

基于组件式 GIS 技术的边坡支护 方案优化设计系统*

陶丽娜 唐胜传 陈谦应

(重庆交通科研设计院 重庆 400067)

摘要 针对山区高等级公路边坡稳定评价和支护设计问题,介绍了边坡稳定的普遍极限平衡法(即 GLE)理论和边坡加固后的稳定计算,并在组件式 GIS 技术上进行了边坡支护方案优化设计系统(SSODS)的设计与开发。介绍了该系统的主要功能:边坡宏观稳定评价功能、工点边坡稳定计算功能、边坡加固处理功能、制图显示功能、查询与分析功能、输出功能等。最后,还举了几个典型实例进行分析,并与国外著名商品化软件——SLOPE/W (加拿大 Alberta GEO-SLOPE 岩土工程软件公司)和 slide (加拿大多伦多 Rocscience 公司)进行了对比,证明 SSODS 的计算结果是正确的和可靠的。同时该系统还在实际工程中得到了应用,表明该系统具有较好的实用性。

关键词 工程地质, 普遍极限平衡法, 组件式 GIS, 边坡支护

分类号 P 208, TU 753.8

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)16-2824-06

OPTIMAL DESIGN SYSTEM OF SLOPE SUPPORT BASED ON COMPONENT GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

Tao Lina, Tang Shenchuan, Chen Qianying

(Chongqing Communications Research and Design Institute, Chongqing 400067 China)

Abstract In order to study highway slope stability and support design in mountainous terrain, firstly the general limit equilibrium method(GLE) and stability analysis method for reinforced slope are explained, and a slope support optimal design system (SSODS) based on component geographic information system (ComGIS) is developed. Then, the main features of SSODS are introduced, which are macroscopical appraisal of slope stability, computation of slope stability, design of reinforced slope, map display, spatial query and analysis capacity, output and print. Finally, several typical examples are put forward for comparing SSODS with commercial software, SLOPE/W(Alberta Canada, GEO-SLOPE International Ltd) and slide(Toronto Canada, Rocscience Inc). The results prove that SSODS is accurate and credible. Besides, SSODS is also successfully used in the real engineering project.

Key words engineering geology, general limit equilibrium method(GLE), component geographic information system (ComGIS), slope support

1 引言

高等级公路建设是中西部基础设施建设重点

之一。西部地区多为山岭丘陵区,由于地质、地形、水文情况复杂,高等级公路的平、纵、横指标均受到限制,公路修建不可避免出现高填深挖,破坏了自然山体的平衡,边坡失稳时有发生。以云南省为

2003年4月10日收到初稿,2003年6月6日收到修改稿。

* 西部交通建设科技项目(2001-318-000-26)。

作者 陶丽娜 简介:女,27岁,2002年于四川大学水电学院岩土工程专业获硕士学位,现主要从事公路边坡、路基方面的科研工作。

例, 据资料表明, 公路每年由于边坡坍塌和各类病害所造成的社会经济损失近亿元^[1], 因此, 有必要对山区公路边坡的稳定性和支护设计进行研究。

随着 GIS 技术的成熟与发展, GIS 在地质灾害信息处理中得到了广泛应用。国外, 尤其发达国家在 GIS 应用于地质灾害研究方面做了很多工作^[2,3], 但国内应用 GIS 技术开展地质灾害研究工作起步较晚, 研究程度较低。目前, 国内 GIS 仅在公路路线设计^[4]、公路环境保护^[5]、公路枢纽决策^[6]等方面有应用, 但在高等级公路边坡稳定评价及支护设计方面还处于空白。

基于上述背景, 由重庆交通科研设计院所承担的西部交通建设科技项目——边坡支护方案优化设计系统, 就是想在这方面有所突破。“边坡支护方案优化设计系统”(slope support optimal design system, 以下简称 SSODS), 以高等级公路开挖边坡为主要研究对象, 充分融合了现阶段人们对边坡失稳地质灾害的研究深度、工程经验和测试手段, 能对边坡进行稳定评价和支护设计。该系统的主要设计思路如下: 对边坡进行宏观稳定评价→小范围的边坡稳定评价→工点边坡稳定计算→提出相应的支护结构设计方案, 该系统的结构如图 1 所示。

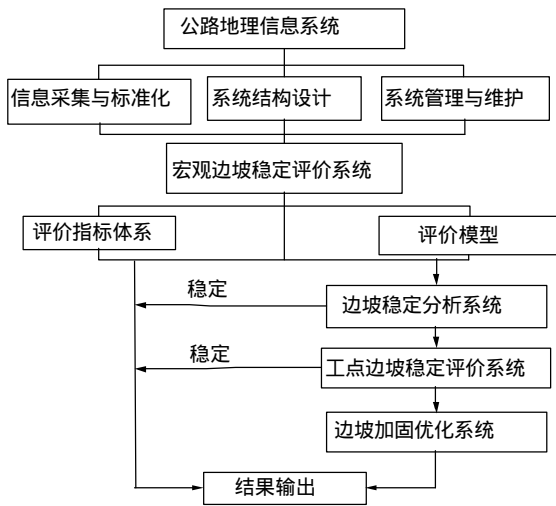


图 1 边坡支护方案优化设计系统结构

Fig.1 Architecture of optimal design system for slope support

2 边坡稳定理论

SSODS 边坡稳定性计算的理论基础主要是普遍极限平衡法(即 GLE)。

2.1 普遍极限平衡法(即 GLE)理论^[7]

GLE 法是一种普遍理论, 其他各种方法均可看作是它的特例。GLE 法中用于推导安全系数的静力

学原理有: 两个方向的力之和均为零, 以及所有的力围绕一点的力矩之和为零(Fredlund 等, 1981)。这两条加上破坏准则, 还不足以使土坡稳定问题成为静定问题^[8,9]。要使它成为静定问题, 必须再补充一条原则, 即对某些力的大小或方向做某些假设。GLE 法是对条间力的方向做了假设。这种做法在极限平衡法中得到广泛采用(Fredlund 和 Krahn, 1977)。采用这种做法的各种极限平衡土坡稳定分析法均可视作 GLE 法的特例(Fredlund 等人, 1981)。

2.2 边坡加固后的稳定计算

对于在实际边坡工程中遇到的特殊情况, 如: 加固措施(灌浆锚杆、土工织物、土钉、抗滑桩)作用; 边坡顶部有拉裂缝作用; 边坡底部有水体作用; 边坡顶部有外荷载(集中荷载, 均布荷载)作用等, 都可以按照 GLE 法原理来求解。下面以锚杆加固为例来说明 SSODS 对边坡加固后的稳定性计算。

在图 2(a)所示的边坡模型中, 用一道锚杆进行加固, 由锚杆产生的加固力 T 作用在土条 10 上, 土条 10 的受力分析如图 2(b)所示。

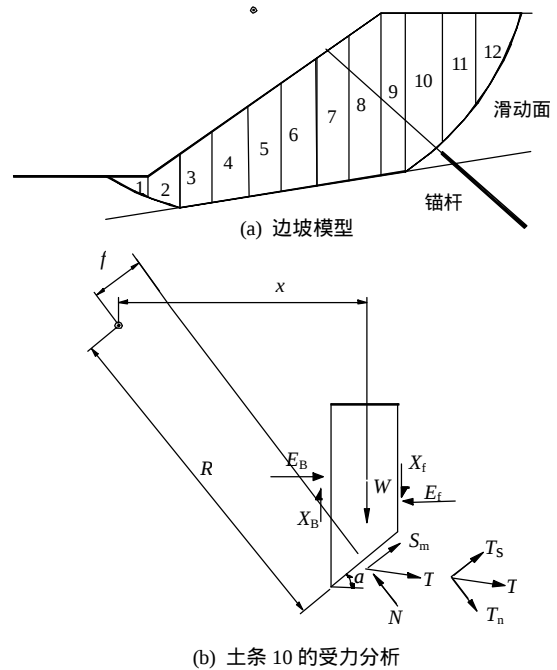


图 2 边坡模型及土条 10 的受力分析

Fig.2 Slope model and forces acting on the 10th slice

采用有效应力分析, 在极限平衡条件下, 土条底面的剪力大小可表示为

$$S_m = \frac{sb}{F} = \frac{b c' + (N - ub) \tan j'}{F} \quad (1)$$

式中: S_m 为土条底面上引发的抗剪力; s 为剪应力强度; c' 为有效粘聚力; j' 为有效内摩擦角; u 为

孔隙水压力； F 为安全系数，其定义是：为了使假设滑动面的土体进入极限平衡状态，土的抗剪强度参数必须按此系数减小(被此系数除)^[7]； N 为作用于土条底面上的总法向力； b 为土条底面的长度。

2.2.1 力矩平衡安全系数和力平衡安全系数

考虑滑坡体的力矩平衡，并联立式(1)，可以得到边坡加固后的力矩平衡安全系数表达式为

$$F_m = \frac{\sum [c' b R + (N - ub) R \tan j']}{\sum W x - \sum N f + T_n f - T_s R} \quad (2)$$

式中： W 为土条的重量， x 为土条中线至转动中心或力矩中心的水平距离， R 为圆弧滑动面的半径或任意形状滑动面上的抗剪力 S_m 的力臂， f 为法向力 N 的作用线至转动中心或力矩中心的垂直距离， T_s 为加固力沿土条底面的切向分力， T_n 为加固力沿土条底面的法向分力。

从力平衡的角度考虑安全系数，对所有土条水平力求和。这时，条间水平法向力 E_B 和 E_F 相互抵消。联立式(1)，便可以得到力平衡安全系数表达式：

$$F_f = \frac{\sum [c' b \cos a + (N - ub) \tan j' \cos a]}{\sum N \sin a - T_n \sin a - T_s \cos a} \quad (3)$$

2.2.2 土条底面的法向力

对于土条底面的法向力，根据所有竖向力的和求解可得

$$N = \frac{W + (X_F - X_B) - \frac{b c' \sin a}{F}}{\cos a + \frac{\tan j' \sin a}{F}} + \frac{\frac{ub \tan j' \sin a}{F} + T_n \cos a - T_s \sin a}{\cos a + \frac{\tan j' \sin a}{F}} \quad (4)$$

式中： X 为条间剪切力(下标“F”表示前，向坡顶方向；下标“B”表示后，向坡角方向)。

由于式(4)中安全系数 F 和条间剪力(如 X_F , X_B) 是未知的，因而不能直接求解式(4)。

在开始求解安全系数时，可以忽略土条之间的法向力和剪切力^[10]。作用在土条上的力沿土条底面的垂直方向求和时，可以得到下面求法向力的公式：

$$N = W \cos a + T_n \quad (5)$$

用简化式(5)求解式(2)得到的安全系数便是“费南钮斯(Fellenius)”或“普通法”安全系数。

假定式(4)中的条间剪力为零，当用式(2)求解力矩平衡安全系数时，这种求解安全系数的方法便是简化毕肖普法。当用式(3)求解力平衡安全系数时，这种求解安全系数的方法便是不考虑经验系数的简

化江布法^[11]。

如果要同时求解力和力矩平衡安全系数，首先必须计算出条间法向力。

在计算每个土条底部法向力的时候，需要知道条间剪切力。假设条间剪力 X 和条间法向力 E 之间存在一定的数学函数关系^[8]：

$$X = E l f(x) \quad (6)$$

式中： $f(x)$ 为描述 X/E 值沿滑动面变化情况的函数关系； l 为比例常数，代表求解安全系数公式时使用函数 $f(x)$ 的百分比。

由条间力函数式(6)可得

$$(X_B - X_F) = l f(x) (E_B - E_F) \quad (7)$$

对每个土条水平方向的力求和为

$$(E_B - E_F) = N \sin a - S_m \cos a - T_n \sin a - T_s \cos a \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)，联立式(4)，并整理得

$$N = -\frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}{B} \quad (9)$$

式中：

$$A_1 = -W$$

$$A_2 = \frac{b c'}{F} [\sin a - l f(x) \cos a]$$

$$A_3 = \frac{ub \tan j'}{F} [-\sin a + l f(x) \cos a]$$

$$A_4 = T_s [\sin a - l f(x) \cos a]$$

$$A_5 = T_n [-\cos a - l f(x) \sin a]$$

$$B = \cos a + l f(x) \sin a + \frac{\tan j'}{F} \sin a -$$

$$\frac{\tan j'}{F} l f(x) \cos a$$

式(9)为求法向力 N 的一般表达式，当 l 与 $f(x)$ 取不同值时，联立式(2)或者式(3)，便可以模拟各种以极限平衡理论为基础的边坡加固稳定计算方法。

3 系统功能及实现技术介绍

SSODS 是一套较完整的集边坡信息管理功能、评价功能和支护设计控制为一体的软件系统。下面对该系统功能和具体实现技术分别作大致介绍。

3.1 边坡宏观稳定性评价功能

SSODS 能对边坡进行宏观稳定评价。SSODS 建立了一套宏观稳定评价指标体系，选择合适的数学方法作为预测评价模型，如模糊综合评判、人工神经网络(BP 网络)、信息量法、多元统计分析等作为危险性区划数学模型，从宏观上对边坡稳定性进行评价。

3.2 工点边坡稳定计算功能

边坡稳定定量分析是高陡边坡加固治理研究的基础,也是加固设计的依据,任何经济、合理、有效的边坡加固治理措施都源自对边坡稳定安全系数和临界滑动面的正确估价^[12]。SSODS 提供了一些国内外广泛使用的、较为成熟的边坡稳定计算方法。如:费南钮斯法(Fellenius),也称普通法(Ordinary)或瑞典圆弧法(Sweden);简化毕肖普法(Bishop Simplified);简化江布法(Janbu's Simplified);斯宾塞法(Spencer);美国陆军工程师团法 1(Corps of Engineers #1 Method);美国陆军工程师团法 2(Corps of Engineers #2 Method);Lowe-Karafiath 法;摩根斯坦-普赖斯法(Morgenstern-Price);普遍极限平衡法(GLE);萨尔码法(Sarma);传力系数法等。其中摩根斯坦-普赖斯法(Morgenstern-Price)和普遍极限平衡法(GLE)允许用户自定义条间力函数。

3.3 边坡加固处理功能

SSODS 的边坡加固处理选用了工程上常用的加固措施,主要有:灌浆锚杆、土工织物、土钉、抗滑桩等。对于抗滑桩,能对其进行内力计算和结构设计。

3.4 制图显示功能

SSODS 有方便的制图显示功能。在 SSODS 中能创建边坡、滑动面、外荷载、地下水及拉裂缝以及锚杆、土工织物、抗滑桩等图形。SSODS 包括常规的地图操作,如放大、缩小、漫游、地图图层控制管理等;SSODS 能创建各种专题图如单值图、等级符号图、统计专题图等。SSODS 还能利用等高线和高程点生成数字高程模型(DEM)和数字正射影像,显示边坡的三维情况,对边坡进行分割、填方挖方计算等。

3.5 查询与分析功能

SSODS 对于边坡属性数据的管理采用的是关系数据库管理空间数据,空间数据与属性数据一体化,因此,图形和属性之间相互查询比较方便。SSODS 能自动考虑地下水的作用,对水位线以上和以下边坡部分进行识别;自动生成滑坡体及对滑坡体进行自动条分;能自动搜索滑面,寻找最危险滑面及圆心。在整个计算中,能随时查询地图窗口中图形的情况;计算完成后,能查询和显示土条的信息,如土条重力、底面倾角、底面剪力、条间力等。

3.6 输出功能

SSODS 具有强大的布局排版功能,对计算结果进行布局排版,根据用户具体要求可以输出多种形式的数据,图形可以输出为图像文件、栅格图层或

直接输出到外部设备上,如彩色绘图仪、打印机等。

3.7 实现技术

SSODS 是基于组件式 GIS 技术进行设计和开发的。组件式 GIS 是面向对象技术和组件式软件在 GIS 软件开发中的应用。其基本思想是把 GIS 系统的主要功能实现为几个控件来供用户编程调用。各个 GIS 控件之间,以及 GIS 控件与其他控件之间,可以方便地通过可视化的软件开发工具(如 Visual Basic, Visual C++ 等)集成起来构成应用系统。组件式 GIS 的发展符合当今软件技术的发展潮流,同时也极大地方便了应用和系统集成^[13]。

在具体实现上,为了保证系统的可扩充性、易使用性、易维护性,SSODS 利用面向对象技术的思想来对各个功能模块作了分析和设计,并基于 Windows 平台,结合组件式 GIS 技术和 Microsoft 公司的 Activex 控件技术,采用快速原型开发工具 Visual Basic 来进行编程工作。在实现过程中,充分考虑了用户界面的使用方便性,并采用各种方式如图表、图形方式来体现计算结果的直观性。

4 应用实例

本文最后将列举几个实例来对 SSODS 作进一步介绍。

4.1 实例 1

选用加拿大 Alberta GEO-SLOPE 岩土工程软件公司的 SLOPE/W 软件中的实例 example.slz。

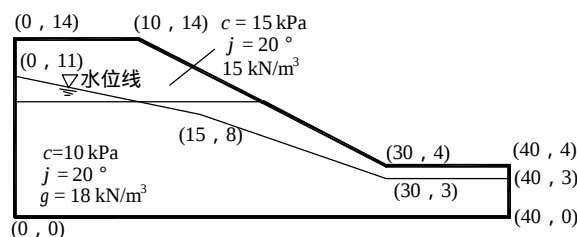


图 3 实例 1 计算模型

Fig.3 Example 1 for computation model

在该实例中,边坡的坡度 1:2,边坡总的高度为 10 m。边坡由 2 种土组成:上层土厚 5 m,有效粘聚力 5 kPa,有效摩擦角 20°,容重 15 kN/m³;下层土厚 9 m,有效粘聚力 10 kPa,有效摩擦角 25°,容重 18 kN/m³,有地下水作用,如图 3 所示。

在 SSODS 中建好边坡几何模型后,用简化毕肖普法(Bishop Simplified)进行稳定安全系数计算,计算结果如图 4 所示。在该实例中还选用普通法和江布法进行计算,计算结果如表 1 所示。从表中不

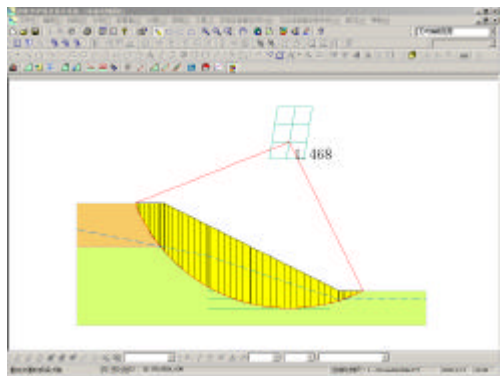


图 4 实例 1 计算结果在 SSODS 中的显示
Fig.4 Output of example 1 in SSODS

表 1 实例 1 安全系数计算结果
Table 1 Output of example 1

方法	SLOPE/W	SSODS
普通法	1.280	1.284
简化毕肖普法	1.464	1.468
简化江布法	1.288	1.290

难看出, SSODS 与 SLOPE/W 计算结果吻合较好。

4.2 实例 2

选用加拿大多伦多 Rocscience 公司的 slide 软件的实例 tutorial6.sli。

边坡坡度 1 : 2, 边坡有效粘聚力 3 kPa, 有效内摩擦角 19.6°, 容重 20 kN/m³, 如图 5 所示。

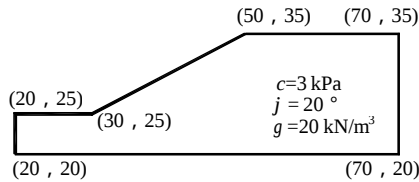


图 5 实例 2 计算模型
Fig.5 Example 2 for computation model

在没有进行加固前, 边坡最小安全系数为 0.988, 认为边坡是不稳定的。采用 5 排灌浆锚杆加固边坡, 图 6 是采用简化江布法计算边坡进行灌浆锚杆加固边坡后的稳定安全系数。表 2 是 SSODS 与 slide 计算结果的对比情况, 从表中可以看出, 对于灌浆锚杆加固边坡后的稳定安全系数计算, SSODS 与 slide 具有很好的一致性。

4.3 实例 3

选用加拿大 Alberta GEO-SLOPE 岩土工程软件公司的 SLOPE/W 软件的实例 fabric.slz。

在该实例中, 边坡的坡度 1 : 1, 边坡总的高度 12 m。边坡由 2 种土组成: 上层土厚 10 m, 有效粘

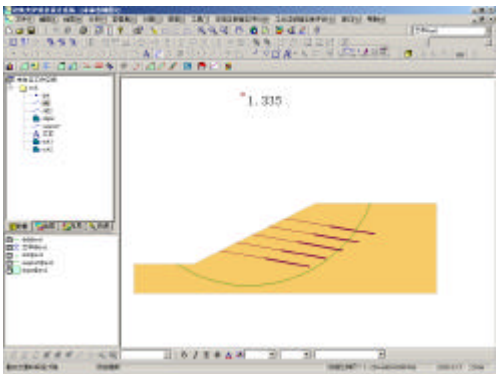


图 6 实例 2 计算结果在 SSODS 中的显示
Fig.6 Output of example 2 in SSODS

表 2 实例 2 安全系数计算结果
Table 2 Output of example 2

方法	slide	SSODS
简化毕肖普法	1.465	1.465
简化江布法	1.333	1.335

聚力 10 kPa, 有效摩擦角 30°, 容重 18 kN/m³; 下层土厚 2 m, 有效粘聚力 10 kPa, 有效摩擦角 25°, 容重 18 kN/m³。如图 7 所示, 坡顶有 10 kN 的集中荷载作用, 用两层土工织物进行加固。

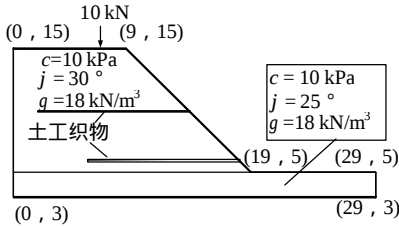


图 7 实例 3 计算模型
Fig.7 Example 3 for computation model

图 8 是采用 GLE 法(条间力函数为半正弦)计算边坡进行土工织物加固后的稳定安全系数情况。图 9 是 GLE 求解时的力矩平衡安全系数与力平衡安全系数随 l 变化曲线, 曲线的交点便是所求的安全系数。表 3 是 SSODS 与 SLOPE/W 计算结果的对比情况, 从表中可以看出, 对于用土工织物加固边坡后的稳定安全系数计算, SSODS 与 SLOPE/W 具有很好的一致性。

4.4 SSODS 在云南昆石路上的应用

运用 SSODS 对在建工程项目云南昆石路边坡的数据进行了管理, 包括边坡地质情况、边坡稳定情况、边坡的显示等。图 10 是根据昆石路边坡 K45+000 ~ K45+696.61 等高线制成的三维可视化图形。通过该图形, 利用系统提供的各种操作, 可以从不同的方向来对该三维图形进行观察, 使用户能很直观地对边坡情况有所了解。

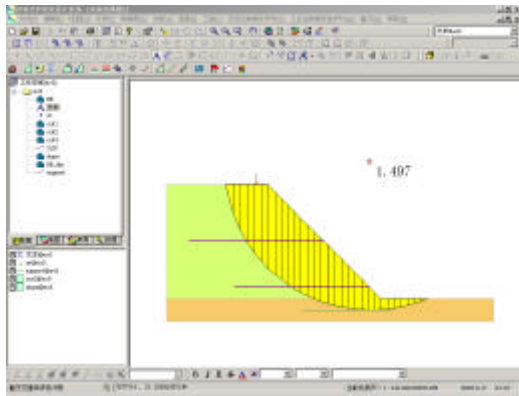


图 8 实例 3 计算结果在 SSODS 中的显示
Fig.8 Output of example 3 in SSODS

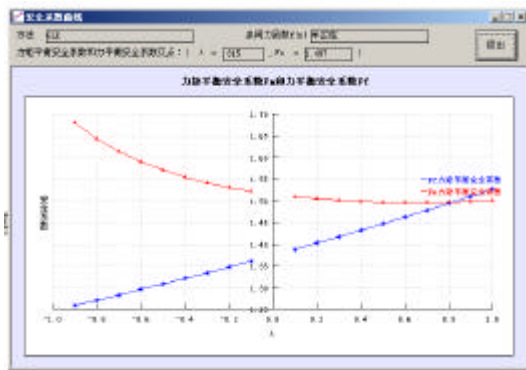


图 9 力矩平衡安全系数与力平衡安全系数随 l 变化曲线
Fig.9 Variation of safety factors of moment and force equilibrium with l

表 3 实例 3 安全系数计算结果
Table 3 Output of example 3

方法	SLOPE/W	SSODS
普通法	1.374	1.371
简化毕肖普法	1.524	1.515
简化江布法	1.368	1.375
GLE 法	1.502	1.497

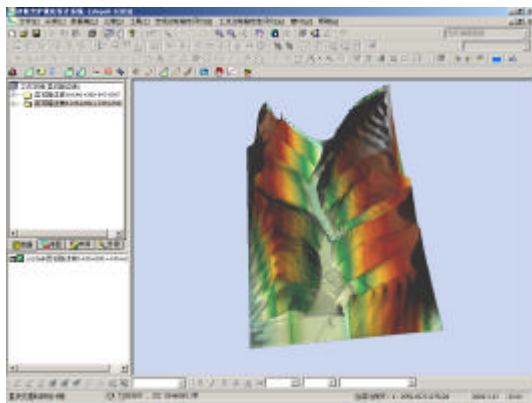


图 10 云南昆石路边坡 k45+000~k45+696.61 三维模型
Fig.10 Three-dimensional model of slope k45+000 ~ k45+696.61 of Yunnan Kunshi express highway

5 结 语

SSODS 将地理信息、工程技术等有机地融为一体, 它不但能对公路沿线边坡进行管理, 还能对边坡模型进行稳定性评价, 并提出相应的治理方案。

SSODS 具有相当完善的功能: 公路边坡信息管理功能、边坡宏观稳定评价功能、工点边坡稳定计算功能、边坡加固处理功能、制图显示功能、查询与分析功能、输出功能等。

在实例分析中, 与国外著名商品化软件——加拿大 Alberta GEO-SLOPE 岩土工程软件公司的 SLOPE/W 和多伦多 Rocscience 公司的 slide 软件进行了对比, 计算结果具有很好的一致性, 并在实际工程项目中得到应用, 表明该系统具有良好的应用价值。

参 考 文 献

- 1 徐绍能. 山区高等级公路路堑边坡设计探讨[J]. 云南交通科技, 2000, 16(2): 14 ~ 16
- 2 Pack R T, Tarboton D G, Goodwin C N. Research associate presented at assessing terrain stability in a GIS using SINMAP[A]. In: Proc. of the 15th Annual GIS Conference, GIS 2001[C]. Vancouver: [s. n.], 2001, 19 ~ 22
- 3 廖兴发. 地质勘察与地质灾害监测评估防治技术实用手册[M]. 北京: 世图音像电子出版社, 2002, 1 130 ~ 1 136
- 4 陈 易, 李满春. GIS 在公路路线设计中的应用[J]. 科技通报. 1998, 14(2): 111 ~ 115
- 5 晏晓林. 基于公路环境保护的 GIS 应用与开发[J]. 中国公路学报, 1998, 11(4): 33 ~ 37
- 6 赵晓梅, 韩日午. 基于 GIS 的公路枢纽决策支持系统[J]. 国土与自然资源研究, 1998, (2): 16 ~ 18
- 7 [加拿大]弗雷德隆德 D G, [印度尼西亚]拉哈尔佐 H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997, 379 ~ 380
- 8 Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slop surfaces[J]. Geotechnique, 1965, 15(1): 79 ~ 93
- 9 Spencer E. A method of analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Geotechnique, 1967, 17(1): 11 ~ 26
- 10 Fellenius W. Calculation of the stability of earth dams[A]. In: Proceedings of the Second Congress of Large Dams[C]. Washington D. C.: [s. n.], 1936, (4): 445 ~ 463
- 11 Janbu N, Bjerrum J, Kjaernsli B. Stabilitetsberegning Skraninger[M]. Oslo: Norwegian Geotechnical Publications, 1956
- 12 陈昌富, 彭振斌. 高陡边坡稳定性分析与计算方法[J]. 西部探矿工程(岩土、钻掘和矿业工程), 1995, 7(4): 31 ~ 33
- 13 宋关福, 钟耳顺. 组件式地理信息系统研究与开发[J]. 中国图像图形学报, 1998, 3(4): 313 ~ 317