

文章编号: 1000-7598-(2005)11-1731-06

基于边坡单元的公路沿线滑坡危险度概率分析

邱 骋, 王纯祥, 江崎哲郎, 谢漠文

(九州大学 环境系统研究中心, 日本福岡 812-8581)

摘 要: 公路沿线发生的滑坡、泥石流等自然灾害是造成交通停滞的主要原因。对公路沿线边坡进行稳定性评价及滑坡灾害分析对于公路管理和灾害防治具有重要意义。为了能对大范围边坡应用三维力学模型进行稳定性评价, 研究中将较大研究区域划分为多个边坡单元 (slope unit), 并介绍了边坡单元划分方法。对每个边坡单元, 采用随机生成许多假想滑动面并通过一个基于 GIS 的边坡稳定性三维分析模型计算其安全系数的方法, 找出具有最小安全系数的危险滑动面, 同时求出在试算过程中安全系数小于某临界值 (通常设为 1.0) 的结果出现的比率, 作为该边坡单元的滑坡发生概率, 以此作为指标对研究区域进行危险度评价。通过对日本 49 号国道沿线边坡中的应用对该方法的实用性进行了验证。

关 键 词: 边坡单元; 滑坡灾害; 边坡稳定性三维分析; 概率分析

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Slope unit based probabilistic analysis of slope stability along highway routes in Japan

QIU Cheng, WANG Chun-xiang, ESAKI Tetsuro, XIE Mo-wen

(Institute of Environmental Systems, Kyushu University, Hakozaki 6-10-1, Higashi Ku, Fukuoka, 812-8581, Japan)

Abstract: Landslides, that occurred on steep slopes along highway routes, always cause traffic stagnation, even endanger property and human life. For doing maintenance work effectively and avoiding disaster, it is essential to assess stability of road slopes. In this study, the large research area is firstly divided into slope units, which are used as the objectives of the three-dimensional deterministic model. Then a random searching method is used to locate the critical slip surface of each slope unit. The critical slip surface with the minimum safety factor is calculated by a GIS-based 3D slope stability model. The failure probability of each slope unit is calculated and landslide hazard degree of the studied area is zoned quantitatively. The methodology is illustrated by a probabilistic slope analysis of the 49th national road in Gouto area of Japan.

Key words: slope unit; landslide hazard; 3D analysis of slope stability; probabilistic analysis

1 引 言

公路在当今社会的经济发展中起着极其重要的作用, 但公路沿线山坡发生的滑坡、泥石流等自然灾害经常造成交通停滞, 更严重的甚至危及生命财产的安全, 为此通常采取对危险区域进行防护施工或进行监控的措施以避免灾害的发生。为了准确预测危险区域、有效地进行维护管理, 有必要对公路沿线边坡进行稳定性评价及滑坡灾害分析。

在边坡稳定性分析领域, 常用的方法可以归类为统计模型法 (statistical model) 和确定模型法 (deterministic model)^[1]。统计模型法使用多变量解析等数学统计方法, 将各种与边坡稳定性相关的

因子 (地质、地形、倾斜角度、植被分布等) 进行权重叠加, 作成综合评价指标分布图, 并以此为依据对研究区域进行稳定性评价。统计模型法大多被用于对大范围区域进行定性评价, 这种方法存在着以下的局限性: 首先只是通过以往的经验来推定各因子对边坡稳定性的影响程度, 缺乏力学理论基础; 其次由于需要大量对以往滑坡的调查数据来进行对照分析, 所以通常只能对灾害多发地区进行应用。另外分析结果只适用于具有相同地形、地质等条件的地区, 存在着地域局限性。

确定模型法能够考虑边坡破坏的力学原理, 不存在地域限制, 适用于对单个边坡进行具体、定量的评价, 其中以边坡的纵向断面为分析对象的二维

极限平衡法因为便于计算,在实际工程中得到了广泛的应用。但自然边坡呈现三维分布,二维方法显然无法考虑自然地形和地质条件的三维分布状态。越来越多的工程问题提出了建立三维边坡稳定分析的要求,有关边坡稳定三维极限平衡方法,已有众多文献介绍了研究成果^[2~4],这些三维方法在具体边坡的稳定性分析中得到了很好的应用。

由于三维模型往往只限于对一个具体研究对象,即是单个边坡的应用,在对公路沿线大范围边坡应用时由于很难划分出具体的研究对象,所以存在着困难。为了使问题变得静定可解,各种三维极限平衡法均引入大量假定,因而削弱了方法的理论基础,无法保证求得的安全系数是严格意义上的准确解。

对上述问题,本文采用对研究区域划分边坡单元(Slope unit)的方法来确定具体研究对象,实现了三维模型在大范围区域的应用。再对每个边坡单元采用随机生成假想滑动面,并计算其安全系数的方法,找出具有最小安全系数的危险滑动面,同时求出在试算过程中安全系数小于某临界值(通常设为1.0)的结果出现的比率,即该边坡单元的滑坡发生概率,以此(而不是无法保证其准确性的安全系数)作为指标对研究区域进行危险度评价。最后通在对日本49号国道沿线边坡的应用验证了该方法的实用性。

2 边坡单元划分

2.1 边坡单元的概念

滑坡灾害评价中的一个重要问题是研究对象的问题,即研究“谁”的安全性。近年来随着GIS(地理信息系统)在自然科学领域中的应用日趋增多^[5,6],许多研究者在使用GIS来分析边坡稳定性时都选取GIS栅格数据的栅格单元作为研究对象,即计算栅格单元的安全系数。虽然对栅格单元的计算机处理相对简单,但是这种规则分布的正方形格子与边坡破坏的力学机理无任何关联,与地质、地形和环境边界也无任何关系。本文采用边坡单元作为研究对象。

在使用三维模型对边坡稳定性进行评价时,除地质构造、水文地质条件之外,还要考虑边坡的倾向、倾角等地形条件^[7,8]。本文把大范围边坡中具有大致相同的倾向及倾角等地形条件的部分称作边坡单元。在对大范围边坡进行滑坡灾害评价时,有必要先把研究区域划分为一个个的边坡单元,再根据各个边坡单元的不同地形、地质情况来分别进行评价,同时三维力学模型也就有了明确的应用对象。

2.2 边坡单元的自动划分方法

边坡单元划分的正确与否将影响到后继分析的准确性,采用一种能够正确、快速的划分边坡单元的方法是十分必要的。以往的研究提出了多种边坡单元的划分方法,其中以地形分界线为划分基准的方法被广泛采用^[9,10]。从地形学上看,边坡单元可以看作是一个流域的左或右边部分(图1)。流域的边界线即为山脊线。如果能够找出谷底线,用谷底线去分割流域,就可以得到两个边坡单元。GIS的水文解析功能能够利用DEM(数字高程模型)数据来划分流域的范围,并可以定义出大于某临界积水值(accumulation value)的河流线。但是定义出的河流线并不一定都纵贯整个流域,而且往往含有很多支流,因此不能直接被用来分割流域。本文参考此水文解析模型中定义河流线的算法,提出一种使用DEM数据抽出一根纵贯流域的谷底线,进一步划分流域、生成边坡单元的方法^[11],并开发了一个程序来自动完成此计算步骤,同时该程序还可以计算出各边坡单元的面积、周长、倾角、倾向、边坡高度、地表曲率等地形特性。图2为对某一研究区域的划分结果的三维图。

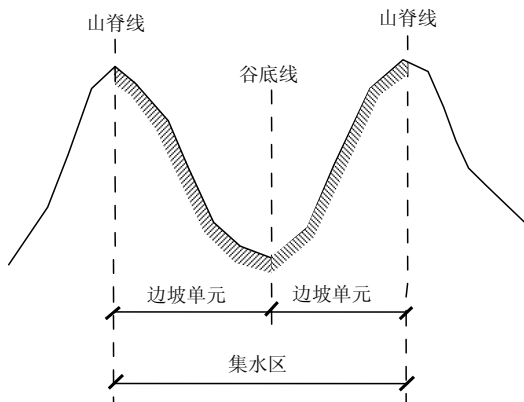


图1 边坡单元划分的示意图

Fig.1 Delineating slope unit by ridge line and valley line

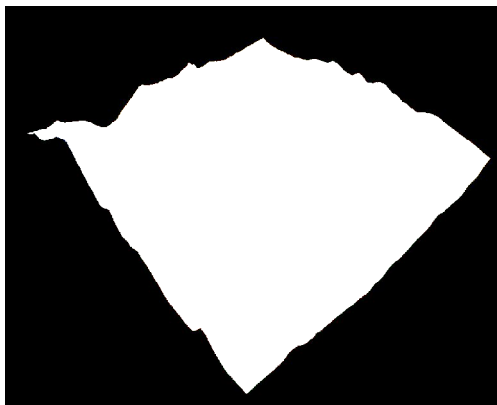


图2 边坡单元分布的三维图

Fig.2 The 3D view of slope units distribution

3 滑坡危险度概率分析

3.1 基于 GIS 的边坡稳定三维分析模型

20 世纪 70 年代中期以来提出了许多三维边坡稳定性分析模型, 这些三维模型大多是基于柱体单元的。在应用这些模型的时候, 将不得不面对如何把复杂的自然边坡分割成一个个的柱体单元以及如何处理比二维计算更为庞大的空间数据的问题。

因为在边坡稳定性计算时所用到的所有的空间数据在 GIS 中均可用栅格数据来表示, 所以本文采用栅格数据的栅格单元来实现柱体单元的划分, 这样庞大的空间数据处理的问题也由于 GIS 的使用而迎刃而解了^[12]。模型简要说明如下。

首先, 把研究区域内与边坡稳定性相关的地形、地层、地下水以及滑动面等空间数据分别转化成 GIS 栅格数据形式的图层, 等于把这些数据分别赋给了每个栅格单元, 这样每个栅格单元所代表的柱状体的滑动力和抵抗力就可以被计算出来。然后, 把所有的栅格单元的滑动力和抵抗力分别求和, 它们的比值即为三维安全系数。在进行计算时滑体的滑动方向设定为滑体的主倾斜方向, 而滑体的主倾斜方向则取滑体范围内各柱体滑面倾向分布的最频值, 如图 3 所示。由于各个柱状体的滑动力和抵抗力分别投影到各自的滑动方向, 只有这些力在滑体滑动方向上的分力参与计算。

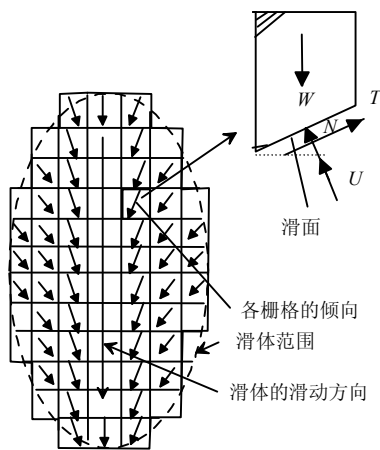


图 3 基于 GIS 栅格数据的三维安全系数计算

Fig.3 3D safety factor calculation based on GIS grid data

3.2 危险滑动面的特定

根据对以往滑坡的调查, 滑动面的形状大体近似于椭球面的一部分。因此本文采用椭球体来对滑动面进行模拟。椭球体的空间形状取决于它的倾向、倾角以及 a , b , c 轴的尺寸。具体来说, 椭球体的倾向和倾角设定为边坡单元的主倾方向和主倾

角。对于反映椭球体几何形状的三轴尺寸, 根据实际情况设定一个变化范围, 在此范围内随机取定。

为了找到危险滑动面的位置与形状, 首先在一定范围内随机改变椭球体的中心点的位置和 a , b , c 轴的尺寸, 产生一个个不同位置、不同形状的椭球体 (图 4)。椭球体与地层的交接面即为虚拟滑动面, 之后对每一个虚拟滑动面计算安全系数。经过大量的试计算后就可以得到一系列安全系数, 从中可以找出一个最小安全系数。经过足够次数的试计算而产生的最小安全系数可以被认为是该边坡单元的实际最小安全系数, 而产生这个安全系数的滑动面就是所要求的危险滑动面。

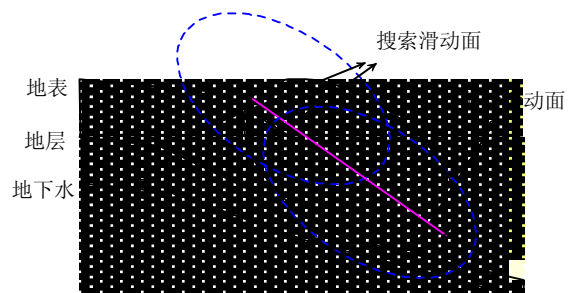


图 4 危险滑动面的搜索

Fig.4 Search of critical slip surface

3.3 滑坡可能发生概率的计算

在使用三维模型评价边坡单元的稳定性时, 由于研究对象的地质构造、力学参数等的不确定性以及对模型所进行的各种假定, 很难保证求得的安全系数的准确性, 因此仅靠一个最小安全系数来评价边坡单元的稳定性是不够的。但是在前面提到的试计算的过程中, 安全系数小于 1 的计算结果出现的比率 (即滑坡可能发生概率) 却可以在一定程度上反映出该边坡单元的滑坡稳定性。本研究采用计算滑坡可能发生概率的方法来定量地评价每个边坡单元的稳定性。计算流程如图 5 所示。首先设定一个临界安全系数值 (一般设为 1.0), 当求得的安全系数小于临界值时, 就认为可能发生滑坡。然后在对随机产生的滑动面进行试算的过程中, 统计出在 M 次的试算中计算结果小于临界值的次数 N , 为可能发生滑坡的次数。最后, 用总共进行的试算次数中可能发生滑坡的次数所占的比率 $P = N/M$ 来定量的评价各边坡单元的稳定性。

图 6 为对一个边坡单元进行 100 次随机试算后的结果示意图。可以看出, 椭球体的中心点随机分布在整個边坡单元的范围内。由于滑动面有可能在坡肩处产生, 所以椭球体搜索的覆盖范围被设定为大于边坡单元的范围。

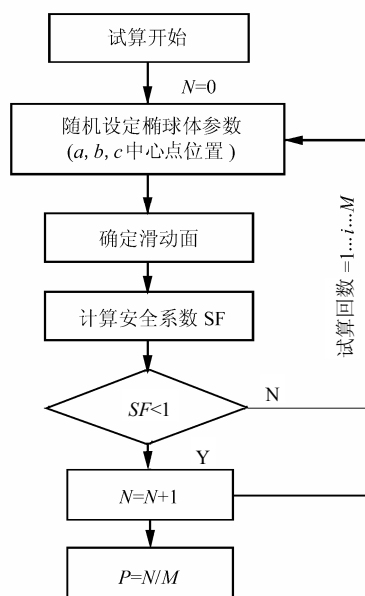


图 5 滑坡发生概率的计算流程图

Fig.5 Flow chart for failure susceptibility calculation

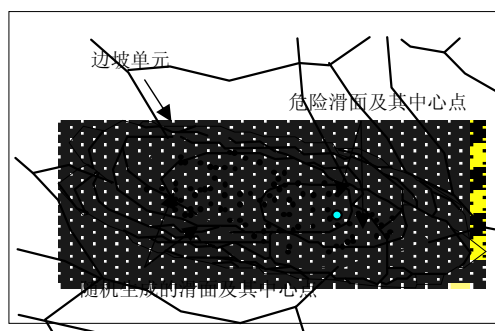


图 6 随机试算例的结果示意图

Fig.6 Result of a random trial calculation

3.4 计算方法的实现

以上阐述的计算方法如果没有一定的平台支持实现起来将是一项费时又费力的工作,而 GIS 恰恰以它优越的空间数据处理和解析功能提供了一个合适的平台。本研究使用 VB6.0 在 ArcGIS™ 平台下进行开发,利用 COM (Component Object Model, 组件对象模型) 组件模式来实现与美国 ESRI 公司的 ArcObjects (实现 GIS 各种功能的组件群) 的耦合,有效利用已有的组件来组装完成自己的系统^[13]。在这个系统中,计算所需的所有数据都将事先被转化为 GIS 的数据格式(栅格数据或矢量数据)再进行输入。所有的数据处理、解析、计算以及计算结果表示等过程都在 GIS 的内部完成。最后完成的系统能够自动划分边坡单元、对每个边坡单元用随机试算的方法计算其滑坡发生概率并找到最危险滑动面的位置和三维形状以及计算危险滑动面的最

小安全系数和破坏概率。

4 应用

4.1 研究区域的概况及滑坡模式的分析

位于日本东北部的 49 号国道是横贯本州的主要道路干线,它所经过的合户地区,位于著名的阿武隈高地与平原的交界处福岛县的西北部。在合户地区的路段中,紧邻道路的陡坡上时常发生滑坡及落石等灾害,严重影响着道路的正常通行(图 7)。



图 7 研究区域的危险斜面

Fig.7 Dangerous slope of study area

为了评价 49 号国道合户地区的滑坡危险度,日本土木研究所采用多种手段对该路段沿线区域进行了现场调查。通过调查可知,该地区的地形为低平地上分布着丘陵和台地,最高标高 440 m,与低地的高差约 180 m。边坡的平均坡度为 40° 左右,个别陡坡甚至达到了 50° ~ 70°。地质调查表明,该地区以花岗闪长岩以及古生代沉积变质岩为基岩,表层覆盖着由岩石风化后产生的残积土和堆积物形成的土层。通过对局部地区的土层进行探测棒贯入测量,得到了土层的厚度数据(图 8),做成 10 m 间隔的点格式数据。土层的最大厚度约为 5 m,平均厚度为 1 m。

从风化程度上看,下部的尚未风化的新鲜花岗岩为硬质岩石,不易产生破坏。而上部的土层则构造松散、透水性好,加之位于陡峭的斜坡上,很容易因降雨等原因产生滑动。现场调查也证明,在该地域最易发生的边坡破坏形式为在风化土层中产生的浅层滑坡。根据以上分析,推测滑动面的产生位置有两种可能,一种是沿着未风化的花岗岩与风化后的残积土的交界面发生滑动,另一种是在残积土中产生滑动(图 9)。

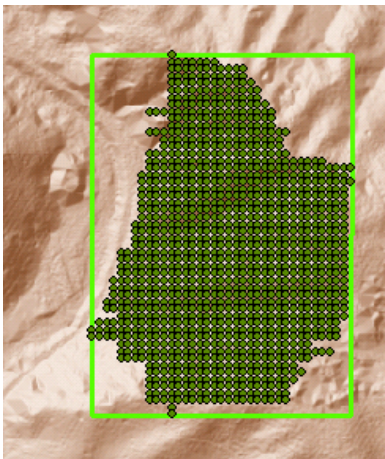


图 8 点格式土层厚度数据
Fig.8 Point shapefile of soil depth data

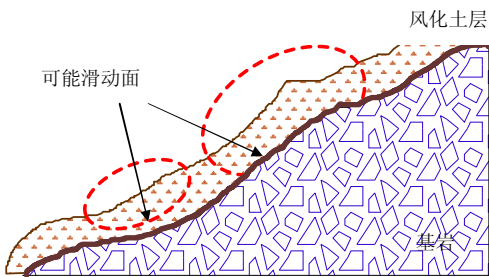


图 9 可能滑动面
Fig.9 Possible slip surfaces

4.2 边坡稳定性的评价

本研究利用 GIS 空间分析功能对土木研究所提供的地表标高进行插值处理，做成了精度为 2 m 的 DEM 栅格数据，并通过对 DEM 数据进行空间解析得到了倾斜角及倾斜方向等地形数据。又利用地表标高减去土层厚度，得到了土层与基岩交界面的标高，也做成了精度 2 m 的栅格数据。图 10 为地表与基岩表面数据的三维视图。

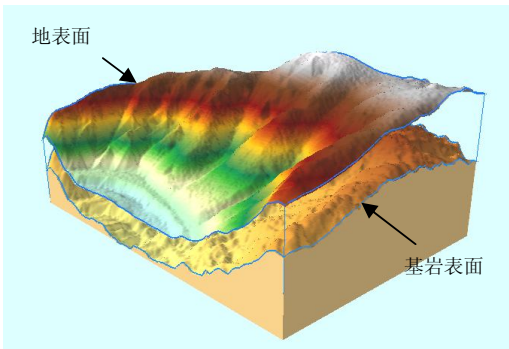


图 10 边坡单元的分区图
Fig.10 Division of slope units

对研究区域的表土层进行土质调查后发现，该区域分布着干性和湿性两种不同性质的土壤。土壤

的干湿程度可以反映出表土层的透水和含水能力的不同，也就意味着力学参数的不同。因此在对研究区域划分边坡单元后，又根据土质分布图将边坡单元归类为干、湿 2 个区域，对各区域的边坡单元采用不同的力学参数分别进行计算。这些力学参数来自于现场取样试验的结果（表 1）。

表 1 力学参数表

Table 1 Geomechanical parameters

区域	c /kPa	ϕ (°)	γ /kN·m ⁻³
干性区	1.6	45	13.8
湿性区	2.0	41	15.3

对每个边坡单元按照上面阐述过的方法进行了危险滑动面搜索计算。在用椭球体模拟滑动面的过程中，由于滑动面不可能出现在坚硬的花岗岩中，所以，当随机生成的椭球体的下半部分越过风化土与花岗岩的交界面进入到花岗岩中时，风化土与花岗岩的交界面就会代替进入到花岗岩中的那一部分椭球面而和风化土层中的椭球面部分共同形成滑动面。经过大量的试计算后（此次研究的试计算次数为 100），求出了各边坡单元的相对最小安全系数和滑坡发生概率。本研究以滑坡发生概率 70 %，50 %，和 20 %作为分界，对研究区域划分危险等级，作成了滑坡发生危险度分区图（图 11），这样就可以一目了然的知道要对哪些区域进行重点监测和防护处理。同时也得到了危险滑动面的位置和空间形状以及各边坡单元的各种地形特性。这些数据将为滑坡防治、个别危险边坡单元的详细评价以及滑坡影响范围的预测提供重要的情报。

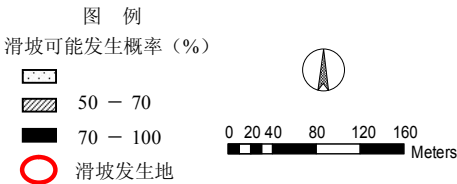
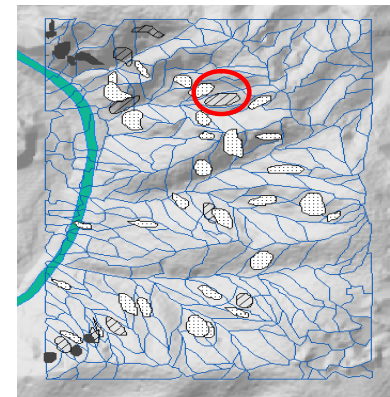


图 11 滑坡危险度分区图
Fig.11 Landslide hazard zonation map

为了验证计算结果, 2004 年 3 月进行了现场调查。调查表明, 绝大部分边坡单元的划分合理, 符合实际地形。图 10 中标注的边坡单元在调查进行前不久发生了滑坡, 从一定程度上验证了计算结果的准确性。

5 结 语

本文对于大范围公路沿线边坡采用一种基于边坡单元的概率方法进行滑坡发生危险度评价, 得到以下几点结论:

(1) 对较大范围研究区域可划分为边坡单元作为力学分析模型的研究对象, 并通过计算最小安全系数和滑坡发生概率的方法来定量评价各边坡单元的滑坡灾害危险程度。

(2) 使用椭球体来模拟滑动面的形状, 通过随机试算的方法来寻找未知的滑动面, 得出的滑动面的位置以及空间形状对滑坡的防治处理具有重要的参考意义。

(3) 使用 GIS 来有效地完成对庞大的空间数据的处理和复杂的计算, 既提高了效率, 又降低了费用。

(4) 本文所提出的方法经工程实践证明具有可行性和有效性。它也为如何利用 GIS 技术更好的为岩土工程服务拓宽了思路。

参 考 文 献

- [1] Aleotti P, Chowdhury R. Landslide hazard assessment summary review and new perspectives[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 1999, 58: 21—44.
- [2] Hovland H J. Three-dimensional slope stability analysis method[A]. **Journal of the Geotechnical Engineering, Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers**[C]. California: Pacific Gas and Electric Co., San Francisco, 1977, 103(GT9): 971—986.
- [3] Hungr O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions[J]. **Geotechnique**, 1987, 37(1): 113—117.
- [4] Lam L, Fredland D G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1993, 30: 905—919.
- [5] Carraea A, Cardinsli F, Guzzetti M, Reichenbach P. GIS technology in mapping landslide hazard[A]. **Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards**[M]. Netherlands: Publication, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1995. 135—175.
- [6] van Westen C J. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation[J]. **International Journal of Earth Sciences CGR Geologische Rundschau**, 1997, (86): 404—414.
- [7] Burton A, Arkell T J, Bathrst J C. Field variability of landslide model parameters[J]. **Environmental Geology**, 1998, 35(2-3): 100—114.
- [8] Ahbalagan D. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain[J]. **Engineering Geology**, 1992, 32: 269—277.
- [9] Philip T, Steven E. An automated approach to the classification of the slope units using digital data[J]. **Geomorphology**, 1998, 21: 251—264.
- [10] van Westen C J. Application of geographic information systems to landslide hazard zonation[M]. Netherlands: ITC Publication vol.15, Enschede, 1993.
- [11] Qiu C, Esaki T, Zhou G, Xie M. Development of GIS-based intelligent slope units identifying tool for 3D slope stability evaluation[A]. **Proceedings of International Workshop on Earth Science and Technology, Fukuoka**[C]. Japan: Kyushu University, 2003. 115—122.
- [12] Xie M, Esaki T, Zhou G, Mitani Y. GIS-based 3D critical slope stability analysis and landslide hazard assessment[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers**, 2003, 129(12): 1 109—1 118.
- [13] Xie M. GIS-based Three-dimensional Landslide Hazard Assessment: Development of Theory and a System, Doctor Graduation Thesis[M]. Japen: Kyushu University, Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, 2002.