

# 基于 SiPESC.FEMS 的隧道施工数值模拟构架

陆旭泽<sup>1</sup>, 张 盛<sup>1</sup>, 陈 飙松<sup>\*1</sup>, 白 杨<sup>2</sup>

(1.大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2.上海卫星装备研究所, 上海 200240)

**摘要:** 基于开放式结构有限元分析软件系统 SiPESC.FEMS 及其弹塑性分析构架, 结合隧道结构设计常用的地层结构模型理论思想和相关技术, 实现了一种隧道施工有限元分析计算构架. 该构架通过地应力平衡分析计算围岩的初始应力, 利用 SiPESC.FEMS 弹塑性分析功能, 实现地应力平衡多步序分析所需的加载和卸载过程. 利用 SiPESC.FEMS 对单元和材料属性数据的灵活管理, 实现生死单元技术. 利用 SiPESC.FEMS 对多种单元和多点约束的支持, 实现埋入单元技术. 利用 SiPESC.FEMS 动态任务流程配置, 搭建了多分析步隧道施工计算流程. 数值算例表明, 该构架适用于隧道施工过程的数值模拟, 能有效地计算出地应力平衡过程的应力变化, 并对隧道施工方案进行优化.

**关键词:** 隧道施工数值模拟; 弹塑性分析; 生死单元; 埋入单元; SiPESC.FEMS

**中图分类号:** O242

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7511/dllgxb202001001

## 0 引言

隧道是现代交通的重要结构形式, 具有克服地形障碍、缩短里程、减少可利用土地破坏等优势, 能带来重大社会、经济效益. 随着城市交通运输工程建设规模和数量的不断增长, 隧道交通因其特有优势呈现出明显的增长趋势<sup>[1]</sup>. 各类复杂地质条件与施工环境、更长里程数及更大断面等要求的不断涌现, 给隧道施工建设及其相关理论发展提出了更大的挑战. 目前, 隧道结构相关理论的发展中, 对岩土体变形性质、应力重分布规律、支护作用机理与时机选择等一系列问题研究不够透彻, 工程经验依旧作为建设工作的重要指导依据, 这给隧道设计与施工带来了巨大的不确定性<sup>[2]</sup>. 国际隧道协会(ITA)给出了目前常被采用的4种隧道结构设计模型<sup>[3]</sup>: 连续体或不连续体模型、作用-反作用模型、收敛-约束模型、工程类比法. 刘建航等<sup>[4]</sup>提出了结合我国地下结构设计实践的4种常用设计模型: 经验类比模型、荷载结构模型、地层结构模型、收敛限制模型. 多种模型

中, 地层结构模型充分考虑了地下结构与围岩的相互作用, 更符合实际工程. 利用地层结构模型, 可以充分模拟施工过程中地下结构内力以及周围地层的变形. 但是, 地层结构模型理论计算过程复杂, 仅有小部分问题可以通过解析求解, 绝大多数的问题依赖数值方法<sup>[5]</sup>. 基于此理论模型的数值算法研究和软件开发是岩土工程的一个重要研究方向.

数值方法中最常用的是有限差分法和有限单元法<sup>[6]</sup>. 基于这些数值方法的商用软件(ANSYS、ABAQUS、FLAC3D、Plaxis等)已逐渐成为地下结构设计及施工方案评估的重要分析工具<sup>[7]</sup>. 商业软件虽然计算功能强大, 通用性好, 但其针对算法和单元的接口开放性较差. 尽管国内也有一些学者通过自行开发程序实现岩土工程问题数值分析, 但往往受到程序构架等因素的限制, 无法提供足够的可扩展性<sup>[8-9]</sup>.

SiPESC是为满足现代工业装备与结构工程中复杂的科学与工程计算需求而研发的软件平台, 其开放性、集成性和大规模计算能力能促进各

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2019-11-13.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0200702); 国家自然科学基金资助项目(11761131005); 辽宁省自然科学基金资助项目(2019-ZD-0021).

作者简介: 陆旭泽(1989-), 男, 博士生, E-mail: luxuze@mail.dlut.edu.cn; 陈飙松\*(1973-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: chenbs@dlut.edu.cn.

类工程领域理论研究在工程中的应用<sup>[10]</sup>。其中, 开放式结构有限元分析软件系统 SiPESC. FEMS 各层次接口开放, 并提供了相应的管理机制, 可以为不同层次的开发者提供规范化、可扩展的设计方案, 为算法研究应用到工程领域提供方便。SiPESC. FEMS 中实现的单元计算模块构架可方便地根据需求添加单元<sup>[11]</sup>, 弹塑性分析软件构架支持不同材料本构、非线性迭代算法的动态集成<sup>[12]</sup>。

本文根据隧道结构施工的基本理论和技术, 基于 SiPESC. FEMS 及其弹塑性分析构架, 在 SiPESC. FEMS 中开发生死单元、埋入单元和地应力平衡分析等功能, 并通过平台的任务流功能动态配置多分析步隧道施工数值模拟流程。最后, 分别给出二维数值验证算例和三维工程应用示例。

## 1 隧道施工基本理论和技术

作用在岩体上的荷载主要是地应力。隧道施工前某一特定时间的稳定地应力场被称为初始地应力场。在地层结构模型中, 支护结构与围岩同时

作为承载对象, 可应用连续介质力学原理, 计算两者的受力及变形状态。

在岩体中开挖隧道后从变形到破坏有一个时间历程, 适时地构筑合理的支护结构可以使围岩与支护共同形成坚固的承载环, 能保证整个结构处于长期稳定状态<sup>[13]</sup>。锚喷支护自 20 世纪 50 年代面世以来, 随同现代支护结构理论的发展(尤其是新奥法), 在各个工程领域都得到了充分的应用<sup>[14]</sup>。它通过与围岩紧密黏合, 加强围岩的抗拉压、抗剪等能力, 并帮助围岩在不发生有害变形的前提下进入一定程度的塑性, 实现“卸载”的作用, 从而改善围岩的承载性能, 提高围岩的稳定性。

隧道施工步骤以及其对应的数值模拟流程如图 1 所示。对于隧道工程这类典型的非线性问题, 其结构在某一时刻的力学性态不仅仅与其当前的应力状态相关, 也取决于之前的应力历史。使用有限单元法进行数值分析时, 不仅可以方便地计算出衬砌的内力, 模拟开挖引起的地面沉降, 计算围岩和结构的变形, 还能在数值分析过程中考虑开挖等具体施工过程<sup>[15]</sup>。

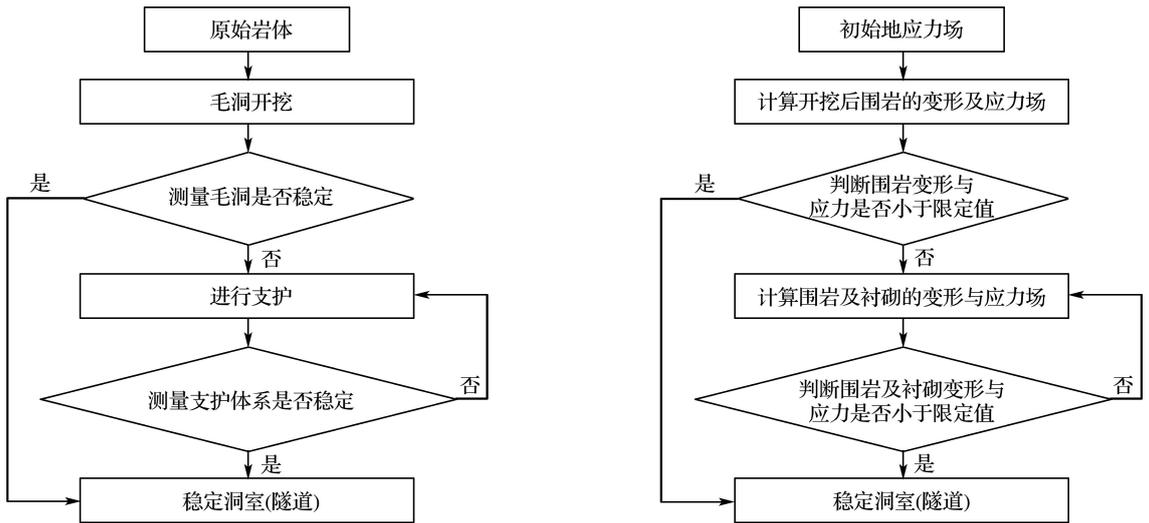


图 1 隧道施工及其数值模拟流程

Fig. 1 Tunnel construction and its simulation process

隧道开挖过程和支护施加过程会导致一定范围内的围岩发生应力状态变化, 是隧道施工数值模拟中的两个重要环节, 必须在计算分析中予以体现。

## 2 隧道施工数值模拟计算基础

隧道施工数值模拟的计算核心是有限元弹塑

性分析。利用 SiPESC 平台中已实现的弹塑性分析软件构架, 通过模型、算法、算法参数等对象的动态替换与组装, 可以顺利模拟隧道开挖与支护施加过程中的应力变化过程。

对于隧道施工的数值模拟, 通常需要考虑多步序分析、初始地应力平衡分析、单元生死、单元埋入等问题的实现。其中多步序分析用于模拟隧

道施工的步骤安排,以便比较多种施工方法,确定最佳施工方案;初始地应力平衡分析用于计算在隧道开挖前围岩的初始应力分布;单元生死用于模拟隧道施工过程中的开挖与支护;而埋入单元则是对锚杆支护的一种数值处理方式。这些构成了隧道施工数值模拟的计算基础。

(1)多步序分析.对于多步序分析过程,其核心内容是每一步序收敛结果的存储与读取,以及不同分析步序之间发生变化的荷载、约束的处理。对于静力问题,多步序分析时荷载或指定位移并非瞬时改变,而需要随着一个虚拟时间(pseudo time)逐步施加。

(2)初始地应力分析.按照弹性理论半空间体的求解方法,对于重度为 $\gamma$ ,泊松比为 $\mu$ 的岩体,距离表面埋深为 $h$ 的考察点,竖向正应力为 $\sigma_z^0 = \gamma h$ ,水平正应力为 $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = \frac{\mu}{1-\mu}\gamma h$ 。一般可将除自重之外的其他因素引起的应力全部归于“构造应力”来进行分析,该应力可以根据实测结果加入计算。

(3)生死单元技术.在隧道开挖过程的数值模拟中,始终伴随着一些单元在模型中的“消失”(开挖)和一些单元的“生成”(支护)。为了模拟这种单元的“消失”和“生成”过程,需要实现生死单元技术。由于在计算中频繁修改结构的拓扑或进行网格重划分会占用大量的计算时间影响分析效率,

可以在数值过程中通过改变单元的材料属性和力学状态来改变它对整个结构的影响,达到与修改结构拓扑同样的效果。

生死单元的技术实现基础是可以对有限元计算数据库进行操作,对于需要“杀死”的单元进行以下操作:

- ①给该单元的刚度赋一个小量;
- ②将单元荷载(如压力、温度)设置为零;
- ③将单元的质量、阻尼的属性设置为零;
- ④将单元积分点上的应力应变向量清零。

而激活单元则是一个反操作的过程,即将单元刚度、荷载、质量等恢复到初始值。

(4)埋入单元技术.对于锚杆的数值模拟分析常采用以下两种方法:

- ①如图2(a)所示将锚杆离散为杆单元,这种方式对网格剖分的要求较高;
- ②如图2(b)所示采用锚杆与岩体的组合单元,这种方式需要分别考虑岩体与锚杆对单刚的贡献编写新的单元。

而本文所采用的埋入单元技术如图2(c)所示,使用多点约束处理锚杆单元与岩土单元的关系,方便地模拟锚杆支护。由于杆单元、实体单元、多点约束都是一般有限元程序中的基本功能,只需实现杆节点的定位与多点约束的自动生成,即可完成单元的埋入。

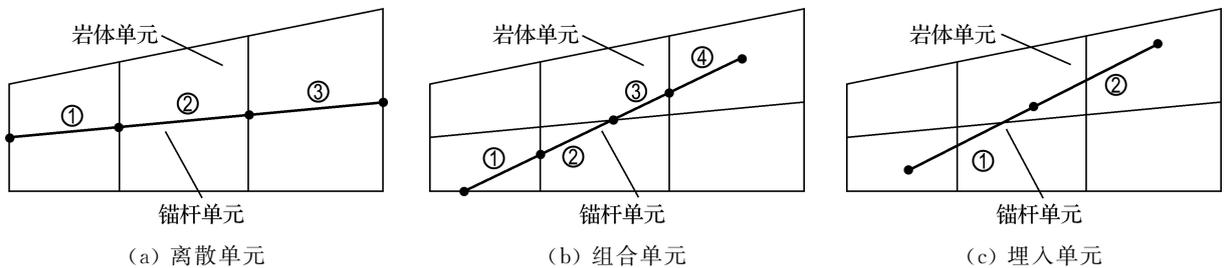


图2 锚杆的数值模拟方法

Fig. 2 Numerical simulation method of anchor

### 3 隧道施工数值模拟实现

在多步序分析、初始地应力平衡分析、单元生死、单元埋入等问题的数值计算基础之上,按照有限元数值计算方法的基本流程,即可实现隧道施工的数值模拟构架。本文在开放式结构有限元分析软件系统 SiPESC、FEMS 的基础上,利用该系统的开放性,实现隧道施工数值模拟。以下是实现

的关键步骤和所需技术。

#### 3.1 多步序分析的数值实现

隧道开挖导致的围岩应力场及位移场的变化,一般通过卸载过程来实现。因此,对于隧道施工问题,多步序分析其实就是对不同步序的卸载过程的分析。本文采用地应力自动释放法模拟卸载过程,其过程如图3所示。

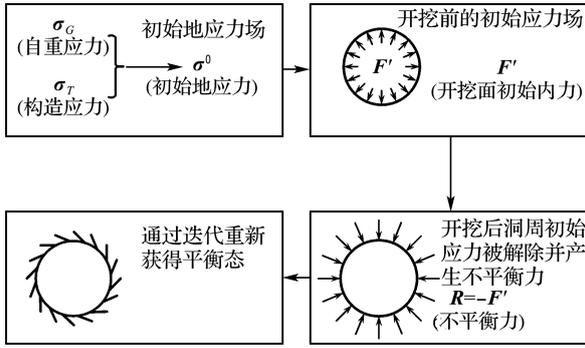


图 3 地应力自动释放法

Fig. 3 Crustal stress auto-release method

地应力自动释放法认为洞室的开挖打破了开挖边界上的应力平衡状态,开挖边界上的节点受力不平衡,为获得新的力学平衡,围岩就要产生相应的变形,引起应力的重分布,形成开挖后围岩的应力场和位移场.这种方法无须人为计算释放荷载,也无须进行应力叠加,对于弹塑性分析计算只须建立相应的弹塑性模型,其余过程与线弹性相同,无须做任何特殊处理就可实现连续开挖计算.

一般的非线性有限元问题可归结为如下非线性代数方程组的求解:

$$\mathbf{R}(\mathbf{u}) = \mathbf{F}^{\text{ext}} - \mathbf{F}^{\text{int}}(\mathbf{u}) = \mathbf{0} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{u}$  为位移向量,  $\mathbf{F}^{\text{ext}}$  为整体外力向量,  $\mathbf{F}^{\text{int}}(\mathbf{u})$  为整体内力向量,  $\mathbf{R}(\mathbf{u})$  称为不平衡力. 在实现地应力自动释放法过程中,可将上式中的内力分为保留部分与挖去部分,其中挖去部分的内力是需要卸载的内力,具体如下式:

$$\mathbf{R}(\mathbf{u}) = \mathbf{F}^{\text{ext}} - (\mathbf{F}_{\text{remain}}^{\text{int}}(\mathbf{u}) + \mathbf{F}_{\text{remove}}^{\text{int}}(\mathbf{u})) = \mathbf{0} \quad (2)$$

由于  $\mathbf{F}_{\text{remove}}^{\text{int}}(\mathbf{u})$  项的消失,不平衡力不再趋于零,需要重新进行迭代平衡计算.为了程序编写的方便,可将挖去部分的内力反向作为外力施加在开挖边界上,利用外力的变化来模拟应力的卸载,如下式:

$$\mathbf{R}(\mathbf{u}) = (\mathbf{F}^{\text{ext}} - \mathbf{F}_{\text{remove}}^{\text{int}}(\mathbf{u})) - \mathbf{F}_{\text{remain}}^{\text{int}}(\mathbf{u}) = \mathbf{0} \quad (3)$$

从上式可以看到,非线性代数方程组的形式依旧未改变,只是对外力项进行了修改,原有的非线性迭代算法可以直接应用于新的代数方程组.

在 SiPESC. FEMS 弹塑性分析构架基础上实现多步序分析过程,使用完全 Newton-Raphson 算法求解,需要继承 MFemNonlinearEquations 模型扩展实现 MTunnelConstructionModel,实现针对隧道施工的数据模型,重新计算迭代步整体不平衡力.然后,创建 MTunnelConstructionModel

进行有限元弹塑性分析,即可实现隧道施工的多步序分析中每一步的平衡分析.对于其他模拟卸载的理论方法,通过修改数据模型,即可实现对应的数值计算功能.

### 3.2 初始地应力平衡分析的数值实现

本文隧道施工模拟有限元模型通过 ABAQUS 建立, SiPESC 平台已经实现了 ABAQUS 数据输入文件 \*.inp 的部分数据导入.为了实现初始应力场的施加,需要对已有的数据导入功能进行扩展,本文设计了 MInitialConditionsHandlerFactory 和 MInitialConditionsHandler 两个功能扩展,实现了对“\* initial conditions”关键词所在数据行的解析,进而实现初始应力场的数据导入与施加.

具体的数据行解析格式为以下两种:

```
* INITIAL CONDITIONS, TYPE = STRESS,
GEOSTATIC
```

```
label, stress1, coord1, stress2, coord2, kx, ky
或
```

```
* INITIAL CONDITIONS, TYPE = STRESS,
INPUT = file
```

其中, label 为需要施加初始地应力的单元集名称或单元号,可以根据具体地质情况分区域施加; coord1 和 coord2 为指定区域最高点和最低点(竖直  $z$  方向)的坐标值; stress1 和 stress2 为坐标对应位置的竖向应力值; kx 和 ky 分别为坐标对应位置  $x$  向和  $y$  向的侧压力系数,考虑地壳构造运动等因素, kx 和 ky 使用实测结果更为准确; file 为地应力数据文件的文件名,该文件定义了所有单元形心处各个应力分量值.通过第二种输入格式,可以导入更加准确的重力和构造应力的实测数据.

以上两种格式的初始应力场施加,均是对施加区域的单元进行循环,获得(计算或直接读取)各单元形心位置处的应力向量,将这个应力向量复制到该单元的各个积分点上,完成初步的地应力施加.另外,通过以上方式施加的地应力并不能保证与重力平衡,还需要通过一次有限元应力平衡分析对应力进行修正.对于其他的地应力处理方式,可以通过编写新的功能扩展进行动态替换,而无须修改其他计算部分的代码.

### 3.3 生死单元技术的数值实现

SiPESC 的有限元计算中,单元的材料属性和力学状态均存放在 SiPESC. ENGDBS 工程数据库中,以应对大规模数值计算数据密集的特点,

保证效率和通用性。

获取或修改单元的材料属性过程步骤如下：

①通过单元数据管理的 MDataManager 获取单元数据对象 MElementData 和对应的属性对象 MPropertyRefData。属性引用对象中存储了指定的材料号、截面信息号等。

②通过 getPropertyId 方法获取材料号,并通过这个编号在名称为 Material 的材料数据管理器的 MDataManager 中获得或修改具体的材料属性对象 MPropertyData。

生死单元的具体实现过程中修改材料属性可以通过修改单元材料属性中的弹性模量、密度、阻尼系数来控制刚度阵、质量阵、阻尼阵。生死单元的具体实现过程如下：

①备份每个单元原有的属性引用号,这样就可以在需要重新激活单元时找回原来的材料属性。

②对于需要“杀死”的单元,分别复制其属性引用对象 MPropertyRefData 和材料属性对象 MPropertyData,并调用 setPropertyDataId 或 setId 方法修改 id 以保证单元访问到新的材料属性。

③通过材料属性对象的 setValue 方法,将弹性模量乘以小量  $1.0 \times 10^{-6}$ ,将密度和阻尼系数置零。

④将新生成的属性通过 MElementData 的 setPropertyId 方法赋给需要“杀死”的单元。

⑤当需要重新激活单元时,可以通过已存储的原有属性引用号并调用 setPropertyId 方法恢复。

### 3.4 埋入单元技术的数值实现

埋入单元,是将一个或一组单元“埋入”到另一组主单元(host elements)中,并通过主单元来约束被埋入单元节点的平动自由度,不约束旋转自由度。在 SiPESC 平台中,埋入单元需要在有限元计算前实现,其步骤如下：

①指定埋入单元；

②指定主单元群(即搜索范围)；

③对每个埋入单元的每个节点进行循环以确定其主单元；

④判断该节点在主单元中的位置并固结约束平动自由度到相应主单元的节点上。

其中第①、②步为用户在导入文件中自行设置,SiPESC 平台通过 \*.inp 文件进行导入并写入数据库中。第③步则通过光线投射算法(ray-

casting algorithm)判断埋入单元节点所属的主单元。

## 4 数值算例

### 4.1 圆形软土隧道施工模拟

某圆形软土隧道埋深 20 m,隧道半径为 5 m。考虑问题的对称性,取一半的模型进行分析,如图 4 所示。该模型在对称线上施加对称边界条件,同时约束底部的竖直自由度和右侧边线的水平自由度。模型中各构件采用的单元类型以及材料属性如表 1 所示。锚杆的长度取 2 m,截面积为  $0.07 \text{ m}^2$ ;衬砌所采用的梁单元的横截面取矩形截面,截面积为  $0.15 \text{ m}^2$ 。

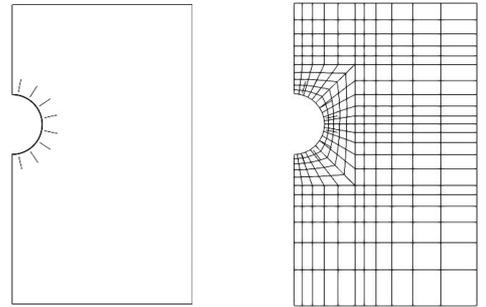


图 4 几何及有限元模型

Fig. 4 Geometry and FE model

表 1 模拟隧道结构各构件的单元类型及材料参数

Tab. 1 Element types and material parameters for tunnel structure simulation

| 构件名称 | 单元类型       | 弹性模量/<br>Pa          | 泊松比 | 重度/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |
|------|------------|----------------------|-----|--|
| 围岩   | 4 节点平面应变单元 | $2.0 \times 10^8$    | 0.2 | 20   |
| 衬砌   | 2 节点平面梁单元  | $1.9 \times 10^{10}$ | 0.2 | —  |
| 锚杆   | 2 节点平面杆单元  | $2.1 \times 10^{10}$ | 0.2 | —  |

本算例的隧道施工模拟中,首先对未开挖的模型进行自重分析,求得开挖边界节点上的等效节点荷载作为虚拟支撑力施加在对应节点上。模拟流程分为 4 个计算步骤：

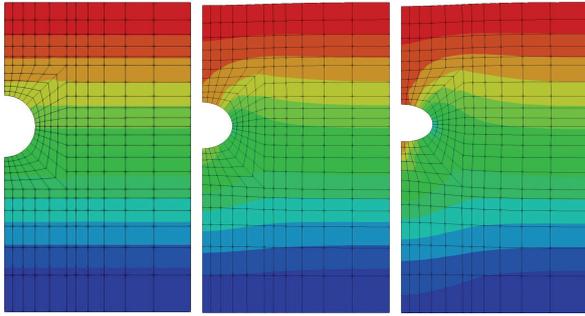
**步骤 1** 进行地应力平衡分析,计算围岩在重力与虚拟支撑力共同作用下的初始应力。

**步骤 2** 实施隧道开挖并释放 40% 的虚拟支撑力。

**步骤 3** 通过施加支护约束围岩的继续变形。

**步骤 4** 完全释放虚拟支撑力, 支护与围岩共同形成支承载环维持结构的稳定。

通过计算, 各步序下结构的竖向应力云图及变形情况如图 5 所示。在不同步序下的应力变化规律验证了多步序分析的流程可以顺利进行, 步骤 1 的结果说明了地应力平衡分析的有效性。从支护的轴向应力  $\sigma_{\text{axis}}$  与时间步  $t$  的关系曲线(图 6、7)可见生死单元与埋入单元在计算中发挥作用, 改变了结构的应力变化规律。



(a) 步骤 1 (b) 步骤 2~3 (c) 步骤 4

图 5 各步序应力云图及变形图

Fig. 5 Stress and displacement nephogram for each step

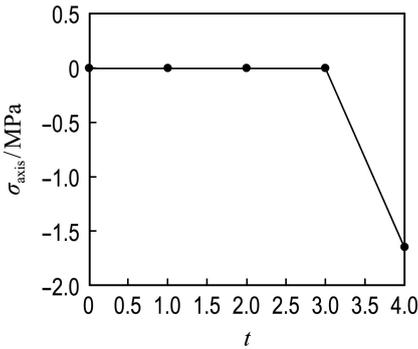


图 6 隧道顶点处衬砌的轴向应力历史

Fig. 6 Axial stress history of liner at the top of tunnel

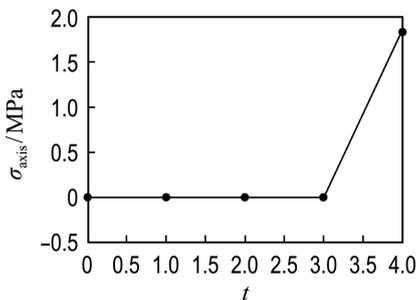


图 7 隧道顶点处锚杆的轴向应力历史

Fig. 7 Axial stress history of anchor at the top of tunnel

## 4.2 多工序隧道施工模拟

为了验证多步序分析在施工方案优化中的应

用, 以及本文实现构架在三维问题中的有效性, 采用文献[16]中的算例, 考虑小间距隧道开挖问题, 采用不同隧道施工方案, 对方案进行优化研究。

建立  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的小间距三维计算模型如图 8 所示, 左右两侧施加  $X$  方向位移约束, 底部施加  $Z$  方向位移约束, 前后两侧则约束  $Y$  方向位移。施工在 V 级围岩中进行, 该围岩的弹性模量为  $1.2 \times 10^9 \text{ Pa}$ , 泊松比为 0.35, 重度为  $20 \text{ kN/m}^3$ 。采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 取摩擦角与膨胀角同为  $25^\circ$ , 内聚力为  $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。本算例不考虑支护施加, 仅通过不同的开挖工序考察隧道施工的优化方案。

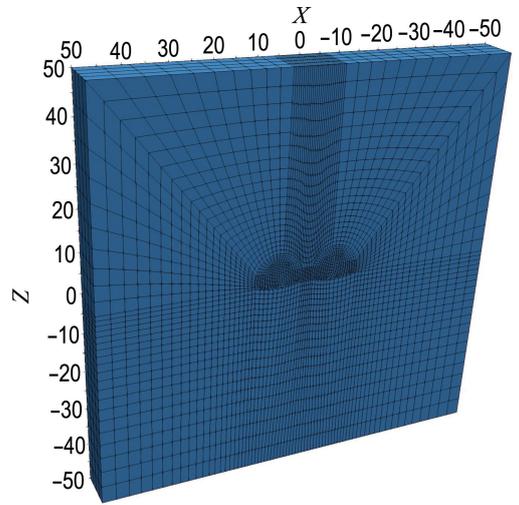


图 8 多工序隧道施工有限元模型

Fig. 8 The finite element model of multi-process tunnel construction

通过本文所实现的隧道施工数值模拟构架计算后, 不同方案算得的结果如下:

①上下台阶与正向侧壁导坑组合法(施工步序如图 9 所示)方案中算得的单侧隧道开挖后的洞周最大主应力云图与最小主应力云图如图 10(a)、(b)所示, 双侧隧道开挖后的洞周最大主应力云图与最小主应力云图如图 11(a)、(b)所示, 双侧隧道开挖后洞周的变形趋势如位移矢量

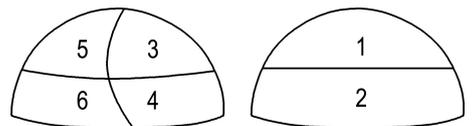
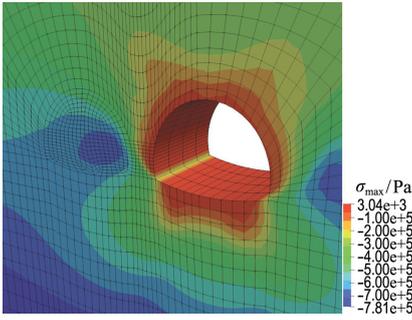
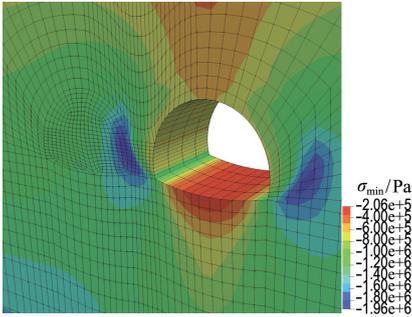


图 9 上下台阶与正向侧壁导坑组合法施工步序

Fig. 9 Construction steps for bench method and forward sidewall pilot method



(a) 最大主应力云图



(b) 最小主应力云图

图 10 单隧道应力云图

Fig. 10 Stress nephogram of single tunnel

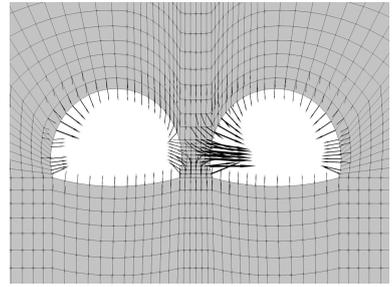


图 12 位移矢量图

Fig. 12 Displacement vector diagram

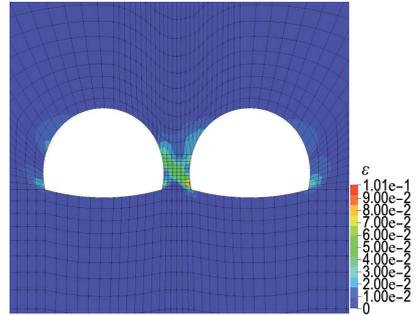


图 13 等效塑性应变云图

Fig. 13 Equivalent plastic strain nephogram

②单侧壁导坑法(施工步序如图 14 所示)方案中算得的结果在应力、位移、塑性应变的大小及分布规律上与方案①基本一致,不再重复作图显示.

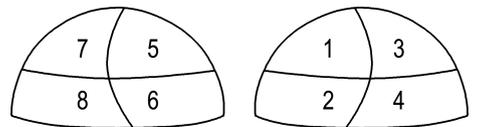
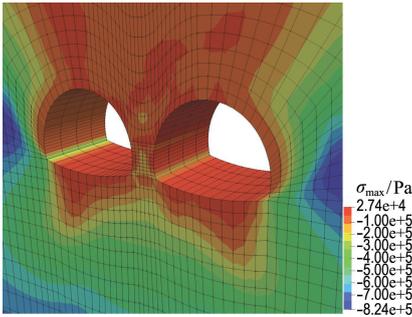
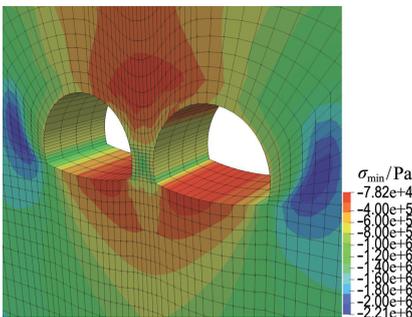


图 14 单侧壁导坑法施工步序

Fig. 14 Construction steps for unilateral pilot method



(a) 最大主应力云图



(b) 最小主应力云图

图 11 双隧道应力云图

Fig. 11 Stress nephogram of double tunnels

两种施工方案的计算结果显示,不论是在施工中段还是完成后,洞周围岩的受力状况都是以压应力为主,且最大压应力均分布在隧道两侧. 双侧隧道开挖后,隧道之间的岩柱处具有最大的变形,且位移偏向先开挖的一侧隧道. 施工完成后,洞周分布有塑性应变,最大塑性应变同样发生在岩柱处. 采用方案①求得的最大位移为 0.070 3 m,最大塑性应变为 0.101 0;采用方案②求得的最大位移为 0.073 0 m,最大塑性应变为 0.103 2. 两种方案的计算结果基本相同,考虑到方案①施工步骤较为简单,故可以优先选择方案①进行施工.

### 5 结 语

本文基于开放式结构有限元分析软件系统

图 12 所示,而图 13 则显示了洞周的塑性应变分布规律.

SiPESC. FEMS 及其弹塑性分析构架, 结合隧道结构设计常用的地层结构模型理论思想和相关技术, 实现了一种隧道施工有限元分析计算构架. 该构架通过地应力平衡分析计算围岩的初始应力; 利用 SiPESC. FEMS 弹塑性分析功能, 实现地应力平衡多步序分析所需的加载和卸载过程; 利用 SiPESC. FEMS 对单元和材料属性数据的灵活管理, 通过备份、修改、还原材料属性, 实现生死单元技术; 利用 SiPESC. FEMS 对多种单元和多点约束的支持, 通过生成的多点约束实现埋入单元技术; 利用 SiPESC. FEMS 动态任务流程配置, 搭建了多分析步隧道施工计算流程. 数值算例进一步验证所实现构架能有效地计算出地应力平衡过程的应力变化, 并对隧道施工方案进行优化.

此外, 隧道施工数值模拟构架的设计和实现过程体现了 SiPESC. FEMS 的开放性和重用性, 对基于有限元的数值模拟构架实现具有重要指导作用. 本文构架可以结合 SiPESC 平台其他功能模块进行扩展, 解决复杂隧道施工工况模拟、三维掘进模拟、隧道结构瞬态动力学分析、围岩力学参数反分析等大型土木工程的计算问题.

## 参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015 [J]. 中国公路学报, 2015, **28**(5): 1-65. Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research: 2015 [J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2015, **28**(5): 1-65. (in Chinese)
- [2] 于富才. 隧道支护与围岩作用体系的力学特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017. YU Fucui. Study on mechanical characteristics of the system of support and surrounding rock [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [3] 武振国, 常翔, 叶飞. 盾构隧道结构设计模型综述 [J]. 隧道建设, 2008, **28**(2): 182-185. WU Zhenguo, CHANG Xiang, YE Fei. An overview on structural design models of shield tunnels [J]. **Tunnel Construction**, 2008, **28**(2): 182-185. (in Chinese)
- [4] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. LIU Jianhang, HOU Xueyuan. **Shield Tunnels** [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991. (in Chinese)
- [5] 蒋洪胜. 盾构法隧道管片接头的理论研究及应用 [D]. 上海: 同济大学, 2000. JIANG Hongsheng. Theoretical study and application of shield tunnel segments [D]. Shanghai: Tongji University, 2000. (in Chinese)
- [6] 龚晓南. 21 世纪岩土工程发展展望 [J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 238-242. GONG Xiaonan. Prospects for the development of geotechnical engineering in the 21th century [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, **22**(2): 238-242. (in Chinese)
- [7] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009. DING Yongchun. Excavation-induced deformation and control in soft deposits [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- [8] 郝哲, 李伟, 刘斌. 韩家岭大跨度隧道开挖过程数值模拟研究 [J]. 西部探矿工程, 2005, **17**(2): 96-99. HAO Zhe, LI Wei, LIU Bin. Study on numerical simulation of excavation process in Hanjialing large span tunnel [J]. **West-China Exploration Engineering**, 2005, **17**(2): 96-99. (in Chinese)
- [9] 苏凯, 崔金鹏, 张智敏. 隧洞施工开挖过程初次支护时机选择方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, **46**(8): 3075-3082. SU Kai, CUI Jinpeng, ZHANG Zhimin. Method of choosing initial supporting time during tunnel excavations [J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2015, **46**(8): 3075-3082. (in Chinese)
- [10] 张洪武, 陈飙松, 李云鹏, 等. 面向集成化 CAE 软件开发的 SiPESC 研发工作进展 [J]. 计算机辅助工程, 2011, **20**(2): 39-49. ZHANG Hongwu, CHEN Biaosong, LI Yunpeng, et al. Advancement of design and implementation of SiPESC for development of integrated CAE software systems [J]. **Computer Aided Engineering**, 2011, **20**(2): 39-49. (in Chinese)
- [11] 张盛, 杨东生, 尹进, 等. SiPESC. FEMS 的单元计算模块设计模式 [J]. 计算机辅助工程, 2011, **20**(3): 49-54. ZHANG Sheng, YANG Dongsheng, YIN Jin, et al. Design pattern of element computation module of SiPESC. FEMS [J]. **Computer Aided Engineering**, 2011, **20**(3): 49-54. (in Chinese)
- [12] 陈飙松, 陆旭泽, 张盛. 基于 SiPESC 平台的弹塑

性分析的软件框架 [J]. 计算力学学报, 2016, **33**(4): 599-604.

CHEN Biaosong, LU Xuze, ZHANG Sheng. Software framework for elasto-plastic analysis based on SiPESC platform [J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2016, **33**(4): 599-604. (in Chinese)

[13] 韩瑞庚. 地下工程新奥法 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.

HAN Ruigeng. **NATM for Underground Engineering** [M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)

[14] 徐千成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

XU Gancheng, BAI Hongcai, ZHENG Yingren, *et al.* **Underground Engineering Support Structure** [M]. Beijing: China Water & Power

Press, 2003. (in Chinese)

[15] 赵尚毅, 郑颖人, 宋雅坤, 等. 地下隧道衬砌结构内力计算方法探讨 [J]. 后勤工程学院学报, 2007, **23**(4): 29-33.

ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SONG Yakun, *et al.* An analysis of the design method of underground tunnel linings [J]. **Journal of Logistical Engineering University**, 2007, **23**(4): 29-33. (in Chinese)

[16] 陈卫忠, 伍国军, 贾善坡. ABAQUS 在隧道及地下工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

CHEN Weizhong, WU Guojun, JIA Shanpo. **Application of ABAQUS in Tunnel and Underground Engineering** [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese)

## Numerical simulation framework for tunnel construction based on SiPESC. FEMS

LU Xuze<sup>1</sup>, ZHANG Sheng<sup>1</sup>, CHEN Biaosong<sup>\*1</sup>, BAI Yang<sup>2</sup>

( 1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China )

**Abstract:** Based on the open system of finite element analysis software SiPESC. FEMS and its elasto-plastic analysis framework, a new finite element analysis algorithm framework for the tunnel construction is realized with the commonly used stratum structure model theory and related technologies. In this framework, the initial stress of the surrounding rock is calculated by geostatic equilibrium analysis. The loading and unloading process required in multi-step analysis for crustal stress balancing is implemented by using elasto-plastic analysis in SiPESC. FEMS. The technology of birth-death element is realized benefiting from the flexible management of elements and properties in SiPESC. FEMS. The technology of embedded element is achieved by the employment of multipoint constraint method in SiPESC. FEMS. The task flow of multi-step analysis in tunnel construction is constructed by the configuration of dynamic task flow from SiPESC. FEMS. Numerical examples show that the new framework is suitable for the numerical simulation of tunnel construction process and it can be used to calculate the stress change in the process of crustal stress balancing effectively and to obtain the optimal tunnel construction scheme.

**Key words:** tunnel construction numerical simulation; elasto-plastic analysis; birth-death element; embedded element; SiPESC. FEMS