

基于三维地质模型的坝基灌浆工程可视化分析

闫福根, 缪正建, 李明超, 钟登华

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 利用 Struts 和 Hibernate 技术, 对灌浆数据进行采集和整理, 在灌浆分析系统中将这些灌浆数据转化为三维灌浆孔模型, 实现三维地质模型和灌浆数据耦合; 在耦合模型的基础上对灌浆效果进行可视化分析: 对任意排灌浆孔模型进行三维地质模型剖切, 揭示每排灌浆孔模型的不良地质体垂直分布情况; 通过改变单位注灰量较大灌浆孔模型的颜色属性, 耦合其对应的三维地质模型, 从而实现单位注灰量在地质模型中的可视化分析; 在灌浆参数基础上自动生成其对应的综合剖面, 将地质条件耦合到剖面中, 赋予综合剖面图地质信息属性; 通过对任意灌浆孔段进行地质信息数字化, 明确每个灌浆孔段是否通过不良地质体以及各个不良地质体的高程分布; 以施工单元为基准, 对单位注灰量和地质信息进行耦合统计分析。通过工程应用实例表明, 基于三维地质模型对整个坝基灌浆工程的可视化分析, 可以有效指导灌浆工作并能对灌浆效果做到及时、有效的反馈分析, 为工程管理人员做出快速的决策提供可靠的依据, 从而提高工作效率和工作水平。

关键词: 灌浆工程; 三维地质模型; 单位注灰量; 可视化分析

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2012)03 - 0567 - 06

作者简介: 闫福根(1987 -), 男, 辽宁营口人, 硕士研究生, 从事三维地质建模与仿真。E-mail: lmc@tju.edu.cn。

Visual analysis for grouting engineering of dam foundation based on 3D geological model

YAN Fu-gen, MIAO Zheng-jian, LI Ming-chao, ZHONG Deng-hua

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: By means of Struts and Hibernate techniques, the grouting data are collected and sorted and converted to grouting hole model in grouting analysis system. Then the coupling between 3D geological model and grouting hole model is achieved. Visual analysis of the effect of grouting is based on the coupling model. The 3D geological model is cut along any grouting platoon so as to reveal the vertical distribution of unfavorable geologic body. The color attributes of grouting hole model with larger unit grouting are changed, and the corresponding 3D geological model is coupled to achieve the visual analysis of the unit grouting. The comprehensive profiles automatically generating are based on grouting parameters, in which geological conditions will be coupled, and the geologic information will be shown in the comprehensive profiles. The geological information of any grouting hole model is digitalized to learn the grouting hole model whether or not to go through unfavorable geologic body and their elevations. On the basis of construction unit, statistical analysis for unit grouting and geological information is performed. Application examples show that the visual analysis of grouting engineering based on 3D geological model can effectively guide the grouting process and obtain a timely and effective feedback to grouting effects, and it will provide a reliable basis for decision-making of project management so as to improve the efficiency and level of work.

Key words: grouting engineering; 3D geological model; unit grouting; visual analysis

0 引言

坝基灌浆工程是解决地基沉降变形、渗透稳定、深层抗滑稳定问题的重要工程措施, 主要包括固结灌浆和帷幕灌浆两部分。由于灌浆工程本身的隐蔽性、复杂性和重要性, 因此对整个坝基地质情况尤其对于不良地质体的分布情况的全面掌握, 对灌浆工程来说

至关重要。

对于大型水利水电工程来说, 由于其地质条件的复杂性, 前期的地勘数据和原始解释资料多为空间分

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51021004);

“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAB29B05)

收稿日期: 2011 - 07 - 29

布不均匀的二维离散数据^[1], 利用这些二维的地质资料对灌浆工程进行指导, 难免存在一定的盲目性、局限性。灌浆工程本身具有工程量大、技术要求高、与混凝土浇筑存在一定干扰等特点, 施工过程中又将产生海量的灌浆数据, 因此, 对这些数据进行及时的整理、分析和反馈, 对分析灌浆效果具有重要的意义。

随着计算机技术的发展, 三维地质建模技术和数据采集技术在国内外取得了很多的成果, 在三维地质方面, Yfantis运用分形技术对地质体表面进行模拟^[2], mallet采用离散光滑插值技术对曲面模拟^[3], 本文采用了NURBS—BREP^[4]混合建模技术进行三维地质建模。通过信息采集技术, 将灌浆数据导入数据库中, 耦合灌浆孔位置信息 X, Y, Z 坐标, 将数字化的灌浆孔数据转化为三维可视化模型, 实现了灌浆数据从文字到三维的转化。在此基础上, 将灌浆孔三维模型耦合到三维地质模型中, 实现两者的无缝连接。通过两者的耦合, 可以明确任意灌浆孔的地质条件分布情况、判断其是否通过不良地质体, 通过对地质模型的横向剖切、数字钻孔、综合剖面输出等操作, 可以有效的实现灌浆孔的地质信息可视化, 查询每一个灌浆孔地质属性。综合分析灌浆孔的地质信息和灌浆参数, 实现对灌浆参数在地质信息基础上的可视化, 从而做到对整个灌浆效果的全面、准确的分析, 为整个灌浆工程提供可靠的依据和保障。

1 灌浆数据的采集与整理

1.1 灌浆数据的采集

对于大型水利水电工程, 在整个灌浆过程中将产生大量的灌浆数据, 其主要包括以下两个方面: ①灌浆参数信息: 主要包括单位注灰量、灌浆压力、水灰比、注浆量、注灰量、涌水量、抬动值等; ②检查参数信息: 主要包括检查孔的压水信息、抬动孔的灌前声波信息、检查孔的灌后声波信息以及声波图片、岩芯图片、钻孔录像图片等。这些参数数据是对灌浆实际效果的直接反应, 所以对这些信息做到有效及时地采集, 对整个灌浆工程有着重大的意义。

近年来, 数据采集技术和数据库技术的发展为灌浆数据的采集提供了有效的保证, 本文主要采用J2EE技术, 将数字型数据和图片型数据通过Internet网络采集到数据库中。

在上述两种参数中, 灌浆参数是在灌浆过程中利用灌浆记录仪自动生成, 并且这些参数有较为固定的Excel格式, 这为网络在线数据采集的实现提供可靠的保证。对于检查信息中的图片类参数采用文件上传技术, 从而实现图片到数据库的链接, 本文采用的数

据库类型为Microsoft SQL Server 2008。

1.2 灌浆数据的整理

采用J2EE程序研发中较为理想Struts+Hibernate^[5]框架技术实现了对灌浆数据的整理。其中Struts是基于MVC (Model view controller) 设计模式, 为程序整体框架的构造和控制提供十分优良的支持; Hibernate实现了对JDBC的封装, 为对数据库的操纵提供了可靠的手段。

通过对灌浆数据的整理, 可以实时查询各个孔段的灌浆参数信息、检查参数信息以及其对应的声波图片、岩芯图片和钻孔录像图片等; 同时对各施工单元对应的灌浆分序统计表、灌浆综合统计表、各次序孔透水率频率曲线图、各次序孔单位注灰量频率曲线图等成果图表进行有效的整理, 为基于三维地质模型, 对灌浆参数的可视化分析提供了基础, 图1为灌浆数据的采集与整理结构图。

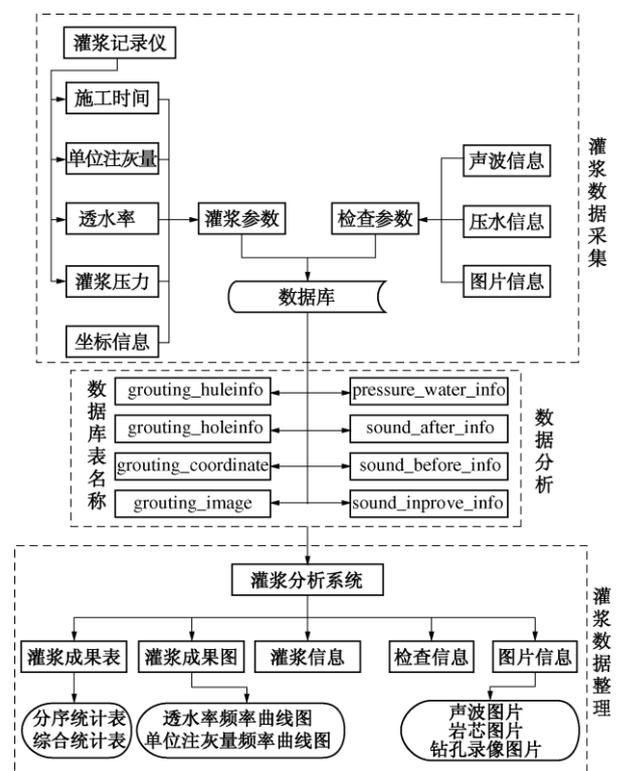


图1 灌浆数据的采集与整理结构图

Fig. 1 Structure of collection and sorting of grouting data

2 三维地质模型和灌浆孔模型耦合

2.1 三维地质模型

针对灌浆工程地质构造情况及其对应的地质数据, 引入以参数函数模型、TIN模型和B-Rep结构为核心的三维地质建模技术, 以工程地质的数据表达方式即数据结构作为建模的基础, 采用以NURBS^[6]结构为主、结合TIN模型和B-Rep结构的混合数据结构^[7],

其中 NURBS 数据结构用来拟合复杂地质结构面, TIN 模型作为原始数据结构向 NURBS 曲面转换的传输载体, B-Rep 用来反映数据结构之间的拓扑关系。

在灌浆工程中地质条件往往比较复杂, 原始地质资料信息量大, 表现方式差异性大、精度要求高, 通过实践证明, 上述建模技术能很好的对地质信息进行表达, 并且产生的数据量较少, 为地质信息的可视化提供了很好的途径; 坝基范围内的地质空间往往存在大量软弱夹层、破碎带、挤压带、断层等不良地质体, 这些不良地质体对灌浆的影响十分显著, 因此对这些不良地质体进行有效的三维表达, 对灌浆效果的分析有着重要的指导意义。

首先对地表进行地形建模, 利用等高线等原始资料, 以 TIN 模型方式将这些离散的地形等高线按一定的规则划分形成互联的不规则三角形网络, 以 TIN 模型为中介, 用 NURBS 技术对地表 TIN 模型进行三维地形重构, 得到三维地形可视化模型。地形三维模型也作为所有不良地质体运算操作的空间约束和基础。不良地质体在岩体内发育较为广泛, 破坏了岩层的整体性和连续性, 大量研究证明对于不良地质体的建模, 也是三维地质建模的一个难点, 主要体现在软弱夹层、挤压破碎带分布比较广泛, 构造较复杂, 且连续性不强, 厚度在空间变化较大。①根据每一个不良地质体自身的原始地质数据, 利用上述的三维建模技术, 分别建立不良地质体的上、下结构面 S1 和 S2; ②利用结构面 S1 和 S2 的空间位置关系, 分别对受体—地表三维模型进行布尔操作, 形成不良地质体 T1; ③终对所有不良地质进行空间拓扑分析。

2.2 三维地质模型与灌浆孔模型耦合

以前对灌浆的研究, 往往局限于数字型数据, 对整个灌浆孔的空间分布情况缺少整体认识, 在上述三维地质模型的基础上, 实现灌浆数据向三维空间模型的转化, 使得两者得到正确的耦合, 将为整个灌浆工程分析提供一个新的视角。

综合灌浆孔位置信息 X, Y, 高程信息 Z, 段长信息 L、孔口直径 D 信息, 实现灌浆孔的三维可视化建模。①用 X, Y, Z 坐标生成对应的三维空间点 P1; ② P1 为圆心, D/2 为半径, 利用函数 ON_Circle::ON_Circle 生成曲线 C1; ③Z 方向作为轴线, L 为长度, 利用函数 RhinoExtrudeCurveStraight 实现曲线 C1 的拉伸放样, 从而形成曲面 S1; ④用函数 Cap 使曲面 S1 形成空间 Z 方向约束, 完成灌浆孔从数字型数据向三维空间模型的转化, 以上 4 步骤用程序可自动完成, 图 2: 三维地质模型和灌浆孔模型耦合模式; 图 3: 三维地质模型与灌浆孔模型耦合效

果图, 其中蓝色实体代表灌浆孔模型, 其他实体代表不良地质体。

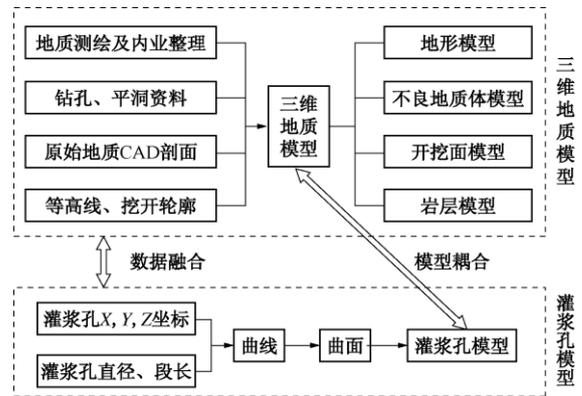


图 2 三维地质模型和灌浆孔模型耦合模式

Fig. 2 Coupling mode for 3D geological and grouting hole model

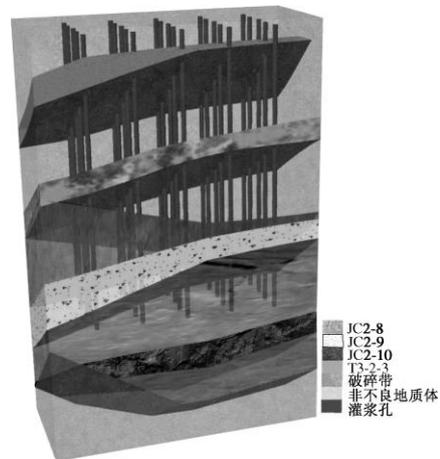


图 3 三维地质模型与灌浆孔模型耦合效果图

Fig. 3 Coupling of 3D geological model and grouting hole

3 工程实例分析

通过三维地质模型和灌浆孔模型的耦合, 可以动态的、全方位的、分层次化对灌浆孔模型进行可视化分析。某水电站为金沙江下游梯级开发的骨干工程, 该水电站的二期坝基灌浆工程从 2009 年年末开工, 持续到 2012 年 6 月份, 整个工期大约为两年半。由于该水电站处于糖房湾短轴背斜的东倾伏段, 发育有立煤湾膝状挠曲, 地质构造条件复杂; 地层岩性主要为三迭系须家河组的河湖相砂、泥岩地层, 岩性岩相十分复杂, 坝址两岸及下游河床分布有 T₃ 含煤岩组, 煤层有开采历史, 整个坝基内分布较多的软弱夹层。

坝基的二期固结灌浆范围为坝基、消力池及其周边一定范围的区域, 整个灌浆区域按灌浆深度分为 6 个区域。帷幕灌浆采用悬挂式防渗帷幕。二期工程大坝坝踵部位设置上游防渗帷幕, 右非 7 以左大坝坝趾部位设置下游防渗帷幕, 右非 7 坝基设置横向防渗帷

幕,与左岸一期大坝的防渗体系相接形成1个独立的封闭帷幕灌浆区;消力池设置封闭防渗帷幕系统,在左、中、右导墙和尾坎设置防渗帷幕,与泄水坝段坝趾防渗帷幕相连,分别在左、右消力池形成2个独立封闭帷幕灌浆区。

3.1 三维剖切分析

为了全方位、多角度对灌浆孔的地质条件进行认识和分析,利用函数3Dsection()对任意排灌浆孔进行横、纵剖面切割,揭示灌浆孔段空间范围内不良地质体数目及分布范围,反映每排灌浆孔之间地质模型的空间关联性;图4为某一排灌浆孔的三维剖切分析;从图中可知,该排灌浆孔通过5个不良地质体,在灌浆孔的底部经过破碎带和JC2-9,同时破碎带中分布一个二级软弱夹层JC2-10,在该排灌浆孔顶部主要分布一级软弱夹层T3-2-3和二级软弱夹层JC2-8。

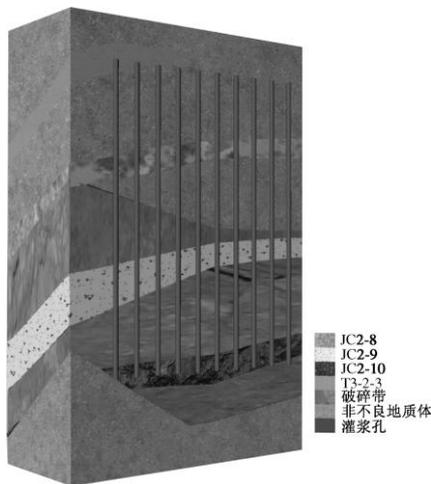


图4 三维剖切分析

Fig. 4 Analysis of 3D section

3.2 单位注灰量可视化分析

单位注灰量^[8-9]对于灌浆工程是一个非常重要的参数,其数值大小直接反映大坝坝基的灌浆效果,根据以往的工程实践表明,对于岩体较好的岩层其单位注灰量相对较小,对于岩体质量较差的岩层其单位注灰量较大;尤其当灌浆孔通过不良地质体时,可能造成单位注灰量较大。以灌浆孔模型为载体,通过其颜色属性反映单位注灰量情况,结合地质条件对单位注灰量进行可视化分析。图5:单位注灰量可视化剖切分析,图中的所有灌浆孔均为一序孔,其中颜色属性为红色的孔段代表单位注灰量大于1000 kg/m,颜色属性为蓝色的孔段代表单位注灰量小于1000 kg/m。从图中可以看出:当灌浆孔通过不良地质体时,该高程范围内对应的灌浆孔段的单位注灰量一般较大,在图中对应为红色灌浆孔段。

3.3 基于地质信息的综合剖面图生成

综合剖面图作为灌浆工程的重要成果,对单元验收起到重要作用。传统的综合剖面图是对灌浆参数,主要是对单位注灰量变化趋势的反映。地质条件作为影响单位注灰量的重要因素,并没有在综合剖面图中有所体现。在灌浆分析系统中,利用函数ProFile(M, Dir, Para)可自动生成任意排灌浆孔综合剖面图,且将综合剖面赋予地质属性,函数中参数M代表选择的灌浆孔实体,Dir代表剖切方向,Para代表选择的灌浆参数。图6为某排灌浆孔综合剖面图:图中的灌浆孔均为一序孔,其中蓝色矩形宽度代表该孔段灌浆孔的单位注灰量,其他封闭曲线为不良地质体分布范围。

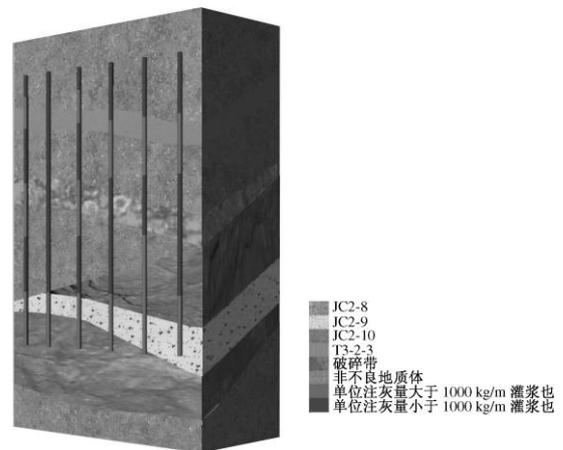


图5 单位注灰量可视化剖切分析

Fig. 5 Visualization analysis for unit grouting

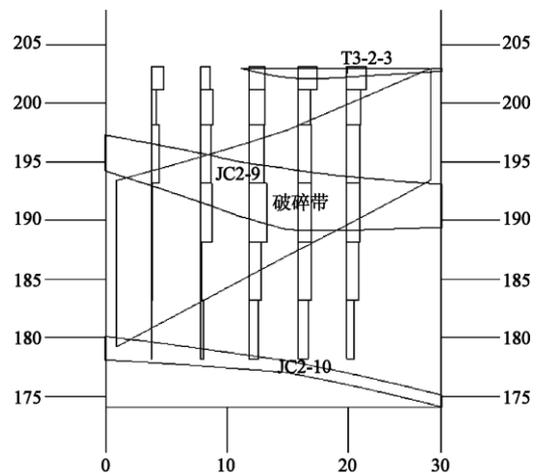


图6 灌浆孔综合剖面图

Fig. 6 Comprehensive profile of grouting hole

3.4 灌浆孔地质信息数字化

通过以上分析可知,不良地质体对于灌浆孔的单位注灰量影响较为明显,如能在施工前对任意灌浆孔的不良地质体分布高程有明确的认识,对于整个灌浆工程将有重要的意义。函数Digital()为该功能的实现提供了有效的途径,首先将灌浆周计划中灌浆孔位置

信息 X, Y, Z 坐标转化为三维灌浆孔模型, 耦合三维地质模型, 实现灌浆孔地质信息数字化, 表 1 为某坝段 10 个灌浆孔段的不良地质体分布高程信息, 单位为 m。工程实践表明该研究结果对灌浆过程有较大的指导意义。

表 1 不良地质体分布高程

Table 1 Elevations of unfavorable geologic body

孔段名称	排序	孔序	夹层	起点高程/m	终点高程/m	高差/m
GX3-40-01-3	40	1	破碎带	194.10	193.00	1.10
GX3-40-01-3	20	1	JC2-9	196.45	193.00	3.45
GX3-40-01-4	40	1	破碎带	193.00	188.00	5.00
GX3-40-01-4	40	1	JC2-9	193.00	192.85	0.15
GX3-40-01-5	40	1	破碎带	188.00	183.00	5.00
GX3-40-01-6	40	1	破碎带	183.00	180.67	2.33
GX3-40-01-6	40	1	JC2-10	179.51	178.00	1.51
GX3-40-02-3	40	2	破碎带	194.72	193.00	1.72
GX3-40-02-3	40	2	JC2-9	196.07	193.00	3.07
GX3-40-02-4	40	2	破碎带	193.00	188.00	5.00

注: GX3-40-01-3 中 G 代表固结灌浆, X3 代表泄 3 坝段, 40 代表排序, 01 代表孔序, 3 代表孔段。

3.5 耦合地质信息的单位注灰量统计分析

在实际灌浆施工过程中, 单元验收都是以施工坝块为标准, 在同一个施工坝块中不良地质的分布情况及其本身的地质属性也比较相近, 因此以施工坝块为基准, 在结合地质信息的基础上, 单位注灰量将具有一定的统计性规律^[10-12]。表 2 为某一施工坝段单位注灰量与地质信息统计分析结果。在灌浆孔和地质条件耦合模型的基础上, 利用灌浆分析系统中提供的函数命令, 实现对每个灌浆孔通过不良地质体情况的明确, 此处将不良地质体 4 类, 分别为破碎带、一级软弱夹层、二级软弱夹层、三级软弱夹层, 通过后方数据库将不良地质体分布状况和灌浆孔灌浆参数中的单位注灰量进行关联, 从而产生表 2 的统计结果, 表中数字代表单位注灰量, 单位为 kg/m, 岩体质量由破碎带向三级软弱夹层逐次提高, 表中对该坝段 2756 个灌浆孔段进行分析, 从表中可以发现, 对于 1 序孔: 所有通过破碎带的灌浆孔段平均单位注灰量最大, 三级软弱夹层最小, 单位注灰量随岩体质量升高呈递减规律, 在 2 序孔中, 单位注灰量随岩体质量变化也存在递减的规律, 但是在三级软弱夹层处存在突变, 说明不良地质体对 1 序孔的影响大于 2 序孔, 这也符合实际的灌浆情况, 因为通过 1 序孔的施工, 坝基地质条件已经得到很大的改善, 所以不良地质体对 2 序孔的影响要降低。

表 2 单位注灰量与地质信息统计分析

Table 2 Statistical analysis for unit grouting and geological information

孔序	破碎带	一级软弱夹层	二级软弱夹层	三级软弱夹层
1	918.93	692.65	662.95	306.07

2	215.88	177.62	144.37	249.16
---	--------	--------	--------	--------

图 7 为不同地质条件下一序孔单位注灰量累计频率曲线图, 图 8 为不同地质条件下二序孔单位注灰量累计频率曲线图, 综合图 7, 8 可得到以下结论: ①单位注灰量累计频率曲线图, 随着岩体质量的提高曲线的上升趋势加快, 说明岩体质量好的岩层其对应灌浆孔段的单位注灰量在低区间分布较多; ②2 序孔单位注灰量累计频率曲线收敛速度大于 1 序孔单位注灰量收敛速度; ③岩体质量对 1 序孔单位注灰量的影响大于对 2 序孔的影响。

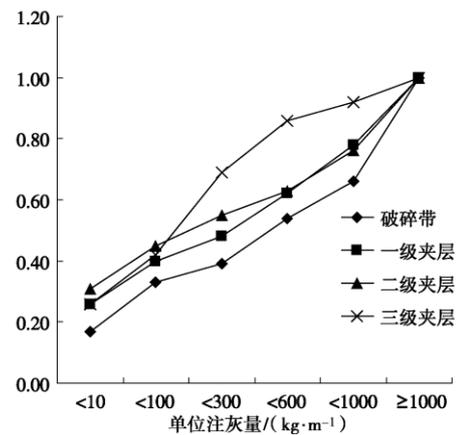


图 7 各类地质条件下 1 序孔单位注灰量频率累计曲线图

Fig. 7 Cumulative frequency curves for first-order grouting hole under different geological conditions

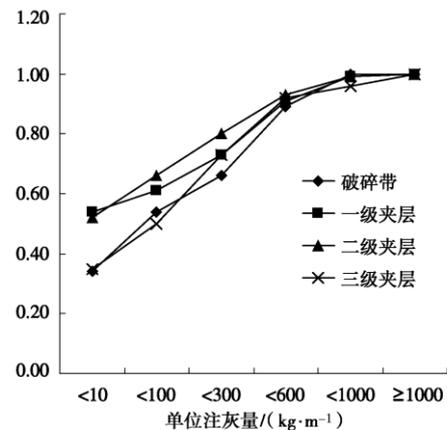


图 8 各类地质条件下 2 序孔单位注灰量频率累计曲线图

Fig. 8 Cumulative frequency curves for second-order grouting hole under different geological conditions

4 结 语

基于三维地质模型的灌浆孔可视化分析, 从一个新的视角对灌浆效果进行了审视, 使原本单纯的数字型灌浆孔数据, 有了三维的表达方式, 由于坝基地质条件与灌浆工程密切相关, 使得三维地质模型、尤

其不良地质体三维模型在灌浆分析方面应用前景更为广阔。本文基于 Struts +Hibernate 技术实现对灌浆数据的采集和整理,通过灌浆分析系统将三维地质模型和灌浆孔模型耦合,利用三维剖切分析,单位注灰量可视化分析、基于地质信息的综合剖面图生成、耦合地质信息的单位注灰量统计分析等方法的使用,工程人员可以充分认识任意排灌浆孔的地质情况,以及灌浆参数与地质条件之间的相关性。利用灌浆孔地质信息数字化方法,可以有效的确定灌浆孔段不良地质体的垂直分布情况,为下一步施工过程的优化提供良好的依据。

参考文献:

- [1] 李明超, 胡兴娥, 安娜, 等. 滑坡体三维地质建模与可视化分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(5): 1355 - 1360. (LI Ming-chao, HU Xing-e, AN Na, et al. 3-D geological modeling and visual analysis of landslide mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(5): 1355 - 1360. (in Chinese))
- [2] YFANTIS E A. Simulation of geological surface using fractals[J]. Mathematical Geology, 1988, **20**(6): 667 - 672.
- [3] MALLETT J L. Discrete modeling for natural objects[J]. Mathematical Geology, 1997, **29**(2): 199 - 218.
- [4] ZHONG DH, LI MC, SONG LG, et al. Enhanced NURBS model and visualization for large 3D geo engineering applications: an example from the Jinping first level hydropower engineering project China[J]. Computer and Geo Sciences, 2006, **32**(91): 1270 - 1282.
- [5] 苏占东, 杨炳儒, 游福成. 基于信息挖掘的智能决策支持系统的结构设计[J]. 计算机应用, 2005(3): 27 - 30. (SU Zhan-dong, YANG Bing-ru, YOU Fu-cheng, et al. A structure design of intelligent decision support system based on information mining[J]. Chinese Journal of Computers, 2005(3): 27 - 30. (in Chinese))
- [6] 钟登华, 李明超, 王刚, 等. 复杂地质体 NURBS 辅助建模及可视化分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, **17**(2): 284 - 290. (ZHONG Deng-hua, LI Ming-chao, WANG Gang, et al. Visualization analysis of complex geologic body with nurbs model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, **17**(2): 284 - 290. (in Chinese))
- [7] PIEGL L, TILLER W. The NURBS book[M]. 2nd Edition. New York: Springer, 1997.
- [8] 张民庆, 张文强. 注浆技术在基坑工程的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊): 1742 - 1747. (ZHANG Min-qing, ZHANG Wen-qiang. Application of grouting technology in excavation engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S0): 1742 - 1747. (in Chinese))
- [9] 许凯, 叶桦, 马铸, 等. 基于 Struts, Hibernate 和 MapXtreme 的 Web GIS 研究与应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, **36**(增刊 1): 58 - 61. (XU Kai, YE Hua, MA Zhu, et al. Research and development of Web GIS based on Struts, Hibenate and MapXtreme[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, **36**(S1): 58 - 61. (in Chinese))
- [10] 王述红, 郝哲. 岩体微裂隙注浆量预测分析的遗传神经网络方法[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 572 - 575. (WANG Shu-hong, HAO Zhe. The genetic algorithm2neural network method to forecast the miniature crack grouting in rock matrix[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(5): 572 - 575. (in Chinese))
- [11] 张忠苗, 吴世明. 钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 681 - 686. (ZHANG Zhong-miao, WU Shi-ming. Study of mechanism and application on bored pile end grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 681 - 686. (in Chinese))
- [12] 许万忠, 潘进兵, 周治平, 等. 节理裂隙岩体注浆渗透模型分析[J]. 中国铁道科学, 2010, **31**(3): 47 - 51. (XU Wan-zhong, PAN Jin-bing, ZHOU Zhi-ping, et al. Model analysis of the grouting seepage in the jointed and fractured rock mass[J]. China Railway Science, 2010, **31**(3): 47 - 51. (in Chinese))