates of slope surface nodes

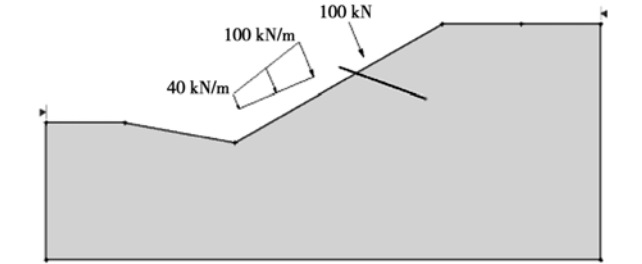


图 4 坡面线节点坐标改变, 荷载作用点脱离坡面

Fig. 4 Load action points broken away from surface

(2) 荷载作用点无任何约束

在 Geo-Slope 中, 建好的荷载模型可被随意移动或修改, 其作用点甚至可以脱离坡面线, 与实际不符, 见图 6 集中荷载与锚杆; 而在 Slide 中, 荷载作用点则被约束的太死, 用户根本无法编辑, 如需修改只能删除荷载再重建, 十分不便。

(3) 不能动态显示中间状态

在 Geo-Slope 及 Slide 中,当荷载移动时,前处理器不能实时显示移动过程,而只有开始与结束状态。这一问题虽不会影响正常使用,但会导致操作过程不可见,带来一些不便。

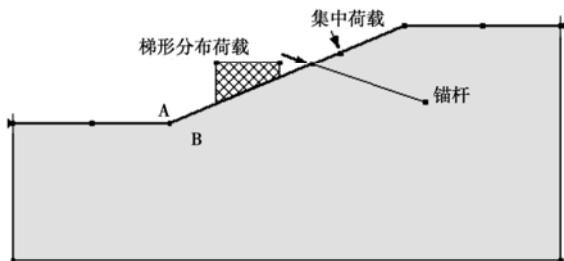


图 5 已创建的 Geo-Slope 荷载模型

Fig. 5 Load model created by Geo-Slope

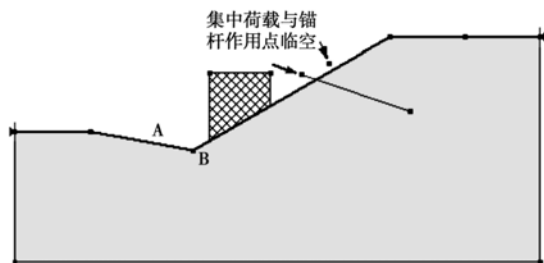


图 6 坡面线节点坐标改变, 集中荷载作用点临空

Fig. 6 Concentrated load action points broken away from surface

2 ZSlope 介绍

ZSlope是一个基于Windows的边坡稳定分析软件,由前、后处理器及求解器3个独立的模块构成,截止目前,ZSlope提供了大多数常规安全系数求解算法,如瑞典法、简化Bishop法^[7]、扩展简单化Bishop法(可求解非圆弧滑面的安全系数)^[8-10]、简化Janbu法^[11]、不平衡推力法^[12-13]、通用条分法GLE^[14-15]、Morgenstern-Price法^[16]、Spencer法^[17]等。采用Monte Carlo搜索算法^[18-19]及其改进算法^[20-22]可求解各种类型的临界滑面^[23](圆弧型、组合型、任意折线型)。同时,可考虑坡面外载、坡外水位、孔隙水压(浸润线)、多层土等多种工况。

ZSlope最初立足笔者自用,主要存在如下2个问题:①模型一旦建立,便不能通过鼠标改变图形元素的位置、大小,如要修改必须先删除再重建,这一点与目前的Slide类似;②通用性较差,前处理器与求解器耦合较紧,不便于推广到其它领域,如地基、挡土墙等。

3 2D-GMS 建模特点

针对上述问题^[24],笔者对ZSlope进行了升级,新

版2D-GMS因全面采用面向对象技术,结合自主创新的图元关系约束机制,功能有了较大提升。

以第1节Slide、Geo-Slope的相同操作为例,在2D-GMS中,无论是坡面线还是荷载变动,它们的相对位置均可自动调整,荷载作用点不会脱离坡面线。

集中荷载是一个矢量,需要大小、方向、作用点3个参数,对于分布荷载则需增加一个参数——分布范围。例如,图7中分布荷载与坡面线垂直,当坡面线节点坐标改变时,分布荷载会进行调整。首先是方向调整,垂直是一个相对概念,改变坡面线节点坐标将导致与其相连线段的倾角改变,因此需相应调整荷载方向以保持与坡面线垂直;其次是荷载作用点坐标的调整,以保持其在坡面线上。就图7中的集中荷载而言,方向为竖直,竖直是一个绝对概念,不会随坡面线倾角改变而变动,但作用点的坐标需调整。

在节点移动过程中(鼠标操作),2D-GMS可实时动态显示坡面及荷载当前最新位置,见图7虚线,这样处理可直观对比移动前、后的位置变化。图8为模型改变后的最终状态。上述功能的实现与笔者研发的图元关系约束机制有关,详见后文。

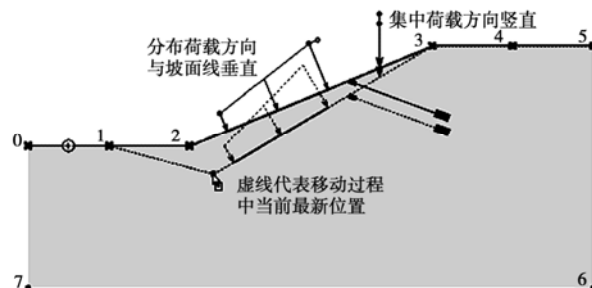


图 7 2D-GMS 坡面线节点坐标改变

Fig. 7 Coordinate of nodes of slope surface modified in 2D-GMS

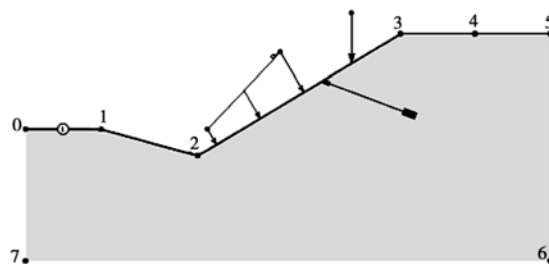


图 8 荷载移动后的最终状态

Fig. 8 Position of loads after slope surface modified

在2D-GMS中,荷载参数均可通过鼠标修改,如改变作用点或调整范围,鼠标简单拖动即可,图9,10,而在Geo-slope与Slide中,上述操作则稍显繁琐。

表2列出了Slide、Geo-Slope以及本文2D-GMS在荷载建模方面的功能对比。

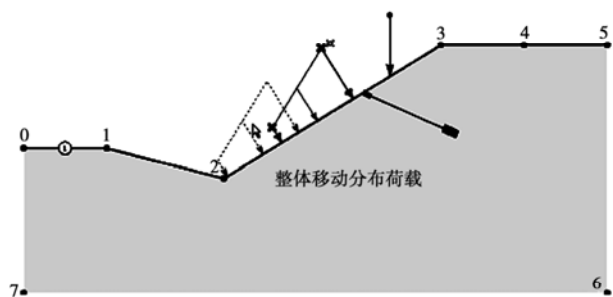


图 9 改变分布荷载作用点
Fig. 9 Modifying the action point of distributed loads

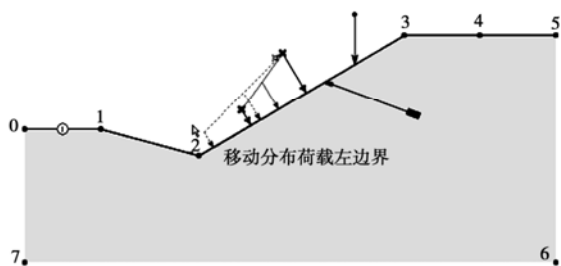


图 10 调整分布荷载范围
Fig. 10 Modifying the range of distributed loads

表 2 不同软件在荷载建模方面的对比

Table 2 Comparison of load modeling among several programs				
荷载类型	功能子项	Geo-Slope	Slide	2D-GMS (本文)
集中荷载	A	No	No	Yes
	B	No	Yes	Yes
	C	Yes	No	Yes
分布荷载	A	Yes	No	Yes
	B	No	Yes	Yes
	C	Yes	No	Yes
	D	Yes	No	Yes
锚杆	A	Yes	Yes	Yes
	B	Yes	Yes	Yes
	C	Yes	Yes	Yes
自动约束	E	No	No	Yes
动态显示	F	No	No	Yes
图形效果	G	No	Yes	Yes
能否 Undo	H	Yes	Yes	Yes

注: No 为不具备的功能, Yes 为具备的功能。A 为能否改变大小; B 为能否改变方向; C 为能否改变作用点; D 为能否改变分布荷载范围; E 为能否自动调整坡面线与荷载的相对位置; F 为能否动态显示编辑、修改过程; G 为荷载显示是否形象; H 为所有操作能否 Undo、Redo。上述功能均基于鼠标操作。

需要说明的是: ①表 1 比较结果并不代表其它未提到的功能, Slide、Geo-Slope 作为世界知名软件, 具有数十年研发历史, 其功能从整体上, 比 2D-GMS 更完善; ②上述软件均能通过键盘输入坐标或数值改变荷载大小、方向及作用点, 不是本文的重点。

4 2D-GMS 系统架构

上述功能的实现需要两个基础模块。首先是二维

图形显示系统, 它解决如何绘制矢量图的问题, 即创建一个矢量画板; 其次是基础图元类库, 它解决绘制内容的问题, 即创建点、线、面等基本图形元素。这两个模块通过系统架构统一组织与管理。系统架构包括静态类架构、时序架构、交互架构等, 涉及计算机图形学、数据结构、面向对象^[25]、设计模式^[26]等软件工程相关学科。限于篇幅, 本文仅介绍 2D-GMS 的静态类架构, 采用 UML^[27] (统一建模语言) 表示。

二维空间中, 基本元素点、线、面可组成各种复杂图形, 如坡面线由点、线组合而成。为实现各图形元素在操作方式上保持一致, 需采用 Composite 设计模式^[26], 如针对图元移动这一功能, 可通过鼠标点选并拖动来实现, 无论是基本元素和组合元素, 鼠标操作没有任何差别。

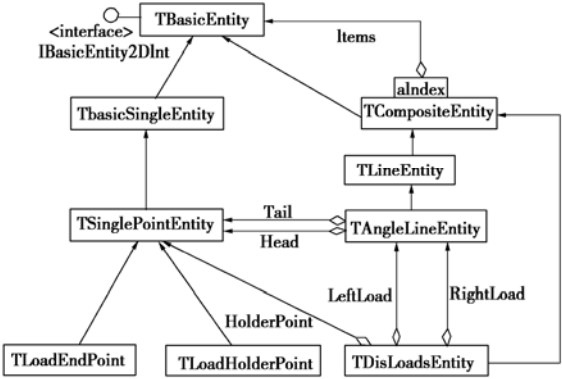


图 11 2D-GMS 静态类架构
Fig. 11 Static class diagram of the 2D-GMS

如图 11 所示, TBasicEntity 图元实体是一个基础抽象类, 定义了一些公共接口, 描述了对对象的基本功能, 如移动, 约束等。TSinglePointEntity: 点实体类, 描述“点”的一些特性, 如坐标、大小、颜色等。TAngleLineEntity: 主要描述集中荷载, 包括锚杆的一些特性, 是一个组合实体, 由两个 TLoadEndPoint 实体及一个 TLineEntity 实体组合而成。TDisLoadsEntity: 分布荷载实体类, 这是一个复杂的组合实体, 由两个 TAngleLineEntity 实体及一个 TLoadHolderPoint 实体组合而成。

在前文介绍中, 我们提到约束机制, 它的作用在于使图元移动时满足各种运动许可条件。在边坡稳定分析领域, 常见的运动许可条件有: ①荷载作用点沿坡面线移动; ②荷载作用点不能超出坡面线左右边界; ③坡面线位置改变时, 满足条件 1; ④有时约束条件不止一个, 如荷载作用点既要在坡面上, 又因岩土不能承受拉力, 其方向必须向下, 但不一定竖直; ⑤有些图元对象没有约束, 可移动到任何位置, 如文字注释。

图元之间的约束条件会因专业领域不同而不同, 因 2D-GMS 是一个通用的几何建模平台, 必须建立一个统一的架构, 以便根据专业需要加入新的约束条件。2D-GMS 约束机制的架构如图 12 所示。

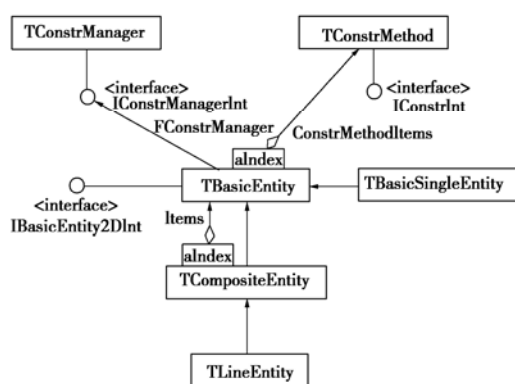


图 12 约束机制静态类图

Fig. 12 Static class diagram of restriction system

TConstrManager: 约束集管理器, 每一个图元对象都有一系列约束条件, 要用 TList 线性列表来存贮约束条件。**TConstrMethod:** 约束方法, 具体描述各种约束类, 经过抽象, 这些约束算法有些非常简单, 如点必须在线上、而有些则较为复杂, 如点只能在某多边形内移动等等, 约束算法能够根据描述对象的物理特性进行自由拼装。为保持架构的扩展性, 还定义了一些接口, 如 IConstrManagerInt、IConstrInt。

5 结 语

2D-GMS 二维图形建模前处理器是 ZSlope 前处理器的升级版, 因采用面向对象技术, 图元可通过鼠标移动、编辑、修改。

2D-GMS 特有的图元关系约束机制可保证各图元在移动、编辑过程中自动满足约束条件, 实时显示移动过程的中间状态, 减少出错的机率, 方便操作。

文中将 2D-GMS 与国外知名边坡分析软件 Geo-Slope、Slide 的荷载建模功能进行对比, 结果显示, 在荷载建模方面, 2D-GMS 特色鲜明, 操作简便, 具有一定的优势。

总体上看, 2D-GMS 仍处在研发阶段, 尚需在实践中不断完善。

参考文献:

- [1] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理、方法、程序[M]. 北京: 水利水电出版社, 2003. (CHEN Zu-yu. Soil slope stability analysis—theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 王海兰, 孙树立, 等. 结构工程师对计算机的滥用[J]. 力学

与实践, 1999, 21(5): 11 - 14.

- [3] CRILLY M. Report on the BGS meeting: validation of geotechnical software for design[J]. Ground Engineering, 1993, 26(9): 19 - 23.
- [4] 张鲁渝. 边坡稳定分析软件 ZSlope 的开发[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2830 - 2835. (ZHANG Lu-yu. The development of software for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2830 - 2835. (in Chinese))
- [5] KRAHN John. Stability modeling with SLOPE/W, an engineering methodology[CP]. First edition, Canada, 2004.
- [6] Slide, 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes, User's Guide, Part 1[CP]. 1989 - 2003 Rocscience Inc. Canada.
- [7] BISHOP A W. The use of slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Géotechnique, 1955, 5: 7 - 17.
- [8] FREDLUND D G, ZHANG Z M, LAM L. Effect of the axis of moment equilibrium in slope stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(3): 456 - 465.
- [9] 张鲁渝, 郑颖人. 简化 Bishop 法的扩展及其在非圆弧滑面中的应用[J]. 岩土力学, 2004(6): 927 - 929. (ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren. The application of stability analysis for non-circular slip by extend simplified Bishop method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(6): 927 - 929. (in Chinese))
- [10] 张鲁渝, 郑颖人. 扩展简化 Bishop 法的取矩中心对安全系数的影响[J]. 岩土力学, 2004(8): 1239 - 1243. (ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren. Effect of the axis of moment on safe factors by extend simplified Bishop method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(8): 1239 - 1243. (in Chinese))
- [11] JANBU N. Application of composite slip surface for stability analysis[C]// Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm: Sweden, 1954: 43 - 49.
- [12] 张鲁渝, 郑颖人, 时卫民. 边坡稳定分析中关于不平衡推力法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 177 - 182. (ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min. The discuss of problem on slope stability analysis by imbalance thrust method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 177 - 182. (in Chinese))
- [13] 时卫民, 郑颖人, 唐伯明, 张鲁渝. 边坡稳定不平衡推力方法的精度分析及其使用条件[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 313 - 317. (SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren, TANG Bo-ming, ZHANG Lu-yu. Accuracy and application range of imbalance thrust force method for slope stability analysis[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(3): 313 - 317. (in Chinese))
- [14] FREDLUND D G, KRAHN J. Comparison of slope stability methods of analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, **14**: 429 - 439.
- [15] 张鲁渝. 一个用于边坡稳定分析的通用条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 496 - 501. (ZHANG Lu-yu. Generalized limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 496 - 501. (in Chinese))
- [16] MORGENSTERN N R, PRICE V E. The analysis of stability of general slip surface[J]. Géotechnique, 1965, **15**: 79 - 93.
- [17] SPENCER E E. A method of the analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces[J]. Géotechnique, 1967, **17**: 11 - 26.
- [18] GRECO Venanzio R. Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **22**(7): 517 - 525.
- [19] ABDALLAH I, HUSEIN Malkawi, WALEED F, et al. Sarma, Global Search method for locating general slip surface using monte carlo techniques[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(8): 688 - 698.
- [20] 张鲁渝, 张建民. 基于 Monte Carlo 技术的临界滑面搜索算法的实现及改进[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7): 857 - 862. (ZHANG Lu-yu, ZHANG Jian-min. Extended algorithm using Monte Carlo techniques for searching general critical slip surface in slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(7): 857 - 862. (in Chinese))
- [21] 张鲁渝, 张建民. 基于滑面段旋转的 Monte Carlo 搜索技术及其改进 (I) 转角大小随机[J]. 岩土力学, 2006, **27**(11): 1902 - 1908. (ZHANG Lu-yu, ZHANG Jian-min. Modified Monte Carlo techniques by rotating slip segments for searching general critical slip surface(I): random angle of rotation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(11): 1902 - 1908. (in Chinese))
- [22] 张鲁渝, 张建民. 基于滑面段旋转的 Monte Carlo 搜索技术及其改进 (II) - 常值转角[J]. 岩土力学, 2006, **27**(12): 2197 - 2202. (ZHANG Lu-yu, ZHANG Jian-min. The extended monte carlo techniques by rotating slip segments for searching general critical slip surface(II): constant angle of rotation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(12): 2197 - 2202. (in Chinese))
- [23] 张鲁渝, 张建民. 边坡稳定分析中组合滑面的构造模型[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(8): 855 - 859. (ZHANG Lu-yu, ZHANG Jian-min. Model of combined slips in slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 855 - 859. (in Chinese))
- [24] 张鲁渝, 欧阳小秀, 郑颖人. 国内岩土边坡稳定分析软件面临的问题及几点思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(1): 166 - 169. (ZHANG Lu-yu, OUYANG Xiao-xiu, ZHENG Ying-ren. Problems and thoughts of development of slope stability analysis software in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(1): 166 - 169. (in Chinese))
- [25] WEISFELD Matt. Object-oriented thought process[M]. The Second Edition, Indiana: Sams Publishing, 2003.
- [26] GAMMA Erich, HELM Richard, JOHNSON Ralph, et al. Design patterns-elements of reusable object-oriented software[M]. New York: Addison-Wesley. 1994.
- [27] FOWLER Martin. UML distilled third edition- a brief guide to the standard object modeling language[M]. New York: Addison-Wesley. 2004.