

滑坡灾害预测模拟及监测 预警系统

谢谟文 李清波 刘翔宇 著

科学出版社

北京

科学出版社
信息技术出版中心
WWW.ABOOK.CN

内 容 简 介

本书是作者数年来在滑坡灾害预测模拟及监测预警系统方面所取得研究成果的总结。本书将 GIS 技术、滑坡监测技术及空间评价方法、滑坡运动模拟与滑坡灾害综合评价相结合,实现基于 GIS 的边坡三维极限平衡模型和算法,以及降雨入参与三维边坡极限平衡相结合的耦合模型;提出相对位移速率比的滑坡空间评价指标,将 SPH 方法与物理力学模型相结合应用于滑坡运动模拟中,在理论上解决了滑坡灾害定量力学评价模型的难点,实现了对滑坡的定量评价、预测模拟及监测预警信息化管理,以期推动滑坡灾害的精细化预测模拟,提高预警预测精度和提升预警能力。

本书可供从事地学、滑坡灾害、岩土工程、工程地质等方面研究的科研人员及高等院校相关专业的师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

滑坡灾害预测模拟及监测预警系统/谢谟文,李清波,刘翔宇著. —北京:科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057698-9

I. ①滑… II. ①谢…②李…③刘… III. ①滑坡-地质灾害-预警系统-研究 IV. ①P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 122791 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 200 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换())

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62139281 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

信息技术快速发展的同时也大大促进了其他学科的发展，也改变着传统的科学研究方法。滑坡灾害的预测模拟及监测预警已成为广大地质科研人员十分重视的科研课题。对于滑坡灾害的预测预报，应包括对滑坡发生的空间预测、范围预测及时间预报。本书是作者近 10 年来在滑坡灾害预测模拟及监测预警系统方面研究和实践工作的总结。本书将 GIS 技术、滑坡监测技术及空间评价方法、滑坡运动模拟与滑坡灾害综合评价相结合，实现了基于 GIS 的边坡三维极限平衡模型和算法，以及降雨入渗与三维边坡极限平衡相结合的耦合模型，提出了相对位移速率比的滑坡空间评价指标，将 SPH 方法与物理力学模型相结合应用于滑坡运动模拟中，在理论上解决了滑坡灾害定量力学评价模型的难点，实现了对滑坡的定量评价、预测模拟及监测预警信息化管理，以期推动滑坡灾害的精细化预测模拟，提高预警预测精度和提升预警能力。

本书由谢谟文负责撰写第 1 章、第 4 章和第 5 章，李清波负责撰写第 6 章和第 7 章，刘翔宇负责撰写第 2 章和第 3 章。全书由谢谟文统稿、定稿。此外，北京科技大学空间技术减灾研究所的柴小庆、许波、胡嫚、何波、王立伟等研究生也参加了与本书相关的研究工作，在此深表谢意！

本书相关研究工作得到了国家自然科学基金委员会、北京科技大学空间技术减灾研究所、国核电力规划设计研究院、黄河勘测规划设计有限公司、中国地质环境监测院、中国电建成都勘测设计研究院、长江三峡勘测研究院等单位的资助和支持，深表感谢！

科学出版社
职教技术出版中心
www.abook.cn

科学出版社
职教技术出版中心
www.abook.cn

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 滑坡灾害研究的意义	1
1.2 滑坡监测及预测研究现状	1
1.3 滑坡空间评价方法	2
第 2 章 基于 GIS 的边坡稳定评价模型	4
2.1 GIS 栅格数据与边坡三维极限平衡的柱体分析方法	4
2.2 模型 1: 经典柱体单元模型	10
2.3 模型 2: 扩展的 Bishop 三维模型	14
2.4 模型 3: 扩展的 Janbu 三维模型	15
2.5 模型 4: 基于滑动面上正应力分布假定的方法	15
2.6 边坡破坏概率计算	19
2.7 迭代计算	20
2.8 算法实现	22
第 3 章 降雨滑坡三维评价模型	25
3.1 考虑外水压力的模型研究	25
3.1.1 外水压力定义	25
3.1.2 库水位涨落引起的水压力变化	26
3.2 降雨渗流的三维水文地质模型	27
3.2.1 恒定降雨强度入渗模型	28
3.2.2 非恒定降雨强度入渗模型	32
3.2.3 基于 GIS 的降雨入渗模型与边坡稳定性分析耦合的极限平衡模型	35
3.3 GIS 支持下的模型算法及程序实现	38
3.3.1 需求分析	38
3.3.2 系统功能简述	39
3.3.3 算法及程序实现	41
3.4 实例分析	44
3.4.1 算例一	44

3.4.2	算例二	45
第 4 章	蠕动型滑坡变形位移与内部破坏特征差分模型	49
4.1	强度折减法	49
4.2	经典边坡稳定性分析	50
4.3	滑坡实例	54
4.3.1	实验验证	54
4.3.2	实例验证	58
4.4	应用	62
4.4.1	地表与深部变形特征分析	63
4.4.2	变形机制分析	71
第 5 章	基于 GIS 与 SPH 方法的滑坡运动模拟	75
5.1	SPH 方法阐述	75
5.1.1	SPH 方法的基本思想	75
5.1.2	SPH 方法的基本公式	76
5.1.3	光滑函数	79
5.2	流体动力学控制方程的 SPH 求解	82
5.2.1	拉格朗日形式的控制方程	82
5.2.2	Navier-Stokes 方程的 SPH 算法公式	84
5.3	改进的 SPH 方法	86
5.4	基于宾汉流体本构的模型	88
5.5	关键数值技术	90
5.5.1	粒子搜索方法	90
5.5.2	边界条件	91
5.6	GIS 平台三维滑坡模型	94
5.6.1	GIS 信息化边坡模型	94
5.6.2	三维滑坡粒子模型	95
5.7	滑坡模拟算例	97
5.7.1	唐家山滑坡	97
5.7.2	王家岩滑坡	102
5.7.3	东河口滑坡	105
第 6 章	滑坡监测数据的空间分析及安全预测	109
6.1	滑坡监测数据的空间分析方法	109
6.1.1	二维可视化分析	109

6.1.2 空间分析.....	117
6.2 滑坡位移空间评价方法.....	124
6.2.1 相对位移速率比方法研究.....	124
6.2.2 滑坡位移空间评价方法.....	136
6.3 滑坡综合时空安全预测.....	139
6.3.1 滑坡综合时空预测方法.....	140
6.3.2 不等时距灰色 GM (1,1) 预测模型.....	141
6.3.3 多项式回归模型.....	143
第 7 章 滑坡监测预警系统.....	145
7.1 需求分析.....	145
7.2 开发策略.....	145
7.2.1 WebGIS 的特点及功能.....	145
7.2.2 WebGIS 实现技术.....	146
7.2.3 开发平台选择.....	146
7.2.4 系统架构.....	147
7.3 功能模块.....	148
7.4 界面设计.....	155
主要参考文献.....	158

科学出版社
职教技术出版中心
www.abook.cn

第1章 绪 论

1.1 滑坡灾害研究的意义

滑坡是一种常见多发的地质灾害，在全球范围内分布很广。滑坡作为仅次于地震的第二大地质灾害，其破坏能力巨大，给人类生命财产安全造成威胁。因此，开展滑坡监测及综合时空分析、模拟滑坡灾害影响范围等研究工作，可以避免和减轻灾害损失，具有十分重要的现实意义。

有效的滑坡灾害体监测方法，是避免或减少灾害造成较大损失的关键技术之一，通过对滑坡体进行灾害发生前的监测，不但可以了解和掌握滑体的演变过程，把握滑坡体运动位移特征，还能为滑坡的预测预报提供基本的数据支持，具有重大意义。

滑坡监测由早期的简易观测朝着高精度、自动化、远程化的方向发展，进而使获取的监测数据量相当庞大。因此，对海量监测数据进行高效的管理和分析成为准确掌握滑坡演变过程及特征的关键环节。滑坡是一个空间实体，具有很强的空间特性，而以往的监测数据分析和预测方法针对测点的数据本身进行，分析结果欠佳。因此，研究滑坡监测数据的空间分析技术，综合考虑监测点的数据与其空间位置及周围的地质环境特征，从空间层面上对监测数据进行分析 and 挖掘，获取滑坡的变形特征信息，具有很重要的学术价值和现实意义。

1.2 滑坡监测及预测研究现状

滑坡监测技术的发展与监测设备的发展密切相关。先后经历了宏观地质经验观察阶段、简易观测阶段、仪器监测阶段，并进一步朝着高精度、自动化、远程化的方向发展。宏观地质经验观察法是一种定性的观测手段，由于早期缺少仪器设备，必须人工亲临现场，观察滑坡的表面变形特征、地表水出露、地下水位突升、动植物异常等来评判滑坡的安全状况。简易观测法是早期的定量监测方法，如测量两点间距的拉线法、测量裂缝宽度的木桩法、旧裂缝填土陷落深度的肉眼观察法等。随着科技的发展，各种监测仪器，如经纬仪、水准仪、测距仪、倾斜仪、全站仪、测缝计、渗压计、应力计等相继涌现。它们使滑坡监测开始进入半自动化、自动化阶段。近年来，全球定位系统（global positioning system, GPS）测量、近景摄影测量技术、声发射法、时域反射技术、激光扫描仪等高精度监测

仪器也开始被用于滑坡监测领域。伴随着网络及遥感技术的发展,光学遥感、微波遥感及合成孔径雷达等远程监测技术应用于广域滑坡的识别方面,实现了滑坡的面状监测。目前主要的滑坡监测方法按照监测的内容大致可以分为地表变形监测、内部变形监测、环境因素监测、地音监测、支护结构监测、巡视监测。

目前对常规监测数据的分析方法有过程线、分布图和相关图,分别用以表达物理量随时间的变化、物理量在某一监测断面或钻孔中的分布以及两个监测量之间的相关关系等,从而直观地判断滑坡的演变过程及变化特征。

过去的几十年中,数值方法的发展极大地促进了滑坡模拟研究的进展,基于网格划分的数值方法仍是目前学术研究与应用中的主流方法。但由于自身的网格属性,其仍存在着一定的局限性,如在计算大变形、运动物质交界面和自由表面流动等问题中网格畸变会导致误差过大或计算终止。由于这些固有的局限性,无网格方法在此背景下应运而生。作为发展最早、目前最为成熟的无网格方法——光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法的纯拉格朗日性质,使其在自由表面流动、移动界面和大变形问题的解决方法中脱颖而出。

1.3 滑坡空间评价方法

安全监测是发现及预测滑坡灾害最直接且可靠的方式,而对监测数据进行及时高效的分析是监测预警中的核心内容。传统的数据处理方法如历时曲线图、分布图等可视化程度不高,无法直观地反映监测数据与其赋存地质环境之间的关系。滑坡的预测也仅基于单点的监测数据进行建模,忽略了其空间特性。地理信息系统(geographic information system, GIS)及互联网技术的高速发展为滑坡监测信息及其赋存地质环境的空间可视化、实时分析及趋势预测提供了一个功能强大而又方便、有效的分析平台。

由于国内外基于GIS的监测数据分析侧重于滑坡监测对象的空间分布,以及实现空间对象和监测信息的交互查询,而对空间分析研究较少,未能形成系统的空间分析方法。

本书基于GIS的空间分析功能,将滑坡的地质信息和监测数据相结合,系统地研究了监测数据的空间分析方法,从不同角度反映了监测数据的空间分布特征,从而能够准确而客观地评价滑坡的空间变形特征。针对单点预测的现状,提出采用相对位移速率比评价单点变形阶段的标准,并结合空间分析技术,探讨基于多点监测数据的滑坡综合时空评价和预测的相对位移速率比分析方法,从而快速地辨识滑坡的整体变形状态及滑动变化情况。

此外,本书以高效、高精度的计算机数值技术预测潜在的影响范围,建立基

于地理信息系统 (GIS) 平台的滑坡粒子模型生成的方法与三维 SPH 模型, 并提出应用该模型进行土质滑坡模拟的方法; 通过与土质滑坡实例的对比和分析, 验证改进方法下的三维宾汉流体本构 SPH 模型是比二维模型更精确的模型, 且适用于流动型滑坡的运动模拟。

科学出版社
职教技术出版中心
www.abook.cn

第 2 章 基于 GIS 的边坡稳定评价模型

2.1 GIS 栅格数据与边坡三维极限平衡的柱体分析方法

地理信息系统 (GIS) 可对与所有空间相关的科学提供一个公用的平台和通用的数据结构, 近年来其在土木工程中的应用也越来越广泛。GIS 提供一种多功能的工具进行空间数据分析和表现, 其相应的数据均存储于空间数据库中。GIS 既可以大大缩短数据准备和处理的时间, 还能处理来自不同数据源的信息。可以预见, GIS 数据形式将成为空间数据处理的基本数据形式。

尽管许多工程师都知道 GIS 技术, 但其强大的分析能力和潜能还未被深知。大多相关的文献局限于大区域的课题, 如土地利用分析、环境分析及水文分析等。实际上, 在小规模的课题研究中, GIS 的应用也是可能的。

对于三维边坡问题, 其稳定性取决于复杂空间分布的地形、地层、岩土力学参数及地下水等因素, 但这些空间分布的信息很难在一般的边坡三维稳定分析程序中进行处理, 而 GIS 恰好提供了一个公用的平台来处理这些复杂的空间信息。

由于所有边坡相关的数据在 GIS 中均能转换成 GIS 栅格数据, 基于柱体单元的边坡三维稳定分析模型均可采用 GIS 栅格数据集进行分析。地层、结构面和地下水位等边坡相关的信息在 GIS 中通过 GIS 数据层来表示, 它们可以是栅格数据或矢量数据。矢量数据的三种基本形式是点 (point)、线 (line)、面 (polygon), 其相应的属性数据保存在数据库中。栅格数据是用均匀分割的栅格来表示的, 一个栅格代表一个属性值, 如高程等。对于一个边坡, 可以用一组栅格数据集分别表示地面高程、地层、不连续面、地下水及力学参数等。

如图 2-1 所示, 对于一个实际边坡, 首先将边坡相关的地形和地质信息抽象为 GIS 层。一般来说, 以矢量数据形式表现的为多, 如地面等高线、钻孔资料及滑面岩土力学参数分区等。在 GIS 中, 利用空间分析 (spatial analyst) 功能可以将这些数据层转换成相应的栅格数据层。这样, 对于滑体中任一微小柱体单元, 其三维数据模型可以表现为如图 2-1 (d) 所示的栅格柱体单元。

因为与边坡有关的数据和信息均呈现空间分布, 因此采用 GIS 工具来处理这些空间数据是很方便的。在 GIS 中, 可以用 GIS 数据表述与边坡有关的地层、断层 (不连续面)、地下水和滑动面等信息。

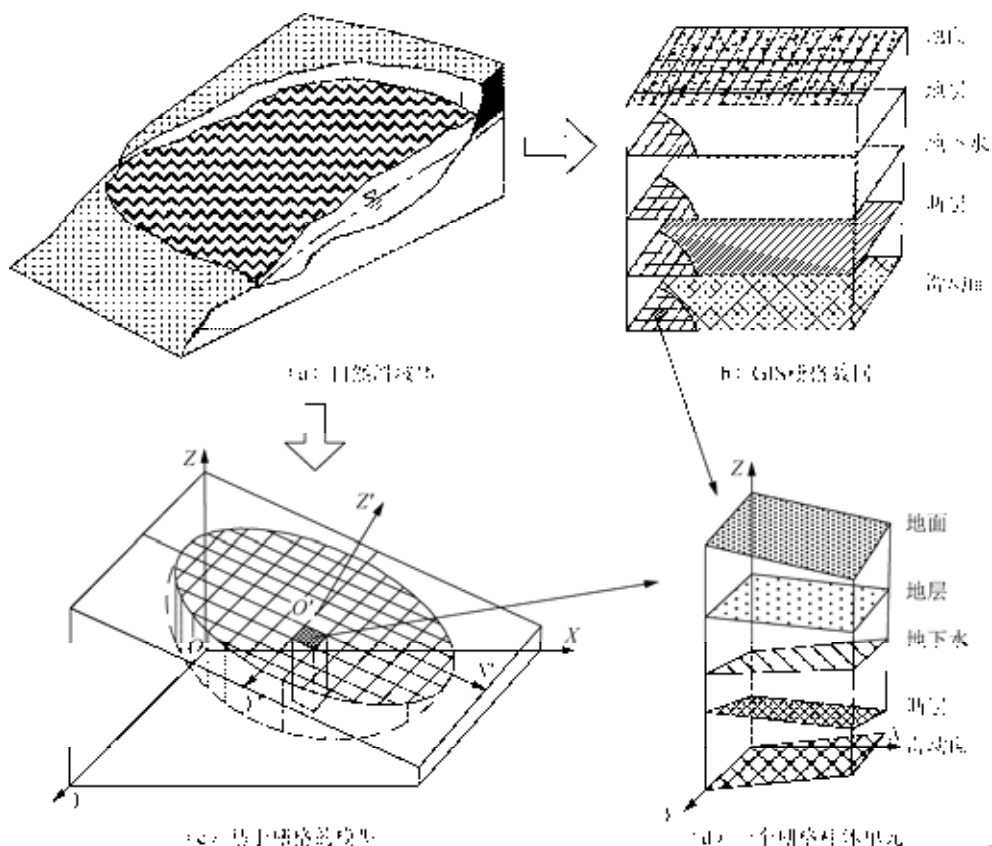


图 2-1 一个实际边坡和其相应的 GIS 数据集

这些与边坡稳定相关的 GIS 数据层与数值地形 (DEM) 一样可以是栅格数据或者以矢量数据形式来表示。矢量数据表现为三种典型的几何形式, 即点、线和面, 而每一元素的附加信息可以保存在其关联的 GIS 数据库中。每一种几何形式在 GIS 中可以有其特有的图像表现形式, 如可以用一条蓝色的线来表示一条河流, 也可以用一块蓝色的面集来表现河流的边界线。栅格数据是用连续的大小相同的像素格子来表现每一格子相对应的值, 其值可以代表标高、分类或者植物种类等属性。

在栅格数据模型中, 用栅格单元的值来代表一种属性。图 2-2 表示栅格数据的数据结构 (一)。一般来说, 栅格数据采用统一的单元大小, 单元的方向由 x - y 轴决定, 单元的边界平行于 x - y 轴, 栅格呈正方形。栅格数据的数据结构 (二) 如图 2-3 所示, 用单元大小、行列数和左下角的坐标即可描述一个栅格数据集。

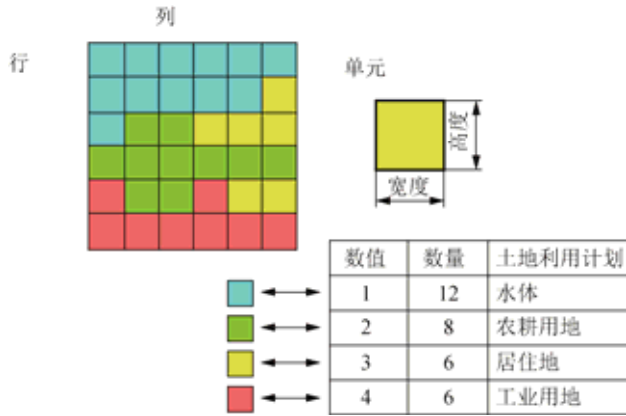


图 2-2 栅格数据的数据结构 (一)

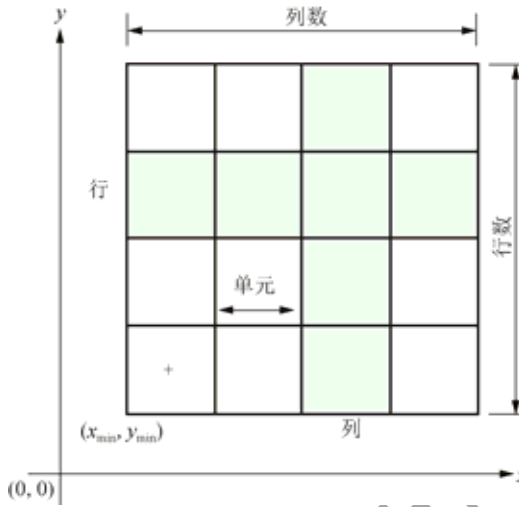


图 2-3 栅格数据的数据结构 (二)

(+表示左下角单元中心)

基于摩尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 准则, 一个滑体如图 2-4 所示, 其三维安全系数 SF_{3D} 可以用可能获得的抗滑力与滑动力之比来计算, 即

$$SF_{3D} = \frac{\text{Available_force}}{\text{Sliding_force}} \tag{2-1}$$

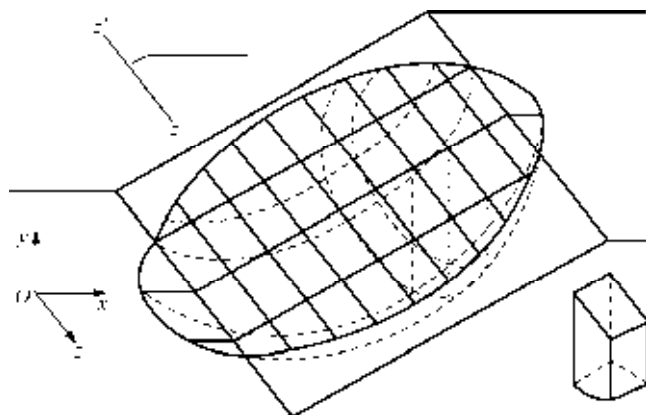


图 2-4 一滑坡体

在数学上式 (2-1) 可以表示为如下的积分形式, 即

$$SF_{3D} = \frac{\iint f_R(x, y) dx dy}{\iint f_S(x, y) dx dy} \quad (2-2)$$

式中: f_R 为滑动面上的抗滑力; f_S 为滑动力。

由于沿滑动面的滑动力函数、滑动面上的正应力分布和孔隙水压力不能显式地获得, 式 (2-2) 的积分形式往往采用差分形式进行计算为

$$SF_{3D} = \frac{\sum_x \sum_y f_R(x_i, y_i)}{\sum_x \sum_y f_S(x_i, y_i)} \quad (2-3)$$

我们已经知道, 所有与边坡有关的数据均可以表示为基于栅格单元的 GIS 栅格数据形式, 因此如果采用一个基于柱体单元的三维模型, 就可以推导出一个基于栅格数据的三维模型来计算边坡的稳定安全系数。

对于一个实际边坡 (图 2-5), 采用 GIS 空间分析功能, 所有的输入数据 (如地面标高、倾斜方向、倾斜角、地下水、地层面、滑动面及呈现空间分布的物理力学参数) 均可以转化为栅格单元的形式。如图 2-6 所示, 用一个三维栅格柱体单元 (对应于每一个栅格单元) 可以描述地面、地层、滑动面等各类与稳定性分析有关的地理地质信息。

采用滑动面的栅格数据集可以很容易地计算各栅格单元滑动面的倾向和倾角。参照图 2-7, 1~4 点的标高值可以用式 (2-4) 和式 (2-6) 计算, 其倾向和倾角可以用式 (2-7) 计算。

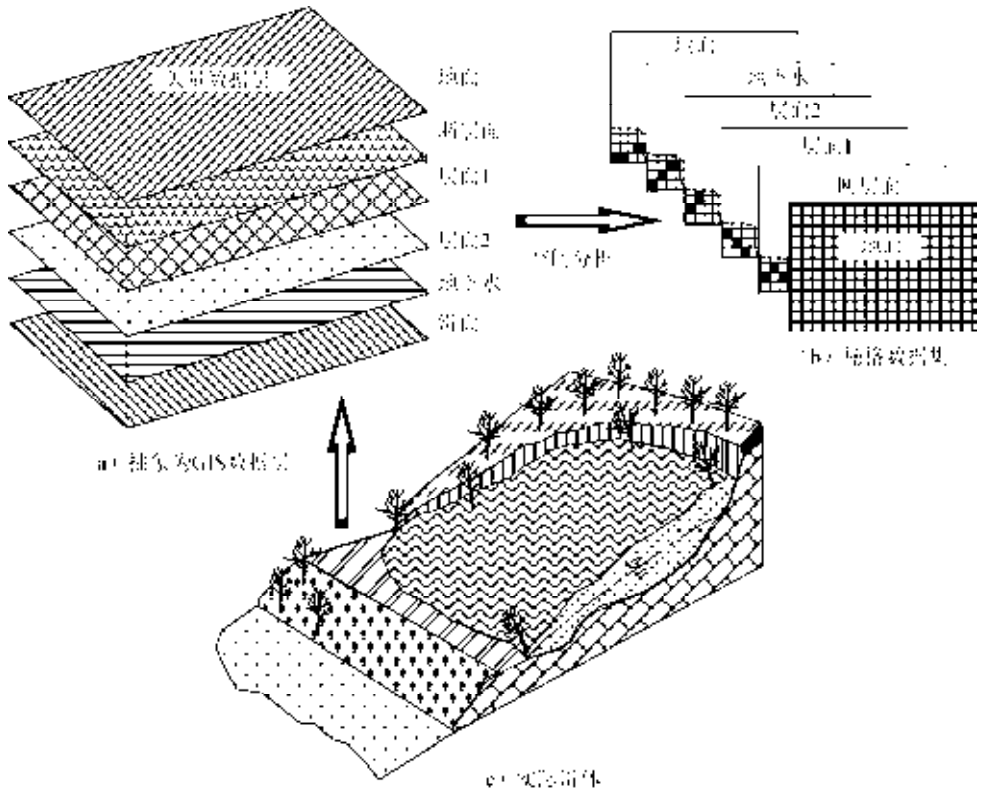


图 2-5 实际边坡及其 GIS 数据集

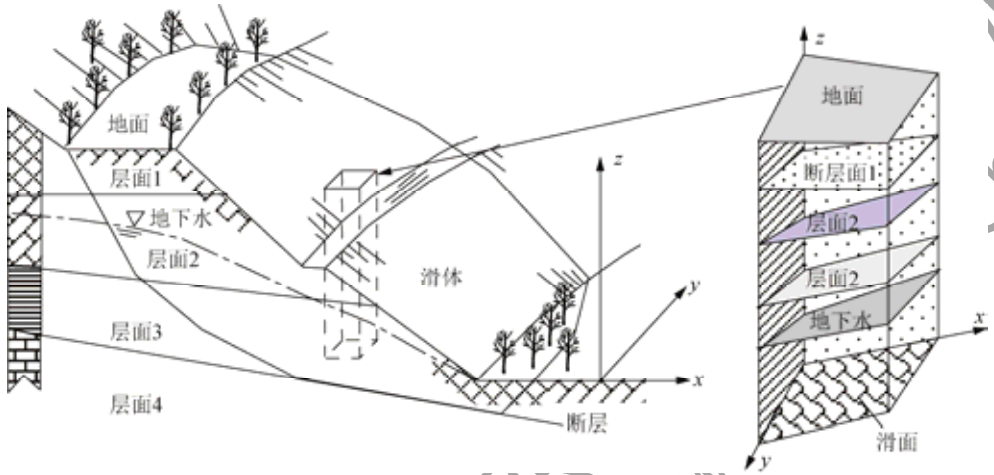


图 2-6 滑体的三维图及某一柱体的三维结构

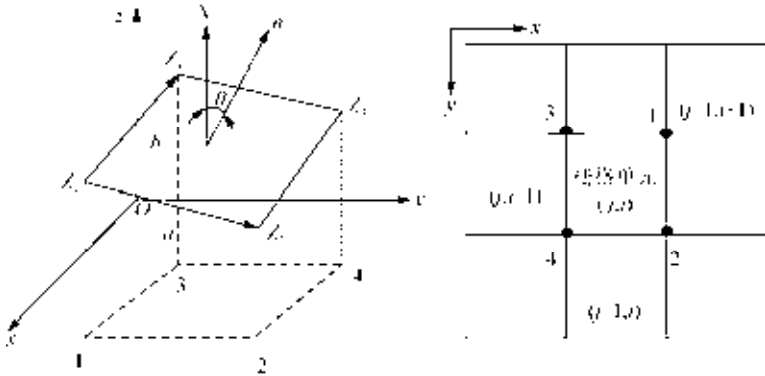


图2-7 栅格单元的倾向和倾角计算

N 为垂直方向； n 为滑动面单元的法线方向； a 、 b 为单元边长

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{Z(j,i) + Z(j-1,i) + Z(j-1,i+1) + Z(j,i+1)}{4} \\ Z_2 = \frac{Z(j,i) + Z(j,i+1) + Z(j+1,i+1) + Z(j+1,i)}{4} \\ Z_3 = \frac{Z(j,i) + Z(j,i-1) + Z(j-1,i-1) + Z(j-1,i)}{4} \\ Z_4 = \frac{Z(j,i) + Z(j+1,i) + Z(j+1,i-1) + Z(j,i-1)}{4} \end{cases} \quad (2-4)$$

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{3Z_1 + Z_2 + Z_3 - Z_4}{4} \\ Z_2 = \frac{Z_1 + 3Z_2 - Z_3 + Z_4}{4} \\ Z_3 = \frac{Z_1 - Z_2 + 3Z_3 + Z_4}{4} \\ Z_4 = \frac{-Z_1 + Z_2 + Z_3 + 3Z_4}{4} \end{cases} \quad (2-5)$$

$$\begin{cases} a_z = Z_2 - Z_1 \\ b_z = Z_3 - Z_1 \end{cases} \quad (2-6)$$

$$\begin{cases} \tan \theta = \frac{\sqrt{a_z^2 + b_z^2}}{d} \\ \tan \beta_0 = \frac{-a_z}{b_z} \end{cases} \quad (2-7)$$

上述式中： $Z(j,i)$ 为单元 (j,i) 的滑动面标高值； θ 为倾角； β_0 为倾向。

另外，采用GIS空间解析模块中的“Aspect”和“Slope”分析功能也能很容易地计算单元的倾向和倾角。

基于柱体单元的方法广泛应用于三维边坡稳定性分析。基于滑体的力和力矩平衡，很多学者提出了自己的用于边坡三维边坡稳定性分析的模型。但由于各三维极限平衡分析模型都是基于自己特有的数据结构和算法，对于工程技术人员来说，很难采用并且也不可能采用多个模型来进行比较研究。本书中采用的几个三维极限平衡分析模型均是基于统一的数据结构和统一的算法，这样便于数据更新和比较分析研究。

在 GIS 系统中，利用空间分析功能，所有的与研究区域有关的数据均可表示为 GIS 的矢量数据层，而通过设定栅格单元的尺寸（不同尺寸可代表不同精度）可以将上述 GIS 矢量数据层转换为 GIS 栅格数据层。至此，研究区域已划分为基于栅格单元的柱体，如图 2-8 所示，所有的地面、地层、地下水、断层及滑动面的数据均可来自这些栅格数据层。对于复杂的地质结构的研究区域，在 GIS 中处理如此众多的栅格数据集的效率是非常低的，且其空间解析复杂。因此，采用一个点数据集（point dataset）来储存所有的栅格数据集。在此点数据集中，一个特征数据表（feature table）用来关联所有的栅格数据，而点数据集的点形状（shape）设定为各栅格的中心点。对于图 2-8 所示的地层结构的特征数据表可用表 2-1 表示。

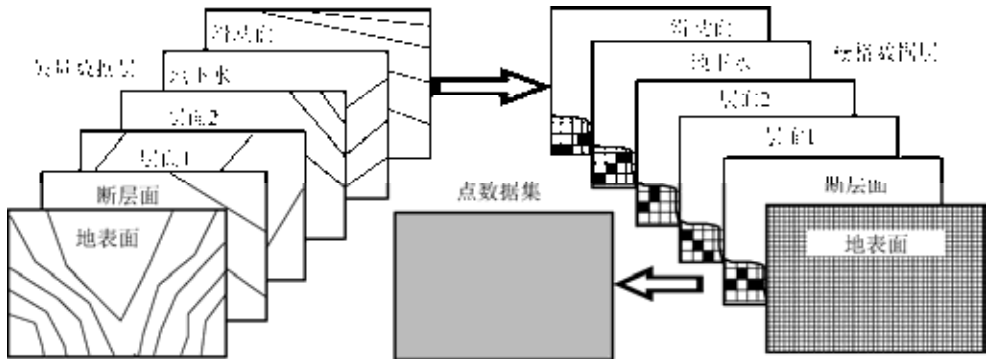


图 2-8 边坡稳定分析的 GIS 栅格数据层及点数据集

表 2-1 一个点数据集的特征数据

栅格单元编号	栅格中心的数据类型	地形参数			地质地下水参数			
		高程/m	方位 / (°)	坡度 / (°)	层面 1 高程/m	层面 2 高程/m	断层面深度/m	地下水深度/m
23	点	184.90	249.77	6.04	170.00	164.22	139.76	168.80

基于以上 GIS 栅格数据，下面来推导几个边坡稳定分析的三维极限平衡模型。

2.2 模型 1：经典柱体单元模型

经典柱体单元模型基于与 Hovland 于 1977 年提出的模型相同的假定。如

图 2-9 所示, 通过将整个分析区域划分为栅格单元, 各单元对应的栅格柱体单元即可表示为如图 2-6 所示的结构。忽略柱体单元的垂直面上的作用力, 则滑体的三维安全系数可以表示为

$$SF_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I (c'A + W \cos \theta \tan \varphi')}{\sum_J \sum_I W \sin \theta} \quad (2-8)$$

式中: SF_{3D} 为滑体三维安全系数; W 为栅格柱体的质量; A 为滑面面积; c' 为滑面的有效凝聚力; φ' 为有效内摩擦角; θ 为滑面的倾角; J 、 I 分别为滑体范围内栅格单元的行、列数。

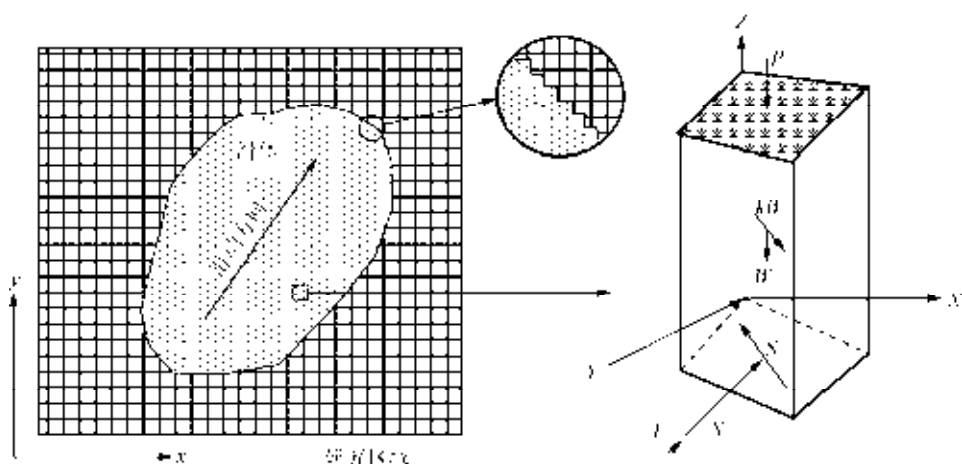


图 2-9 经典柱体单元模型

P 、 kW 为地震水平推动力; W 为重力; U 为滑动面上孔隙水压力; S 为滑动面上抗剪力

基于上述的点数据集, 式 (2-8) 可以转换为基于 GIS 的计算式。这里, 对一滑体而言, 其滑动力和抗滑力均投影到滑动方向, 而滑动方向设定为滑体滑面的主倾斜方向。图 2-10 为某一滑体滑动面各栅格倾角分布。对滑体的每一柱体, 其滑面倾向是不一样的, 滑体的主倾斜方向取滑体范围内各柱体滑面倾向分布的最频值。

图 2-11 为一柱体及其滑面与空间坐标的关系图。基于图 2-11, 式 (2-8) 的三维安全系数可以转换为基于 GIS 数据的计算式, 即参照图 2-11, 滑面面积为

$$A = ab \sin \alpha \quad (2-9)$$

同时, 参照图 2-11 可以推导

$$c' = g \tan \theta, \quad d = \frac{g}{\cos(Asp)}, \quad e = \frac{g}{\sin(Asp)}, \quad f = \frac{g}{|\cos(Asp - AvrAsp)|} \quad (2-10)$$

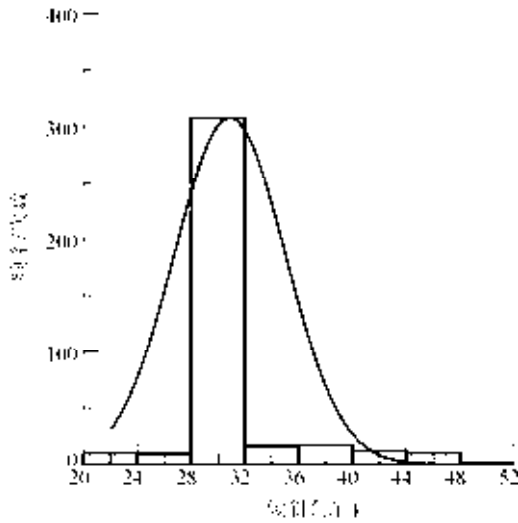


图 2-10 某一滑体滑动面各栅格倾角分布

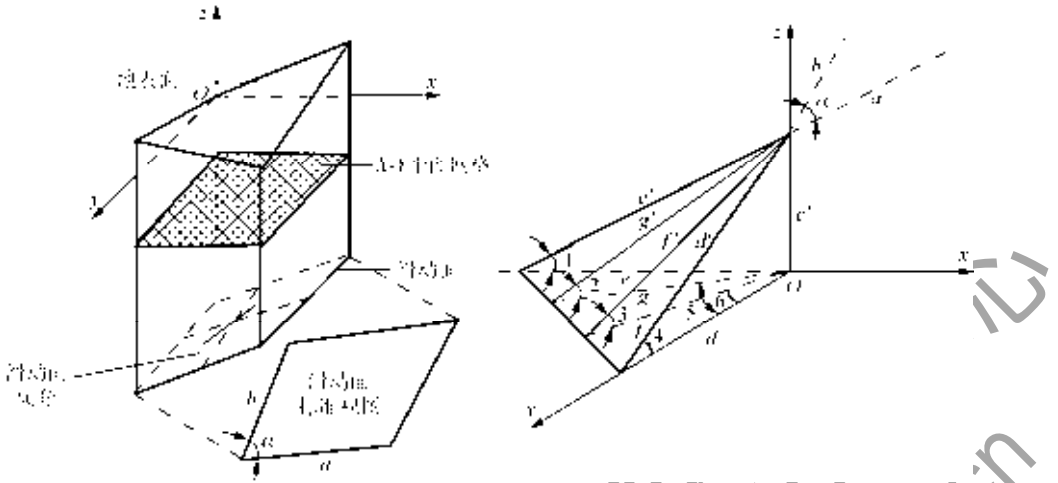


图 2-11 边坡稳定分析式推导用的一个栅格柱体的三维图

- 1. 滑面沿 x 轴的视倾角；2. 视倾角；3. 滑面沿滑体倾斜方向的视倾角；
- 4. 滑面沿 y 轴的视倾角；5. 滑体方向角；6. 滑面沿滑体滑动方向角

$$\cos \alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{e'}{d'} + \frac{d'}{e'} - \frac{e^2 + d^2}{e'd'} \right) = \sin \theta_{xz} \sin \theta_{yz} \quad (2-11)$$

其中，滑面沿 x、y 轴的视倾角可表示为

$$\tan \theta_{yz} = \frac{c'}{d} = \tan \theta \cos(Asp), \quad \tan \theta_{xz} = \frac{c'}{e} = \tan \theta \sin(Asp) \quad (2-12)$$

考虑到 $a = cellsize / \cos \theta_{xz}$ 和 $b = cellsize / \cos \theta_{yz}$ ，滑面面积为

$$A = \text{cellsize}^2 \left[\frac{\sqrt{(1 - \sin^2 \theta_{xz} \sin^2 \theta_{yz})}}{\cos \theta_{xz} \cos \theta_{yz}} \right] \quad (2-13)$$

沿滑体滑动方向的视倾角为

$$\tan \theta_{\text{Avr}} = \frac{c'}{f} = \tan \theta |\cos(\text{Asp} - \text{AvrAsp})| \quad (2-14)$$

因此 Hovland 三维模型的三维安全系数可以转换为基于 GIS 数据的计算式, 即

$$SF_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I \{c'A + [(W + P) \cos \theta - U] \tan \phi'\}}{\sum_J \sum_I [(W + P) \sin \theta_{\text{Avr}} + kW] - E} \quad (2-15)$$

如果基于滑动方向力的平衡可以得到修正的 Hovland 三维模型, 即

$$SF_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I \{c'A + [(W + P) \cos \theta - U] \tan \phi'\} \cos \theta_{\text{Avr}}}{\sum_J \sum_I [(W + P) \sin \theta_{\text{Avr}} \cos \theta_{\text{Avr}} + kW] - E} \quad (2-16)$$

上述式中, 对每一个柱体栅格单元, θ 为滑面的倾角; θ_{xz} 为滑面沿 x 轴的视倾角; θ_{yz} 为滑面沿 y 轴的视倾角; θ_{Avr} 为滑面沿滑体倾斜方向的视倾角; Asp 为滑面的倾斜方向; AvrAsp 为滑面沿滑体滑动方向; E 为外加锚固力的总和; cellsize 为栅格单元尺寸; W 为各柱体单元的质量, 如图 2-12 所示。

$$W = d^2 \sum_{i=1}^n h_i \gamma_i \quad (2-17)$$

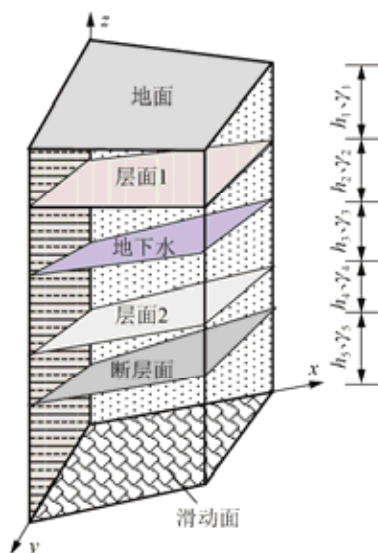


图 2-12 柱体单元的质量示意图

每一柱体单元上的垂直荷载为

$$P = d^2 p \tag{2-18}$$

孔隙水压力为

$$U = Au \tag{2-19}$$

式中： u 为孔隙水压力的分布值。

2.3 模型 2：扩展的 Bishop 三维模型

扩展的 Bishop 三维模型的算法是 Hungr 于 1987 年提出的，如图 2-13 所示。由于二维 Bishop 模型在工程实践中广泛应用，该扩展 Bishop 三维模型也得到广泛采用。该模型基于以下两点假定。

- (1) 忽略柱体单元的垂直面上的垂直向剪切力。
- (2) 各柱体单元的垂直方向力的平衡式和整个滑体的力矩平衡足以求解未知力。

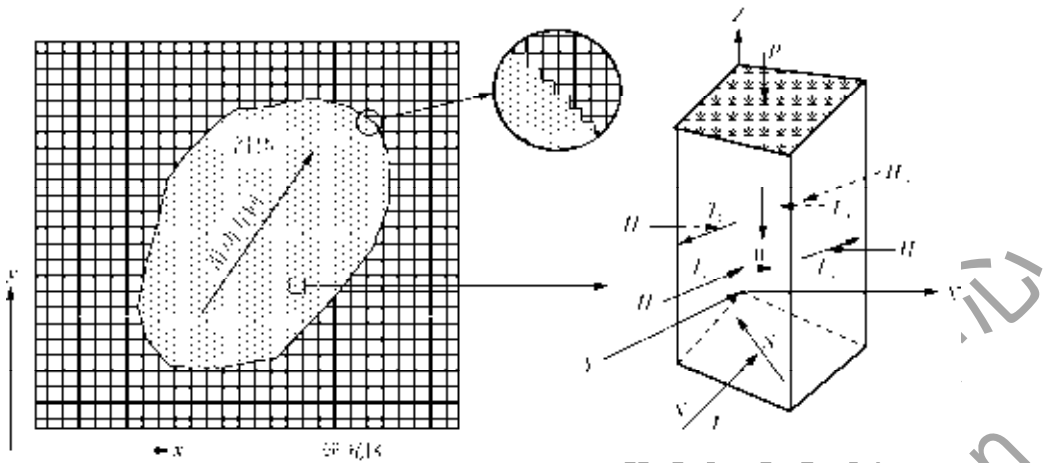


图 2-13 扩展的 Bishop 三维模型

参照图 2-13，考虑各柱体单元的垂直方向力的平衡可以得到（其推导过程与模型 1 相同）

$$P + W = N \cos \theta + SF_{3D}^{-1} [c'A + (N - U) \tan \phi'] \sin \theta_{Avr} \tag{2-20}$$

因此滑动面上的正应力为

$$N = \frac{P + W + SF_{3D}^{-1} U \tan \phi' \sin \theta_{Avr} - SF_{3D}^{-1} c'A \sin \theta_{Avr}}{\cos \theta + SF_{3D}^{-1} \tan \phi' \sin \theta_{Avr}} \tag{2-21}$$

基于整个滑体对一个垂直与滑动方向的转动轴的力矩平衡，其方程式为

$$\sum_j \sum_l [(N - U) \tan \phi' SF_{3D}^{-1} + c'ASF_{3D}^{-1}] = \sum_j \sum_l (W + P) \sin \theta_{Avr} \tag{2-22}$$

则其三维安全系数可以用式 (2-23) 求解为

$$SF_{3D} = \left(\sum_J \sum_I (W + P) \sin \theta_{Avr} \right)^{-1} \sum_J \sum_I \frac{(W + P - U \cos \theta) \tan \varphi' + c'A \cos \theta}{\cos \theta + SF_{3D}^{-1} \tan \varphi' \sin \theta_{Avr}} \quad (2-23)$$

由于 SF_{3D} 隐含在式 (2-23) 中, 可以用式 (2-21) 和式 (2-22) 迭代计算。

2.4 模型 3: 扩展的 Janbu 三维模型

从模型 2 的推导可知, 如考虑滑体的水平方向的力的平衡, 其三维安全系数可以用式 (2-24) 和式 (2-25) 求解

$$N = \frac{P + W + SF_{3D}^{-1} U \tan \varphi' \sin \theta_{Avr} - SF_{3D}^{-1} c'A \sin \theta_{Avr}}{\cos \theta + SF_{3D}^{-1} \tan \varphi' \sin \theta_{Avr}} \quad (2-24)$$

$$SF_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I [c'A + (N - U) \tan \varphi'] \cos \theta_{Avr}}{\sum_J \sum_I (N \sin \theta \cos(Asp - AvrAsp) + kW) - E} \quad (2-25)$$

同样, 由于 SF_{3D} 隐含在式 (2-25) 中, 可以用式 (2-24) 和式 (2-25) 迭代计算。

2.5 模型 4: 基于滑动面上正应力分布假定的方法

上面介绍的几个模型均采用了柱体单元的方法, 这种传统的方法是通过假定柱体间的相互作用力来直接计算滑动面上的正应力分布。许多学者都研究过滑动面上的正应力分布情况并提出了一些方法来计算其分布。Leshchinsky 和 Huang 于 1992 年提出的极限平衡方法不是基于柱体单元的方法而是基于三个函数 $z(x, y)$, $\sigma(x, y)$, $\theta(x, y)$ (即滑动面上的标高、正应力及倾角分布) 来推导极限平衡公式。Leshchinsky 和 Huang 的方法是一个通用的用于边坡三维稳定分析方法, 它能处理一般对称的滑动面。在其数学公式推导过程中, 沿任一滑动面的正应力通过满足全局力和力矩平衡来寻找最危险滑动面和计算最小安全系数。

基于滑动面上的正应力分布方法的优点是它不用假定根本不存在的柱体单元间的应力及分布, 但其最大的障碍是复杂的数学计算和困难的算法。一个有效的解决方案是假定滑动面上的正应力分布。这种方法已经在二维的计算中采用。Yang 等于 2001 年提出的方法是在二维的断面中将边坡滑体作为一个整体而不用将其条分, 他们假定滑动面上的正应力分布呈三次方曲线。这个正应力分布假定使得边坡二维问题静定可解, 并满足所有的力和力矩平衡。四个未知数通过线性方程组求解。这种方法得到的结果比传统的条分法更准确, 这是因为假定更符合实际

并且满足了所有的力和力矩平衡。Zhu 和 Lee 于 2002 年提出的方法也是基于滑动面上的正应力分布假定，他们假定沿滑动面的正应力分布呈三阶拉格朗日多项式 (Lagrange polynomial of degree 3)，其中在滑动面的上下两端为已知而在中间设定两个未知点，这样滑体的三个平衡方程 (即水平方向力的平衡、垂直方向力平衡及力矩平衡) 是显式可解的。Chen 于 1975 年提出的解决方案局限于 Φ 坐标系统，虽然可解但非常复杂，且极限平衡方法很难应用这种 Φ 坐标系统。Leshchinsky 于 1990 年和 1992 年提出的方法更复杂，滑体分解为 n 个片断，需要解 n 个线性方程组和 3 个非线性方程求解。

基于滑动面的正应力分布的方法也可应用于三维边坡稳定性分析。这里，我们首次提出一个假定三维正应力分布的极限平衡模型，同时其算法与基于柱体单元方法一样也是采用差分的方法计算，因此这个模型本身与其他模型均可基于同样的输入数据和柱体单元参数来计算。

为了推导三维安全系数的计算式 (图 2-14)，首先将 X' 轴转换到主滑动方向 X' 并将原点移到滑体多边形的中心 $X'O'Y'$ ，其变换式为

$$\begin{cases} x' \\ y' \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos(AvrAsp - 90^\circ) & -\sin(AvrAsp - 90^\circ) \\ \sin(AvrAsp - 90^\circ) & \cos(AvrAsp - 90^\circ) \end{bmatrix} \begin{cases} x - x_0 \\ y - y_0 \end{cases} \quad (2-26)$$

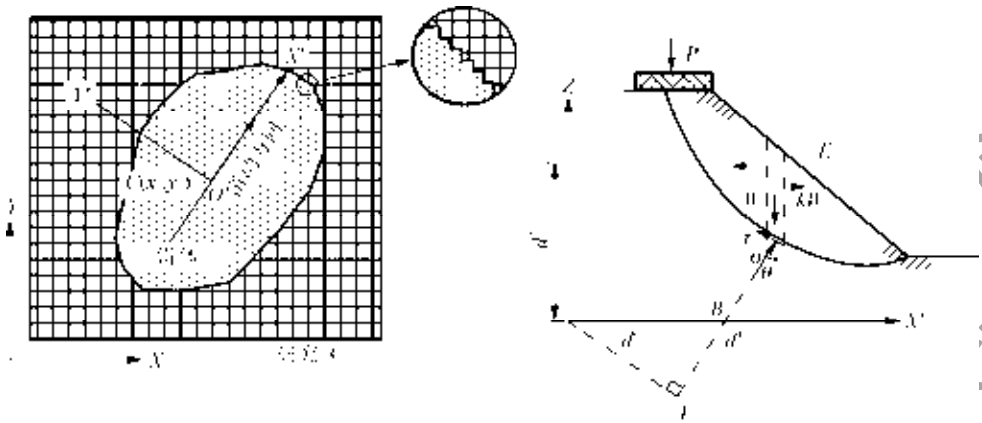


图 2-14 基于滑动面上正应力分布假定的三维力学模型

对整个滑体，沿滑动方向的总水平力的平衡式为

$$X' = \sum_j \sum_l \left(\frac{cA + A(\sigma - u) \tan \phi}{SF_{3D}} \cos \theta_{Avr} - A\sigma \sin \theta \cos(Asp - AvrAsp) - kW \right) + E = 0 \quad (2-27)$$

同时垂直于滑动方向的水平力平衡式为

$$Y' = \sum_j \sum_l A\sigma \sin \theta \sin(Asp - AvrAsp) = 0 \quad (2-28)$$

垂直方向的力平衡式为

$$Z = \sum_j \sum_l \left[\frac{cA + A(\sigma - u) \tan \varphi}{SF_{3D}} \sin \theta_{Avr} + A\sigma \cos \theta - W - P \right] = 0 \quad (2-29)$$

整个滑体相对 $O'Y'$ 轴的力矩平衡式为

$$M = \sum_j \sum_l Wd^W + \sum_j \sum_l kWd^{kW} + \sum_j \sum_l Pd^P - \sum_j \sum_l \sigma Ad^\sigma - \sum_j \sum_l \frac{cA + A(\sigma - u) \tan \varphi}{SF_{3D}} d^\tau - Ed^E = 0 \quad (2-30)$$

式中： d^E 为水平总荷载 E 的力臂； d^P 、 d^W 、 d^{kW} 、 d^σ 、 d^τ 分别为 P 、 W 、 kW 、 σ 、 τ 的力臂。对每一柱体单元如图 2-14 所示，其力臂计算式可以推导为

$$d^P = d^W = x' \quad (2-31)$$

$$d^{kW} = z + 0.5H \quad (2-32)$$

$$d^\sigma = (x' - z \tan \theta_{Avr}) \cos \theta_{Avr} \quad (2-33)$$

$$d^\tau = (x' - z \tan \theta_{Avr}) \sin \theta_{Avr} + \frac{z}{\cos \theta_{Avr}} \quad (2-34)$$

式中： x' 、 z 为每一柱体单元底面中心的坐标值（在 $X'Y'Z$ 坐标系中）； H 为柱体单元的高度。水平地震力假定作用在柱体单元的中心。

正如在二维计算中所用的一样，这里从假定正应力的分布入手。正应力的假定如图 2-15 所示，对于滑体，“ C ” 是滑体范围多边形的中心，沿滑动方向“ ab ” 是长轴方向，短轴是其垂直方向。如图 2-15 所示，滑体的尺寸特征用“ AA ” 和“ BB ” 两个参数表示。对沿着滑动方向的断面图，正应力分布假定为三阶拉格朗日多项式，即

$$\sigma = \lambda_1 \xi_1(x') + \lambda_2 \xi_2(x') + \xi_3(x') \quad (2-35)$$

$$\xi_1(x') = \frac{(x' - a)(x' - b)(x' - a_2)}{(a_1 - a)(a_1 - b)(a_1 - a_2)} \quad (2-36)$$

$$\xi_2(x') = \frac{(x' - a)(x' - b)(x' - a_1)}{(a_2 - a)(a_2 - b)(a_2 - a_1)} \quad (2-37)$$

$$\xi_3(x') = \sigma_a \frac{(x' - b)(x' - a_1)(x' - a_2)}{(a - b)(a - a_1)(a - a_2)} + \sigma_b \frac{(x' - b)(x' - a_1)(x' - a_2)}{(b - a)(b - a_1)(b - a_2)} \quad (2-38)$$

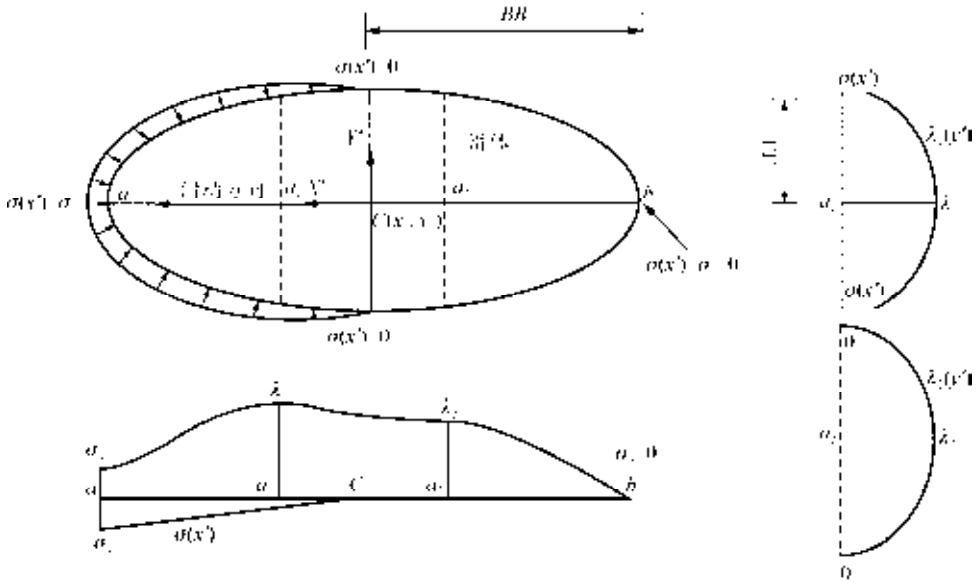


图 2-15 滑动面上的正应力假定

沿滑动方向中间的任意两个点选定在 1/3 和 2/3 处，即

$$a_1 = a + \frac{1}{3}(b - a) \tag{2-39}$$

$$a_2 = a + \frac{2}{3}(b - a) \tag{2-40}$$

参见图 2-9，“C”是可能滑体的中心点，两个参数“AA”和“BB”分别表示滑体的宽度和长度。在滑动面边界处的上半部，其正应力假定为 0，而其下部假定为 $\sigma(x')$ 。必须指出的是，当滑动面很陡时，在滑动面的上部可能出现负的正应力（拉应力），拉应力很容易使之在顶部产生张裂缝，因此正应力的部位不一定正好在滑动面的顶部，可能在顶部附近或者低于顶部的位置。比较来说，顶部的拉应力非常小，可以忽略不计。这一点在前人的研究中已经得到证明。 $\sigma(x')$ 假定为线性分布，沿着垂直于滑动方向的剖面，其正应力的分布假定为抛物线分布（图 2-15）为

$$\lambda_1(x') = g_1x'^2 + g_2x' + g_3 \tag{2-41}$$

$$\lambda_2(x') = k_1x'^2 + k_2x' + k_3 \tag{2-42}$$

考虑到边界条件，上述式可以表示为

$$g_1 = (AA^2)^{-1}[\sigma(x') - \lambda_1] \tag{2-43}$$

$$g_2 = 0 \tag{2-44}$$

$$g_3 = \lambda_1 \tag{2-45}$$

$$k_1 = -(AA^2)^{-1} \lambda_2 \quad (2-46)$$

$$k_2 = 0 \quad (2-47)$$

$$k_3 = \lambda_2 \quad (2-48)$$

至此，四个方程组(2-27)~(2-30)联合方程(2-36)可以用来求解 SF_{3D} 、 λ_1 、 λ_2 和 σ_a 四个未知数。

2.6 边坡破坏概率计算

下面采用两种方法进行边坡的破坏概率计算。

一种方法是每次计算三维安全系数时都利用蒙特卡罗模拟方法对两个重要的剪切参数 c 和 φ 产生在一定分布函数内的随机变量。如图2-16所示，在每次试算中，都产生一次滑动面上每一单元处 c 和 φ 值的GIS栅格数据来计算一个边坡三维安全系数，其破坏概率则通过大量的蒙特卡罗模拟计算获得。

另一种方法是基于 c 和 φ 及其相关的破坏概率 $P = f(c, \varphi)$ 均呈现正态分布的假定。从正态分布函数的特征来看，在 $\mu \pm 3\sigma$ （其中 μ 是平均值， σ 标准偏差）范围内的概率是99.75%，因此我们可以近似地将 $\mu \pm 3\sigma$ 认为是其随机变量的上、下限值。实际在边坡工程的概率分析中，我们得到的参数 c 、 φ 往往给定为一个范围值 $[\min, \max]$ ，因此可以用 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 来计算平均值 μ 和标准偏差 σ 。参见图2-16，其中 SF_{3D} 的平均值，即最大和最小值可以通过 c 和 φ 的范围值 $(\mu - 3\sigma)$ 和 $(\mu + 3\sigma)$ 来计算，最后参见图2-17，破坏概率可以用式(2-49)计算为

$$P(SF_{3D} \leq 1) = \int_{-\infty}^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \cong \int_{-3\sigma}^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2-49)$$

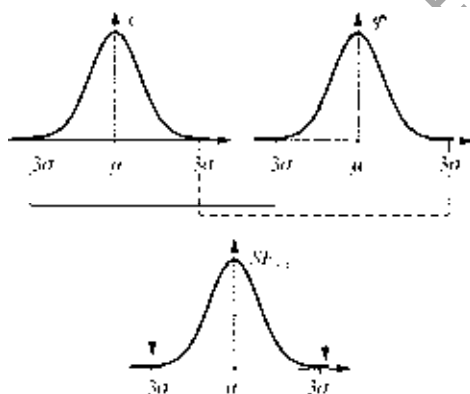


图2-16 最大和最小三维安全系数计算

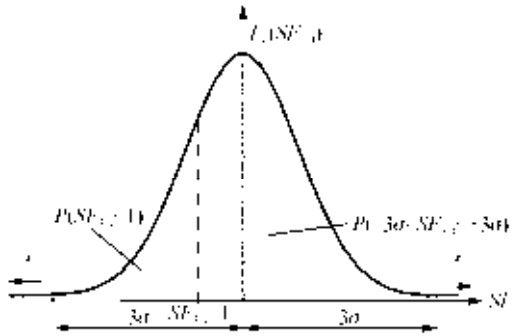


图 2-17 破坏概率计算

2.7 迭代计算

Bishop 和 Janbu 的扩展三维模型中，由于安全系数是隐含的，将采用牛顿迭代法进行计算。对于 $SF_{3D} = f(SF_{3D})$ 的根，在 k 次迭代计算时的逼近迭代值为

$$SF_{3D}^{(k+1)} = \frac{SF_{3D}^{(k)} - [f(SF_{3D}^{(k)}) - SF_{3D}^{(k)}]}{[f'(SF_{3D}^{(k)}) - 1]} \quad (2-50)$$

对于基于滑动面上正应力分布的模型，有四个方程组求解四个未知数 SF_{3D} 、 λ_1 、 λ_2 和 σ_a ，这里采用牛顿-拉普拉斯 (Newton-Laplace) 迭代法求解。对任意一组初始假定值 SF_{3D}^0 、 λ_1^0 、 λ_2^0 和 σ_a^0 ，可以得到非零的四个值 $\Delta X'$ 、 $\Delta Y'$ 、 ΔZ 和 ΔM 。为了求得更接近零的四个值 $\Delta X'$ 、 $\Delta Y'$ 、 ΔZ 和 ΔM ，在 k 次迭代计算中 SF_{3D} 、 λ_1 、 λ_2 和 σ_a 的取值可用式 (2-51) ~ 式 (2-54) 计算为

$$SF_{3D}^{(k+1)} = \frac{SF_{3D}^{(k)} - K_{SF_{3D}}}{D} \quad (2-51)$$

$$\lambda_1^{(k+1)} = \frac{\lambda_1^{(k)} - K_{\lambda_1}}{D} \quad (2-52)$$

$$\lambda_2^{(k+1)} = \frac{\lambda_2^{(k)} - K_{\lambda_2}}{D} \quad (2-53)$$

$$\sigma_a^{(k+1)} = \frac{\sigma_a^{(k)} - K_{\sigma_a}}{D} \quad (2-54)$$

其中

$$\left. \begin{aligned}
 D &= \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccc} \frac{\partial X'}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial X'}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial X'}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial X'}{\partial \sigma_a} \\ \frac{\partial Y'}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial Y'}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial Y'}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial Y'}{\partial \sigma_a} \\ \frac{\partial Z}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial Z}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial Z}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial Z}{\partial \sigma_a} \\ \frac{\partial M}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial M}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial M}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial M}{\partial \sigma_a} \end{array} \right| \\
 K_{SF_{3D}} &= \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccc} \Delta X' & \frac{\partial X'}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial X'}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial X'}{\partial \sigma_a} \\ \Delta Y' & \frac{\partial Y'}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial Y'}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial Y'}{\partial \sigma_a} \\ \Delta Z & \frac{\partial Z}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial Z}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial Z}{\partial \sigma_a} \\ \Delta M & \frac{\partial M}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial M}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial M}{\partial \sigma_a} \end{array} \right| \\
 K_{\lambda_1} &= \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccc} \frac{\partial X'}{\partial SF_{3D}} & \Delta X' & \frac{\partial X'}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial X'}{\partial \sigma_a} \\ \frac{\partial Y'}{\partial SF_{3D}} & \Delta Y' & \frac{\partial Y'}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial Y'}{\partial \sigma_a} \\ \frac{\partial Z}{\partial SF_{3D}} & \Delta Z & \frac{\partial Z}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial Z}{\partial \sigma_a} \\ \frac{\partial M}{\partial SF_{3D}} & \Delta M & \frac{\partial M}{\partial \lambda_2} & \frac{\partial M}{\partial \sigma_a} \end{array} \right| \\
 K_{\lambda_2} &= \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccc} \frac{\partial X'}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial X'}{\partial \lambda_1} & \Delta X' & \frac{\partial X'}{\partial \sigma_a} \\ \frac{\partial Y'}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial Y'}{\partial \lambda_1} & \Delta Y' & \frac{\partial Y'}{\partial \sigma_a} \\ \frac{\partial Z}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial Z}{\partial \lambda_1} & \Delta Z & \frac{\partial Z}{\partial \sigma_a} \\ \frac{\partial M}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial M}{\partial \lambda_1} & \Delta M & \frac{\partial M}{\partial \sigma_a} \end{array} \right|
 \end{array}
 \right.$$

$$K_{\sigma_a} = \begin{pmatrix} \frac{\partial X'}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial X'}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial X'}{\partial \lambda_2} & \Delta X' \\ \frac{\partial Y'}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial Y'}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial Y'}{\partial \lambda_2} & \Delta Y' \\ \frac{\partial Z}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial Z}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial Z}{\partial \lambda_2} & \Delta Z \\ \frac{\partial M}{\partial SF_{3D}} & \frac{\partial M}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial M}{\partial \lambda_2} & \Delta M \end{pmatrix} \quad (2-55)$$

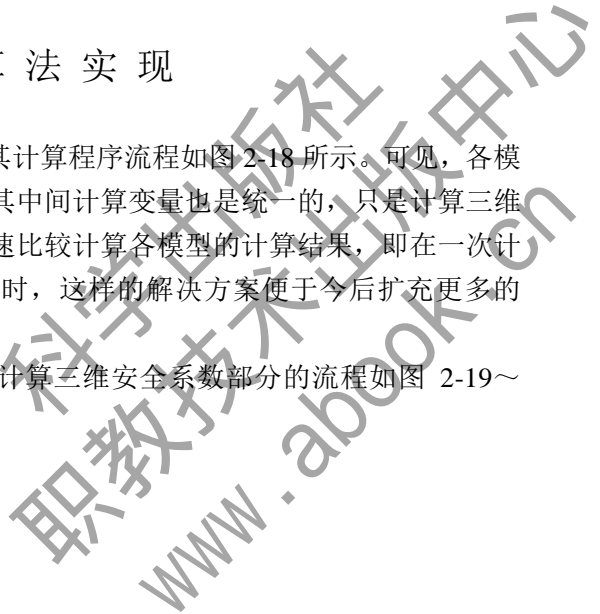
迭代计算的最后收敛条件为

$$\begin{cases} |\varepsilon_1| = \frac{SF_{3D}^{(k+1)} - SF_{3D}^{(k)}}{SF_{3D}^{(k)}} < 0.001 \\ |\varepsilon_2| = \frac{\lambda_1^{(k+1)} - \lambda_1^{(k)}}{\lambda_1^{(k)}} < 0.001 \\ |\varepsilon_3| = \frac{\lambda_2^{(k+1)} - \lambda_2^{(k)}}{\lambda_2^{(k)}} < 0.001 \\ |\varepsilon_4| = \frac{\sigma_a^{(k+1)} - \sigma_a^{(k)}}{\sigma_a^{(k)}} < 0.001 \end{cases} \quad (2-56)$$

2.8 算法实现

基于上述几个三维模型的算法，其计算程序流程如图 2-18 所示。可见，各模型的输入参数和数据层是一样的，且其中间计算变量也是统一的，只是计算三维安全系数的方法不同。这样，便于快速比较计算各模型的计算结果，即在一次计算中可以得到多个不同模型的解。同时，这样的解决方案便于今后扩充更多的模型。

不同模型的算法略有不同，各自计算三维安全系数部分的流程如图 2-19~图 2-22 所示。



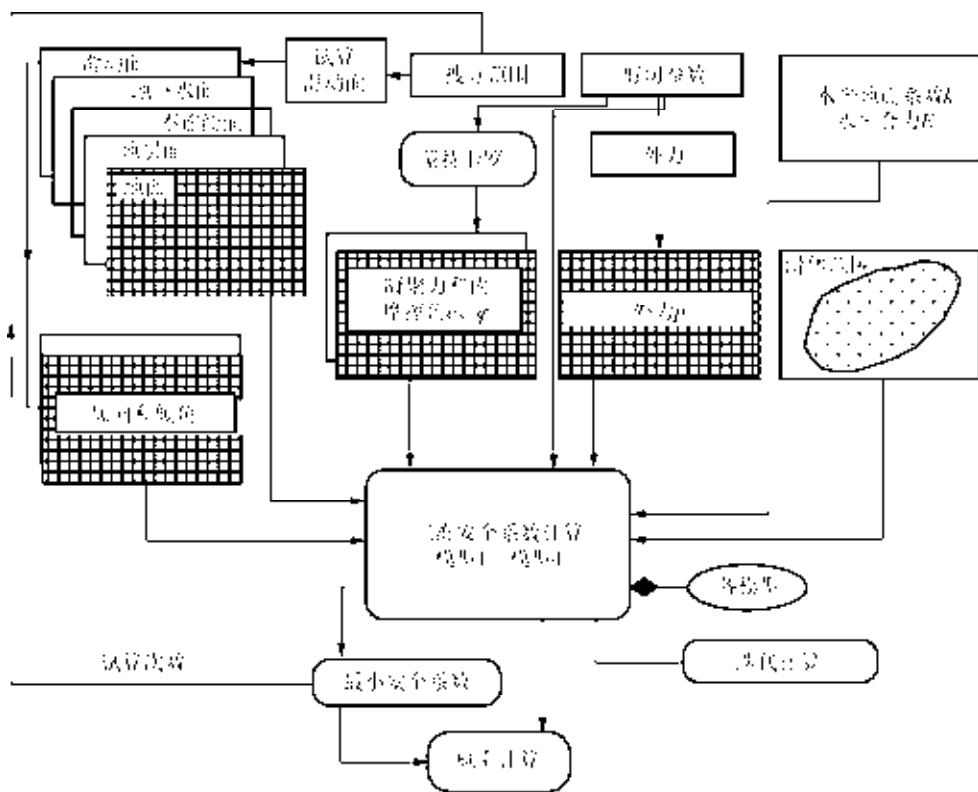


图 2-18 各模型计算程序流程

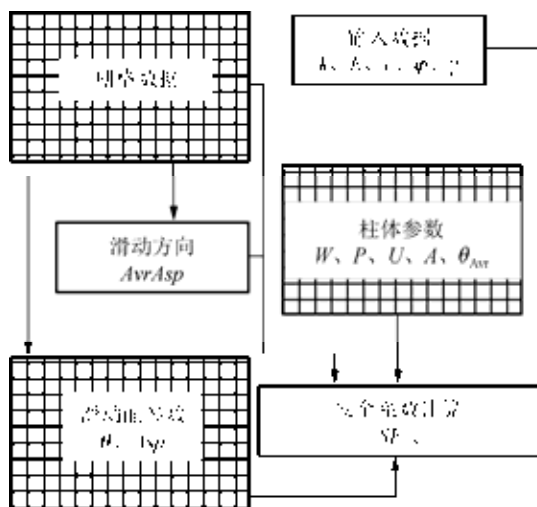


图 2-19 模型 1 计算流程

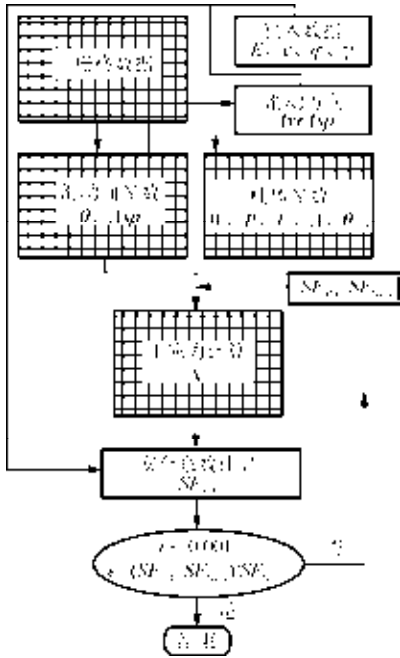


图 2-20 模型 2 计算流程

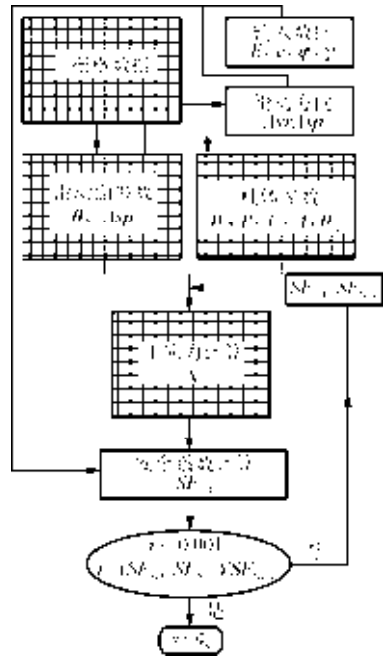


图 2-21 模型 3 计算流程

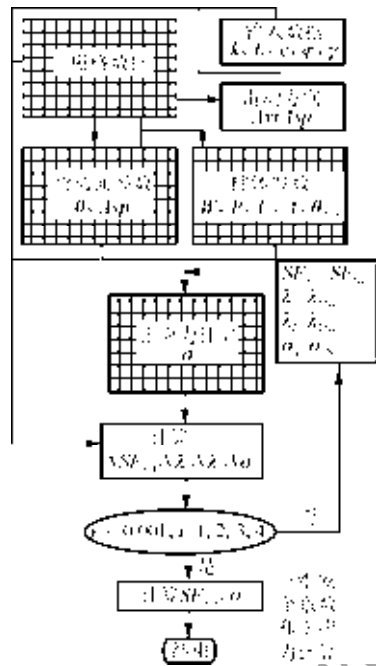


图 2-22 模型 4 计算流程

出版社
技术出版中心
www.abook.cn

第3章 降雨滑坡三维评价模型

降雨滑坡分布范围广、发生频度高、破坏力强、造成的损失严重，是滑坡灾害预测预报研究的主要对象之一。在降雨入渗前，边坡土体尤其是上部岩土体处于非饱和状态，在降雨过程中，边坡土体的自重增加和强度降低这两个不利因素同时影响边坡的稳定性，当达到极限状态时就会引发滑坡灾害。因此，如何将降雨入渗过程与降雨对滑坡稳定性的影响转为定量的力学分析过程，建立一套简单、实用且具有力学理论依据的时空稳定性分析模型，具有重要的学术意义和实用价值。

本章将 GIS 的降雨渗流模型和边坡稳定分析的三维极限平衡模型耦合，建立降雨滑坡预测的渗流-稳定耦合三维极限平衡模型，为降雨滑坡的实时预测及灾害预警提供理论模型支撑。

3.1 考虑外水压力的模型研究

外水压力的作用使库岸滑坡赋存的水文地质环境发生改变。因外水压力的变化和降雨引起的滑坡体变形的本质原因是滑坡体水岩之间相互作用，岩土体的抗剪强度参数降低。因此，外水压力的变化对滑坡变形有直接影响，其应力分布如图 3-1 所示，垂直作用于地表面和滑动面。

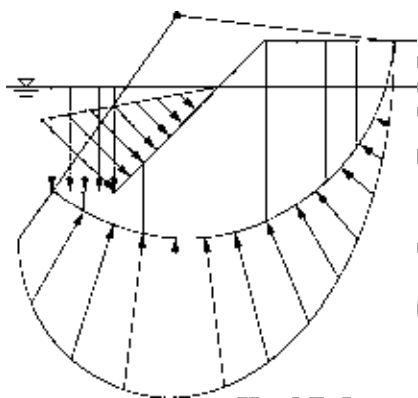


图 3-1 外水压力分布模式

3.1.1 外水压力定义

Hovland 法、修正的 Hovland 法与简易 Bishop 方法的计算式中均考虑了“孔

隙水压力”与“饱和质量”两种计算式。

1. 考虑孔隙水压力的情况

水压力垂直作用于滑动面。柱体质量位于地下水水位以下的按饱和质量计算，以上按常态计算。在修正的 Hovland 方法中体现为 W 、 U ，可以用下式表示为

$$SF_{3D} = \frac{\sum_j \sum_l \{cA + [(W + P) \cos \theta - U - kW \sin \theta] \tan \varphi\} \cos \theta_{Avr}}{\sum_j \sum_l [(W + P) \sin \theta_{Avr} \cos \theta_{Avr} + kW - E_w]} \quad (3-1)$$

式中： W 为土的质量（地下水以下采用饱和质量）； U 为孔隙水压力。

孔隙水压力的作用如图 3-2 所示，可表示为

$$U = Au \quad (3-2)$$

式中： A 为滑动面面积（ m^2 ）； u 为单位面积的水压力（ kN/m^2 ）。

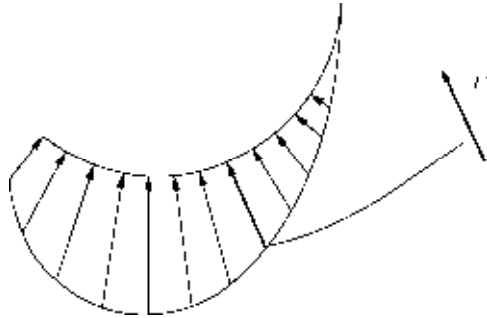


图 3-2 孔隙水压力的分布

2. 在饱和质量中考虑水压力作用

将水压力作为饱和质量考虑，忽略孔隙水压力的作用。同样，在修正的 Hovland 方法中体现为 W'

$$SF_{3D} = \frac{\sum_j \sum_l \{cA + [(W' + P) \cos \theta - U - kW \sin \theta] \tan \varphi\} \cos \theta_{Avr}}{\sum_j \sum_l [(W + P) \sin \theta_{Avr} \cos \theta_{Avr} + kW - E_w]} \quad (3-3)$$

其中

$$W' = d^2 h (\gamma_{sat} - \gamma_w) \quad (3-4)$$

式中： W' 为土的质量； d 为柱体单元的底边边长（ m ）； h 为柱体单元的高度（ m ）； γ_{sat} 为饱和质量（ kN/m^3 ）； γ_w 为水的单位质量（ kN/m^3 ）。

3.1.2 库水位涨落引起的水压力变化

水压力垂直作用于地表面，蓄水位以下水压力作用于地表面的压力分布如图 3-3 所示，随着地表的深度变化水压力有所变化。

$$P_w = \gamma_w h d^2 \cos \theta \quad (3-5)$$

$$E_w = \gamma_w h d^2 \sin \theta \quad (3-6)$$

式中： θ 为地表面与水平面的倾斜角 ($^\circ$)；将垂直作用于滑动面的水压力分解为竖直方向和水平方向的力， P_w 为竖直方向的力； E_w 为水平方向的力。在修正的 Hovland 模型中体现为 P_w 、 E_w ，计算式为

$$SF_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I \{cA + [(W + P_w) \cos \theta - u - kW \sin \theta] \tan \phi\} \cos \theta_{Avr}}{\sum_J \sum_I (W + P_w) \sin \theta_{Avr} \cos \theta_{Avr} + kW - E_w} \quad (3-7)$$

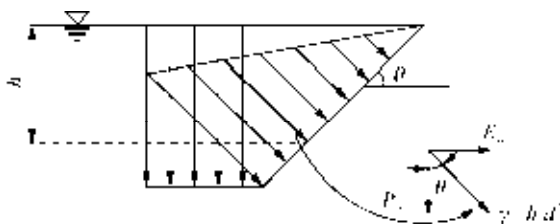


图 3-3 蓄水位以下的压力分布

3.2 降雨渗流的三维水文地质模型

渗透是指水从地表进入土层的物理过程，渗入土层的水量与土的湿润程度、水压力及饱和和渗透系数相关。降雨初始阶段，土壤的初始渗透能力一般大于或等于降雨强度，地表无积水；随着降雨强度的增大或降雨时间的持续，土壤渗透能力逐渐逼近或小于降雨强度，地表开始出现积水，因此将降雨入渗分为两个明显的阶段，即无地表积水和有地表积水。

国内外有很多的渗透模型来描述这一入渗过程。本章采用广泛公认的 Green-Ampt 模型来进行计算，其优点在于其具有明确的物理意义、仅需要初始的渗透雨量，并且该模型涉及的其他变量是可预测的，且便于程序的实现。

Green-Ampt 模型描述的是在整个降雨研究期间内始终保持存在地表积水状态下的入渗过程，即降雨强度大于土层的渗透能力，渗入土层中降雨量等于土壤的最大渗透能力。应用达西定律，土壤的实际渗透能力可用下式表示为

$$f = K_s \left(\frac{1 + \psi_f \nabla \theta}{z_r} \right) \quad (3-8)$$

式中： K_s 为土壤饱和导水率 (m/h)； ψ_f 为降雨入渗前锋处的吸力水头参数 (m)； z_r 为湿润锋深度 (m)； $\nabla \theta$ 为降雨入渗前锋内的含水量差 (m^3/m^3)。

针对 Green-Ampt 模型做四个假设，使之应用于不同降雨强度下的入渗雨量分析。假设如下。

- (1) 由于地表积水效应，地表土处于饱和状态。
- (2) 降雨入渗前锋为一个清晰的面。
- (3) 土层中渗透系数为常数。
- (4) 降雨入渗前锋处的吸力水头为一常数。

3.2.1 恒定降雨强度入渗模型

图 3-4 为两个恒定降雨强度下的渗透模式。对于恒定降雨强度事件 A，其雨水入渗量计算为

$$F(t) = it \tag{3-9}$$

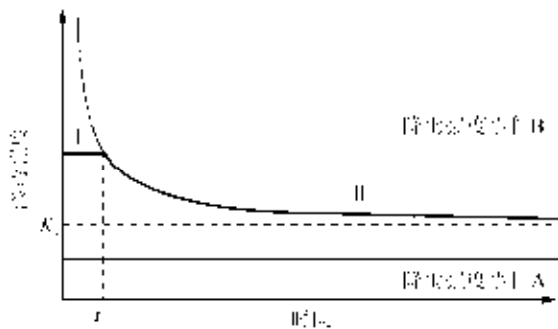


图 3-4 两个恒定降雨强度下的渗透模式

相对于降雨强度事件 B，初始阶段降雨强度 i 大于土壤的饱和渗透系数 K_s 。此时，降雨强度小于土壤的实际渗透能力 f_p ，所以此时的渗透率等于降雨强度 i (图 3-4 中，I 属于降雨强度事件 B 的一部分)。降雨量全部渗入土壤中并引起土体饱和度的增加，入渗率 f 是随累积入渗量 F 的增加而减小。设想当累积入渗量达到某一值时，即 $f = i$ 开始积水，称此累积入渗量为 F_p 。将 t_p 定义为地表开始出现积水的时间起点，在此时可对应的参数为初始地表积水形成时的入渗前锋深度 z_p 以及此时的入渗量 F_p ，其计算公式见下述。

假定 $a = \psi_f \nabla \theta$ ，则

$$F_p = \frac{a}{i - K_s} \tag{3-10}$$

开始积水时间 t_p 为

$$t_p = \frac{F_p}{i} = \frac{a \nabla \theta}{i(i - K_s)} \tag{3-11}$$

因此，在任意时刻 T 的降雨入渗量及入渗深度可分别用式 (3-12) 和式 (3-13) 表示为

$$F = F_p + K_s(t - t_p) + a \ln \left(\frac{F + \psi_f \nabla \theta}{F_p + \psi_f \nabla \theta} \right) \quad (3-12)$$

$$z_w = \frac{F}{\nabla \theta} \quad (3-13)$$

由于 F 隐含在式 (3-12) 中, 采用以下提议的方法以求得更加精确的方程解, 并进行应用验证。

式 (3-12) 可以写为

$$\begin{aligned} F &= F_p + K_s(t - t_p) + NF \\ NF &= a \ln \left(\frac{F + a}{F_p + a} \right) \end{aligned} \quad (3-14)$$

扩展这个非线性余项 NF , 有

$$F = F_p + K_s(t - t_p) + \sum_{i=0}^{\infty} A_i \quad (3-15)$$

对 $\sum_{i=0}^{\infty} A_i$ 应用泰勒级数定理展开为

$$\begin{cases} A_0 = NF_0 \\ A_1 = F_1 \frac{dNF_0}{dF_0} \\ A_2 = F_2 \frac{dNF_0}{dF_0} + \frac{F_1^2}{2!} \frac{d^2 NF_0}{dF_0^2} \\ A_3 = F_3 \frac{dNF_0}{dF_0} + F_1 F_2 \frac{d^2 NF_0}{dF_0^2} + \frac{F_1^3}{3!} \frac{d^3 NF_0}{dF_0^3} \end{cases} \quad (3-16)$$

由此得到

$$\begin{cases} F_0 = K(t - t_p) + F_p \\ F_1 = A_0 = a \ln \left[\frac{K(t - t_p) + F_p + a}{F_p + a} \right] \\ F_2 = A_1 = a \ln \left[\frac{K(t - t_p) + F_p + a}{F_p + a} \right] \left[\frac{a}{K(t - t_p) + F_p + a} \right] \\ F_3 = A_2 = a \ln \left[\frac{K(t - t_p) + F_p + a}{F_p + a} \right] \left\{ \frac{a^2}{[K(t - t_p) + F_p + a]^2} \right\} \\ \quad - \frac{a}{2} \ln^2 \left[\frac{K(t - t_p) + F_p + a}{F_p + a} \right] \left\{ \frac{a^2}{[K(t - t_p) + F_p + a]^2} \right\} \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{aligned} F_4 = A_3 &= a \ln \left[\frac{K(t-t_p) + F_p + a}{F_p + a} \right] \left\{ \frac{a^3}{[K(t-t_p) + F_p + a]^3} \right\} \\ &- \frac{3a}{2} \ln^2 \left[\frac{K(t-t_p) + F_p + a}{F_p + a} \right] \left\{ \frac{a^3}{[K(t-t_p) + F_p + a]^3} \right\} \\ &\times \frac{a}{3} \ln^3 \left[\frac{K(t-t_p) + F_p + a}{F_p + a} \right] \left\{ \frac{a^3}{[K(t-t_p) + F_p + a]^3} \right\} \end{aligned} \right. \quad (3-17)$$

将上述等式进行简化，有

$$\left\{ \begin{aligned} F_0 &= K(t-t_p) + F_p \\ F_1 &= a \ln \left[\frac{F_0(t) + a}{F_p + a} \right] \\ F_2 &= a \ln \left[\frac{F_0(t) + a}{F_p + a} \right] \left[\frac{a}{F_0(t) + a} \right] \\ F_3 &= a \ln \left[\frac{F_0(t) + a}{F_p + a} \right] \left\{ \frac{a^2}{[F_0(t) + a]^2} \right\} - \frac{a}{2} \ln^2 \left[\frac{F_0(t) + a}{F_p + a} \right] \left\{ \frac{a^2}{[F_0(t) + a]^2} \right\} \\ F_4 &= a \ln \left[\frac{F_0(t) + a}{F_p + a} \right] \left\{ \frac{a^3}{[F_0(t) + a]^3} \right\} - \frac{3a}{2} \ln^2 \left[\frac{F_0(t) + a}{F_p + a} \right] \left\{ \frac{a^3}{[F_0(t) + a]^3} \right\} \\ &\times \frac{a}{3} \ln^3 \left[\frac{K(t-t_p) + F_p + a}{F_p + a} \right] \left\{ \frac{a^3}{[K(t-t_p) + F_p + a]^3} \right\} \end{aligned} \right. \quad (3-18)$$

假设 $m_1(t) = [F_0(t) + a] / (F_p + a)$ 、 $m_2(t) = a / [F_0(t) + a]$ ，联立式 (3-18) 有

$$\begin{aligned} F &= F_0(t) + a \ln[m_1(t)] + a \ln[m_1(t)]m_2(t)[1 + m_2(t) + m_2^2(t) + m_2^3(t) + \dots] \\ &- a \ln^2[m_1(t)]m_2^2(t)[1 + m_2(t) + m_2^2(t) + \dots] \\ &+ a \ln^3[m_1(t)][1 + m_2(t) + m_2^2(t) + \dots] - \dots \end{aligned} \quad (3-19)$$

进而有

$$\left\{ \begin{aligned} F &= F_0(t) + a \ln[m_1(t)] + a[m_1(t)]m_2(t) \left[\frac{1}{1-m_2(t)} \right] \\ &- a \ln^2[m_1(t)]m_2^2(t) \left[\frac{1}{1-m_2(t)} \right] + a \ln^3[m_1(t)] \left[\frac{1}{1-m_2(t)} \right] \\ &\dots \\ F &= F_0(t) + \frac{a \ln[m_1(t)]}{[1-m_2(t)]} \{ 1 - \ln[m_1(t)]m_2^2(t) + \ln^2[m_1(t)]m_2^3(t) - \dots \} \end{aligned} \right. \quad (3-20)$$

推导至

$$F(t) \approx F_0(t) + a \ln(m_1(t)) \times \left\{ 1 + \frac{m_2(t)}{[1 - m_2(t)][1 + m_2(t) \ln(m_1(t))]} \right\} \quad (3-21)$$

此时式(3-21)并不是方程的精确解, 因为在此无穷极限中, 一些条件被忽视, 进一步更正为

$$f = K \left\{ 1 + m_2(t) + \frac{m_2^2(t)}{(1 - m_2(t))[1 + m_2(t) \ln(m_1(t))]} \right. \\ \left. \times \left[1 - \ln(m_1(t)) - \frac{m_2(t) \ln(m_1(t))}{1 - m_2(t)} - \frac{m_2(t) \ln(m_1(t))(1 - \ln m_1(t))}{1 + m_2(t) \ln(m_1(t))} \right] \right\} \quad (3-22)$$

在此, 令

$$2m_2(t) = \frac{2a}{F_0(t) + a} < 1 \quad (3-23)$$

如果式(3-22)成立, 式(3-20)适用于解答 $F(t)$, 否则使用牛顿迭代法进行计算。

以一个算例分析验证该方法的可用性。计算数据如下: $P=2\text{cm/h}$; $K_s=1\text{cm/h}$; $\psi_f=10\text{cm}$; $\nabla\theta=0.3$ 。图3-5为该模型下的精确解 $f = K_s(1 + \psi_f \nabla\theta / z_f)$ 与近似解

$2m_2(t) = \frac{2a}{F_0(t) + a} < 1$ 之间的比较图。

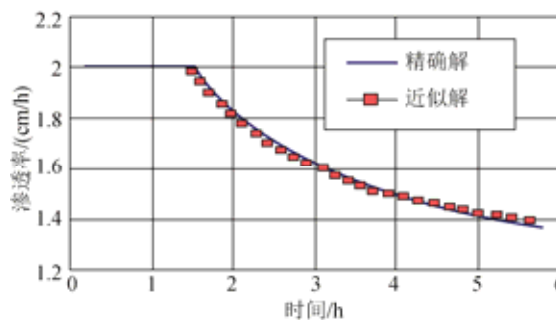


图3-5 入渗率近似和精确解的方案比较

验证得到精确解与近似解的曲线相吻合, 证明该解推算过程为正确。该过程实现的流程如图3-6所示。

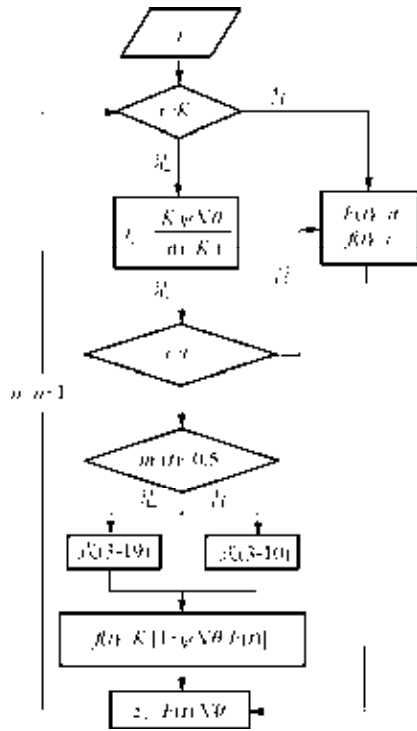


图 3-6 降雨入渗前峰深度计算流程

3.2.2 非恒定降雨强度入渗模型

实际的降雨强度往往是不恒定的。在非恒定降雨强度事件发生过程中，地表积水可能会发生间歇性改变。在此，将 Green-Ampt 模型做进一步改进，使其可应用于变化雨强的降雨过程，该部分的难点在于不稳定降雨事件下的渗透状态。

在一次降雨过程中，可以式 (3-24) 表示水量平衡为

$$P(t) = F(t) + G(t) + R(t) \quad (3-24)$$

式中： $P(t)$ 为累计降雨量； $F(t)$ 为地层渗入水量； $G(t)$ 为地表积水量； $R(t)$ 为因植物截流、蒸发等流失的水量； t 为降雨历时。

假定某一地表面存在最大限度的积水且没有水量损失产生，则此时的状态称为地表储水能力 (D)，以式 (3-25) 表示为

$$0 \leq G \leq D \quad (3-25)$$

随着降雨时间的持续以及强度的增大，地表超过储水能力，没有一个直接的公式来计算流失水量 $R(t)$ ，但可以用式 (3-26) 间接表示为

$$R(t_n) = \begin{cases} \max(p(t_n) - F(t_n) - D, R(t_{n-1})) & G = D \text{ and } i > f_p \\ R(t_{n-1}) & G < D \text{ or } i < f_p \end{cases} \quad (3-26)$$

与稳定降雨入渗状态类似，当降雨强度 i 在小于土壤的实际渗透系数 K_s 的时间段内 (即 t_{n-1} 到 t_n)，降雨量全部入渗到土壤中没有水量的流失，此时的总渗透

量为

$$F(t_n) = F(t_{n-1}) + i(t_n - t_{n-1}) \quad (3-27)$$

相反, 如果初始降雨强度大于土壤的渗透能力, 则地表的积水状态可能会发生间歇性改变, Chu 等提议的修正 Green-Ampt 方法用于非恒定降雨事件渗透过程研究, 其基本做法是, 对每个计算时段将地表状态分为四种情况: ①开始无积水, 结束无积水; ②开始无积水, 结束有积水; ③开始有积水, 结束有积水; ④开始有积水, 结束无积水。

在每一时段开始, 已知降雨总量与入渗总量、剩余总量, 定义如下两个因子为

$$C_u = P(t_n) - R(t_{n-1}) - \frac{K_s \psi_f \nabla \theta}{i - K_s} \quad (3-28)$$

$$C_p = P(t_n) - F(t_n) - R(t_{n-1}) \quad (3-29)$$

式中: $P(t_n)$ 为 t_n 时刻降雨总量; $R(t_{n-1})$ 为 t_{n-1} 时刻雨量剩余总量; $P(t_n)$ 为 t_n 时刻土壤实际入渗能力; $F(t_n)$ 为 t_n 时刻入渗总量。

可以证明, 时刻结束时地表是否存在积水与式 (3-28) 和式 (3-29) 正负等价。具体判断如表 3-1 所示 (当 $i < K_s$ 时, 式中无积水, 不用此两因子判断)。

表 3-1 每个计算时段的地表状态

开始无积水	$P(t_n) - R(t_{n-1}) - K_s \psi_f \nabla \theta / (i - K_s) < 0$	时段结束无积水
	$P(t_n) - R(t_{n-1}) - K_s \psi_f \nabla \theta / (i - K_s) > 0$	时段结束有积水
开始有积水	$P(t_n) - F(t_n) - R(t_{n-1}) < 0$	时段结束无积水
	$P(t_n) - F(t_n) - R(t_{n-1}) > 0$	时段结束有积水

表 3-1 所示的四种状态, 可解释如下。

(1) t_{n-1} 时段地表无积水, t_n 时刻结束地表也无积水时, 表示为

$$\frac{P(t_n) - R(t_{n-1}) - K_s \psi_f \nabla \theta}{i - K_s} < 0$$

此时降雨入渗量为

$$F(t_n) = P(t_n) - R(t_{n-1}) \quad (3-30)$$

(2) t_{n-1} 时段地表无积水, t_n 时刻结束前地表开始出现积水时, 表达式为

$$\frac{P(t_n) - R(t_{n-1}) - K_s \psi_f \nabla \theta}{i - K_s} > 0$$

对于恒定的降雨强度形成地表水池开始的时间点 t_p 由下式决定为

$$\begin{cases} i(t) = \frac{P(t_n) - P(t_{n-1})}{t_n - t_{n-1}} = i \\ P(t) = \int_{t_{n-1}}^t i(t) dt = P(t_{n-1}) + (t - t_{n-1})i \\ t_p = \frac{K_s \psi_f \nabla \theta}{(i - K_s) - P(t_{n-1})} + \frac{R(t_{n-1})}{i + t_{n-1}} \end{cases} \quad (3-31)$$

同样，相对于非恒定降雨强度来说，形成地表积水的时间 t_s 可由下式表示为

$$\begin{cases} t_s = \frac{P(t_p) - R(t_{n-1})}{K_s - \psi_f} \frac{\nabla \theta \ln \left\{ \frac{1 + [P(t_p) - R(t_{n-1})]}{\psi_f \nabla \theta} \right\}}{K_s} \\ F(t_n) = \psi_f \nabla \theta \ln \left[\frac{1 + F(t_n)}{\psi_f \nabla \theta} \right] + K_s (t_n - t_p - t_s) \end{cases} \quad (3-32)$$

式中： $P(t_p)$ 为形成地表积水时间段内的累积降雨量。

(3) t_{n-1} 时刻地表有积水而在 t_n 时刻之前积水消失，表示为

$$P(t_n) - F(t_n) - R(t_{n-1}) < 0$$

降雨入渗量计算同状态 (1)。

(4) t_{n-1} 时刻地表有积水而在 t_n 时刻积水一直存在，表示为

$$P(t_n) - F(t_n) - R(t_{n-1}) > 0$$

降雨入渗量计算同状态 (2)。

图 3-7 表示不同降雨强度下入渗前锋深度的计算流程，在此计算的降雨渗透前锋深度将用于斜坡稳定性计算中。

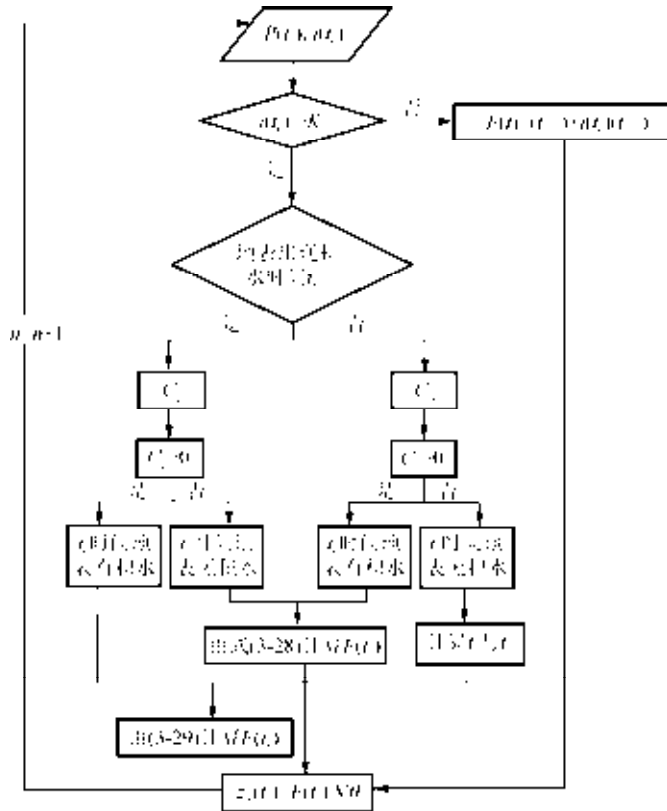


图 3-7 不同降雨强度下入渗前锋深度的计算流程

3.2.3 基于 GIS 的降雨入渗模型与边坡稳定性分析耦合的极限平衡模型

降雨对边坡稳定性的影响主要体现为降雨渗流引起土体重量增加、抗剪强度降低和孔隙水压力的变化。这些变化的起因是雨水下渗引起土体饱和度的变化，由于雨水下渗是非线性的，各因素在三维滑坡体的不同空间位置上的影响程度也不同，需要综合评价。本节的目的是把降雨渗流模型的结果，即土体饱和度的变化与边坡稳定分析三维极限平衡模型耦合，定量评价降雨过程中边坡稳定性的变化。

边坡稳定分析模型采用基于柱体单元的三维极限平衡分析方法。滑坡体的土柱分割由 GIS 栅格数据 (Grid 数据) 的网格完成。组合模型的总体建模方案如图 3-8 所示。将滑坡体分割为土柱后，不同位置的土柱体在各时刻的饱和度状态不同，其滑动面上的抗剪强度和孔隙水压力的变化程度也不同。耦合模型依据土体饱和度的空间分布，分别计算各土柱体的质量、抗剪强度和作用在滑动面上的孔隙水压力，再依据三维极限平衡方法综合评价三维滑坡体的安全系数。

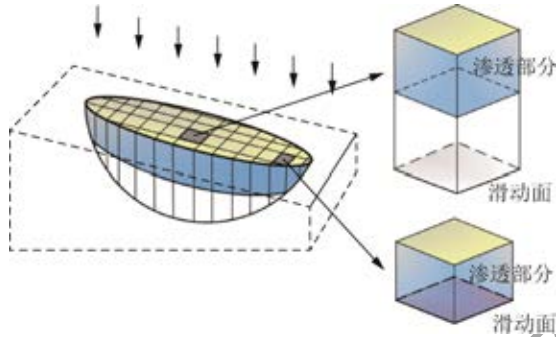


图 3-8 耦合模型的示意图

降雨渗透过程中滑坡体内的饱和度分布状态大致可归纳为以下四种模式。

模式一：在降雨渗透初期，渗透前锋位于滑坡体中部，且滑动面位于地下水面上 [即 $H_w \leq H_s$ ，并且 $(H_0 - H_w) > z_w$]。此模式反映强降雨开始后短时间内发生的浅层滑坡的破坏模式。此时，三维滑动面的周边部分（渗透前锋到达的部分）处于饱和（或接近饱和）状态，其他部分（渗透前锋未到达部分）位于自然非饱和状。该模式如图 3-9 所示，处于饱和状态区的土柱体滑动面采用饱和状态下的抗剪强度并同时考虑孔隙水压力的影响和由入渗水量引起的自重增加，其他处于非饱和状态区的土柱体滑动面则采用非饱和状态下的抗剪强度并同时考虑自重增加。

$$\begin{cases} W = [\gamma_{\text{sat}1} z_w + (H_0 - H_s - z_w) \gamma_2] A \\ U = 0 \end{cases} \quad (3-33)$$

式中： H_0 为地表标高； $\gamma_{\text{sat}1}$ 为地表至降雨前锋处的土壤饱和质量； γ_2 为降雨入渗

前锋深度至滑动面之间的土体质量。

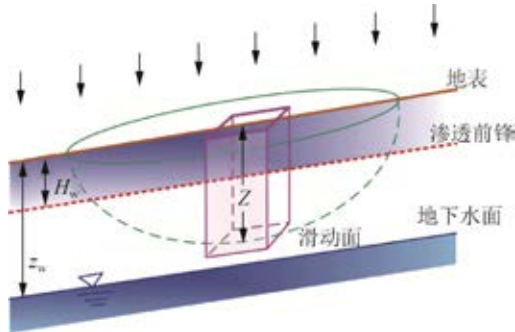


图 3-9 模式一示意图

模式二：地下水位继续上升且与降雨入渗前锋接触 [即 $H_w > H_s$ ，并且 $(H_0 - H_w) \leq z_w$]，使中间包气带完全饱和（此情况下上升的往往是在透水系数显著不同的两土层交界面形成的临时饱和水带，而非真正的地下水）。此时，滑坡体处于完全饱和状态，所有的土柱体滑动面都将采用饱和状态下的抗剪强度，并同时考虑孔隙水压力的影响和由渗入水量引起的自重增加，如图 3-10 所示。

$$\begin{cases} W = \gamma_{\text{sat}}(H_0 - H_s)A \\ U = \rho g(H_0 - H_s)A \end{cases} \quad (3-34)$$

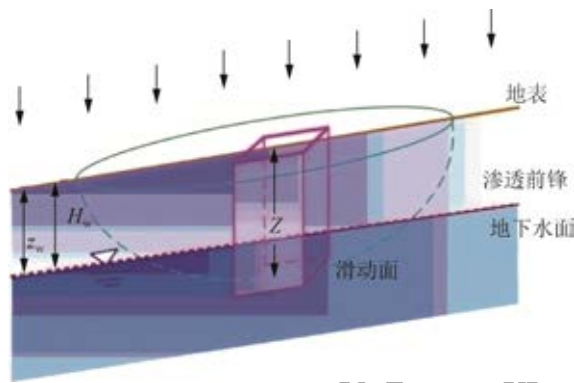


图 3-10 模式二示意图

模式三：随着渗透进行，渗透前锋越过滑动面，且滑动面发生在季节性饱和区内，即滑坡体完全处于饱和（或接近饱和）状态 [即 $H_w \leq H_s$ ，并且 $(H_0 - H_s) \leq z_w$]，如图 3-11 所示。此时，所有的土柱体滑动面都将采用饱和状态下的抗剪强度并同时考虑孔隙水压力的影响和由渗入水量引起的自重增加。此时参数 W 、 U 与模式二相同。

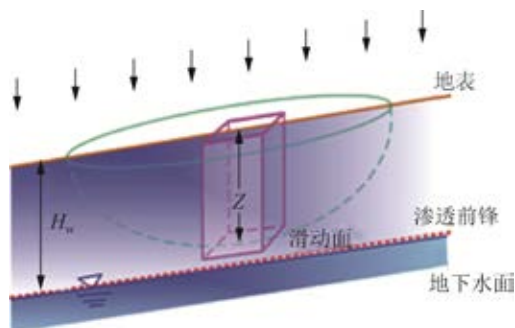


图 3-11 模式三示意图

模式四：渗透前锋到达地下水面后引起地下水上升，但尚未达到季节性饱和区，即地下水面与季节性饱和区之间尚存在中间包气带的非饱和区，且滑动面的一部分处于地下水面下（即 $H_w > H_s$ ），入渗前锋未到达地下水位处 [即 $(H_0 - H_w) > z_w$]，如图 3-12 所示。此模式反映由地下水位变动引起的滑坡模式，多为滞后发生的较大型滑坡。此时，三维滑坡体划分成的土柱体大致分为三种状态：第一种状态是滑坡体周边的土柱体，其底部滑动面位于季节性饱和区中，土柱体处于完全饱和（或接近饱和）状态，土柱体滑动面采用饱和状态下的抗剪强度并同时考虑孔隙水压力的影响和渗入水量引起的自重增加；第二种状态为土柱体的底部滑动面位于中间包气带的非饱和区，采用非饱和状态下的抗剪强度并同时考虑自重增加；第三种状态为土柱体的底部滑动面位于地下水面下，即土柱体分为上部（季节性饱和区）的饱和状态，中部（中间包气带）的非饱和状态和下

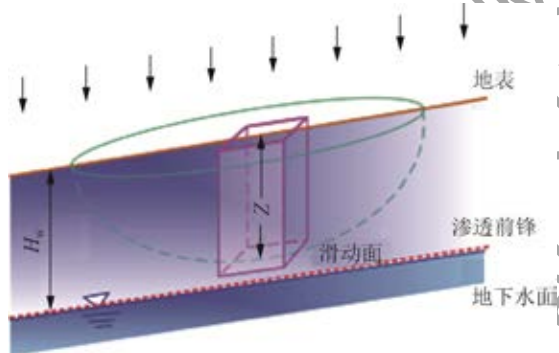


图 3-12 模式四示意图

部（地下水）的饱和状态。此时，土柱体滑动面采用饱和状态下的抗剪强度并同时考虑孔隙水压力的影响和由渗入水量引起的自重增加。

$$U = \rho g(H_w - H_s)A \quad (3-35)$$

式中： ρ 为水的密度。

在分析模式二、模式三和模式四时，滑动范围处于饱和状态，抗剪强度参数 c 、 ϕ 使用饱和值，模式一取常规值，参数取值可来源于现场试验或者三轴试验。如果这些数据是不可利用的，则尽可能进行经验取值。在决定了各土柱体滑动面上的下滑力和抵抗力的算法后，最后采用三维极限平衡方法计算整个滑坡体的安全系数。

3.3 GIS 支持下的模型算法及程序实现

3.3.1 需求分析

GIS 提供了一个良好的空间数据处理和图形输出平台，但不能处理一些特殊的专业要求。因此，需要在 GIS 环境中开发融合专业模型，GIS 界面与专业模型相结合已成为 GIS 研究领域中的焦点。一般来说，降雨滑坡实时预测三维极限平衡模型与 GIS 的结合有四种形式：①孤立型。GIS 与专业模型运行在不同的系统中。②松散型。GIS 与专业模型的结合通过 ASC II 等文件进行数据交换。③紧密型。GIS 与专业模型通过标准的界面进行自动数据交换。④完整型。专业模型镶嵌在 GIS 系统中，这种整合形式不需要进行数据转换，专业模型与 GIS 共有数据模型和数据库管理系统。

降雨滑坡的实时预测系统的开发是基于 COM (component object model) 技术开发的一个 GIS 扩展模块。该扩展模块以本书作者早期开发的 3D SlopeGIS 为基础，进一步增加专业模型、完善功能，以形成服务于单体滑坡灾害应急工作的决策支持系统。该模块同样是可以镶嵌在 GIS 软件 (ESRI 的 GIS 软件) 中运行的。实际上，ArcGIS 本身也是基于 COM 技术 (ArcObjects) 开发的，因此可以用任意支持 COM 开发的语言在 GIS 中开发各种专业扩展模块。

降雨滑坡灾害实时时空评价模型与 ArcGIS™ 整合的概念如图 3-13 所示，降雨滑坡灾害的所有数据处理均在 ArcGIS™ 中处理，后续分析计算则是利用扩展后的模块系统。

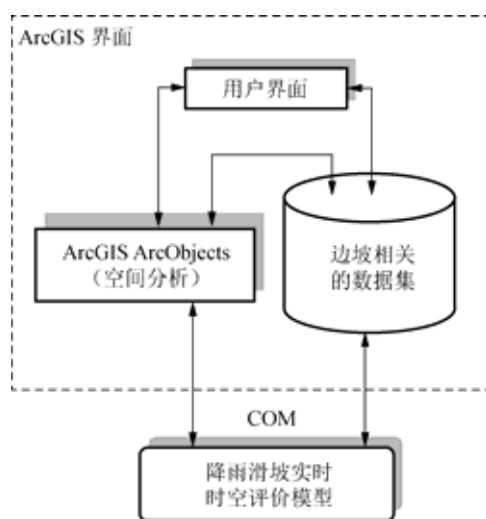


图 3-13 降雨滑坡实时时空评价模型与 ArcGIS™ 整合的概念图

3.3.2 系统功能简述

3D SlopeGIS 系统的基本架构如图 3-14 所示，主要包括以下六个主要模块。

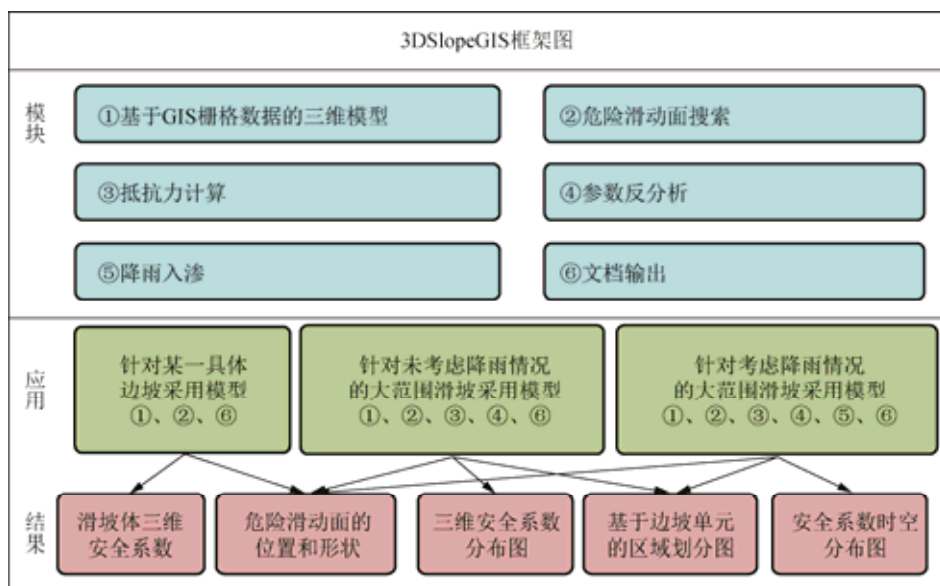


图 3-14 系统功能模块

(1) 基于 GIS 栅格数据的三维模型。此模块包含四个基于 GIS 栅格数据的三维极限平衡模型，即利用 Hovland 模型、Janbu 三维扩展模型、Bishop 三维扩展模型和修正的 Hovland 模型来计算滑坡体的三维安全系数。

- (2) 危险滑动面搜索利用蒙特卡罗方法模拟危险滑动面。
- (3) 抵抗力计算。
- (4) 参数反分析模块。
- (5) 降雨入渗。在本模块中，通过降雨渗透的时空定量评价方法模拟降雨入渗对滑坡体稳定性的影响。

(6) 文档输出模块。除了这些主要的分析模块外，3D SlopeGIS 系统还提供一些数据分析工具，如表面分析功能、Shape 编辑工具、三维显示工具等，用来有效处理数据和成果介绍。这些工具的有效结合可以为不同条件下的边坡稳定性分析提供支持。

在获得单体滑坡的地表面与滑动面数据后，通过该系统可以在很短的时间内计算其三维边坡稳定性，其滑坡分析模块数据如图 3-15 所示，用户可以选择任何一种三维模型进行安全系数分析。

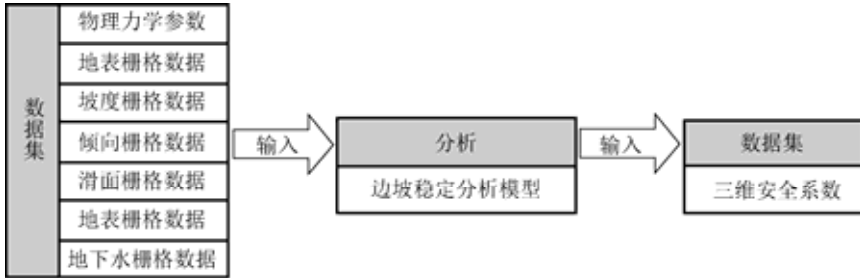


图 3-15 单体滑坡分析数据

降雨滑坡分析模块如图 3-16 所示，其参数来源于模型涉及的降雨数据以及相关的水文地质参数。

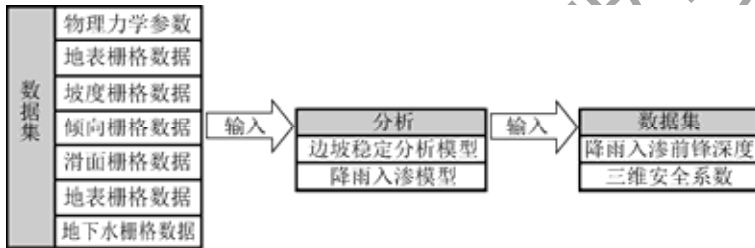


图 3-16 降雨滑坡分析模块

同其他专业的计算机辅助软件一样，该决策支持系统的分析结果依赖于数据的准确性。这需要基于现场调查和室内试验来收集详细的地质信息，对于区域的地质信息收集，这显然是一件成本高的工作，也是区域滑坡灾害评估的主要难点之一。

另外，各模型的算法略有不同，所以各模型计算三维安全系数的详细流程如图 3-18~图 3-21 所示。

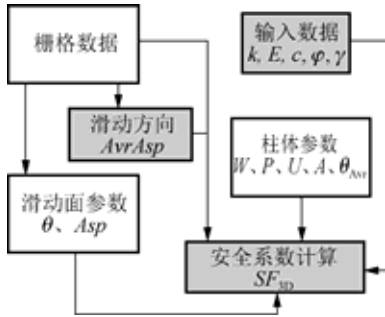


图 3-18 Hovland 三维扩展模型算法流程



图 3-19 修正的 Hovland 三维模型算法流程

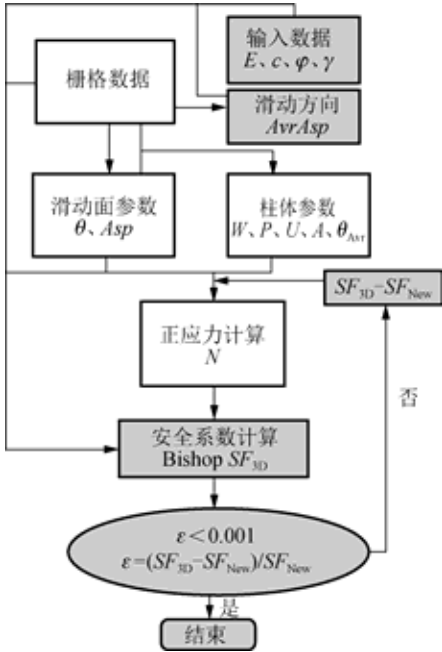


图 3-20 Bishop 三维模型算法流程

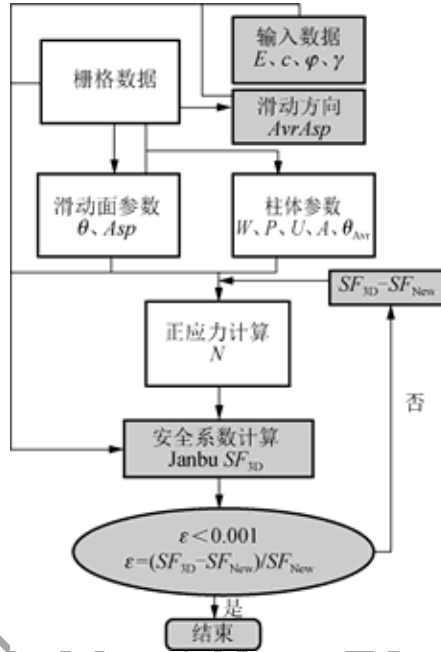


图 3-21 Janbu 三维扩展模型算法流程

在三维极限平衡算法建立的基础上，进一步研究开发了适用于单体滑坡的降雨滑坡三维时空预测系统。系统采用开放式结构框架，各理论模型分别做成专业模块，并增加数据读入处理和评价结果（灾害图等）表现模块。各模块在系统中根据实际需要进行临时组合，以高效完成不同的任务。系统的整体结构方案如图 3-22 所示。数据处理模块主要负责读入不同格式的原始数据，包括地表高程等空间数据和各种参数等非空间数据，并转化成系统格式（基本为 GIS 数据格式），