

岩石力学与工程学报
Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering
ISSN 1000-6915, CN 42-1397/O3

《岩石力学与工程学报》网络首发论文

题目: 基于 CT 探测技术的不良地质构造三维网格模型重构方法
作者: 王启明, 车爱兰
DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1232
收稿日期: 2018-10-25
网络首发日期: 2019-01-25
引用格式: 王启明, 车爱兰. 基于 CT 探测技术的不良地质构造三维网格模型重构方法 [J/OL]. 岩石力学与工程学报. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2018.1232>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 CT 探测技术的不良地质构造 三维网格模型重构方法

王启明, 车爱兰

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 不良地质条件下的岩土体稳定性在地下空间工程中引起了广泛关注。本文针对不良地质条件下的岩土体稳定性, 为建立可靠的分析模型对其进行分析与预测, 提出了基于 CT 探测技术的不良地质构造三维网格模型重构方法。该方法通过进行弹性波 CT 仿真并进行区块化 Kriging 插值获得弹性波速度构造三维可视化模型, 利用峰值法进行材料阈值分割, 同时利用三维网格构建和材料属性映射, 形成目标区域的三维网格模型。结果表明: 通过对重构的三维网格模型与初始模型进行对比分析, 重构模型的仿真度高达 91.44%, 体积分数的绝对误差为 3.33%; 在此基础上, 针对桥梁基础落位区开展弹性波 CT 探测现场试验, 重构该区域三维网格模型并进行取芯验证, 其仿真度大于 84.31%, 体积分数的绝对误差小于 2.45%。该方法具有较高的建模精度, 能够精确地反映不良地质体的空间分布状态, 对评价不良地质稳定性具有重要科学意义。

关键词: 岩土工程; 不良地质; 弹性波 CT; 三维网格模型; 重构方法; 仿真度

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2019)00-0000-00

Reconstruction method of 3D element mesh models for unfavorable geology based on CT technology

WANG Qiming, CHE Ailan

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The stability of rock and soil under the unfavorable geological conditions has attracted wide attention in underground space engineering. A reconstruction method of 3D mesh model of unfavorable geological conditions based on CT detection technology was proposed to establish a reliable analysis model to do analysis and prediction of the stability of rock and mass. In this method, a 3D visualization model of elastic-wave velocity is obtained by performing numerical simulation of elastic-wave CT detection and block Kriging interpolation. The peak value formula is used for material threshold segmentation, and the 3D mesh construction and material property mapping are used to form the 3D grid model in target region. By comparing the reconstructed three-dimensional grid model to original model, the results show that the simulation degree of the reconstructed model is as high as 91.44%, and the absolute error of the volume fraction is 3.33%. On this basis, the field test of elastic-wave CT detection is carried out for the bridge foundation location area, and the 3D mesh model of the region is reconstructed and verified by coring. The simulation degree is greater than 84.31%, and the absolute

收稿日期: 2018-10-25; **修回日期:** 2018-12-23

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0809400)

Supported by the National Key R&D Program of China(Grant No. 2018YFC0809400)

作者简介: 王启明(1993-), 男, 2015年毕业于武汉大学土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事不良地质探测技术及重构方法等方面的研究工作。E-mail: 1165723859@qq.com。通讯作者: 车爱兰(1969-), 女, 博士, 现任研究员、博士生导师。E-mail: alche@sjtu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1232

error of the volume fraction is less than 2.45%. The method has high modeling accuracy and can accurately reflect the spatial distribution state of bad geological bodies, which has important scientific significance for evaluating poor geological stability.

Key words: geotechnical engineering; unfavorable geology; elastic wave CT; 3D element mesh model; reconstruction method; simulation

1 引言

进入 21 世纪,我国社会经济快速发展,公路、铁路、大型建筑等基础设施建设规模不断扩大,大量在建和规划中的工程项目不可避免的会遇到不良地质构造,诸如底层软硬不均、断裂破碎、孤石、穿越水底浅覆土层和地下溶洞等,对施工安全和施工进度造成严重影响^[1-2]。为了使地下工程施工顺利、安全的通过不良地质分布区域,提前对不良地质构造进行探测并根据探测结果进行数值分析,充分评估其对施工进度造成的不利影响变得尤为重要^[3]。随着物理学、数学、电子技术、计算机技术等学科快速发展,地球物理勘探方法在不良地质探测领域取得了明显的研究进展并得到成熟的应用。对于断裂、褶皱等大尺度不良地质,常用高密度电法、大地电磁法进行探测。溶洞等较小尺度的不良地质,常用弹性波 CT、电磁波 CT 法探测,相比电磁波 CT 法,弹性波 CT 法具有探测范围大、探测精度高、抗干扰能力强等优势,在溶洞探测中有良好的应用效果^[4-5]。通过地球物理勘探方法所获取的构造信息多为空间离散点、二维切片,虽能较为准确的反映地下不良地质空间分布状态,但并不能直接应用于数值分析。目前,基于地球物理勘探资料,利用先进的计算机信息技术建立三维网格模型,对三维网格模型进行数值分析,为不良地质条件下的岩土工程稳定性分析以及工程问题的预测提供适时的决策支持,已成为岩土工程界亟待解决的难题^[6]。

三维网格模型重构方法(3D mesh model Reconstruction)广泛应用于医学仿真、材料微观结构性能研究,姚国鹏^[7]根据人体骨骼 CT 图像重构有限元模型,并利用有限元分析软件 Abaqus 进行力学分析,为后续的骨骼生物力学分析奠定了基础。黄明、李跃明^[8]通过对 $Al_2O_3/(W, Ti)C$ 纳米复合陶瓷材料采集 CT 图像,对其复杂微观结构进行三维重构并进行宏观刚度性能预测,阐明了异质材料的微观结构对其宏观性能的影响,取得了良好的效果。近年来,很多学者针对三维网格模型重构方法在岩土工程中的应用做了大量研究。惠兵、郭牧等^[9]将

三维网格模型重构方法应用到公路坑槽分析,利用三维激光技术获取公路坑槽断面数据,对不同深度、宽度和体积指标的坑槽进行三维重构,为研究路面坑槽损伤程度判定提供依据。田威^[10]等通过对岩体式样进行 CT 扫描,不仅重构了岩样的复杂内部结构,还利用 3D 打印制作出与岩样高度近似的模型,为岩石力学研究材料替换提供了新的研究途径。然而不良地质探测所采集的地质钻孔、地质剖面、地震剖面等一系列地质数据,具有探测范围广、覆盖面有限、排布方式不固定等特点,上述方法在不良地质构造三维网格模型重构方面并不适用。因此结合不良地质探测所采集地质数据的特点,设计一种合理的三维网格模型重构方法,是解决不良地质探测结果与数值分析相结合的关键。

基于此,本文提出一种适用于不良地质的三维网格模型重构方法,首先研究了基于三维可视化和网格构建的三维网格模型重构理论基础,接着进行了弹性波 CT 探测仿真和三维网格模型重构,并从体积分数和仿真度两个方面对三维网格模型重构方法的建模精度进行检验。在此基础上,对桥梁基础落位区开展弹性波 CT 探测现场试验,重构该区域三维网格模型并进行取芯验证。

2 三维网格模型重构方法

在对地下溶洞进行弹性波 CT 探测时,为达到对探测区域的全覆盖,通常在探测区域内均匀布置钻孔,在相邻 4 个钻孔间采集 6 组弹性波 CT 切片。获取弹性波 CT 切片后,为将其应用于建立三维可视化模型,需要将他们按照厘定的钻孔位置进行三维空间展布。由于这种基于 CT 切片的三维展布方法所获得的数据并不均匀——数据点都分布在切片上,为使三维可视化模型更加贴合实际,设计一种适应采样数据特点的插值方法尤为必要。三维可视化模型根据三维空间内弹性波速度的不同反映了地下溶洞的真实空间分布状态,对模型的力学性能及稳定性等进行数值分析还需利用网格构建技术对其划分网格并对网格单元映射材料属性,以完成三维网格模型重构。

针对上述关键问题，将基于弹性波 CT 探测技术的三维网格模型重构方法的实现过程分为两个关键部分：三维可视化模型建立、三维网格构建。其总体流程如图 1 所示。

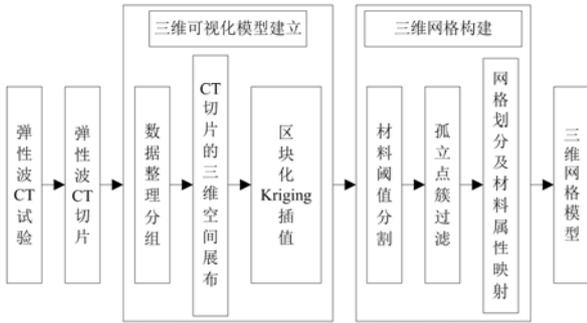


图 1 总体流程图
Fig.1 Overall flow chart

2.1 三维可视化模型建立

面绘制和体绘制是建立三维可视化模型的重要方法。面绘制的基本思想是提取目标物体的表面信息，利用基于边缘或基于区域的分割方法确定空间域内物体的表面特征信息，从而建立物体表面三维模型。该方法无法表征物体内部结构，其只是表示物体的外壳，不能表示实际物体^[11]。体绘制法三维可视化建模的基础是体数据，体数据是对有限空间的一组离散采样，每个采样点代表该点所在空间的一个或多个物理特性，体绘制以采样点簇来表达材料的结构，它不仅真实地重构材料的各相结构，还能完全地反映各相结构内部更为细小的夹杂、孔洞等结构^[12-13]。例如弹性波 CT 切片中弹性波速度对岩溶地质的识别，其结果都是以有限的特征信息来描述空间域内物体的形状特征。体绘制法三维可视化建模的关键步骤如下：①数据整理分组；②二维 CT 切片的三维空间展布；③区块化 Kriging 插值。

Kriging 插值法是一种求最优、线性、无偏的空间插值方法，依据协方差函数对随机场进行空间建模的回归算法，可以实现基于二维 CT 切片的三维可视化过程，有稳定的插值效果。传统的三维可视化方法要求将二维切片展示在三维空间中，直接进行 Kriging 插值，这样做并不适合本文所述弹性波 CT 切片的排布方式^[14]。在基于弹性波 CT 法的不良地质探测中，CT 切片相交将探测区域划分成若干个五面体，若直接进行 Kriging 插值，每个五面体内离散数据点的插值对象不仅包括五面体的三个侧面，还包括其他弹性波 CT 切片，模型的精确度大大降低。在插值过程中，将弹性波探测区域区块

化，以弹性波 CT 切片及其交线为边界把探测区域划分成若干五面体，并对插值对象和离散数据点进行约束，以三个侧面为插值对象，对五面体内各离散数据点进行 Kriging 插值，避免了非相关切片影响的同时，降低了 Kriging 插值中随机误差点出现的可能性。三维空间区块化过程如图 2 所示。

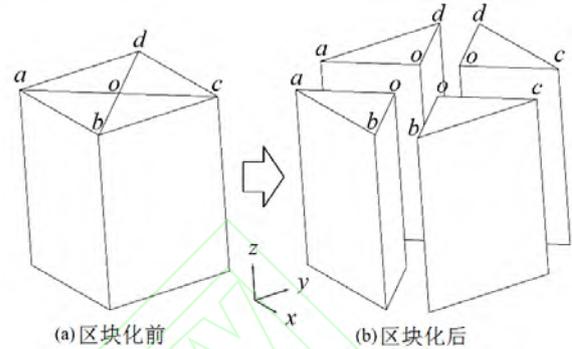


图 2 三维空间区块化过程
Fig.2 Blocking process of 3D space

因此，在对二维 CT 切片进行三维空间展布后，对插值对象和离散数据点进行区块化约束后插值，有效的提高了模型的精确度。

2.2 三维网格构建

三维网格构建作为一种通用技术，理论上就是以单类型数据作为建模数据来源构建三维有限元网格模型。本文根据不良地质构造三维可视化模型数据结构的特点，以八节点的六面体为单元进行三维网格构建，同时建立起网格单元与材料属性的映射关系，实现三维网格模型重构。三维网格构建的步骤如下：①材料阈值分割；②孤立点簇过滤；③网格划分及材料属性映射。

(1) 材料阈值分割的过程：① 确定阈值 T_e ；② 三维可视化模型 $F(i, j, k)$ 中的离散数据点，其值对应不同的值域段；③ 区分不同材料的分布区域^[15]。可用如下公式表示，即

$$G(i, j, k) = \begin{cases} 0, & F(i, j, k) \leq T \\ e, & T_e < F(i, j, k) \leq T_{e+1} \\ f, & T_f < F(i, j, k), \quad e = 1, 2, \dots, f-1 \end{cases} \quad (1)$$

本文所述模型仅涉及两种材料，则对三维可视化模型 $F(i, j, k)$ 的分割，可简化为如下公式，即

$$G(i, j, k) = \begin{cases} 0, & F(i, j, k) \leq T \\ 1, & T < F(i, j, k) \end{cases} \quad (2)$$

所以，对于材料阈值分割，阈值 T 的选择是材料阈值分割过程中最为关键的一步。本文所研究的溶洞不良地质发育于灰岩中，由于灰岩与溶洞的力

学特性差异大，弹性波速度处于不同数量级，且本文所采用的弹性波 CT 层析成像分析和 Kriging 插值法均为线性变换过程，符合正态分布规律，因此峰值法^[16]作为一种全局阈值分割方法最为适用于本文所述材料阈值分割，且操作简单，易于实现。针对岩溶地质问题中的典型二值化阈值分割，根据物理特性将两种材料对应不同的值域段，拟合得到两函数曲线有两个分离的峰值，两峰之间的谷底对应的值就是分割阈值 T 。对于不同岩土层中存在的岩溶地质问题，首先根据钻孔资料和弹性波速度将岩土地层划分为不同层级，依次进行峰值法分割，可以保证较好的材料阈值分割效果。引入直方图 $h(F)$ ，该直方图通过统计不同值域段离散点的数目来确定，即

$$h(F) = \frac{\text{count}}{1 \leq i \leq U, 1 \leq j \leq V, 1 \leq k \leq W} \{p + n\Delta l < F \leq p + (n+1)\Delta l\}$$

$$p + (n+1)\Delta l < q$$

$$n = 0, 1, \dots$$

(3)

式中： Δl 为值域段大小， U 、 V 、 W 为三轴向离散数据点数量， $(p, q]$ 为 F 的值域。

(2) 对于 $U \times V \times W$ 的离散数据点阵，本文提出了一种快速准确地确定三维数据点阵中聚集簇的累计标记法，该方法沿三轴向依次对数据点进行扫描，在访问每一个数据点时，通过前邻点的标记状态确定当前数据点的标记，并根据数据点的标记状态进行分组，从而完成聚集簇的识别。

对于数据点 (i, j, k) ，其邻点示意如图 3 所示，根据扫描次序，将当前数据点的 6 个邻点，分为 3 个前邻和 3 个后邻，当前数据点和三个前邻点的值 $G(i, j, k)$ 、 $G(i-1, j, k)$ 、 $G(i, j-1, k)$ 和 $G(i, j, k-1)$ 分别记为 G_s 、 G_1 、 G_2 和 G_3 。

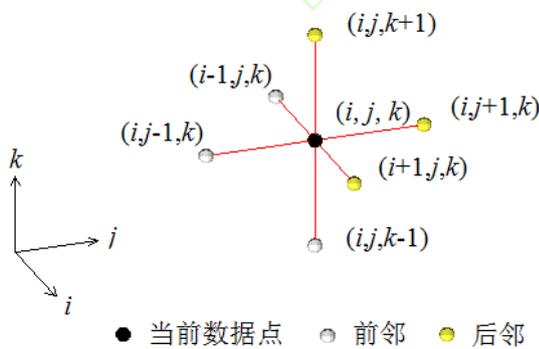


图 3 邻点示意图
Fig.3 Diagram of adjacent points

采用依次沿 i 、 j 、 k 正方向的扫描方式对数据点阵进行顺序标记，若首先以 $G(i, j, k) = 1$ 的数据点

为需要标记的目标，则 $G(i, j, k) = 0$ 的数据点暂无需标记。综合所有聚集簇数据点整合情况，当前数据点为目标点时，当前元素的 8 种前邻状态及聚集簇整合情况列于表 1 中。表中， m_1 、 m_2 、 m_3 分别为三个前邻点 $(i-1, j, k)$ 、 $(i, j-1, k)$ 和 $(i, j, k-1)$ 所在原聚集簇中数据点数目。

表 1 8 种前邻状态及聚集簇整合情况
Table 1 Eight kinds of adjacent state and cluster integration

Case	G_s	G_1	G_2	G_3	聚集簇	m
(a)	1	0	0	0	新建分组	1
(b)	1	1	0	0	分组不变	m_1+1
(c)	1	0	1	0	分组不变	m_2+1
(d)	1	0	0	1	分组不变	m_3+1
(e)	1	1	1	0	分组合并	m_1+m_2+1
(f)	1	1	0	1	分组合并	m_1+m_3+1
(g)	1	0	1	1	分组合并	m_2+m_3+1
(h)	1	1	1	1	分组合并	$m_1+m_2+m_3+1$

完成上述扫描后，以 $G(i, j, k) = 0$ 的数据点为需要标记的目标，再次进行扫描。所有数据点根据其前邻状态被分配至不同的聚集簇，将数据点数 m 小于一定值的聚集簇定义为孤立点簇，并对孤立点簇的材料属性值 $G(i, j, k)$ 进行转换，即完成孤立点簇过滤。孤立点簇过滤有效地避免了弹性波 CT 探测分析过程产生的离散误差和 Kriging 插值产生的随机误差，进一步提高建模精确性。

(3) 建立与数据点阵形成映射关系的三维网格模型，三维网格模型由八节点的六面体单元构成，每个数据点对应一个单元，数据点位于单元中心，单元沿三轴向的尺寸与数据点三轴向间距相同。对网格模型的节点编号，如图 4 所示，模型第 n 个节点的坐标为

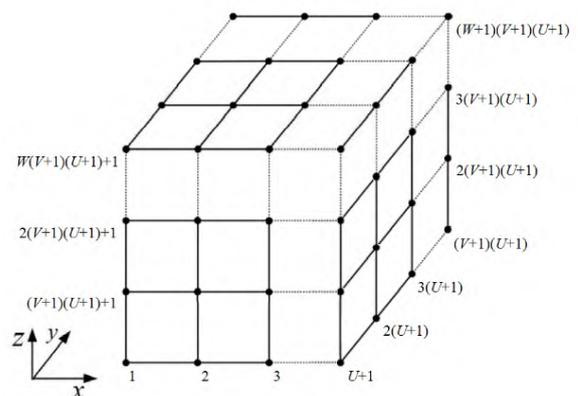


图 4 三维网格模型的节点编号
Fig.4 Node number of 3D mesh model

$$\begin{cases} x_n = \{(n-1)\%[(U+1)(V+1)]\}\%(W+1)\alpha - \frac{1}{2}\alpha \\ y_n = \left\lfloor \frac{(n-1)\%[(U+1)(V+1)]}{(W+1)} \right\rfloor \beta - \frac{1}{2}\beta \\ z_n = \left\lfloor \frac{n-1}{[(U+1)(V+1)]} \right\rfloor \lambda - \frac{1}{2}\lambda \end{cases} \quad (4)$$

$n = 1, 2, \dots, (U+1)(V+1)(W+1)$

式中： α 、 β 、 λ 为离散数据点沿三轴向间距值。

模型中第 n 个单元沿逆时针方向排列的 8 个节点编号由下式确定

$$\begin{cases} N_n^1 = n + \left\lfloor \frac{n-1}{U} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n-1}{UV} \right\rfloor (U+1) \\ N_n^2 = N_n^1 + 1 \\ N_n^3 = N_n^1 + U + 2 \\ N_n^4 = N_n^1 + U + 1 \\ N_n^r = N_n^{r-4} + (U+1)(V+1), r = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (5)$$

$n = 1, 2, \dots, UVW$

模型中第 n 个单元的材料属性由公式(2)确定，

其中 i 、 j 、 k 与 n 之间的关系为

$$\begin{cases} i = (n-1)\%U + 1 \\ j = \left\lfloor \frac{(n-1)\%(UV)}{U} \right\rfloor + 1 \\ k = \left\lfloor \frac{n-1}{UV} \right\rfloor \end{cases} \quad (6)$$

根据以上步骤开发算法，实现三维网格构建，该三维网格构建方法可以控制三维网格模型的单元规模，在保证分析精度的前提下提高计算效率。

3 弹性波 CT 仿真

将形状不规则的地下溶洞简化为六面体，建立有限元分析模型，以此为初始模型，采用商用有限元分析软件 Abaqus 的有限元动力分析模块进行弹性波 CT 探测仿真。如图 5(a)所示，初始模型几何尺寸为 $12.00\text{m} \times 12.00\text{m} \times 14.00\text{m}$ ，沿 z 轴方向设置 4 个钻孔，编号为 a、b、c、d，考虑溶洞与钻孔间的不同位置关系，在模型中布置不同的溶洞分布形式，其中，①号溶洞为 a、b 两钻孔贯穿的连通性溶洞，②号、③号溶洞为 a、b 两钻孔贯穿的非连通性溶洞，④号溶洞在 c、d 两钻孔之间，如图 5(b)所示。考虑到本次探测结构的物理性质及弹性波的最大波长等

因素，采用多级尺寸网格划分，在重点分析部位，主要是钻孔周边部位单元网格进行加密处理。整个模型划分了 221704 个单元，232218 个节点。模型中灰色部分为石灰岩，绿色部分为饱和黏土填充岩溶，各材料具体参数如表 2 所示，表中： ρ 为材料重度， E 为弹性模量， μ 为泊松比， V_p 为纵波速度。

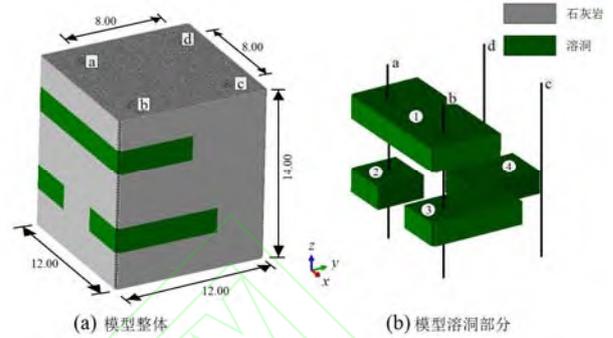


图 5 弹性波 CT 仿真模型(m)

Fig.5 Finite element model of elastic wave CT simulation(m)

表 2 模型材料参数

Table 2 Material parameters of model

介质	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	μ	$V_p/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
石灰岩	2 640	48.00	0.27	4 766
饱和黏土	1 800	0.68	0.35	778

数值模拟采用 Ricker 波作为激发震源，主频设定为 400 Hz，采样间隔 $\Delta t = 0.000\ 05\ \text{s}$ ，持续时间 $t = 0.006\ \text{s}$ 。接收点和激发点依次设置在两不同钻孔内，具体采集参数设定如下：采样间隔 $0.000\ 1\ \text{s}$ ，持续时间 $0.05\ \text{s}$ 。接收点间距为 $0.5\ \text{m}$ ，激发点间距为 $0.5\ \text{m}$ ，在某一钻孔中的激发点激发时，分别在其他钻孔不同接收点进行接收，扫描方式有水平同步扫描、斜同步扫描、定点发射扇形接收扫描。激发方向沿钻孔孔壁法向向外，接收方向为水平方向。共激发 96 次，采集波形 5 184 道。当激发点在钻孔 b 内 $z = 4.0\ \text{m}$ 处激发，钻孔 a 内 $z = 1.5 \sim 7.0\ \text{m}$ 范围内 12 个接收点所接收到的波形如图 6 所示。

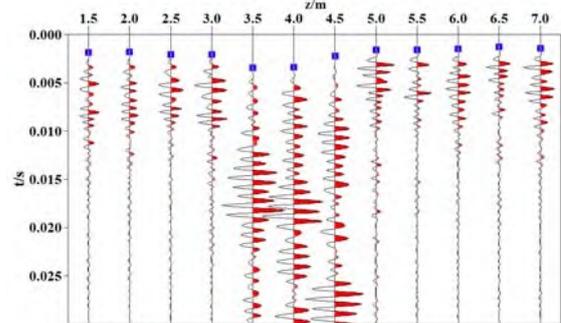


图 6 弹性波波数据例

Fig.6 Elastic wave data example

费马原理假定弹性波由发射点开始传播到接收点结束传播这段时间，首波沿最佳路径传播，且用时最短，此时间为最小旅行时差^[17]。具体实施过程：根据探测目标区域几何信息划分合适尺寸的网格单元，并赋予每个网格单元一个介质波速且假定为常数，其成像方法为求解多元方程

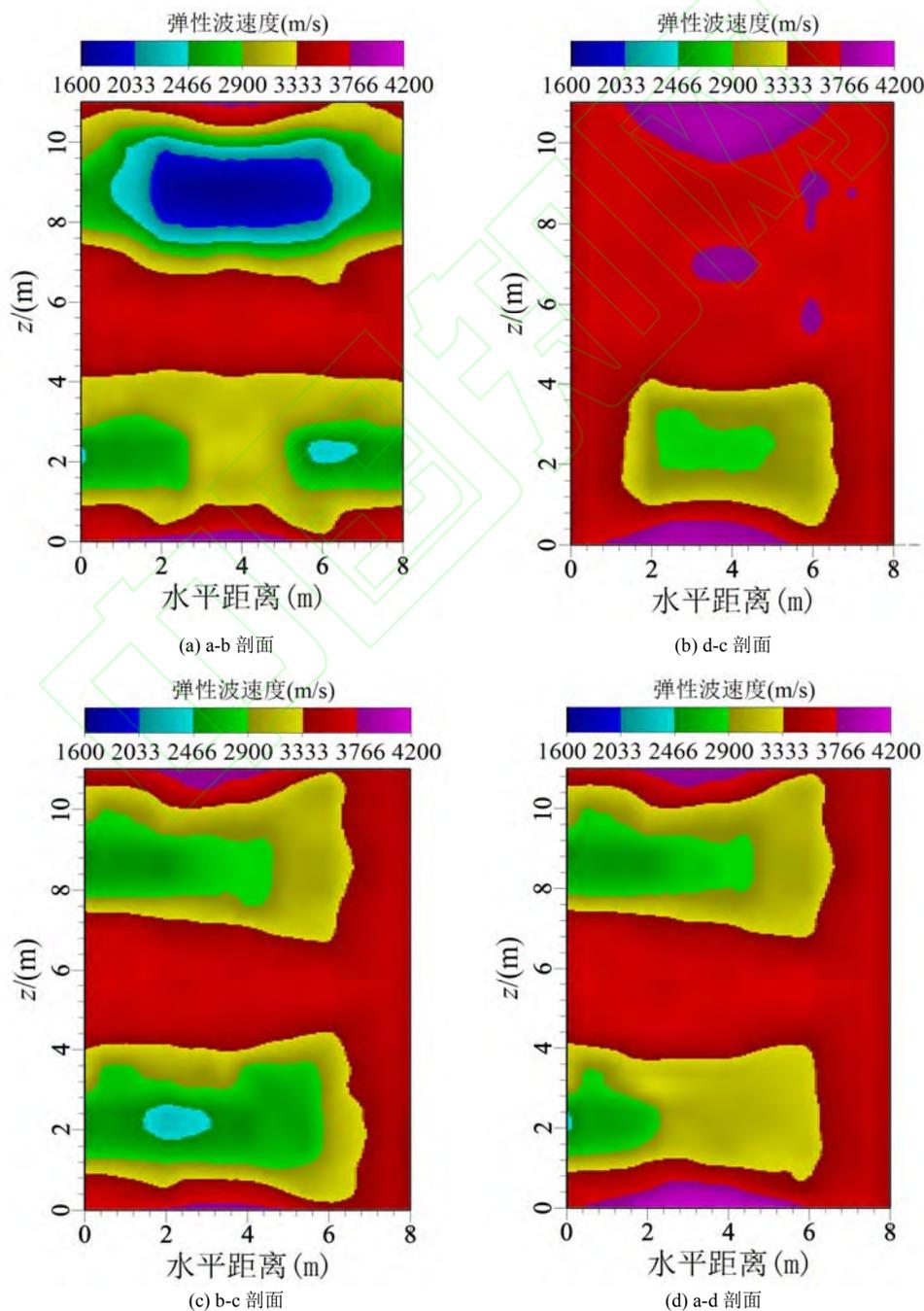
$$\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1M} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ l_{N1} & l_{N2} & \cdots & l_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \cdots \\ S_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \cdots \\ t_N \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： l_{ij} 是第*i*条射线在第*j*个单元内的传播路径长

度； $S_j = 1/V_j$ 是第*j*个单元的慢度值； V_j 是第*j*个单元的纵波速度值； t_i 是第*i*条射线的走时值； N 为剖面内共测试射线数； M 为剖面分成的网格数。对波形数据进行上述处理，获取 6 个弹性波 CT 切片，如图 7 所示。

4 三维网格模型重构

首先给定直角坐标系，按照各钻孔的实际坐标，依次将两钻孔间弹性波 CT 切片中各数据点展现在三维空间中。将图 7 中弹性波 CT 仿真得到的 6 组弹性波 CT 切片展布，结果如图 8 所示。



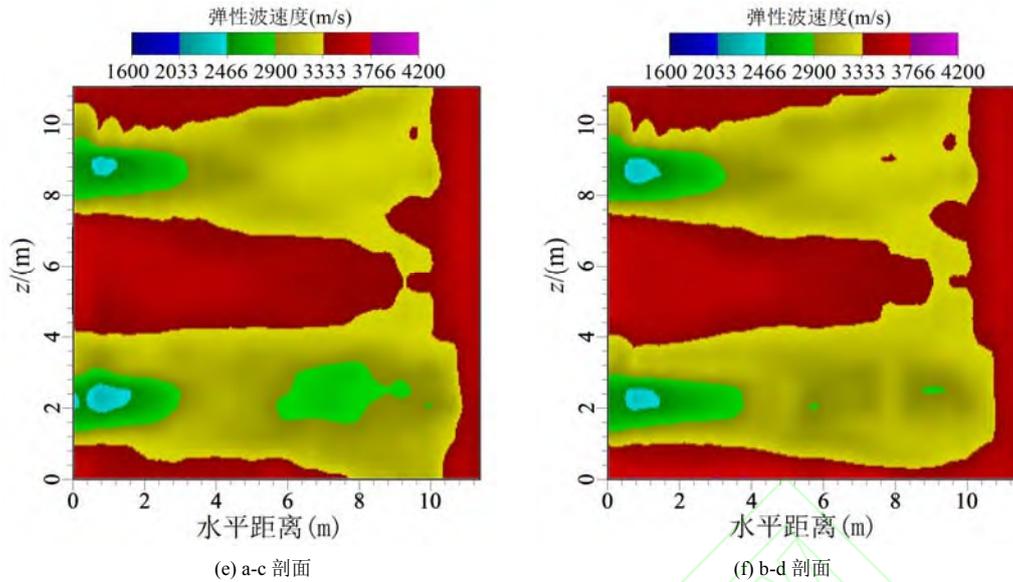


图 7 弹性波速度构造分布
Fig.7 Velocity distribution of elastic wave

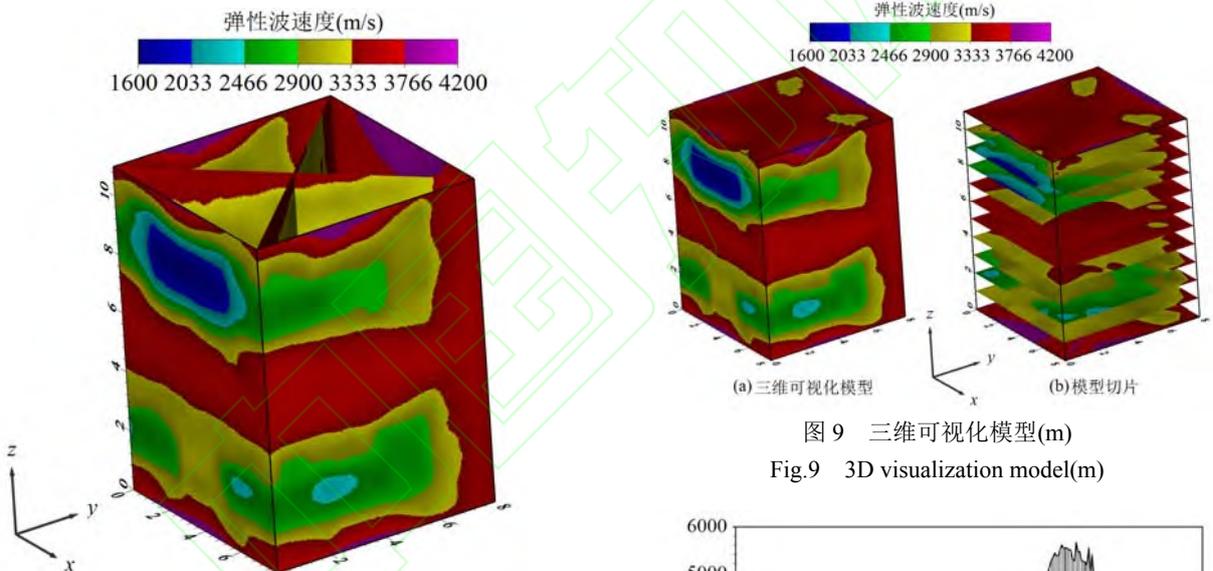


图 8 二维 CT 切片的三维空间展布(m)
Fig.8 3D spatial distribution of 2D CT slices(m)

图 9 三维可视化模型(m)
Fig.9 3D visualization model(m)

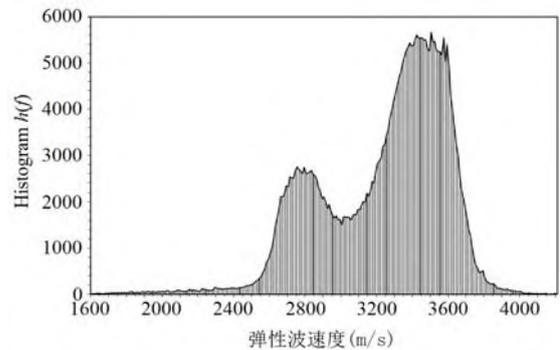


图 10 弹性波速度直方图
Fig.10 Elastic wave velocity histogram

弹性波 CT 切片在三维规范化空间中的区域范围是 8.00 m×8.00 m×11.00 m 的六面体,根据目标区域大小及所要重构模型的网格单元规模,将三轴向上离散数据点的间隔值 $\alpha \times \beta \times \lambda$ 设置为 0.125 m×0.125 m×0.125 m,则生成 64×64×88 的规则离散数据点阵。对离散数据点阵进行区块化 Kriging 插值,所有离散数据点统一进行三维可视化成像,结果如图 9(a)所示,图 9(b)为沿 z 轴方向切片。

对图 9 所示三维可视化模型进行材料阈值分割, $F(i, j, k)$ 的值域为(1 600, 4 200],取 $\Delta l = 10$ 。图 10 给出了该三维可视化模型的直方图,由图可

知,分割阈值 $T = 2\ 985\ \text{m/s}$, $F(i, j, k) > 2\ 985\ \text{m/s}$ 时, $G(i, j, k) = 1$,材料为石灰岩; $F(i, j, k) \leq 2\ 985\ \text{m/s}$ 时, $G(i, j, k) = 0$,材料为饱和黏土。

对三维数据点阵中的聚集簇进行累计标记,将数据点数 m 小于 50 的聚集簇定义为孤立点簇,并

对孤立点簇的材料属性值 $G(i, j, k)$ 进行转换, 即完成孤立点簇过滤。然后进行三维网格构建, 网格单元尺寸设为 $0.125\text{ m} \times 0.125\text{ m} \times 0.125\text{ m}$, 共划分了 360 448 个节点, 345 303 个单元, 三维网格模型如图 11(a), 溶洞在模型中的分布如图 11(b)所示。

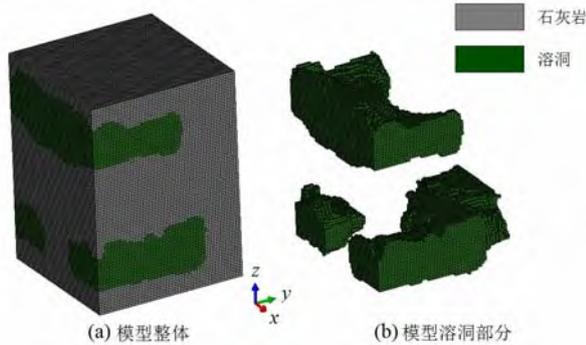


图 11 三维网格模型

Fig.11 3D mesh model

图 11 所示三维网格模型中溶洞的体积分数为 21.51%, 图 5 所示初始模型探测区域内溶洞的体积分数为 18.18%, 即有 3.33% 的绝对误差。

对图 11 三维网格模型和图 5 初始模型探测区域进行仿真度计算, 仿真度由下式确定,

$$s = \frac{\sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^V \sum_{k=1}^W R(i, j, k)}{UVW} \quad (8)$$

$$R(i, j, k) = \begin{cases} 1, & G_A(i, j, k) = G_B(i, j, k) \\ 0, & G_A(i, j, k) \neq G_B(i, j, k) \end{cases}$$

式中, s 为仿真度, $G_A(i, j, k)$ 和 $G_B(i, j, k)$ 为两模型对应离散点的材料属性。通过计算得出三维网格模型的仿真度为 91.44%。

为验证三维网格模型中溶洞空间分布状态的准确性, 计算两模型沿 z 轴方向切片的仿真度, 图 12(a) 和 12(b) 分别为三维网格模型和初始模型探测区域在 $z = 9.00\text{ m}$ 处切片的材料属性, 通过仿真度计算, 两切片材料属性的仿真关系如图 13 所示, 仿真度为 92.15%。

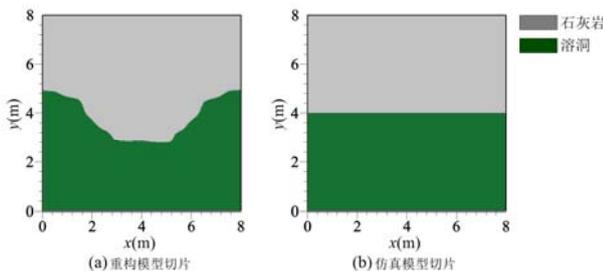


图 12 模型切片材料属性

Fig.12 Material properties of model slices

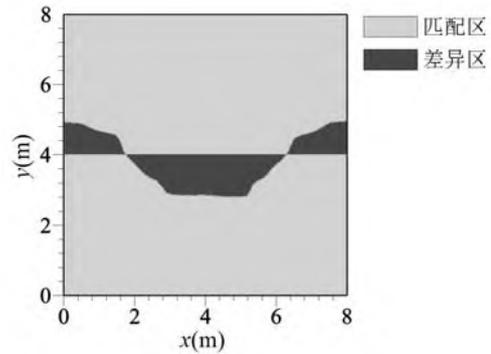


图 13 模型切片仿真关系

Fig.13 Similarity relation of model slices

沿深度方向(z 轴)不同位置处分别对①~④号溶洞取 x - y 平面切片进行仿真度计算, 如图 14 所示。切片仿真度受溶洞与钻孔之间的不同位置关系、溶洞体积、切片位置等因素影响。①号溶洞体积最大, 不同位置切片仿真度在 87%-94% 范围; ④号溶洞位于 c、d 两钻孔之间, 切片仿真度局部较低, 在 70%-85% 范围。可以认为, 本文所述三维网格模型重构方法, 在较为精准的反映溶洞体积分数的同时, 对溶洞形状仍有较高的还原。

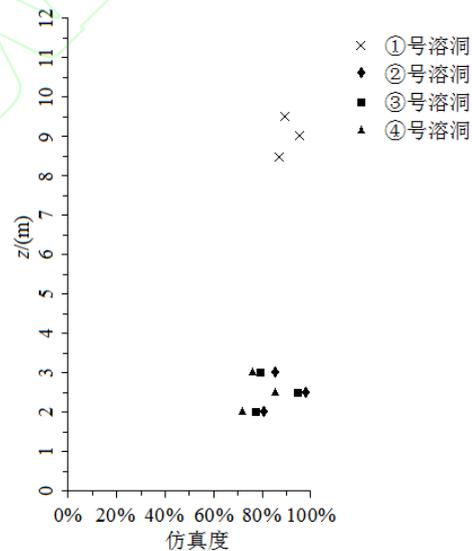


图 14 溶洞切片仿真度

Fig.14 Similarity of karst cave slices

5 现场试验

5.1 工程概况

炭步大桥位于广州市炭步镇境内, 省道 S118 线上, 跨越巴江河。初步勘察资料显示, 场地内地层上部沉积物为人工填土层和沉积层, 下部基岩为石灰系炭质灰岩, 易形成岩溶地质, 且发育状况不一, 部分呈单洞形式, 部分以一定范围内的单洞串

通形式存在，溶洞厚度范围为 0.20~7.00 m，填充形式以半填充为主，个别无填充，集中在深度 19.00~52.00 m 范围内，如图 15 钻孔柱状图所示。根据《岩土工程勘察规范》对该项目场地进行岩溶地质弹性波 CT 探测试验。其中，在桥梁基础落位区域分别布置 4 个探测孔、2 个验证孔，孔深约 51 m，钻孔孔径不小于 70 mm，孔口至孔底均有 PVC 管以保证钻孔畅通。钻孔布置如图 16 所示。

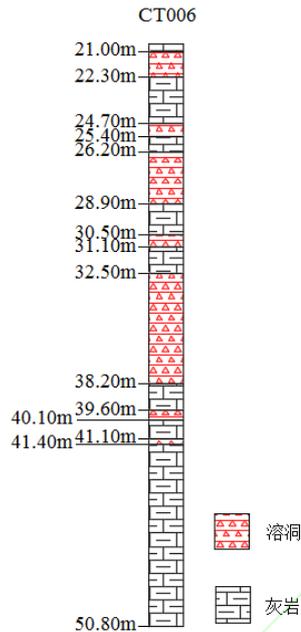


图 15 钻孔柱状图

Fig.15 Borehole diagram

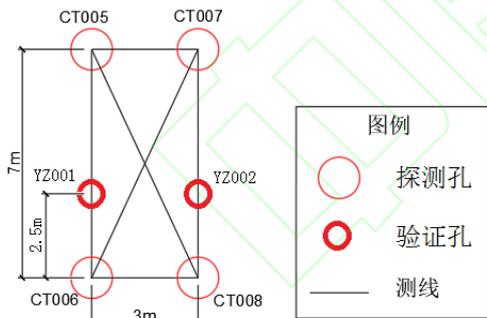


图 16 钻孔布置图

Fig.16 Drilling layout

5.2 弹性波 CT 现场试验

于 2018 年 9 月 20 日，对炭步大桥桥梁基础落位区进行弹性波 CT 现场试验数据采集。采集系统如图 17 所示。主要有 Geod 地震仪、水声检波器(自主研制)、大功率电火花(自主研制)、激发器、笔记本电脑、电缆、电源等。采集参数如下：接收道数为 12 道，道间距为 0.5 m，激发点间距为 0.5 m，每组激发点数为 12 个，完成一组激发后，12 道接收道上移 3 m。采样间隔 20.833 μ s，持续时间 0.15 s。

在 4 个探测孔之间，采集 6 组弹性波 CT 切片数据，采集到的波形如图 18 所示。



图 17 弹性波 CT 数据采集系统

Fig.17 Data acquisition system of elastic wave CT

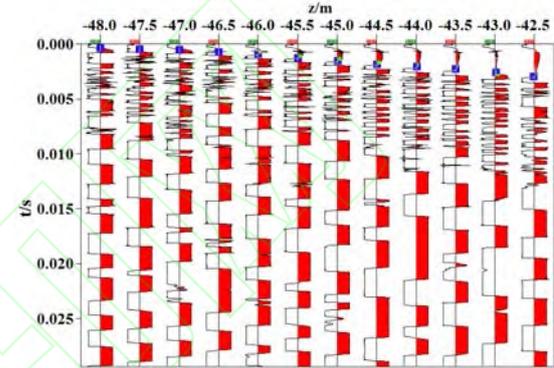


图 18 弹性波波数据例

Fig.18 Elastic wave data example

5.3 岩溶地质三维网格模型重构

对 6 组弹性波 CT 切片进行处理后，按前文所述步骤进行三维网格模型重构，所重构的三维网格模型共有 98 496 个节点，划分 92 169 个单元，如图 19 所示。对比验证孔取芯所得地质柱状图和三维网格模型对应深度溶洞分布状况(如图 20)，验证孔

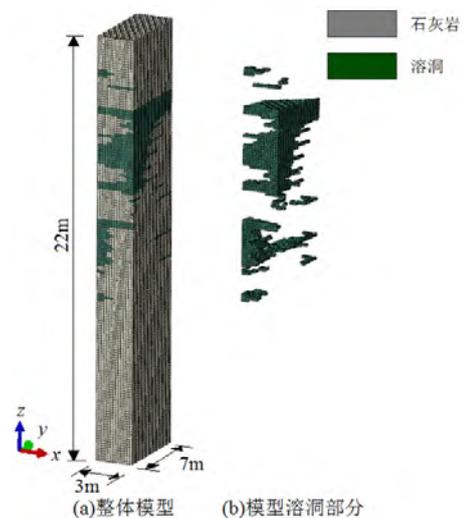


图 19 三维网格模型

Fig.19 3D mesh model

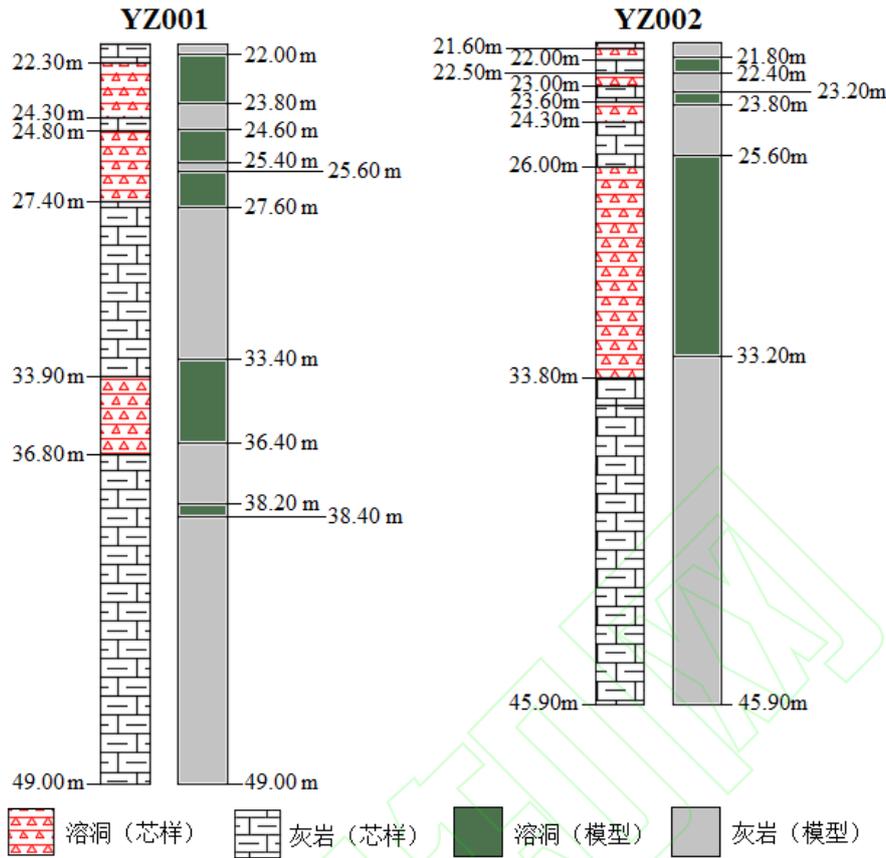


图 20 取芯对比图

Fig.20 Core comparison diagram

YZ001 体积分数绝对误差为 1.11%，仿真度为 90.80%，验证孔 YZ002 体积分数绝对误差为 2.45%，仿真度为 85.31%。即除部分体积较小溶洞外，芯样中溶洞分布与三维网格模型基本对应，可以认为，该方法具有较高的建模精度，能准确反映不良地质的空间分布状态。

6 结 论

(1) 本文提出了基于 CT 探测技术的不良地质构造三维网格模型重构方法，该方法依托弹性波 CT 探测技术，对探测结果进行三维可视化和网格构建，重构不良地质的三维网格模型，实现不良地质探测结果与数值分析的结合。

(2) 该方法中，区块化 Kriging 插值通过约束插值对象和离散数据点，避免了非相关切片对插值精度的影响，孤立点簇过滤通过对数据点阵顺序标记分组并过滤，进一步提高三维网格模型重构精度。

(3) 针对溶洞这种不良地质，开展弹性波 CT 探测仿真并进行三维网格模型重构，检验三维网格

模型重构方法的建模精度。结果表明：通过对重构的三维网格模型与初始模型进行对比分析，重构模型的仿真度高达 91.44%，体积分数的绝对误差为 3.33%。

(4) 开展了桥梁基础落位区弹性波 CT 探测现场试验，对重构的不良地质三维网格模型进行取芯验证，除部分体积较小溶洞外，芯样中溶洞分布与三维网格模型基本对应，同样表明该建模方法具有较高的精确性。

随着岩土工程信息化的发展，工程建设对三维网格模型提出的要求越来越高，基于弹性波 CT 探测技术的三维网格模型重构方法具有较高的准确性及计算模型建模便宜性，为工程稳定性问题提供了一种有效的评价方法。

参考文献(References):

[1] 龙驭球, 崔京浩, 袁 驷, 等. 力学筑梦中国[J]. 工程力学, 2018, 35(1): 1 - 54.(LONG Yuqiu, CUI Jinghao, YUAN Si, et al. Build 'Chinese Dream' with the Assistance of Mechanics[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(1): 1 - 54.(in Chinese))

- [2] 钱七虎. 隧道工程建设地质预报及信息化技术的主要进展及发展方向[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 251 - 263.(QIAN Qihu. Main Developments and directions of geological prediction and informatized technology of tunnel construction[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(3): 251 - 263.(in Chinese))
- [3] 李术才, 徐振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分折[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1 041 - 1 069.(LI Shucan, XU Zhenhao, HUANG Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1 041 - 1 069.(in Chinese))
- [4] 王千年, 车爱兰, 郭强, 等. 孔内声波 CT 技术在软土地区地下溶洞调查中的应用[J]. 西北地震学报, 2011, 33(b08): 335 - 339.(WANG Qiannian, CHE Ailan, GUO Qiang, et al. Technology of Borehole Sonic Computer Tomography and Its Application on Survey of Underground Cave[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(b08): 335 - 339.(in Chinese))
- [5] 李高, 郑旭辉, 张宝君, 等. 基于弹性波 CT 技术的岩体破裂探测方法[J]. CT 理论与应用研究, 2015, 24(5): 681 - 688.(LI Gao, ZHENG Xuhui, ZHANG Baojun, et al. A Detecting Method for Rock Mass Fracture Based on Elastic Wave CT Technique[J]. CT Theory and Applications, 2015, 24(5): 681 - 688.(in Chinese))
- [6] 冯夏庭, 周辉, 李邵军, 等. 复杂条件下岩石工程安全性的智能分析评估和时空预测系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 741 - 1 756.(FENG Xiating, ZHOU Hui, LI Shaojun, et al. System of Intelligent Evaluation and Prediction in Space-time for Safety of Rock Engineering under Hazardous Environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 741 - 1 756.(in Chinese))
- [7] 姚国鹏. 基于骨骼 CT 图像的三维重构[D]. 西安科技大学, 2003.(YAO Guopeng. Bone 3D-reconstruction Based on CT Image[D]. [Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an Science and Technology University, 2003.(in Chinese))
- [8] HUANG M, LI Y. X-ray tomography image-based reconstruction of microstructural finite element mesh models for heterogeneous materials[J]. Computational Materials Science, 2013, 67: 63 - 72.
- [9] 惠冰, 郭牧, 王洲, 等. 基于三维激光技术的路面坑槽多维度指标检测[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2018, 46(1): 60 - 66.(HUI Bing, GUO Mu, WANG Zhou, et al. Multi-dimensional Index Detection of Potholes Based on 3D Laser Technology[J]. Journal of Tongji University: Natural science, 2018, 46(1): 60 - 66.(in Chinese))
- [10] 田威, 裴志茹, 韩女. 基于 CT 扫描与 3D 打印技术的岩体三维重构及力学特性初探[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2 297 - 2 305.(TIAN Wei, PEI Zhiru, HAN Nu. A Preliminary Research on Three-dimensional Reconstruction and Mechanical Characteristics of Rock Mass Based on CT Scanning and 3D Printing Technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2 297 - 2 305.(in Chinese))
- [11] DING Z, SUN J, ZHANG Y. FCM Image Segmentation Algorithm Based on Color Space and Spatial Information[J]. International Journal of Computer & Communication Engineering, 2013, 2(1): 48 - 51.
- [12] 孟永东, 蔡征龙, 徐卫亚, 等. 边坡工程中监测数据场三维云图实时动态可视化方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, (增 2): 3 482 - 3 490.(MENG Yongdong, CAI Zhenglong, XU Weiya, et al. A method for three-dimensional nephogram real-time dynamic visualization of safety monitoring data field in slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, (Supp.2): 3 482 - 3 490.(in Chinese))
- [13] CHEVALIER Y, PAHR D, ALLMER H, et al. Validation of a voxel-based FE method for prediction of the uniaxial apparent modulus of human trabecular bone using macroscopic mechanical tests and nanoindentation[J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40(15): 3 333 - 3 340.
- [14] GILBERT D, MORTAZAVI I, PILLER O, et al. Low dimensional modeling of Double T-junctions in water distribution networks using Kriging interpolation and Delaunay triangulation[J]. Pacific Journal of Mathematics for Industry, 2017, 9(1): 1 - 19.
- [15] 钟江城, 周宏伟, 任伟光, 等. 基于 CT 图像灰度分布的含杂质煤体三值化方法. 力学与实践, 2018, 40(2): 140 - 147.(ZHONG Jiangcheng, ZHOU Hongwei, REN Weiguang, et al. A Three-value-segmentation Method of Coal Containing Inclusion Based on Gray Distribution of Computed Tomography Image. Mechanics in Engineering, 2018, 40(2): 140 - 147.(in Chinese))
- [16] 万成, 张肖宁, 贺玲凤, 等. 基于真实细观尺度的沥青混合料三维重构算法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(7): 360 - 367.(WAN Cheng, ZHANG Xiaoning, HE Lingfeng, et al. 3D Reconstruction Algorithm of Asphalt Concrete Based on Real Microscopic Scale[D]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(7): 360 - 367.(in Chinese))
- [17] 张连伟. 井间地震 CT 技术及其在铁路岩溶勘察中的应用[D]. 天津大学, 2014.(ZHANG Lianwei. The cross-well seismic ct technology and its application in railway karst survey[Ph. D. Thesis][D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.(in Chinese))