

文章编号:1005-0930(2023)06-1410-017 中图分类号:TU4 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2023.06.004

基于 BIM 技术的地质体与结构体模型 深度融合方法

吴佳明^{1,2,3}, 丁烈云², 肖明清^{1,3}, 戴林发宝^{1,3},
薛光桥^{1,3}, 陈健⁴, 付晓东⁴

(1.中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉 430063;2.华中科技大学土木与水利工程学院,湖北 武汉 430074;3.水下隧道技术国家地方联合工程研究中心,湖北 武汉 430063;4.中国科学院武汉岩土力学研究所,岩土力学与工程国家重点实验室,湖北 武汉 430071)

摘要:三维地质建模技术和基于 BIM 的结构建模技术在各自领域发展迅猛,但是两者在数据来源、建模方式以及信息表达等方面存在显著的差异,目前两类模型主要表现为在空间上叠加,始终难以很好地深度融合.以岩土工程中的地质体和结构体为研究对象,对两类模型进行布尔运算,通过平面回路搜索和空间回路分析,建立三维地质模型和 BIM 结构模型的深度融合方法.记录地质体模型和结构体模型的重叠关系,对可能重叠的地质体模型和结构体模型进行面—面之间的重叠和相交的布尔运算;基于递归算法,对面上的线段进行共线识别,记录新的顶点、线、面的信息;通过平面回路搜索,在平面上建立新的顶点—有向边—有向环—有向面的几何拓扑关系;通过空间回路分析,在空间上形成有向面—有向壳—有向体的几何拓扑关系,实现地质体和结构体的几何拓扑重构,从而真正实现地质体与结构体的深度融合.结合三维模型力学分析需求,实现了深度融合的一体化模型与力学分析模型的转换,进一步验证该方法的有效性和适用性.

关键词:BIM 技术;岩土工程;地质体;结构体;几何拓扑重构;深度融合;力学分析

岩土工程既是地质工程,又是结构工程.岩土工程包含地质体和结构体两类核心要素,二者之间相互作用,相互影响^[1].目前针对地质体和结构体两类核心要素,众多学者分别研究了三维地质建模技术和基于建筑信息模型(Building Information Modelling, BIM)的结构建模技术,两者在各自领域都发展迅猛.三维地质建模的概念最早由加拿大学者 Houlding 于 1993 年提出^[2],法国 Mallet 推动了三维地质模型的广泛应用,提出基于离散光滑插值的三维地质建模方法^[3].Kemp 利用 3D Bézier 和 Bézie-NURBS 曲面对复杂地质模型进行三维建模^[4];Calcagno 等根据地质界面位置和方位资料开发了新的地质建模方法^[5].随着计算机技术的日趋成熟以及三维地质建模市场的日益扩大,美国环境系统研究

收稿日期:2023-02-28;修订日期:2023-07-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600404);中国科学院青年创新促进会项目(2021325)

作者简介:吴佳明(1993—),男,博士,工程师.E-mail:wujiaming16@mails.ucas.ac.cn

所公司 (Esri) 开发了 GIS 与地质建模软件 ArcGIS, 法国 Earth Decision Sciences (EDS) 公司推出了地质建模软件 GOCAD. 近年来, 国内的三维地质建模也得到迅猛发展, 李明超等提出一种基于 NURBS 结构的工程尺度地质结构三维参数化建模方法^[6]; 李建等建立了多源数据融合的规则体元分裂三维地质建模方法^[7]; 郭甲腾等^[8]、冉祥金^[9] 利用机器学习算法并基于钻孔数据, 实现了三维地质建模的构建. 刘汉龙等基于数据统计、图像识别以及 Bayes 参数估计理论等多种方法, 实现了区域三维地质建模以及地层结构特征描述的数字化和可视化^[10-11].

三维地质建模技术主要应用于地质体模型建模, 对于结构体模型, 该技术稍显乏力, 而 BIM 技术则有效地弥补了这一短板. 陈湘生等通过一系列实际工程案例指出, 以 BIM 为基础的信息技术促进了盾构隧道智能建造技术发展^[12]; 李晓军等利用 BIM 技术进行山岭隧道的多尺度建模和拼装^[13]; Koch 等^[14]、Zhou 等^[15] 则利用参数化建模技术实现了盾构隧道 BIM 模型的构建; 吴佳明等基于 BIM 技术进行地铁基坑工程的三维建模, 并进行了施工仿真模拟^[16]. 目前 BIM 技术在建筑结构领域有着完美的表现, 但是在地质模型领域存在着诸多问题. 虽然目前一些学者利用 BIM 平台构建了三维地质模型^[17], 但是尚难以表达大场景复杂地质模型.

尽管三维建模技术与基于 BIM 的结构建模技术发展取得突飞猛进的进步, 然而地质模型和结构模型在数据来源、建模方式以及信息表达等方面存在显著的差异, 始终难以很好地融合. 究其原因, 两种建模技术之间缺乏统一的空间数据结构和几何拓扑关系, 建模方式也有所不同, 亟待开展针对性研究.

鉴于此, 以地质体与结构体为主要研究对象, 深入分析地质体与结构体之间融合存在的问题, 解析两类模型的空间关系, 提出基于平面回路搜索和空间回路分析的几何拓扑关系重构方法, 实现两类模型的深度融合, 构建岩土工程一体化模型, 拓展一体化模型的应用深度.

1 两类模型融合存在的问题

地质体和结构体这两类模型在组成属性、数据来源上存在着巨大差异, 建模理论和建模方法也有所不同 (表 1), 导致两类模型融合时存在着一致性差、互操作性难、兼容性差等难点, 有必要从根本上分析两类模型的异同, 探索两类模型深度融合的必要性.

表 1 地质体与结构体特征对比

Table 1 Comparison of geological and structural features

核心要素	地质体	结构体
组成属性	天然介质	人工合成
数据来源	钻孔、物探等	设计图纸
建模理论	离散数学理论	连续数学理论
模型形态	不规则、非连续	规则、连续
建模算法	插值逼近	精确函数
模型构成	不确定	确定

针对工程地质体模型, 考虑到工程地质体是天然介质, 地质体变化表现为不规则、非

连续,相关的地质数据只能通过测量得到.地质体模型中钻孔位置和钻孔数量主要通过人为选取,同时岩土工程地质特点只是局部可知,其余未测量区域只能通过推测得到.已知的钻孔信息都是离散的,不能通过确定的数学函数来精确描述,只能通过少数已知的离散信息,按照地质规律,利用插值算法,推测地质模型轮廓.在工程地质体中,经常会出现歼灭、断层、地层倾覆等情况,在构建地质体模型时也需要通过离散数学来揭示相关现象.随着岩土工程建设的推进,在进一步掌握工程地质体内部的地质情况后,可以通过增加确定信息,利用插值算法对地质体模型进行更新.

针对工程结构体,考虑到岩土工程相关结构体都属于构筑物,属于人工合成介质,是设计师人为设计出来的.模型数据的来源主要为设计图纸,几何尺寸和物理力学性能等都是设计人员提前确定好的,可以通过参数化的表达去描述构件信息.结构体模型可以利用连续数学理论,采用精确数学函数对模型几何特征进行描述.

在构建 BIM+GIS 一体化模型方面,Zhao 等利用 BIM 与 GIS 进行公路线性优化^[18];李谧等融合 BIM 与 GIS 信息模型,实现了市政工程全生命周期的数据管理^[19];袁红等将 BIM 与 GIS 技术应用于地下空间设计中,对信息数据进行综合管理^[20].上述研究都利用 BIM+GIS 进行模型展示和管理,加强可视化展示,但主要是将两类模型进行空间上的叠加,没有实现真正融合.

在对 BIM 模型进行数值分析方面,Fabozzi 等利用 Bentley 软件分别构建了三维地质模型和隧道结构模型,通过数据转换导入至 Plaxis 软件中进行力学分析^[21].Li 等利用 CATIA 构建了地下厂房三维地质模型和结构模型,利用软件的自带布尔运算后导入到 Abaqus 中进行数值计算^[22].Alsahly 等也建立了 BIM-FEM 的工作流程,实现了 BIM 模型的可计算^[23].上述研究在进行岩土工程力学分析时,同时考虑了采用 BIM 技术构建的工程结构模型和地质模型,推动了 BIM 模型在力学分析领域的应用.但是结构模型和地质模型的整合要利用软件平台自带的布尔运算功能,并且需要进行繁琐的手动操作,才能实现两类模型的布尔运算,并且两类模型的接触都要进行处理,不具有大规模应用的能力.

鉴于三维地质建模多数为 GIS 行业服务,大多采用封闭的不规则三角网表达实体表面,利用 BRep 边界表示法来描述三维地质实体空间,而 BIM 结构模型主要是采用 CSG 构造实体来进行表达,二者在组织方式上存在明显差异.因此,在对两类模型进行布尔运算时,三维地质模型容易出现狭长三角形,同时在两类模型的公共接触面上会出现很多节点不一致的情况.

结合地质体和结构体耦合模型力学分析的需求^[24],一方面,两类模型布尔运算后的几何拓扑一致性很难保持,制约了两类融合模型在数值计算软件或前处理软件中进行深入融合分析处理;另一方面,在岩土工程中进行数值模拟时,先对地质体进行开挖,然后进行结构体的施工,而且不同深度地质体有不同的岩土力学参数,为了真实模拟施工情况,需要进行多次布尔运算.随之而来容易出现的问题是布尔运算次数过多,节点位置不同、拓扑一致性不一致的情况越多,在对三维模型进行网格划分时出现的错误越多.

综上所述,针对地质体和结构体模型,在采取有针对性的模型构建方法,保证地质体模型和结构体模型能准确表达对象特征的基础上,需要对两类模型进行空间解析,提取地质体模型与结构体模型的几何数据,对两类模型进行面与面之间的重叠和相交的布尔运

算.基于递归算法进行共线识别,记录新的顶点、线、面的信息.通过平面回路分析和空间回路分析,建立两类模型的深度融合方法,实现两类模型的几何拓扑重构.最后,通过实际案例,利用深度融合方法构建耦合了三维地质模型和结构 BIM 模型的一体化模型,并对一体化模型进行力学分析,以验证该方法的有效性和实用性.

2 地质体与结构体模型的空间解析

地质体和结构体之间的布尔运算包括模型实体之间的交、并、差以及分割运算.模型实体之间的交运算指的是获取地质体和结构体的公共部分形成新实体的过程;模型实体之间的并运算指的是获取既包括地质体模型,又包括结构体模型的新实体的过程;模型实体之间的差运算指的是地质体中去掉地质体与结构体的公共部分形成新实体的过程;模型实体之间的分割运算是指将地质体和结构体模型分为地质体去掉公共部分、公共部分、结构体去掉公共部分 3 类模型的过程.

针对地质体 G 和结构体 S ,布尔运算过程数学表达如下

$$P_{\cap} = G \cap S \quad (1)$$

$$P_{\cup} = G \cup S \quad (2)$$

$$P_{\text{差}} = G - S \quad (3)$$

$$P_{\text{分}} = (G - S) \cup (G \cap S) \cup (S - G) \quad (4)$$

针对地质体模型和结构体模型,提取体一面一线一点等几何数据,记录表达地质体和结构体边界面以及结构面的多边形,分别建立每个面的拓扑关系.在此基础上,利用以上约定的地质体和结构体布尔运算过程,对所有的地质体和结构体进行面一面之间的重叠和相交的布尔运算.

如图 1 所示,以面 1-2-3-4 为例,该面由边 1-2、2-3、3-4、4-1 组成,其中边 1-2 由顶点 1 与 2 连接而成、边 2-3 由顶点 2 与 3 连接而成、边 3-4 由顶点 3 与 4 连接而成、边 4-1 由顶点 4 与 1 连接而成.点 1、2、3、4 的三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, 3, 4$.

选取空间中的任意两个面,如面 1-2-3-4(面编号为 F1)和面 5-6-7-8(面编号为 F2),F1 和 F2 存在公共线段 9-10.记录边 9-10,同时记录边 9-10 的两个顶点 9、10 的坐标以及 F1、F2.

以此类推,遍历地质体和结构体模型所有的面,记录地质体和结构体求交线得到的所有交线的集合.

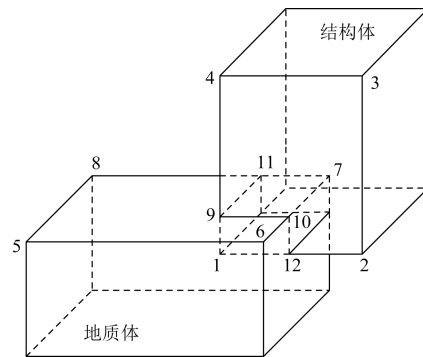


图 1 地质体与结构体相交示意

Fig.1 Intersection of geological body and structural body

3 地质体和结构体模型的深度融合方法

3.1 深度融合方法流程

针对从空间上整合到一起的三维地质模型和结构 BIM 模型,进行布尔运算与拓扑分

析.提取地质体模型与结构体模型的体—面—线—点等几何数据.记录地质体模型和结构体模型的重叠关系,对可能重叠的地质体模型和结构体模型进行面—面之间的重叠和相交的布尔运算.基于递归算法,对面上的线段进行共线识别,记录新的顶点、线、面的信息,通过对平面上的闭合回路进行搜索,删除面上不能形成闭合回路的线段和顶点信息,在平面上建立新的有向面—有向环—有向线段—顶点的几何拓扑关系.通过对空间上的闭合回路进行搜索,删除空间上孤立的面,记录组成块体的所有有向面的信息,在空间上建立新的有向体—有向壳—有向面的几何拓扑关系.通过对地质体和结构体模型的重叠状态进行分析,记录地质体和结构体的真实重叠状态.最终形成深度融合的一体化模型.地质体与结构体深度融合过程如图2所示.

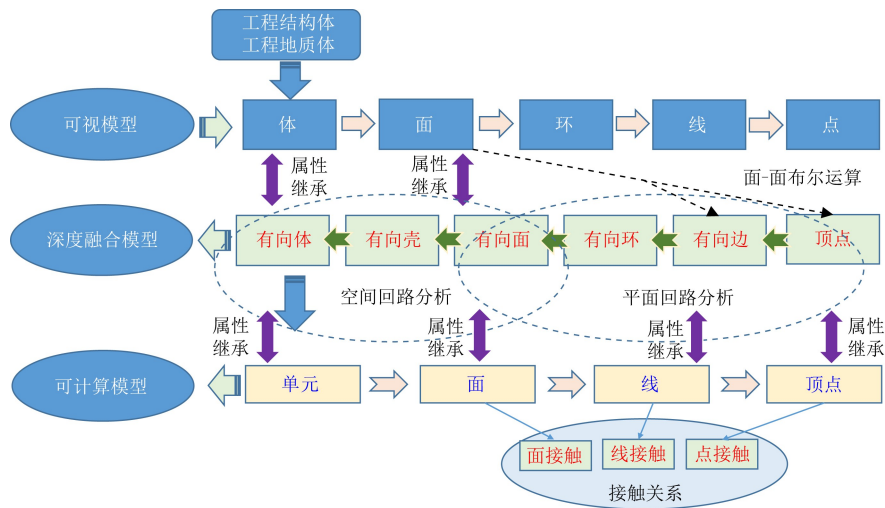


图2 地质体与结构体深度融合过程

Fig.2 Self-consistent integration process of geologic body and structural body

在将深度融合模型进行力学分析时需要将深度融合模型进行单元剖分,建立岩土工程可计算模型,采用单元—面—线—点的几何拓扑关系描述.将深度融合模型中有向体的地层或材料属性赋予可计算模型的单元,将面、线、点的地层或材料属性赋予可计算模型的面、线、点.深度融合模型不仅包括可计算模型中的所有单元,还包括这些单元之间的接触关系;单元之间的接触关系包括面接触、线接触与点接触,这些接触的辨识规则是该面或该线或该点同时有岩土地层体属性与工程结构体属性.

3.2 基于平面回路分析的几何拓扑关系重构

根据空间中所有地质体和结构体的边以及所有面的交线,基于递归算法,完成空间中所有线段的共面识别,在此基础上计算所有线段的交点.选择任意一条有向线段,按照逆时针方向依次搜索平面上的闭合回路形成有向环.进而分析有向环的包含关系,形成有向面.记录面上每个闭合回路的面编号、组成的有向线段、线段的交点等信息,实现平面上新的有向面—有向环—有向线段—顶点的拓扑关系的构建.循环所有的面,实现所有面上的闭合回路搜索,基本流程如图3所示.

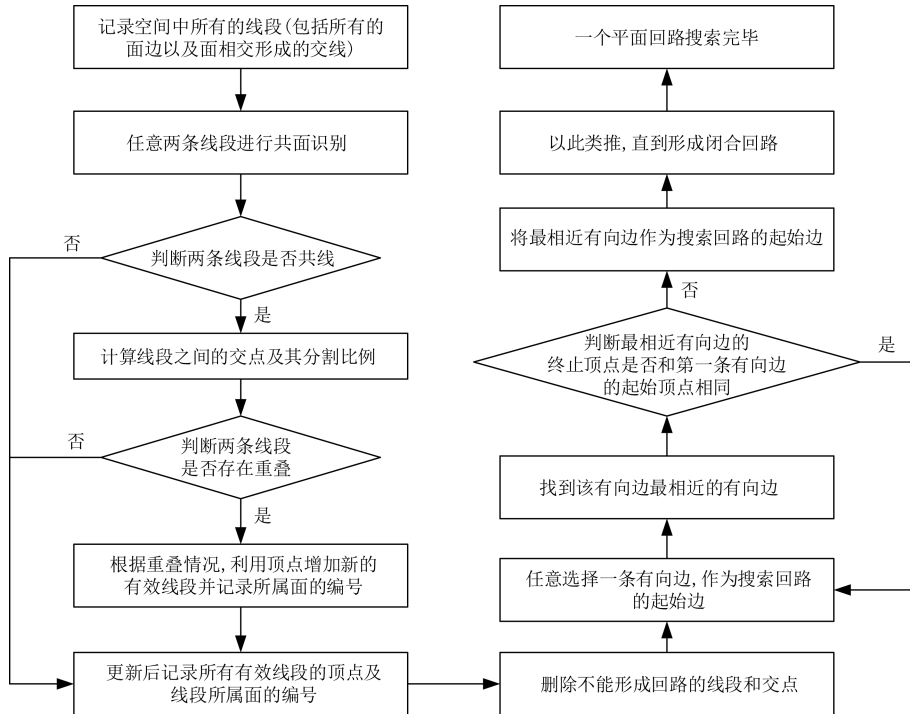


图3 平面回路分析流程

Fig.3 Flowchart of plane loop analysis

3.2.1 空间线段共面识别 记录空间中地质体和结构体所有面的边以及所有面的交线,记录这些线段的顶点以及线段所属的面的编号,并将它们记录为有效线段.为了完成空间中有效线段的共面识别,引入递归算法.递归算法通常可以将复杂问题层层转化为与原问题相似的规模较小的问题来求解,递归策略只需少量的程序就可描述出解题过程所需要的多次重复计算.如图3所示,采用递归算法对任意两条线段进行共面识别.递归的主要步骤为:(1)判断两条线段是否共线,如果不共线则记录有效线段的顶点及线段所属面的编号;(2)针对共线的两条线段,计算线段之间的交点及其分割比例,同时进一步判断两条线段是否存在重叠;(3)针对存在重叠的两条线段,利用顶点增加新的有效线段并记录所书面的编号.利用递归算法对空间中的所有有效线段进行判断,将复杂的空间识别问题转换为有效线段的共面识别问题,通过循环有效解决多次重复计算问题.

选取空间中的任意两条有效线段,分别设为 P_0P_3 (编号为 L1)、 P_1P_2 (编号为 L2),其中线段顶点 $P_i(i=0,1,2,3)$ 的空间坐标为 (x_i, y_i, z_i) .根据图3所示的流程进行判断,如果两条线段共线,设两条线段的交点为 P_k , k_0 为 P_0P_k 与 P_0P_3 的矢量比值; k_3 为 P_kP_3 与 P_0P_3 的矢量比值,则

$$k_0 = \frac{x_0 - x_1}{x_2 - x_1}, k_3 = \frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1}, x_2 \neq x_1 \quad (5)$$

$$k_0 = \frac{y_0 - y_1}{y_2 - y_1}, k_3 = \frac{y_3 - y_1}{y_2 - y_1}, y_2 \neq y_1 \quad (6)$$

$$k_0 = \frac{z_0 - z_1}{z_2 - z_1}, k_3 = \frac{z_3 - z_1}{z_2 - z_1}, z_2 \neq z_1 \quad (7)$$

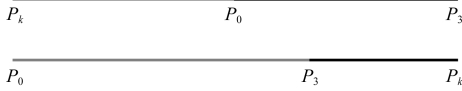


图4 两条线段不重合示意

Fig.4 Schematic diagram of two lines not coincide

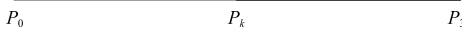


图5 两条线段重合示意

Fig.5 Schematic diagram of two lines coincide

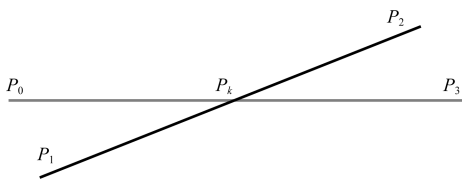


图6 两条线段相交示意

Fig.6 Schematic diagram of two lines intersect

(1) 当两条线段不重合时(图4), $k_0 \leq 0$ 且 $k_3 \leq 0$, 或者 $k_0 \geq 1$ 且 $k_3 \geq 1$, 按照平面回路分析流程, 两条线段不相交, 记录线段及线段所在面的编号;

(2) 当两条线段重合时(图5), 利用顶点 P_k 添加新的有效线段 P_0P_k 、 P_kP_3 , 记录该有效线段及其所属面编号;

(3) 当两条线段有交点时(图6), 而且满足 $0 \leq k_0 \leq 1$ 和 $0 \leq k_3 \leq 1$, 那么两条线段的交点 P_k 坐标可以用式(8)、式(9)计算, 记录通过 P_k 的线段 L1、L2, 以及对应的分割比例 k_0 和 k_3 .

$$\begin{cases} x_k = x_0 + (x_3 - x_0)k_0 \\ y_k = y_0 + (y_3 - y_0)k_0 \\ z_k = z_0 + (z_3 - z_0)k_0 \end{cases} \quad (8)$$

或者

$$\begin{cases} x_k = x_1 + (x_2 - x_1)k_3 \\ y_k = y_1 + (y_2 - y_1)k_3 \\ z_k = z_1 + (z_2 - z_1)k_3 \end{cases} \quad (9)$$

基于递归算法, 完成空间中任意两条线段的共面识别判断, 记录所有有效线段的顶点及线段所属面的编号.

3.2.2 平面闭合回路搜索 将空间中任意面记为 $F_i (i=1, 2, 3, \dots)$, 提取用于搜索面 F_i 闭合回路的信息, 包括面 F_i 上所有有效线段、所有线段的交点、通过每个交点的线段编号及计算的分割比.

将面 F_i 上所有有效线段视为有向边, 指定并记录有向边的方向. 同时, 针对每一条有向边, 复制 1 条与其坐标位置相同、方向相反的有向边. 设空间中的任意 1 条有向边为 $\overrightarrow{P_0P_1}$, 其中有向边顶点 $P_i (i=0, 1, 2, 3, \dots)$ 的空间坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $\overrightarrow{P_0P_1}$ 的单位方向向量为 \vec{e}_0 为

$$\vec{e}_0 = \left(\frac{x_1 - x_0}{a}, \frac{y_1 - y_0}{a}, \frac{z_1 - z_0}{a} \right) \quad (10)$$

或者

$$a = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (11)$$

同样地, 与 $\overrightarrow{P_0P_1}$ 坐标位置相同、方向相反的有向边为 $\overrightarrow{P_1P_0}$, $\overrightarrow{P_1P_0}$ 的单位方向向量为 \vec{e}'_0 . 记录有向边 $\overrightarrow{P_0P_1}$, 将其标记为闭合回路, 即有向环 \vec{L}_j 的第一条边, 并作为搜索有向环

\vec{L}_j 的下一条有向边的起始边.在此规定,从任意起始边开始,按照逆时针方向顺序标记所有的有向边,最终形成的由若干有向边组成的闭合回路即为有向环.如图 7 所示,依据有向边 $\vec{P_0P_1}$ 终止顶点 P_1 ,搜索所有未被标记的以 P_1 为起始顶点的有向线段 $\vec{P_1P_t}$, $\vec{P_0P_1}$ 对应的单位向量为 \vec{e}_0 ($t=1,2,3,\dots$),通过 $\vec{P_0P_1}$ 与 $\vec{P_1P_t}$ 的方向向量求解两条有向边的方向角 θ_{0i} ,即为

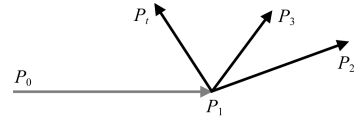


图 7 有向边连接示意

Fig.7 Schematic diagram of directed edge connection

$$\theta_{0i} = \begin{cases} \pi - \cos^{-1}(\vec{e}_0 \cdot \vec{e}_i), & (\vec{e}_i \times \vec{e}_0) \cdot \vec{n}_i \geq 0 \\ \pi + \cos^{-1}(\vec{e}_0 \cdot \vec{e}_i), & (\vec{e}_i \times \vec{e}_0) \cdot \vec{n}_i < 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中: θ_{0i} 为有向边 $\vec{P_0P_1}$ 与相邻有向边 $\vec{P_1P_i}$ 的方向角; \vec{n}_i 为有向环 \vec{L}_j 所在面的单位法向量.

在此约定,当有向边 $\vec{P_0P_1}$ 与相邻有向边 $\vec{P_1P_i}$ 的方向角 θ_{0i} 最大时,即取方向角为 $\theta_{0max} = \max(\theta_{01}, \theta_{02}, \dots, \theta_{0n})$ 时,将该方向角对应的有向边作为有向边 $\vec{P_0P_1}$ 的最相邻有向边,并将其记录为有向环 \vec{L}_j 中的有向边.

标记有向边 $\vec{P_0P_1}$ 最相邻的有向边为 $\vec{P_1P_2}$,将其记录为有向环 \vec{L}_j 中的第二条有向边.在此基础上,搜索所有未被标记的以 P_2 为起始顶点的有向线段 $\vec{P_2P_t}$,按照上述方式以此类推.在搜索过程中,如果有向边的最相邻有向边的终止顶点与有向环 \vec{L}_j 的第一条有向边起始顶点相同,则有向环 \vec{L}_j 搜索完毕,形成封闭回路.否则将该最相邻有向边作为搜索有向环 \vec{L}_j 的下一条有向边的起始边,直至有向环 \vec{L}_j 形成封闭回路.

考虑同一个面上可能存在多个闭合回路,即面上可能存在多个有向环,分析该面上有向环之间的包含关系.以图 8 示意,面上的有向线段为地质体和结构体的边线、地质体与结构体面—面相交形成的交线.搜索面上的闭合回路,从面上的任意有向线段开始搜索,按照逆时针方向,可以得到面上所有有向环,即为有向环 ABCDE、有向环 BGF、有向环 KLM.如果 1 个有向环不包括其他有向环,那么这个有向环就是 1 个有向面,如图中的面 BGF、KLM.如果 1 个有向环包含 1 个或者多个有向环,那么以该有向环为外环、以内部被包含的其他有向环为内环,一起形成 1 个有向面,如图中的外环 ABCDE、内环 KLM.对于在该面上没有形成闭合回路的有向线段以及点,如图中的有限线段 IJ、点 H,按照上述方法分别找到包含它们的面.这个面上所有的闭合回路搜索完成,记录这个面上的面编号、有向环编号、组成环的有向线段的编号、线段的交点编号.

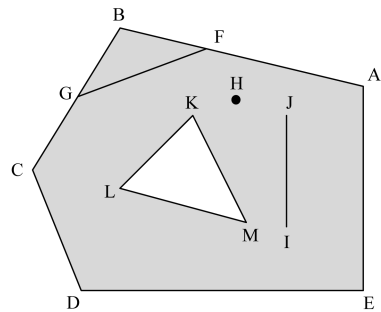


图 8 平面回路分析示意

Fig.8 Schematic diagram of plane loop analysis

基于以上流程,通过平面闭合回路分析,在平面上构建形成新的有向面—有向环—有向线段—顶点的几何拓扑关系,形成基于平面回路分析的几何拓扑关系重构方法.按照以

上方法,循环所有的面,完成所有面的闭合回路搜索和记录.

3.3 基于空间回路分析的几何拓扑关系重构

3.3.1 闭合回路关系分析 针对空间中地质体和结构体所有的闭合回路,也就是多边形面,在进行空间回路分析时,必须要分析和判断多边形面之间的包含关系.

选取空间中的任意两个面 F_i 、 F_j , 计算 F_i 的形心坐标为 $P_{ci}(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$, F_i 外接圆半径 r_i , F_i 内部任意坐标点为 (x_{li}, y_{li}, z_{li}) , F_i 边上任意坐标点为 (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) . 计算 F_j 的形心坐标为 $P_{cj}(x_{cj}, y_{cj}, z_{cj})$, F_j 外接圆半径 r_j , F_j 内部任意坐标点为 (x_{lj}, y_{lj}, z_{lj}) , F_j 边上任意坐标点为 (x_{2j}, y_{2j}, z_{2j}) . F_i 、 F_j 之间存在相离、相邻、包含 3 种关系:

(1) 分析 F_i 与 F_j 是否相离

通过分析两个面的形心间的距离是否大于两个面的外接圆半径之和,来判断这两个面是否相离.当两个面的形心间的距离有如下关系时,面 F_i 与 F_j 相离,如图 9 所示.

$$\sqrt{(x_{ci} - x_{cj})^2 + (y_{ci} - y_{cj})^2 + (z_{ci} - z_{cj})^2} > (r_i + r_j) \quad (13)$$

(2) 分析 F_i 与 F_j 是否相邻

面 F_i 边上多个坐标点 (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) 在面 F_j 的边上或者面 F_j 的多个坐标点 (x_{2j}, y_{2j}, z_{2j}) 在面 F_i 边上,如图 10 所示,则两个面相邻.

(3) 分析 F_i 与 F_j 是否包含

若面 F_i 的内部任意坐标点 (x_{li}, y_{li}, z_{li}) 在面 F_j 内部,那么面 F_j 包含面 F_i ;若面 F_j 内部任意坐标点为 (x_{lj}, y_{lj}, z_{lj}) 在面 F_i 内部,那么面 F_i 包含面 F_j .

针对存在包含关系的面,将修正该闭合回路的组成线段.如图 11 所示,面 F_i 包含面 F_j ,即闭合回路 ABCD 包含闭合回路 EFG,针对这种包含关系,需要将里面的闭合回路 EFG 逆序存入闭合回路 ABCD 中,因此面 F_i 的闭合回路修正为 ABCD-GEF.

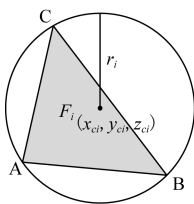


图 9 两个面相离示意

Fig.9 The two faces
are separated

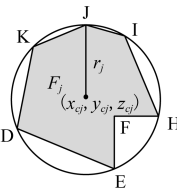


图 10 两个面相邻示意

Fig.10 The two faces
are adjacent

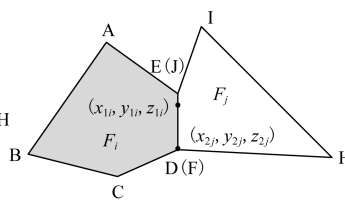


图 11 两个面包含示意

Fig.11 One face
contains another

考虑空间中存在孤立面的情况,制定判断准则:1 个面由若干条线段组成,如果这些组成线段中存在只属于这 1 个面的线段,那么该面为孤立面.在空间回路分析的几何拓扑关系重构中,需要删除孤立面.如图 12 所示,面 CGJ 中包含边 CJ、JG、GC,其中边 GC 和 GJ 属于多个面共用,边 CJ 只属于面 CGJ,因此判定面 CGJ 属于孤立面,需要删除.面 FGJI 中边 CJ、JI、IF 都只属于该面,不被其他面共用,因此需要删除孤立面 FGJI.

3.3.2 空间闭合回路搜索 在删除所有孤立面后,针对空间中的每 1 个有向面,复制 1 个与其坐标位置相同、法向方向相反的有向面,称之为孪生面,即将原来的有向面的所

有组成有向边均逆序存储一遍.由于复制了孪生面,空间中的每个面和每条有向环、有向边都存在两个方向.针对面 ABCD,它的孪生面为 DCBA,有向边 \vec{AB} 和有向边 \vec{BA} 为方向向量不同的两条有向边.重新记录空间中所有的有向面、有向环、有向边以及组成的顶点.

利用以上记录的信息,开始搜索 1 个新的三维实体,记为 E_i .提取空间中任意 1 个有向面 \vec{F}_i ,将其记录为空间封闭回路,也就是有向壳 \vec{C}_j 的第一个有向面,并作为搜索有向壳 \vec{C}_j 的下一个有向面的起始面.在此规定,从任意起始面开始,按照一定的规则标记所有的有向面,最终形成的由若干有向面组成的空间闭合回路即为有向壳.

将有向面 \vec{F}_i 标记为搜索组成有向壳 \vec{C}_j 空间闭合回路有向面的起始有向面,并将其记为有向面 \vec{F}_{i0} .选择有向面 \vec{F}_{i0} 中的任意 1 条有向边,设该有向边的单位方向向量为 \vec{e}_0 .提取空间中所有包含该有向边所在线段的有向面,记为 \vec{F}_{j0} .通过有向面 \vec{F}_{i0} 与 \vec{F}_{j0} 的法向向量求解这两个有向面的夹角 φ_{i0} ,即为

$$\varphi_{i0} = \begin{cases} \pi - \cos^{-1}(\vec{n}_{j0} \cdot \vec{n}_{i0}), & (\vec{n}_{i0} \times \vec{n}_{j0}) \cdot \vec{e}_0 \geq 0 \\ \pi + \cos^{-1}(\vec{n}_{j0} \cdot \vec{n}_{i0}), & (\vec{n}_{i0} \times \vec{n}_{j0}) \cdot \vec{e}_0 < 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中: \vec{n}_{i0} 为有向面 \vec{F}_{i0} 的单位法向向量; \vec{n}_{j0} 为有向面 \vec{F}_{j0} 的单位法向向量.

在此约定,当有向面 \vec{F}_{i0} 与 \vec{F}_{j0} 夹角 φ_{i0} 最大时,即取这两个有向面的夹角为 $\varphi_{i0} = \max(\varphi_{10}, \varphi_{20}, \dots, \varphi_{n0})$ 时,将该夹对应的有向面作为有向面 \vec{F}_{i0} 的最相邻有向面,并将其标记为有向壳 \vec{C}_j 中的有向面.

记录这个起始有向面 \vec{F}_{i0} ,针对有向面 \vec{F}_{i0} 上的每条有向面对应的最相邻有向面,都将其标记为有向壳 \vec{C}_j 中的有向面.进一步,针对最相邻有向面,按照这种方法寻找它的最相邻有向面,将其都加入有向壳 \vec{C}_j 中.以此类推,直到形成空间闭合回路.

剖析有向壳之间的空间包含关系,如果 1 个有向壳不包括其他有向壳,则这个有向壳本身就是 1 个有向体.如果 1 个有向壳包含 1 个或者多个其他有向壳,那么以这个有向壳为外壳,被包含的其他有向壳为内壳,共同组成 1 个有向体.

基于以上方法和流程,通过空间闭合回路分析,在空间上构建形成新的有向体—有向壳—有向面的几何拓扑关系,形成基于空间回路分析的几何拓扑关系重构方法.按照以上方法,循环所有的体,完成所有体的闭合回路搜索和记录.

3.4 空间重叠状态分析

在完成空间回路分析后,实现了有向体—有向壳—有向面—有向环—有向线段—顶点的几何拓扑关系重构,形成新的一体化模型.在此基础上,分析地质体和结构体的空间重叠状态,具体状态如图 13 所示.

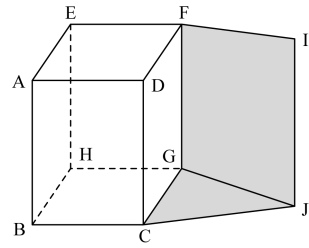


图 12 孤立面示意

Fig.12 Schematic diagram of isolated face

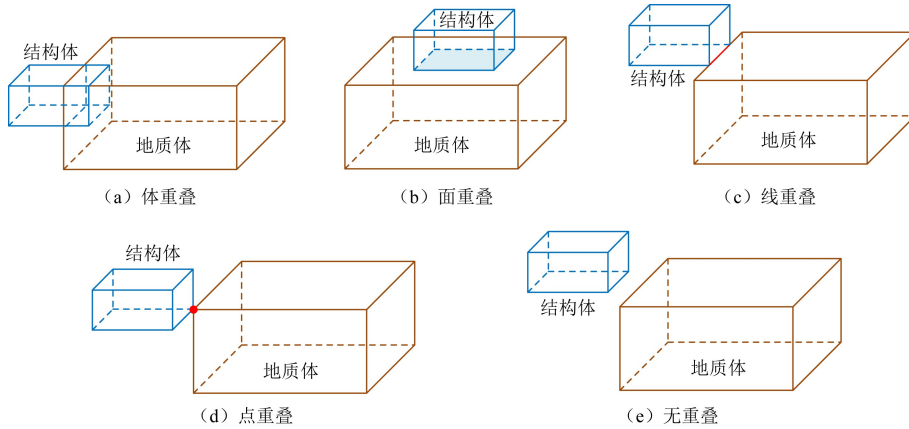


图 13 地质模型与结构模型重叠状态示意

Fig.13 The overlapping state of geological model and structural model

3.4.1 有向体 分析空间中组成地质体和结构体的有向体中,是否存在公共有向体,如果存在,说明地质体和结构体存在体重叠.在进行力学分析时,融合部分的属性在施工开挖之前为地层属性,物理力学参数为对应地层的岩土力学参数;在开挖结束后融合部分变为结构体,对应的属性变为结构体属性,物理力学参数为对应的结构力学参数.物理力学参数作为一种属性附属在对应的地质体或者结构体上.在导入力学分析软件时,携带属性的有向体转换为带有相应属性的单元,在对单元进行分组时会将属性或者物理力学参数进行统一变化.

3.4.2 有向面 分析空间中组成地质体和结构体的有向面中,是否存在公共有向面,如果存在,说明地质体和结构体存在面重叠.基于以上情况,说明这种状态下地质体和结构体存在面接触,记录这些重叠面编号,在后续进行力学分析过程中,针对面接触的地方,需要进行作用力传递和位移协调处理.

3.4.3 有向边 分析空间中组成地质体和结构体的有向边中,是否存在公共有向边,如果存在,证明地质体和结构体存在边重叠.基于以上情况,说明这种状态下地质体和结构体存在线接触,记录这些有限边编号,为后续力学分析过程中,针对线接触的地方,需要进行作用力传递和位移协调处理.

3.4.4 顶点 分析空间中组成地质体和结构体的顶点中,是否存在公共顶点,如果存在,证明地质体和结构体存在点重叠.基于以上情况,说明这种状态下地质体和结构体存在点接触,记录这些顶点编号,为后续力学分析过程中,针对点接触的地方,需要进行作用力传递和位移协调处理.

结合力学分析需求,在模型向可计算模型转换时,地质体和结构体之间的接触关系可以直接对应转换成单元之间的接触关系,即两类模型的面重叠、线重叠、点重叠关系可以直接与单元之间的面接触、线接触以及点接触进行一一映射,这些接触的辨识规则是该面或该线或该点同时有地质体属性与结构体属性.

3.5 示例分析

基于以上流程和方法,对基于 BIM 技术构建的结构体与地质体模型一体化整合过程

进行简单描述(图 14).地质体与结构体相交,产生了公共体,同时也由于面—面相交,产生若干条交线.由顶点 5、6、7、8 构成的面,被交线 L_{910} 和 L_{911} 分隔开.以有向边 9-11 为起始边,按照平面回路分析,遵循顶点—有向边—有向环顺序,可以搜索出有向环 9-11-8-5-6-10-9、有向环 9-11-7-10-9 以及有向环 9-11-13-1-9.进一步,由于这 3 个环都不包含其他环,形成有向面 9-11-8-5-6-10-9、有向面 9-11-7-10-9 以及有向面 9-11-13-1-9.

通过空间回路分析,按照有向面—有向壳—有向体顺序,搜索出如图 15 所示的体 E_1 、 E_2 以及 E_3 .体 E_1 为原地质体部分,体 E_3 为原结构体部分,体 E_2 为公共体.体 E_2 在某个阶段为地质体部分,具有地质体的属性,在某个阶段为结构体部分,具有结构体的属性.具体融合过程如图 16 所示.

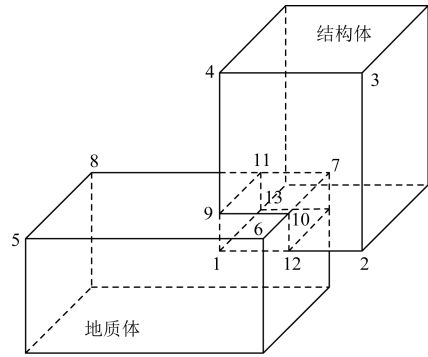


图 14 地质体与结构体相交

Fig.14 Intersection between geological and structural bodies

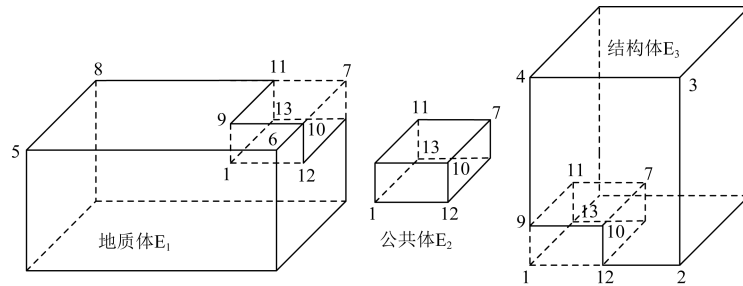


图 15 地质体与结构体深度融合

Fig.15 Deep fusion of geological and structural bodies

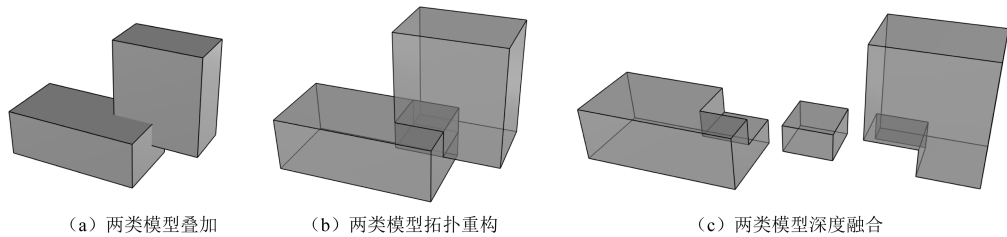


图 16 地质体与结构体深度融合过程

Fig.16 Deep fusion process between geological and structural bodies

4 工程实例

4.1 岩土工程模型深度融合案例

基于上述方法研究利用 C++ 程序自主开发了一套两类模型深度融合算法,能够实现两类模型的快速融合.利用实际工程中的勘察和设计数据,基于 BIM 技术构建的地质体模

型和结构体模型,说明结构体与地质体模型的深度融合实现过程,从而用来验证该方法的有效性和实用性,如图 17、图 18 所示.

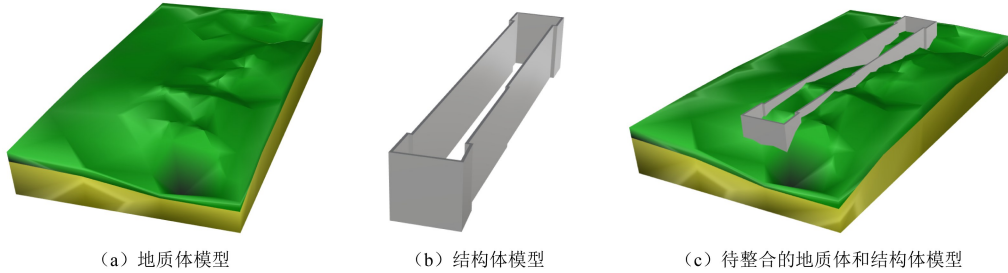


图 17 地质体与结构体整合实例

Fig.17 An integration example of geologic and structural bodies

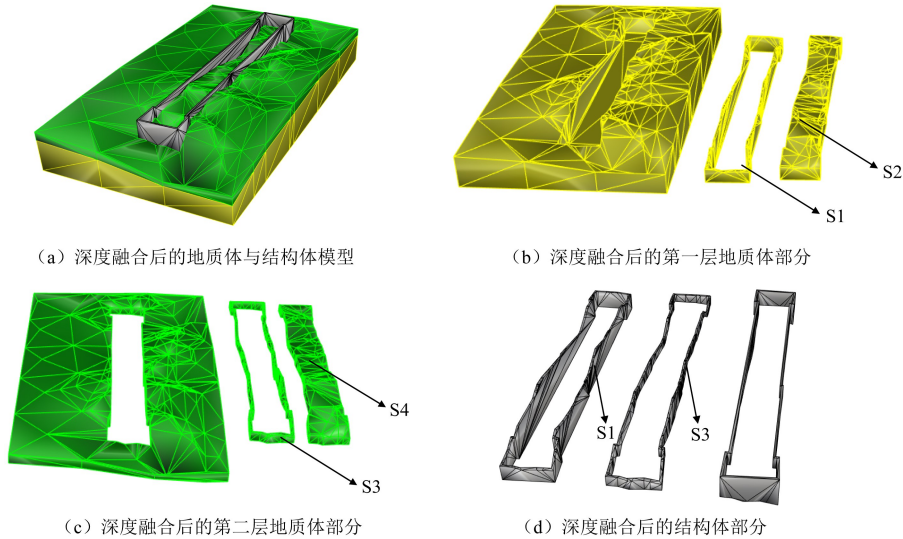


图 18 地质体与结构体深度融合实例

Fig.18 A deep fusion example of geologic and structural bodies

图 17 所示为单独的地质体模型、结构体模型以及待整合的地质体和结构体模型,通过该方法将地质体模型与结构体模型进行深度融合后,得到图 18(a) 所示的地质体与结构体耦合模型.图 18(b)、(c) 所示为两层地质体的分解情况,其中图 18(b) 所示的第一层地质体的 S1 与图 18(d) 所示的 S1、图 18(c) 所示的第二层地质体的 S3 与图 18(d) 所示的 S3 在本质上是相同的几何体.在地质体尚未开挖时,S1、S2、S3、S4 均为地质体,具有地质体属性;在进行地质体开挖、结构体施工时,S2、S4 需要被开挖掉,S1、S3 由地质体属性变化成结构体属性.结合融合模型进行力学分析,在地质体尚未开挖时,S1、S2、S3、S4 均为地质体,均赋予对应地层的物理力学参数,进行地质体开挖、结构体施工时,S1、S3 携带的物理力学参数变化成对应结构的力学参数.

在进行常规的基于 BIM 模型的布尔运算时,结构体不会根据地层线被切割成 3 部

分,而是如图 17(b)所示的一个整体.在考虑力学分析需求时,结构体模型与布尔运算后的地质体模型之间几何拓扑一致性很难保持,会出现畸形网格或者重复节点,在网格划分时出现错误.另一方面,在模拟开挖过程时,S1、S3 原来携带的对应地层的地质属性和物理力学参数,后变为对应结构的结构属性和物理力学参数,但是常规的布尔运算不能清晰表达这个变化过程.

4.2 岩土工程模型力学分析案例

以 1 个框架式的承台为例,承台基础采用混凝土灌注桩筏板基础,将 8 根长为 21m 的方桩嵌入到地质体中,分别构建三维地质模型和承台结构 BIM 模型,按照上述方法对两类模型进行几何拓扑重构,实现两类模型的深度融合(图 19).将深度融合的模型进行网格划分,进一步通过数据转换,将模型导入至数值计算软件中.施加静力荷载,对模型进行桩土作用的力学分析(图 20).

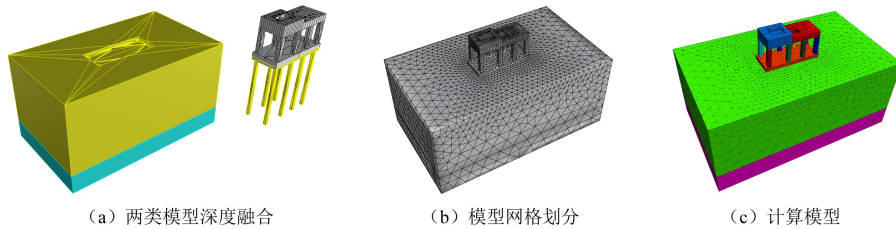
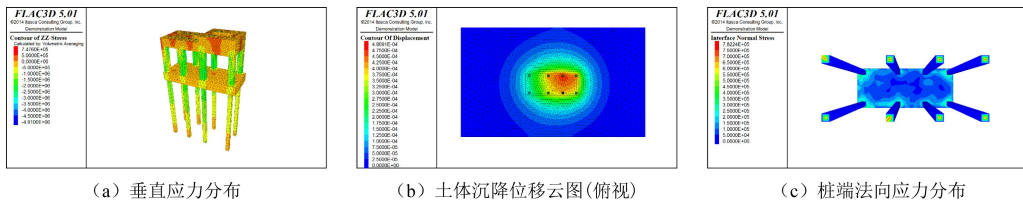


图 19 模型转换过程

Fig.19 Model conversion process



(a) 垂直应力分布

(b) 土体沉降位移云图(俯视)

(c) 桩端法向应力分布

图 20 深度融合模型力学分析过程

Fig.20 Mechanics analysis process of deep fusion model

在力学分析过程中,土体采用摩尔库伦模型,结构采用线弹性模型.在承台基座受力墩上施加静力荷载 $8.5 \times 10^6 \text{ kN}$,对模型进行应力、位移场、桩周与桩端摩阻力 3 个方面的分析.

在应力方面,如图 20(a)所示,静力工况基本组合内力作用下桩基础沿垂直方向的 Z 向应力,在静力荷载作用下,桩身最大压应力出现在桩底,最大压应力为 1.63 MPa .在位移场方面,静力工况基本组合内力作用下桩基础沿垂直方向的沉降位移,桩和承台变形以铅直沉降为主,承台在静力荷载作用下出现不均匀沉降,由图 20(b)可知,土体最大沉降为 0.48 mm ,承台下土体出现了与承台类似的不均匀沉降.在桩周与桩端摩阻力方面,如图 20(c)所示,单桩桩端提供的端承力为 $48 \sim 80 \text{ kN}$,总端承力仅为 640 kN ,静力荷载主要由桩周摩阻力承担.

5 结论

针对长期以来地质体和结构体两类模型难以真正实现深度融合的难题,深入剖析了两类模型融合的难点,对两类模型进行空间解析和布尔运算,通过平面回路搜索和空间回路分析,建立了地质体和结构体的几何拓扑重构方法,进一步利用 C++ 程序自主开发了一套两类模型深度融合算法,实现了地质体和结构体模型的深度融合.主要结论如下:

(1) 通过布尔运算和递归算法,对所有面的线段进行了共线识别,记录了新的顶点、线、面的信息.通过平面回路搜索,建立了顶点—有向边—有向环—有向面的几何拓扑关系.通过空间回路分析,形成了新的有向体—有向壳—有向面—有向环—有向线段—顶点的空间拓扑关系,建立了基于 BIM 技术的地质体和结构体深度融合方法;

(2) 利用地质体和结构体的深度融合方法,重构了地质体和结构体模型的几何拓扑关系,克服了需要人工多次进行布尔运算才能解决地质模型和 BIM 结构模型重叠的难题,同时也解决了 BIM 模型布尔运算高度依赖建模平台的问题,实现了两类模型的深度融合,建立了耦合地质体和结构体的一体化模型;

(3) 结合力学分析需求,深度融合方法的实现保证了两类模型接触面的拓扑一致性,地质体和结构体之间的接触关系可以直接转换成对应的计算单元之间的接触关系,通过数据转换可以直接将耦合了地质体和结构体的一体化模型转换成力学分析模型,打通了 BIM 一体化模型向力学分析模型转换的重要环节.

目前进行数值计算后的力学分析结果独立于 BIM 领域之外,不能与三维信息模型进行交互.在后续的研究中,将开发信息提取和数据转换接口,将力学分析云图返回至 BIM 模型中,从而能更加清晰、直观地反映工程建设过程中的力学性质变化过程.

参考文献

- [1] 陈健,盛谦,陈国良,等.岩土工程数字孪生技术研究进展[J].华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(8):79-88
Chen Jian, Sheng Qian, Chen Guoliang, et al. Review of advances in digital twin technology for geotechnical engineering [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(8): 79-88
- [2] Houlding S. 3D geoscience modeling: Computer techniques for geological characterization [M]. Springer-Verlag, 1994: 299-301
- [3] Mallet J L. Discrete smooth interpolation in geometric modelling [J]. Computer-aided Design, 1992, 24(4): 178-191
- [4] Eric A de Kemp. Visualization of complex geological structures using 3-D Bézier construction tools [J]. Computers and Geosciences, 1999, 25(5): 581-597
- [5] Calcagno P, Chilès J P, Courrioux G, et al. Geological modelling from field data and geological knowledge [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2008, 171(1): 147-157
- [6] 李明超,白硕,孔锐,等.工程尺度地质结构三维参数化建模方法[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增1):2848-2858
Li Mingchao, Bai Shuo, Kong Rui, et al. 3D parametric modeling method of engineering-scale geological structures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 2848-2858
- [7] 李建,刘沛溶,梁转信,等.多源数据融合的规则体元分裂三维地质建模方法[J].岩土力学,2021,42(4):1170-1177
Li Jian, Liu Peirong, Liang Zhuixin, et al. Three-dimensional geological modeling method of regular voxel splitting based on multi-source data fusion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1170-1177

- [8] 郭甲腾,刘寅贺,韩英夫,等.基于机器学习的钻孔数据隐式三维地质建模方法[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(9):1337-1342
Guo Jiateng,Liu Yinhe,Han Yingfu,et al.Implicit 3D geological modeling method for borehole data based on machine learning[J].Journal of Northeastern University (Natural Science),2019,40(9):1337-1342
- [9] 冉祥金.区域三维地质建模方法与建模系统研究[D].长春:吉林大学,2020
Ran Xiangjin.The research of method and system of regional three-dimensional geological modeling[D].Changchun: Jilin University,2020
- [10] 刘汉龙,章润红,刘东升,等.基于数据融合的工程地质物理力学参数特征研究[J/OL].土木与环境工程学报(中英文):1-11.http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20211123.1621.005.html
Liu Hanlong,Zhang Runhong,Liu Dongsheng,et al.Study on the characteristics of physical and mechanical parameters of engineering geology based on data fusion[J/OL].Journal of Civil and Environmental Engineering,1-11.http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20211123.1621.005.html
- [11] 刘东升,刘汉龙,吴越,等.岩土材料的基因特征及其测试方法[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(4):1-9
Liu Dongsheng,Liu Hanlong,Wu Yue,et al.Genetic features of geo-materials and their testing method[J].Journal of Civil and Environmental Engineering,2022,44(4):1-9
- [12] 陈湘生,李克,包小华,等.城市盾构隧道数字化智能建造发展概述[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(5):1057-1074
Chen Xiangsheng,Li Ke,Bao Xiaohua,et al.Innovations in the development of digital and intelligent construction of urban shield tunnels[J].Journal of Basic Science and Engineering,2021,29(5):1057-1074
- [13] 李晓军,田吟雪,唐立,等.山岭隧道结构 BIM 多尺度建模与自适应拼接方法及工程应用[J].中国公路学报,2019,32(2):126-134
Li Xiaojun,Tian Yinxue,Tang Li,et al.Multiscale BIM modeling and adaptive splicing method of mountain tunnel structure for engineering application[J].China Journal of Highway and Transport,2019,32(2):126-134
- [14] Christian Koch,Andre Vonthron,Markus König.A tunnel information modelling framework to support management, simulations and visualisations in mechanised tunnelling projects[J].Automation in Construction,2017,83:78-90
- [15] Zhou Y,Wang Y,Ding L,et al.Utilizing IFC for shield segment assembly in underground tunneling[J].Automation in Construction,2018,93:178-191
- [16] 吴佳明,陈健,陈国良,等.基于 BIM 技术的地铁基坑工程施工仿真模拟方法[J].岩土力学,2022,43(增1):553-566+579
Wu Jiaming,Chen Jian,Chen Guoliang,et al.Construction simulation method of metro foundation based on BIM technology[J].Rock and Soil Mechanics,2022,43(S1):553-566+579
- [17] 钟宇.城市地铁工程信息模型 TIM 的开发与应用[D].北京:中国科学院大学,2016
Zhong Yu.Development and application of urban tunnelling and underground space information modelling[D].Beijing: University of Chinese Academy of Science,2016
- [18] Zhao Linlin,Liu Zhansheng,Jasper Mbachu.Highway alignment optimization:An integrated BIM and GIS approach[J].ISPRS International Journal of Geo-Information,2019,8(4),172-184
- [19] 李谧,贺晓钢,李博涵,等.基于 BIM+GIS 的市政工程规建管一体化应用研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(增2):527-539
Li Mi,He Xiaogang,Li Bohan,et al.Research on integrated application of municipal engineering at the stage of planning, construction and management based on BIM + GIS [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(S2):527-539
- [20] 袁红,付飞,姚强,等.基于 GIS+BIM 技术的中心型轨道站点地下空间设计[J].地下空间与工程学报,2020,16(增2):517-526
Yuan Hong,Fu Fei,Yao Qiang,et al.Research on underground space design of core rail station based on GIS & BIM technology[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(S2):517-526
- [21] Fabozzi S,Biancardo S A,Veropalumbo R,et al.I-BIM based approach for geotechnical and numerical modelling of a conventional tunnel excavation[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2021,108:103723
- [22] Li H,Chen W,Tan X,et al.Digital design and stability simulation for large underground powerhouse caverns with parametric model based on BIM-based framework[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2022,(123):104375

- [23] Alsahly A, Hegemann F, König M, et al. Integrated BIM-to-FEM approach in mechanised tunnelling[J]. *Geomechanics and Tunnelling*, 2020, 13(2): 212-220
- [24] 于德海, 张涛. 邻近桥桩地铁盾构隧道变形规律及力学行为分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(3): 545-552
- Yu Dehai, Zhang Tao. Analysis on deformation and mechanical behavior of shield tunnel near bridge pile[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(3): 545-552

Deep Fusion Method of Geological and Structural Models Based on BIM Technology

WU Jiaming^{1,2,3}, DING Lieyun², XIAO Mingqing^{1,3}, DAI Linfabao^{1,3},
XUE Guangqiao^{1,3}, CHEN Jian⁴, FU Xiaodong⁴

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. National & Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunnelling Technology, Wuhan 430063, China; 4. State Key Lab. of Geomechanics and Geotechnical Eng., Inst. of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract

Although both three-dimensional (3D) geological modeling technology and building information modeling (BIM) based structural modeling technology have advanced quickly in their respective fields, there are considerable variations between them in terms of data sources, modeling techniques, and information expression. At present, the two types of models are mainly superimposed in space, and it is always difficult to integrate well. Taking geological bodies and structural bodies in geotechnical engineering as research objects, Boolean operations were applied to the two types of models, and finally a deep fusion method of 3D geological model and BIM structural model was established through plane loop search and spatial loop analysis. The overlapping relationship between geological model and structural model was recorded, and Boolean operation between the surfaces was carried out for the geological model and structural model. Based on recursive algorithm, collinear recognition was performed for line segments on the face, and new vertex, line and face information were recorded. Through plane loop search, new geometric topological relations of vertices, directed edges, directed rings and directed faces were established on the plane. The geometric topological relationship of directional surface, directional shell and directional body was formed in space by means of spatial loop analysis, and then the geometric topology reconstruction of geological and structure model was realized, so as to truly realize the deep integration of geological model and structural model. Combined with the mechanical analysis requirements, the conversion of the deeply integrated model and the mechanical analysis model was realized, which further verifies the validity and applicability of this technology.

Keywords: BIM technology; geotechnical engineering; geological body; structural body; geometric topology reconstruction; deep fusion; mechanical analysis