

# MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup>耦合建模新方法及其应用

王树仁, 张海清

(燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**针对 FLAC<sup>3D</sup> 面向复杂地质体与结构工程前处理建模存在的技术困难与不足, 提出 MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模新方法。即先利用 MIDAS/GTS 进行三维几何建模和网格划分, 然后, 基于对两类软件中单元、节点数据关系的差异分析, 应用 MATLAB 编写 MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 接口程序, 实现了 MIDAS/GTS 环境下建模的单元、节点信息导入 FLAC<sup>3D</sup> 的数据转换。通过下伏采空区砚水沟大桥-师婆沟隧道复杂工程建模实例, 验证了 MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模方法的可行性和有效性, 为 FLAC<sup>3D</sup> 构建三维复杂工程模型提供了新的思路。

**关键词:**三维模型; FLAC<sup>3D</sup>; MIDAS/GTS; 数据转换; 接口程序

中图分类号: U456.3 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)01-0012-06

## A Coupling Modeling Method with MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> and Its Application

WANG Shu-ren, ZHANG Hai-qing

(School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, P. R. China)

**Abstract:** A coupling modeling method with MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> was put forward aiming at the technical difficulties and deficiencies in pre-processing for complex geologic body and structural engineering with FLAC<sup>3D</sup>. The coupling procedure was that, firstly, the three-dimension geometry model was built with MIDAS/GTS and the model meshes were divided. And Secondly, the element and node data of the completed model built in MIDAS/GTS were exported. After data was transformed by using the interface program in MATLAB, the information was imported into FLAC<sup>3D</sup>. Thus the three-dimension FLAC<sup>3D</sup> model for complex engineering was generated coupling with MIDAS/GTS. With coupling method, the complex three-dimension model was built for Fanshuigou bridge-Shipogou tunnel engineering above mined-out region, and the results verified the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** three-dimension model; FLAC<sup>3D</sup>; MIDAS/GTS; data transformation; interface program

FLAC<sup>3D</sup>有限差分程序是基于岩土类介质开发的国际著名数值计算软件之一, 该程序能较好地模拟岩土类材料在达到强度极限或屈服时发生的破坏或塑性流动的力学行为, 特别适用于分析渐进破坏、失稳以及模拟大变形现象<sup>[1]</sup>。FLAC<sup>3D</sup>自 20 世纪 90 年代初引入中国后, 广泛应用于边坡稳定性分析、地下洞室施工与支护设计、隧道与矿山工程等多个领域, 已成为工程技术人员较为理想的三维数值分析

工具<sup>[2]</sup>。

由于 FLAC<sup>3D</sup>面向比较复杂的三维工程建模以及单元网格划分等前处理问题上存在诸多技术困难<sup>[3-6]</sup>, 致使建模过程繁琐、工作量大、花费时间长, 导致了 FLAC<sup>3D</sup>处理三维复杂工程模型问题的难度加大。随着 FLAC<sup>3D</sup>在岩土工程领域应用的不断拓展和深入, 其在三维复杂工程建模方面呈现的问题逐渐凸显出来。因此, 近年来, 国内外专家学者针对

收稿日期: 2009-09-18

基金项目: 燕山大学博士基金项目(B245); 山西省科技厅科技计划项目(06-11)

作者简介: 王树仁(1968-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程、岩土力学数值计算研究, (E-mail)w\_sr88@163.com。

FLAC<sup>3D</sup>前处理上存在的不足,进行了有意义的探索研究,分别从不同角度提出了解决该问题的方法,虽取得了一定进展,但至今该问题并未得到完美解决。

为克服 FLAC<sup>3D</sup>前处理的不足并充分发挥其强大的计算能力,作者拟借助韩国优秀有限元软件 MIDAS/GTS 强大的前处理功能,进行复杂地质体及工程结构的几何建模和网格划分,尝试通过数据转换将建好的模型导入到 FLAC<sup>3D</sup>中,从而简化 FLAC<sup>3D</sup>前处理的难度,实现复杂工程的 FLAC<sup>3D</sup>三维模型快速、准确构建。

## 1 复杂工程 FLAC<sup>3D</sup>建模方法进展

对于结构简单、几何外形规则的研究对象,利用 FLAC<sup>3D</sup>提供的 12 种初始单元生成器即可完成建模工作;对于较特殊的研究对象,可以利用 3DShop 六面体实体网格生成工具包进行建模。由于该建模软件费用高、限制条件多、短期内不易掌握等,制约了用户的普及性和接受程度。此外,对于地质情况复杂、地表高低起伏多变、岩层数量多且岩层界面为曲面,研究范围内存在采空区,甚至有桥隧工程结构等的复杂三维工程建模,利用 3DShop 以及 Fish 语言建模,也不易实现或需耗费大量的时间。

通过查阅大量文献,发现近年来国内外学者在 FLAC<sup>3D</sup>前处理方面,结合实际工程特点自己研发工作较多,该方面的相关进展情况总结归纳如下:

1) 利用编程语言(如 VC、VB 和 FORTRAN 等)直接开发 FLAC<sup>3D</sup>前处理程序,生成与 FLAC<sup>3D</sup>相匹配的三维模型数据文件。

如胡斌等采用 FORTRAN 语言编写了 FLAC<sup>3D</sup>前处理程序,基于 FLAC<sup>3D</sup>提供的初始单元模型,组合生成微单元模型,进而建立复杂地质体三维模型,对于地表形态复杂、岩层和地质结构较单一的地质体实现了快速、便捷的建模<sup>[3]</sup>。这是专门针对 FLAC<sup>3D</sup>前处理问题的较早研究。丁秀美等和汪吉林等分别基于一定的单元生成模式,编写了 FLAC<sup>3D</sup>前处理程序,直接在 FLAC<sup>3D</sup>中建立复杂地形地质条件的三维地质体模型<sup>[2, 9]</sup>。

前处理程序开发需要对 FLAC<sup>3D</sup>的单元构模方法进行深入研究,生成地表曲面和岩层界限等需要建立相应的算法,要用到拟合、插值等大量的数学知识,还需要很高的计算机编程能力,实现难度大。因此,该方法仅限于少数高级用户使用,推广普及性差。

2) 利用三维建模软件与 FLAC<sup>3D</sup> 联接,使 FLAC<sup>3D</sup> 直接继承和利用三维工程建模数据,简化其

前处理的难度。

成熟的三维地学可视化建模软件,能根据钻孔信息建立三维地层模型,并能对所建的三维地层模型实现诸如切割、挖补、移动等操作,可实现任意方向剖面图绘制等,表现出了较好的三维地质建模和空间剖分能力<sup>[8]</sup>。侯恩科等提出了地学建模软件与数值分析软件的两种联接模式——松散连接(数据耦合模式)和完全耦合(功能耦合模式),相对于完全耦合需要改写源程序,难度大,因此,松散连接是当前比较可行的发展模式<sup>[9]</sup>。侯恩科等给出了三维地学建模软件 microLYNX 与数值计算软件 RFPA 和 FLAC<sup>2D</sup>、FLAC<sup>3D</sup>之间实现松散连接的具体方法<sup>[9]</sup>。

此外,王明华等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<sup>3D</sup>基本元素之间的转化方法<sup>[10]</sup>;李明超等采用自行开发的 VisualGeo 系统完成了工程地质三维建模和网格剖分工作,通过数据转换程序将上述模型数据导入到 FLAC<sup>3D</sup>等数值分析软件中进行计算<sup>[11]</sup>;郑文棠等编制了基于 AutoCAD 到 FLAC<sup>3D</sup>软件的接口程序,实现了可视化模型导入数值分析软件的转换<sup>[12]</sup>;D. Aringoli 等对矢量化的地形数据,先利用 Surfer 8 对等高线控制点的三维坐标进行 Kriging 插值得到均匀分布的点,并选择合理尺寸进行网格离散化,再利用 GID 8 处理得到大小不等的四面体单元组成的模型,通过 Fish 编程将建好的网格读入到 FLAC<sup>3D</sup>中<sup>[13-18]</sup>。

地学建模软件主要适用于复杂地质体建模,对于施工工况复杂、结构复杂及几何形状特殊的桥隧结构工程等建模,在地学建模软件中不易实现,因此,该方法的局限性较大,其适用性受到限制。

3) 借助有限元软件(如 ANSYS、ADINA 等),完成复杂工程的建模和网格剖分过程,再通过数据转换实现 FLAC<sup>3D</sup>模型的自动生成。

廖秋林等提出以 ANSYS 有限元程序完成的复杂地质体建模、网格划分为基础,通过数据转换,实现 FLAC<sup>3D</sup>模型的自动生成,并采用 Visual Basic 语言编写了 ANSYS-FLAC<sup>3D</sup>接口程序<sup>[4]</sup>。董鹏、周先齐、许文杰等人,分别基于 ANSYS、ADINA 等有限元软件,相继进行了 FLAC<sup>3D</sup>前处理建模方法的探索和尝试,实现了直观、快速建模的效果<sup>[19-21]</sup>。

ANSYS、ADINA 等有限元软件,虽然对地层岩性、地质构造条件等复杂的三维工程岩体建模方面,仍存在建模过程繁琐、耗时费力等不足,但其在网格划分,尤其对局部化网格的剖分处理方面优势明显。

## 2 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模法

### 2.1 MIDAS/GTS 前处理功能简介

MIDAS/GTS 是韩国开发的岩土与隧道结构有限元分析软件, 该软件的几何建模和网格划分功能十分强大, 主要体现在以下 2 个方面:

#### 1) 几何建模功能

MIDAS/GTS 有 Windows 窗口式的操作界面, 通过点取菜单完成操作, 可以方便地建立各种点、线、面、体, 并可进行布尔运算、复制、旋转、嵌入、分割等操作; 可以导入后缀为 . DXF 等格式文件, 实现与 AutoCAD 等软件的数据交换; 其内置的地形数据生成器, 可以利用导入的 . DXF 格式的地形等高线方便地生成复杂曲面。

#### 2) 网格划分功能

MIDAS/GTS 除了可以较快地划分映射网格和自由网格以外, 还可以对网格进行析取、检查、手动分割等网格调整操作, 对复杂模型网格划分与检查十分方便。

MIDAS/GTS 的“模型”表单具有将节点和单元信息输出到 Excel 表格的功能, 为与其他程序进行数据交换提供了方便的接口。

### 2.2 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 数据转换格式

MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 所采用的单元形状基本相同, 不同之处在于两者单元节点的编号规则和节点顺序。将 MIDAS/GTS 的单元和节点数据信息按照 FLAC<sup>3D</sup> 可识别的格式进行重新编排, 再导入 FLAC<sup>3D</sup> 中, 即可实现两者间的数据转换。

MIDAS/GTS 主要提供四面体、五面楔形体和六面体 3 种实体单元, 可分别对应于 FLAC<sup>3D</sup> 中的 Tetrahedron、Wedge 和 Brick 单元, 其单元节点编号对应关系见表 1。MIDAS/GTS 导出的节点、单元数据格式与 FLAC<sup>3D</sup> 可识别的节点、单元数据格式对照分别见表 2 和表 3 所列内容。

表 1 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 单元数据关系对照表

单元类型	单元节点编号	
	MIDAS/GTS	FLAC <sup>3D</sup>
六面体		
五面楔形体		
四面体		

表 2 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 节点数据格式对照表

MIDAS/GTS 导出的节点数据格式	节点号	坐标系	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
	1	整体直角	100	0	100
FLAC <sup>3D</sup> 可识别节点数据格式	节点关键字	节点号	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
	G	1	100	0	100

表 3 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 单元数据格式对照(以六面体单元为例)表

MIDAS/GTS 导出单元数据格式(以六面体为例)	单元号	单元类型	属性号	属性类型	材料号	材料特性	节点号 1	节点号 2	节点号 3	节点号 4	节点号 5	节点号 6	节点号 7	节点号 8
	1	六面体	6	实体	4	-	1	2	3	4	5	6	7	8
FLAC <sup>3D</sup> 可识别单元数据格式(以六面体为例)	单元关键字	单元号	节点号 1	节点号 2	节点号 3	节点号 4	节点号 5	节点号 6	节点号 7	节点号 8				
	Z B8	1	1	2	4	5	3	8	6	7				

### 2.3 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 数据转换思路

基于对 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 单元数据关系, 以及两者节点和单元数据格式的对照分析, 结合 FLAC<sup>3D</sup> 可识别数据格式中的分组方法, 作者应用 MATLAB 编写了 MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 接口程序。将 MIDAS/GTS 导出的节点、单元数据视为大型矩阵, 利用 MATLAB 强大而简便的矩阵运算功能, 将其处理成 FLAC<sup>3D</sup> 可识别的数据格式, 并存入一个 \*. flac3d 文件中, 然后, 通过 FLAC<sup>3D</sup> 的 impgrid 命

令调入这个 \*. flac3d 文件, 即可在 FLAC<sup>3D</sup> 中生成网格模型; 再依此进行边界条件和初始条件施加、材料参数赋值和各种施工工况设定, 即可进行数值计算。

### 2.4 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 数据转换接口程序

具体编程实现过程如下:

1) 节点数据转换 由表 2 可知, 将 MIDAS/GTS 的节点数据转换为 FLAC<sup>3D</sup> 数据格式, 只需删掉非数据列(即“坐标系”列), 并在节点号前面添加节点关键字“G”即可, 操作比较简单。

2) 单元数据转换 将 MIDAS/GTS 的单元数据转换为 FLAC<sup>3D</sup> 数据格式,与节点数据转换相比要复杂一些。首先根据组成单个单元的节点数判断单元的类型,并在单元号前面添加相应的单元关键字(Z B8、Z T4 或 Z W6);然后根据单元类型,将组成单个单元的节点,按照表 1 中所列的单元数据对应关系进行重新排序以符合 FLAC<sup>3D</sup> 数据格式要求,并将非数据列删掉(保留“材料号”列),即完成单元转换工作。

3) 单元分组 FLAC<sup>3D</sup> 可识别的单元分组信息格式为 ZGROUP 组名,该分组所包含单元号(一一列出)。由表 3 可见,MIDAS/GTS 导出的单元数据中并不直接包括单元所属的网格组信息,但其包含材料编号信息。由此,在 MIDAS/GTS 中进行网格划分时,对同一网格组内的所有单元给定相同的材料号,对不同网格组的单元将其材料号设为不同,于是每个网格组便与一个材料号相对应,这样就可实现单元分组信息的识别。作者利用 MATLAB 编写的转换程序,对单元分组的组名从  $g_1$  开始进行自动编号,每将一个单元分组所包含的单元号查找完毕后,组名编号自动加 1,由  $g_i$  变为  $g_{(i+1)}$ ,直至完成所有单元组的查找工作。

4) 数据信息输出 最后,将转换完毕的节点、单元数据以及单元分组信息输出到一个 \*.flac3d 文件中,以供 FLAC<sup>3D</sup> 调用。

模型转换的具体操作流程如图 1 所示。

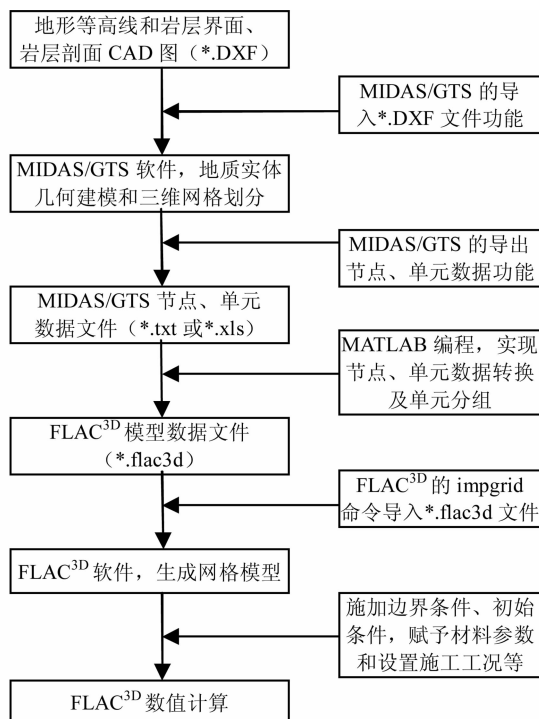


图 1 模型转换流程图

### 3 MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模方法实例验证及讨论

#### 3.1 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模实例验证

以下伏采空区矾水沟大桥-师婆沟隧道工程建模为例,与前述复杂地质体 FLAC<sup>3D</sup> 建模方法进行对比,说明 MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模具体实现过程和该方法的优点。

矾水沟大桥-师婆沟隧道工程,下伏同德煤矿双层采空区,工程条件十分复杂,地表起伏不平,岩层数量多,兼有桥梁和隧道结构工程。数值模拟既涉及到复杂地质体建模,又涉及隧道和桥梁结构建模,三维建模难度相当大,直接利用 FLAC<sup>3D</sup> 进行建模存在很多困难,不易实现。作者采用 MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模新方法,在 MIDAS/GTS 中建立好网格模型后,利用编写的 MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 接口程序将网格模型导入到 FLAC<sup>3D</sup> 中,从而完成下伏采空区桥隧工程复杂模型的 FLAC<sup>3D</sup> 建模。

##### 1) MIDAS/GTS 三维工程建模

利用 MIDAS/GTS 与 CAD 建模软件的接口(具体操作为:文件>>导入>>.DXF 文件),读入同德煤矿采空区分布、各岩层界限、隧道轮廓等。DXF 格式文件,生成各层岩体、采空区轮廓和桥隧实体等;利用 MIDAS/GTS 中内置的地形数据生成器读入地形等高线数据生成地表曲面,经过对几何体进行分割、嵌入及布尔运算等操作,完成下伏采空区桥隧工程的三维几何建模。

由于建模区域地形起伏很大,而且存在桥梁和隧道工程,所以,利用自由网格划分功能生成四面体网格,利用其网格组功能生成多个网格组。

##### 2) MIDAS/GTS 三维模型数据输出

利用 MIDAS/GTS 的节点、单元信息输出功能,将节点、单元信息输出,并分别存入 node.txt 和 zone.txt 两个文本文件中;利用编写的接口程序调用节点、单元信息文件,生成符合 FLAC<sup>3D</sup> 数据格式的 \*.flac3d 文件。

##### 3) MIDAS/GTS 三维模型导入 FLAC<sup>3D</sup>

利用 FLAC<sup>3D</sup> 的 impgrid 命令导入上述 FLAC<sup>3D</sup> 文件,在 FLAC<sup>3D</sup> 中生成桥隧工程网格模型,如图 2 所示;在 FLAC<sup>3D</sup> 中加入材料参数、边界条件及设定施工工况后,即可进行数值计算分析。

通过数值计算分析,确定了桥隧工程地表沉陷盆地的特征和下伏采空区对地表桥隧结构造成的有害变形影响范围。

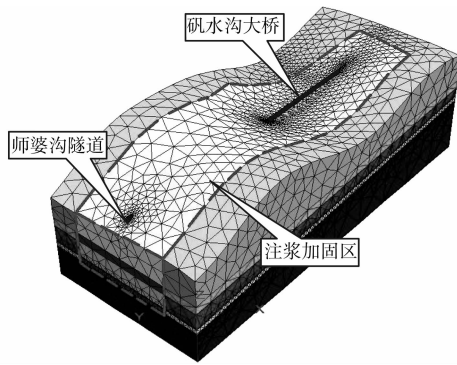


图 2 三维计算模型及网格划分图

下伏采空区矾水沟大桥由桥面、托梁、桥墩和墩台 4 部分组成。桥梁结构示意图如图 3(a) 所示。受地下双层采空区直接影响的墩台及其沉降变形结果如图 3(b) 所示, 该结果与现场实际情况比较吻合。

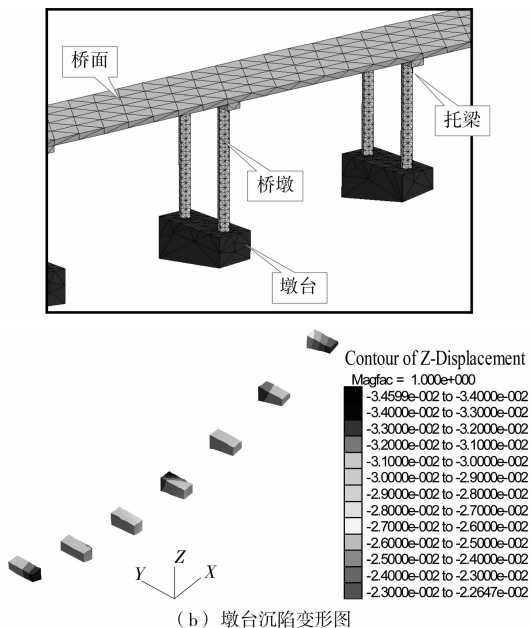


图 3 桥梁结构与墩台沉降变形图

考虑回采时间顺序、采空区覆岩空间结构以及施工工序效应, 由数值模拟计算分析了隧道衬砌、桥梁结构, 以及墩台的变形和应力分布特征。

上述计算分析结果, 为指导采空区注浆处治设计及对桥隧结构关键部位采取安全工程对策, 提供了决策依据和参考。

### 3.2 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模方法优点

与直接开发 FLAC<sup>3D</sup> 前处理程序相比, 基于 MIDAS/GTS 建模的数据转换仅需对数据的编排格式进行调整, 易于实现; MATLAB 具有强大的矩阵运算能力, 而 MATLAB 语言又被称为“演算纸式的科学计算语言”, 程序编写比较简单, 并可直接利用 MATLAB 内部的众多函数, 因此, 利用 MATLAB

编写接口程序比用其他高级程序设计语言要容易。

与利用三维建模软件与 FLAC<sup>3D</sup> 联接建模方法相比, MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模方法克服了地学建模软件的局限性, 利用 MIDAS/GTS 的几何建模的强大功能、灵活性强的网格划分以及具有网格局部化处理功能等优势, 拓展了该方法的适用性。

与基于 ANSYS 等软件的 FLAC<sup>3D</sup> 建模方法相比, MIDAS/GTS 与 AutoCAD 软件的数据接口更为方便, 其内置的地形数据生成器可以直接读取。DXF 格式的地形等高线数据, 通过鼠标选取所需的等高线数据范围后, 即可直接生成复杂曲面, 对于复杂地表和非平面界限多岩层地质体建模具有很大优势, 可省去利用第三方软件(或通过编程)进行数据读取的工作, 从 AutoCAD 数据到有限元建模一步到位, 非常简便。

综上所述, MIDAS/GTS 兼有三维地学建模软件的强大几何建模功能和有限元软件的优秀网格划分功能, 数据输入、输出接口良好, 实现复杂三维工程建模和数据转换方面优势明显。

## 4 结 论

1) 通过对国内外大量相关文献的分析, 针对 FLAC<sup>3D</sup> 面向复杂地质体与结构工程前处理建模存在的技术困难与不足, 提出 MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模新方法。

2) 基于对 MIDAS/GTS 与 FLAC<sup>3D</sup> 2 类软件中单元、节点数据关系的差异分析, 应用 MATLAB 编写 MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 接口程序, 成功实现了 MIDAS/GTS 环境下建模的单元、节点信息导入 FLAC<sup>3D</sup> 的数据转换。

3) 工程实例验证表明, MIDAS/GTS-FLAC<sup>3D</sup> 耦合建模方法可行、有效, 优势明显, 为 FLAC<sup>3D</sup> 构建三维复杂工程模型提供了新的思路。

### 参考文献:

- [1] 寇晓东, 周维垣, 杨若琼, 等. 应用三维快速拉格朗日法进行三峡船闸高边坡锚固稳定与机理研究[J]. 土木工程学报, 2002, 25(1): 68-82.  
KOU XIAO-DONG, ZHOU WEI-YUAN, YANG RUO-QIONG, et al. Study on anchorage stability and mechanism of high slope in three-gorge locks[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 25(1): 68-82.
- [2] 丁秀美, 黄润秋, 刘光士. FLAC-3D 前处理程序开发及其工程应用[J]. 地质灾害与环境, 2004, 15(2): 68-73.  
DING XIU-MEI, HUANG RUN-QIU, LIU GUANG-

- SHI. Development of pre-processing software for FLAC-3D and its application to engineering[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2004, 15(2): 68-73.
- [3] 胡斌, 张倬元, 黄润秋, 等. FLAC<sup>3D</sup>前处理程序的开发及仿真效果检验[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1387-1391.
- HU BIN, ZHANG ZHUO-YUAN, HUANG RUN-QIU, et al. Development of pre-processing package for FLAC<sup>3D</sup> and verification of its simulating effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1387-1391.
- [4] 廖秋林, 曾钱帮, 刘彤, 等. 基于 ANSYS 平台复杂地质体 FLAC<sup>3D</sup>模型的自动生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1010-1013.
- LIAO QIU-LIN, ZENG QIAN-BANG, LIU TONG, et al. Automatic model generation of complex geologic body with FLAC<sup>3D</sup> based on ANSYS platform [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1010-1013.
- [5] 罗周全, 吴亚斌, 刘晓明, 等. 基于 SURPAC 的复杂地质体 FLAC<sup>3D</sup>模型生成技术[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1334-1338.
- LUO ZHOU-QUAN, WU YA-BIN, LIU XIAO-MING, et al. FLAC<sup>3D</sup> modeling for complex geologic body based on SURPAC[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1334-1338.
- [6] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 基于 SURPAC 的 FLAC<sup>3D</sup>三维模型自动构建[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 339-342.
- LIN HANG, CAO PING, LI JIANG-TENG, et al. Automatic generation of FLAC<sup>3D</sup> model based on SURPAC[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(3): 339-342.
- [7] 汪吉林, 丁陈建, 吴圣林. 基于 FLAC<sup>3D</sup>的复杂地貌三维地质建模[J]. 地质力学学报, 2008, 14(2): 149-157.
- WANG JI-LIN, DING CHEN-JIAN, WU SHENG-LIN. 3D Geological modeling of complex landforms based on FLAC<sup>3D</sup>[J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14(2): 149-157.
- [8] 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 YAN-HUA, BAI SHI-WEI, NI CAI-SHENG. 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.
- [9] 侯恩科, 吴立新, 李建民, 等. 三维地质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 EN-KE, WU LI-XIN, LI JIAN-MIN, et al. Study on the coupling of 3D geoscience modeling with numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 388-392.
- [10] 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): 1123-1126.
- WANG MING-HUA, BAI YUN. Study on integration of three-dimensional modeling and numerical simulation for stratified rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1123-1126.
- [11] 李明超, 钟登华, 秦朝霞, 等. 基于三维地质模型的工程岩体结构精细数值建模[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1893-1898.
- LI MING-CHAO, ZHONG DENG-HUA, QIN ZHAO-XIA, et al. Refined modeling for numerical simulation of engineering rock mass structures based on 3D geological model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1893-1898.
- [12] 郑文棠, 徐卫亚, 童富果, 等. 复杂边坡三维地质可视化和数值模型构建[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1633-1644.
- ZHENG WEN-TANG, XU WEI-YA, TONG FU-GUO, et al. 3D geological visualization and numerical modeling of complicated slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1633-1644.
- [13] ARINGOLI D, CALISTA M, GENTILI B, et al. Geomorphological features and 3D modelling of Montelparo mass movement[J]. Engineering Geology, 2008, 99(2): 70-84.
- [14] CHUGH ASHOK K, STARK TIMOTHY D, DEJONG KEES A. Reanalysis of a municipal landfill slope failure near Cincinnati, Ohio, USA[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(1): 33-53.
- [15] JENCK ORIANNE, DIAS DANIEL, KASTNER RICHARD. Three-dimensional numerical modeling of a piled embankment [J]. International Journal of Geomechanics, 2009, 9(3): 102-112.
- [16] PAPA-KONSTANTINOU S, SCHUBERT W. Parametric study of displacements on sequential and full-face tunnel excavation[C]// Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress-Underground Space-The 4th Dimension of Metropolises, 2007, 10: 639-643.

(下转第 55 页)

- [5] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [6] 刘立新,谢丽丽,于秋波. 500 MPa 级钢筋混凝土构件的受力性能及工程应用研究[C]//首届全国建筑结构技术交流会论文集.北京:建筑结构杂志社,2006:5-66-5-68.
- [7] 王铁成,李艳艳,戎贤. 配置 500 MPa 钢筋的混凝土梁受弯性能试验[J].天津大学学报,2007,40(5):507-511.  
WANG TIE-CHENG, LI YAN-YAN, RONG XIAN. Test for bending behavior of reinforced concrete beam with 500 MPa steel bar [J]. Journal of Tian Jin University,2007,40(5):507-511.
- [8] 李志华. 配高强钢筋混凝土梁的受弯性能研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2008.
- [9] 梁书亭,蒋永生,姜宁辉. 高强钢筋高强混凝土梁裂缝宽度验算方法的研究[J].南京建筑工程学院学报,1998,45(2):10-15.  
LIANG SHU-TING, JIANG YONG-SHENG, JIANG NING-HUI. Research for calculation method of cracking width of high-strength concrete beams [J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute,1998,45(2):10-15.
- [10] 刘仲波,王海龙,钟铭. 高强钢筋混凝土梁的静载试验研究与分析[J].石家庄铁道学院学报,2004,17(3):63-66.  
LIU ZHONG-BO, WANG HAI-LONG, ZHONG MING. Experimental research and analysis of high-strength reinforced concrete beams under dead loads [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute,2004,17(3):63-66.
- [11] 龚志国. 高强混凝土受弯构件长期性能的试验研究[D].南京:东南大学土木工程学院,2000.
- [12] 张艇. HRB500 级钢筋混凝土构件受力性能的试验研究[D].郑州:郑州大学土木工程学院,2004.
- [13] 钱伟. 500MPa 螺旋肋钢筋混凝土构件受力性能的试验研究[D].郑州:郑州工业大学土木建筑工程学院,2000.
- [14] 李美云. HRB400 级钢筋混凝土构件受力性能的试验研究[D].郑州:郑州大学土木工程学院,2004.
- [15] 孟建伟. 高强钢筋混凝土梁疲劳性能的试验研究及分析[D].石家庄:石家庄铁道学院土木工程分院,2004.
- [16] 尚世仲,苏小卒,李志华. 配高强钢筋的混凝土梁受弯性能试验研究[C]//第四届全国预应力结构理论与工程应用学术会议论文集.上海:同济大学出版社,2006:3-47-3-50.
- [17] HOGNESTAD E. High strength bars as concrete reinforcement, Part 2: control of flexural cracking[J]. PCA Research and Development Laboratories, 1962, 4(1): 46-63.
- [18] KAAR P H, Mattock A H. High strength bars as concrete reinforcement, Part 4: control of cracking[J]. PCA Research and Development Laboratories, 1963, 5(1): 15-38.
- [19] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M].上海:同济大学出版社,2004.
- [20] 丁大均. 钢筋混凝土构件抗裂度、裂缝和刚度[M].南京:南京工学院出版社,1986.

(编辑 胡英奎)

(上接第 17 页)

- [17] SITHARAM T G, MAJI V B, VERMA A K. Practical equivalent continuum model for simulation of jointed rock mass using FLAC<sup>3D</sup> [J]. International Journal of Geomechanics, 2007, 7(5): 389-395
- [18] PARISH Y, ABADI F. NAJAEI. Dynamic behaviour of earth dams for variation of earth material stiffness [C]// Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, FEBRUARY, 2009, 38: 606-611.
- [19] 董鹏,李长洪. 基于 ANSYS 软件的 FLAC<sup>3D</sup> 实体建模[J].山西建筑,2007,33(5):350-351.  
DONG PENG, LI CHANG-HONG. Modeling in FLAC<sup>3D</sup> software based on ANSYS software entity[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(5): 350-351.
- [20] 周先齐,徐卫亚,钮新强,等. 拱坝-坝肩三维可视化建模和稳定性分析[J].岩土力学,2008,29(S0):118-122.  
ZHOU XIAN-QI, XU WEI-YA, NIU XIN-QING, et al. Three-dimensional visualization model and stability analysis of arch dam-dam abutment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup.): 118-122.
- [21] 徐文杰,胡瑞林. 基于逆向工程的三维复杂地质体精细建模及 ADINA 前处理在 FLAC<sup>3D</sup> 建模中的应用[J].工程地质学报,2008,16(5):703-709.  
XU WEN-JIE, HU RUI-LIN. Refined modeling of 3D geological body based on reverse engineering and the application of ADINA in the model building of FLAC<sup>3D</sup> [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 703-709.

(编辑 胡玲)