

基于三维地质模型的工程岩体结构精细数值建模

李明超, 钟登华, 秦朝霞, 佟大威, 刘 杰

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 针对岩体结构数值模拟分析前处理工作中存在的地质模型建立、空间单元划分等难点, 提出将三维地质模型与数值模拟分析进行耦合来简化其前处理的具体思路和方法。在三维地质建模系统中, 建立精细的工程地质三维统一模型, 通过单元网格几何模型的自动生成和模型数据的转换输入, 可快速、准确地为岩体结构数值模拟分析提供不同类别、信息丰富的精细三维网格剖分模型, 不仅简化了数值计算分析的前处理工作, 同时也可丰富三维地质模型的属性信息, 为工程设计与优化提供更直观、便捷的信息平台。

关键词: 数值模拟; 三维地质模型; 岩体结构; 耦合模式

中图分类号: O 242

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)09 - 1893 - 06

REFINED MODELING FOR NUMERICAL SIMULATION OF ENGINEERING ROCK MASS STRUCTURES BASED ON 3D GEOLOGICAL MODEL

LI Mingchao, ZHONG Denghua, QIN Zhaoxia, TONG Dawei, LIU Jie

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the difficulties of geological modelling and space unit division in pre-processing of numerical simulation analysis for engineering rock-mass structures, the coupling pattern and method of 3D geological model with numerical simulation are put forward to simplify the pre-processing. The refined 3D engineering geological integrated model was built by the 3D geological modelling system in the research area. Then, the element mesh model could be generated automatically. Subsequently, the model data were converted and imported to numerical simulation programs; and it offered different kinds of 3D mesh division models with abundant information. It can not only simplify the pre-processing of numerical computation and analysis, but also is abounding with the attributive information of 3D geological models. And it will offer a visual and convenient information platform for engineering design and optimization.

Key words: numerical simulation; 3D geological model; rock mass structure; coupled pattern

1 引言

我国的水利水电工程建设近年来得到了迅速发展, 尤其随着西部开发和西电东送战略的实施, 一

批高坝大库正在规划建设中。这些大型工程大都位于西南、西北的高山峡谷地区, 工程岩体尤其是高边坡的稳定性问题至关重要^[1]。因此, 建立客观的三维岩体结构模型和采用合理的计算方法进行稳定性数值模拟分析, 确保工程建筑物的稳定安全是大

收稿日期: 2007 - 01 - 19; **修回日期:** 2007 - 03 - 03

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50525927); 国家自然科学基金资助项目(50479048, 50525927)

作者简介: 李明超(1979 -), 男, 博士, 2001年毕业于天津大学水利水电工程系水利水电建筑工程专业, 主要从事水利水电工程的工程地质建模与分析等理论及应用方面的教学与研究工作。E-mail: lmc@tju.edu.cn

型水利水电建设中的关键技术问题。

然而, 由于存在地质模型建立、空间单元划分等前处理工作烦琐、甚至难于进行的局限, 目前国内外的岩体结构数值模拟计算分析中, 往往不得不采用简化地质模型的做法^[2, 3], 地基多作为在一定范围的固定边界内的无质量线弹性介质, 而对工程建筑物近域地基中复杂的不均匀岩性、断层、节理裂隙、软弱夹层等真实地质条件以及坝址河谷两岸实际地形的影响考虑较少。这在一定程度上影响了数值模拟分析的效果, 简化岩体结构数值计算的前处理工作是一个值得研究的重要问题。对此, 侯恩科等^[2]通过松散连接实现了三维地学模拟软件 microLYNX 与数值模拟软件 REPA 和 FLAC 之间的模型数据转换; 夏艳华等^[3]对某水利枢纽工程坝址区工程地质三维可视化与 FLAC^{3D} 数值模拟分析的耦合进行了研究; 王明华和白云^[4]在较为简单的层状岩体三维可视化建模的基础上, 提出了基于松散模式的三维规则格网与 FLAC^{3D} 基本元素之间的转化方法; 蔡明等^[5]提出采用融合共通地质模型与地质力学模型进行地下工程的规划与设计, 以便得到更好的优化方案。这些研究结果对三维地质模型与数值模拟分析的结合起到了推动作用。

工程地质三维建模技术能够构建不同精度要求的工程建筑物与复杂地质信息(包含地形、地质条件)的三维统一模型^[6, 7], 且在空间剖分方面具有很强的优势。因此, 若能将三维地质模型与数值模拟分析耦合起来, 让数值模拟直接继承和利用工程地质三维统一模型数据, 自动生成包含复杂地形、地质条件的岩土结构和工程建筑物的三维有限元网格体系, 并能对生成单元自动进行拓扑检验和局部编

码调整, 这样就可以大大简化和减轻繁重的前处理工作, 从而为数值模拟分析创造重要的前提条件。

2 耦合模式总体思路

三维地质模型与数值模拟分析的耦合模式一般有 2 种: (1) 数据耦合模式, 即通过数据转换将两者连接起来, 这需要编制相应的数据转换程序, 将地质建模系统的数据转换为数值模拟分析程序所能接受的数据格式并输入; 该模式能保证 2 套系统相互独立, 编程量较小, 其关键是要掌握两者的数据文件格式。(2) 功能耦合模式, 即将数值模拟分析功能完全移植于三维地质建模系统中, 使系统功能非常强大。这需要获得数值模拟分析程序的源代码或者自己编写相应的程序, 故难度较大。

对于上述 2 种耦合模式, 目前更为可行的是采用数据耦合的方式, 只需清楚三维地质建模系统与数值模拟分析程序两者的相关数据文件格式, 加以适当的改进、转换和输入输出即可。因此, 基于该模式提出耦合模式总体结构(见图 1), 采用作者所开发的 VisualGeo 系统负责工程地质三维建模和网格剖分工作, 不仅直观准确地提供了包括岩层、断层、软弱夹层、节理裂隙等地质构造和大坝建筑物三维模型, 而且还能完成相应的三维网格剖分功能, 并赋以相关属性; 进而通过数据转换程序将上述模型数据导入到数值模拟分析软件(如 FLAC^{3D}, ANSYS, Algor, Abaqus 等商业软件)中, 供各种模拟分析方法调用; 最后, 还可将分析成果与工程地质三维模型相结合, 进行直观地可视化分析, 获得更好的效果。

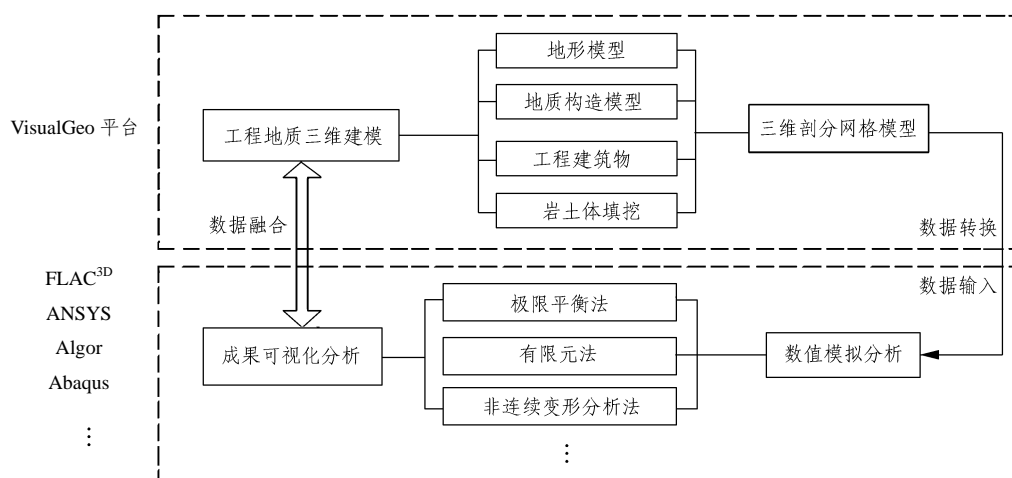


图 1 耦合模式总体结构图

Fig.1 Overall structure scheme of the coupling pattern

3 工程地质三维统一建模

获得丰富准确的地质信息是进行岩体结构数字模拟分析的基本前提, 同时, 任何计算方法的成功都必须建立在深入查明地基地质特征和作出符合实际情况的机制分析基础上^[8]。因此, 利用地质勘探和实验分析所得到的一系列空间分布不均的离散数据来进行三维地质建模与可视化分析, 描述地质构造的空间展布情况, 不仅能为正确判断、分析工程地质问题提供可视化的综合信息, 而且还能为工程岩体稳定分析提供基本的几何模型^[9]。

三维地质建模是目前国内外研究具有挑战性的一个热点问题^[10]。在分析这方面研究成果的基础上, 本文根据我国水利水电工程地质勘探的特点和实际需求情况, 针对多源地质数据的耦合分析、地质体复杂性、信息量大、分析速度慢、地质构造的动态性、模型可靠性及其快速反馈更新等工程科学问题, 融合水利水电工程科学、工程地质学、数学地质学和计算机科学等多个交叉学科的先进理论与技术, 提出了面向水利水电工程地质的 NURBS 混合数据结构技术、耦合多源数据的水利水电工程地质三维统一模型的构建方法和基于三维统一模型的水利水电工程地质分析应用 3 项关键技术的解决方案, 并研制开发了水利水电工程地质建模与分析系统 VisualGeo, 成功地解决了地质体复杂、信息存储量大与分析要求高的矛盾, 可快速、客观地重构坝区工程地质三维统一模型, 具有数据存储量小、精度高且易于操作分析的优点^[5, 10]。

在工程岩体结构数值分析建模中, 工程 - 岩体体系的三维模型尺寸可以在顺河向、横河向及坝底深部基岩以下一定的范围内生成, 图 2 给出了小湾工程坝区工程地质三维统一模型(图中: *M* 代表时代不明确的中深变质岩系), 该模型的长约 2 000 m、宽约 1 700 m、高约 1 000 m(坝底以下深部基岩取一倍坝高范围), 包含 16 个不同的岩层、57 个与工程关系密切的断层、风化卸荷界限、地下水位线以及大坝和地下洞室群等水工建筑物。该模型将河谷两岸断层等复杂的地质构造情况进行了很好地模拟, 准确地表达了坝址区的地形地质条件, 可为高拱坝坝肩、坝基岩体的稳定分析提供精细的计算分析几何模型。

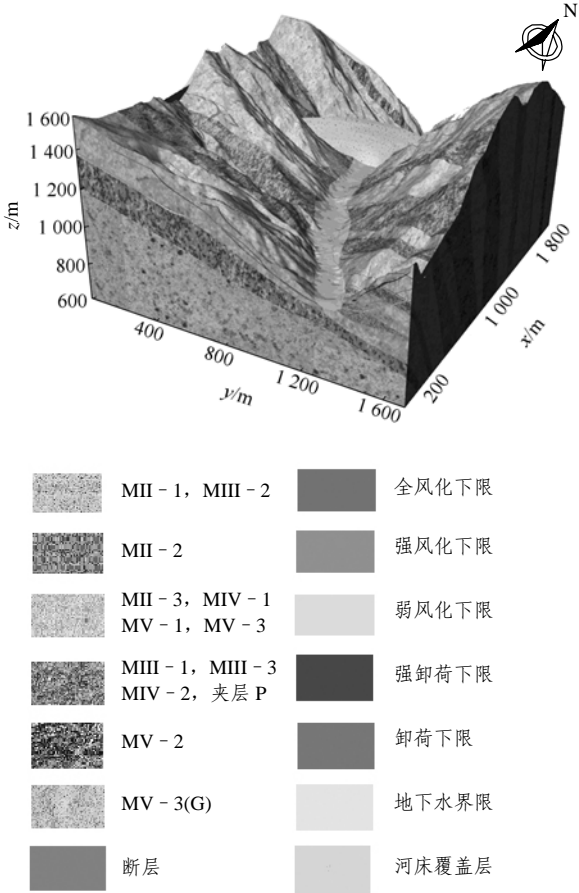


图 2 小湾工程坝区工程地质三维统一模型
Fig.2 3D engineering-geological integrated model of Xiaowan Project

4 工程岩体结构三维数值模拟分析

工程岩体结构的稳定性问题是一个非常复杂的地质力学问题, 需要采用理论与实践、定性与定量相结合的方法进行研究, 数值模拟分析技术已在各类工程中得到了广泛的应用^[4, 11], 如极限平衡理论方法、非线性有限元法、离散元法、界面元法、不连续变形分析法和数值流形分析方法等, 这些方法已成为工程岩体结构应力与变形分析的有力工具。

岩体中的结构面成因各异, 对岩体工程性质的影响差别亦较大。目前, 工程地质界主要采用谷德振^[12]所提出的 5 级结构面分类法, 在数值模拟计算分析中, 对这 5 级结构面可分为两大类进行处理^[13]: 一类为规模较大、有一定厚度、力学性质差的结构面(对应 I~III 级结构面), 如断层、软弱夹层及深裂缝等, 它们对岩体的变形和稳定起控制作用, 需设置夹层单元等进行准确模拟; 另一类为岩

体中大量存在的闭合结构面(对应 IV, V 级结构面),如胶结较好的层面、层理面及闭合裂隙等,这类结构面密度大、空间分布复杂,难以逐条模拟,可作等效处理。此外,在高山峡谷地区开挖工程高边坡,地形地貌对边坡稳定性有极其重要的控制作用,在数值计算分析时,计算模型中能否真实地反映研究区的地形地貌,对计算结果的可靠性有至关重要的影响^[1]。由此可见,建立可靠的地质模型是各类工程岩体稳定性数值分析的前提和基础,缺乏对地质体客观、正确认识的任何数值分析都将难以得到可靠的分析结果^[14]。

因此,工程岩体结构三维数值模拟分析要求将工程、岩体和结构面作为有机的整体,建立更为精确、真实的实体模型,而这往往需要生成复杂的工程岩体三维有限元网格模型,如张伯艳和陈厚群^[15]所建立的拱坝-地基计算体系,单元总数为 20 107 个,节点总数为 22 878 个,总自由度数为 68 634,规模很大;若要求能够提供更为精细的复杂地质构造(如断层)和拱坝结构模型,其有限元网格的生成是一项非常艰巨的任务,需采用更为便捷的方法。

5 耦合应用方法

由前述各方面的分析可知,将三维地质模型与数值分析有机地结合起来,既能简化数值分析的几何前处理工作,又可大大提高工程岩体结构系统几何模型的精度,具有很强的优势。具体而言,两者的耦合应用方法可从以下几个方面展开:

(1) 地质结构与工程建筑物结构的精细建模。这实际上是节 3 坝区工程地质三维统一建模的内容,主要是根据确定的计算范围对该区域的关键地质结构(主要包括地层、断层、软弱夹层等)和拱坝结构进行精确的三维建模,获得基本的几何模型。图 3 给出了小湾工程坝区工程地质结构三维精细模型。

(2) 计算网格模型的自动生成。研究区域复杂的地质构造和建筑物造型给数值计算网格模型的建立与数据输入带来了极大的困难,尤其对于有限元网格建模。数值模型前处理数据的手工输入极其繁琐,且常常出错,而前处理数据输入中的一个错误,往往导致整个模拟分析的失败。对于工程岩体结构

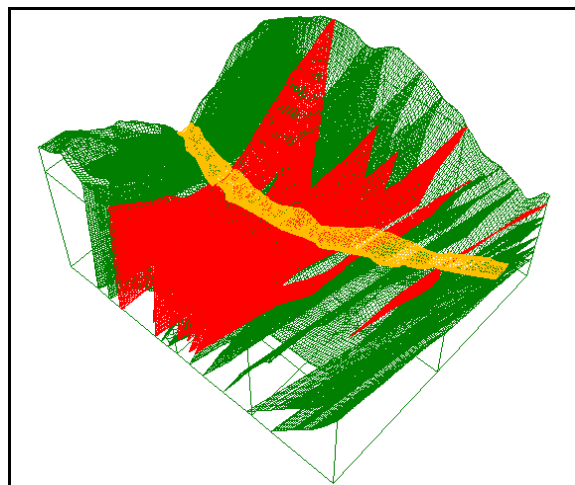


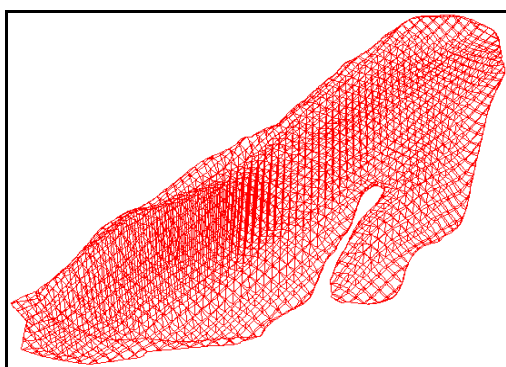
图 3 小湾工程坝区工程地质结构三维精细模型
Fig.3 3D refined model of engineering geological structures in dam area of Xiaowan Project

的耦合模拟分析,研究建筑物与地基的相互作用、岩体稳定分析计算、建筑物结构对应力的影响等,都增加了前处理工作的难度,而计算方案的修改、节点的增删、边界约束的调整都会导致整个输入数据文件的重新生成,给研究人员带来了难以估量的工作量。计算网格模型的自动生成是高拱坝抗震分析中一个相对薄弱的环节。

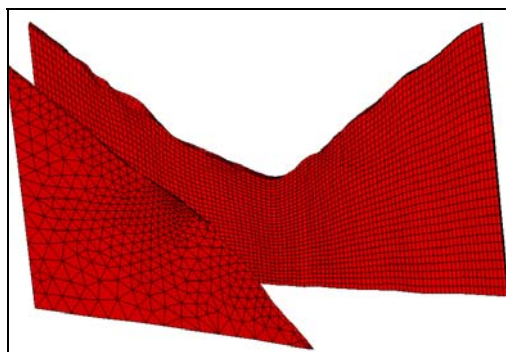
对于极限平衡分析方法,其前处理工作一般是将坝肩可能滑动岩块以三维条块进行划分。基于构建的三维地质模型,按照一定的主滑动方向、岩体的长度和宽度,本文设计实现了相应的自动剖分模块(Auto_Subdivision),可快速、准确地提供三维几何剖分模型。

对于有限单元法,其网格剖分模型的生成相对复杂得多,不仅要考虑关键部位的加密问题,而且还需要附加相应的节点坐标、单元信息、材料信息、荷载信息及边界条件等属性数据,网格疏密度与模型数据量的矛盾往往非常突出,使得复杂结构的有限元网格自动剖分成为其数值分析的一个难点。本文在三维地质模型的基础上,采用四边形或三角形单元进行自动均匀或加密剖分,并且在含有相应几何属性信息的同时能够加入任意用户数据。

图 4 所示为基于三维地质模型完成的一些网格剖分实例,其中图 4(a)为长度和宽度均为 20 m 的三维条块剖分图,共 1 167 个条块,并含有编号、体积、面积、坐标、倾角等共 10 多组属性数据;图 4(b)为 2 个断层结构分别采用三角形或四边形单元进行



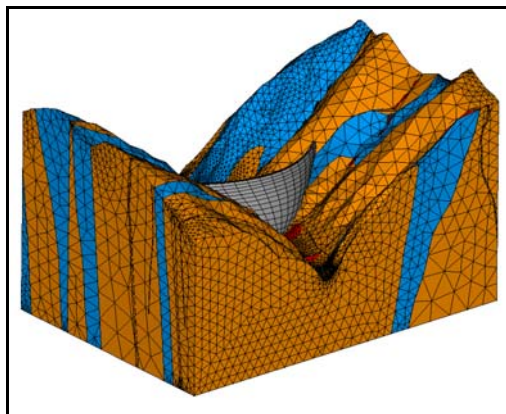
(a) 三维条块剖分图



(b) 断层的有限元网格剖分图



(c) 水平层状岩层的有限元网格剖分图



(d) 坝区拱坝-地基系统的三维有限元网格模型图

图 4 基于三维地质模型的网格剖分图

Fig.4 Mesh generation based on 3D geological model

剖分的有限元网格剖分图;图 4(c)为水平层状岩层的有限元网格剖分图;图 4(d)为坝区拱坝-地基系统(包含岩层、断层和拱坝等)的三维有限元网格模型图。

(3) 数据转换。在上述网格几何模型建立之后,需要相应的数据转换程序对其进行读取,并输入到数值分析程序中以供使用。这可以采用两种途径加以实现:一是在数值分析程序中编写模型读取程序,将上述几何模型及附加用户信息完全输入进来,由于作者拥有 VisualGeo 地质建模系统的模型文件格式,这是一条较好的途径,但需要一定的编程工作;二是通过建模系统和数值分析程序两者能共同识别的文件格式,如 iges, sat, dxf 等数据交换格式,来进行模型的输出、输入,该途径虽然操作方便快捷,但某些用户信息或几何属性可能会产生丢失,导致更大的模型处理工作量。

(4) 计算结果的可视化表达。这属于分析后处理的内容,即可将数值模拟分析的计算结果(如计算单元的应力、应变等)按照实际坐标位置读入地质建模系统中,采用一定的图形方式将其表达出来,实现三维地质模型与数值分析的可视化统一表达,可为研究人员提供一种新的、更直观的分析方法。

6 结 论

针对工程岩体结构稳定性分析等数值模拟计算前处理工作存在地质建模、单元网格剖分等难点,本文提出了耦合三维地质模型与数值分析的具体思路和方法,通过精细的工程地质三维建模和便捷的自动网格划分,为数值模拟提供精度高且数据存储空间小的计算几何模型,同时数值模拟计算分析的结果又可丰富地质模型的属性信息,为工程设计与优化提供直观、快速的三维信息平台。目前,作者所建立的三维地质模型不仅提供了开放的数据格式可供用户自由读取,而且能方便地导入到大型通用数值分析软件(如 $FLAC^{3D}$, Algor, Abaqus, ANSYS 等)进行计算分析。这表明本文所提出的耦合模式和方法是可行的,将三维地质模型运用到工程岩体结构数值模拟分析中的耦合研究具有重要的现实意义。

参考文献(References):

- [1] 宋胜武, 巩满福, 雷承第. 峡谷地区水电工程高边坡的稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 226 - 234.(SONG Shengwu, GONG Manfu, LEI Chengdi. Study on stability of high rock slope in hydropower engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 226 - 234.(in Chinese))
- [2] 侯恩科, 吴立新, 李建民. 三维地学模拟与数值模拟的耦合方法研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 388 - 392.(HOU Enke, WU Lixin, LI Jianmin. Study on the coupling of 3D geoscience modeling with numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 388 - 392.(in Chinese))
- [3] 夏艳华, 白世伟, 倪才胜. 某水利枢纽厂房开挖三维可视化与数值模拟耦合研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 968 - 972.(XIA Yanhua, BAI Shiwei, NI Caisheng. Study on coupling of 3D visualization with numerical simulation for powerhouse excavation of a certain hydro-junction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 968 - 972.(in Chinese))
- [4] 王明华, 白云. 层状岩体三维可视化构模与数值模拟的集成研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1 123 - 1 126.(WANG Minghua, BAI Yun. Study on integration of three-dimensional modeling and numerical simulation for stratified rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1 123 - 1 126.(in Chinese))
- [5] 蔡明, KAISER P K, COTESTA L, 等. 共通地质模型和虚拟现实在地下工程规划与设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 182 - 1 189.(CAI Ming, KAISER P K, COTESTA L, et al. Planning and design of underground engineering utilizing common earth model and immersive virtual reality[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 182 - 1 189.(in Chinese))
- [6] 钟登华, 李明超. 水利水电工程地质三维建模与分析理论及实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.(ZHONG Denghua, LI Mingchao. Theories and applications of 3D engineering-geological modeling and analysis of hydraulic and hydroelectric projects[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006.(in Chinese))
- [7] 钟登华, 李明超, 杨建敏. 复杂工程岩体结构三维可视化构造及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 575 - 580.(ZHONG Denghua, LI Mingchao, YANG Jianmin. 3D visual construction of complex engineering rock mass structure and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 575 - 580.(in Chinese))
- [8] MAFFEI A, MARTINO S, PRESTININZI A. From the geological to the numerical model in the analysis of gravity-induced slope deformations: an example from the Central Apennines(Italy)[J]. Engineering Geology, 2005, 78(3/4): 215 - 236.
- [9] 李邵军, 冯夏庭, 王威, 等. 岩土工程中基于栅格的三维地层建模及空间分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 532 - 537. (LI Shaojun, FENG Xiating, WANG Wei, et al. Planning and design of underground engineering utilizing common earth model and immersive virtual reality[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 532 - 537.(in Chinese))
- [10] ZHONG D H, LI M C, SONG L G, et al. Enhanced NURBS modeling and visualization for large 3D geoengineering applications: an example from the Jinping first level hydropower engineering project, China[J]. Computer and Geosciences, 2006, 32(9): 1 270 - 1 282.
- [11] HUANG C C, TSAI C C, CHEN Y H. Generalized method for three-dimensional slope stability analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(10): 836 - 848.
- [12] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 204 - 207.(GU Dezhen. Basis of rockmass engineering geological mechanism[M]. Beijing: Science Press, 1979: 204 - 207.(in Chinese))
- [13] 张勤, 陈志坚, 朱代洪, 等. 层状裂隙岩体稳定性分析的主要问题[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 753 - 756.(ZHANG Qin, CHEN Zhijian, ZHU Daihong, et al. Several problems in the stability analysis of layer jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 753 - 756.(in Chinese))
- [14] AGLIARDI F, CROSTA G B. High resolution three-dimensional numerical modeling of rockfalls[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(4): 455 - 471.
- [15] 张伯艳, 陈厚群. 用有限元和刚体极限平衡方法分析坝肩抗震稳定[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 665 - 670.(ZHANG Boyan, CHEN Houqun. Analysis of abutment aseismatic stability by using finite element and rigid body limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 665 - 670.(in Chinese))