

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.1221

基于建筑信息模型技术的盾构隧道 结构信息模型建模方法

钟 宇^{1,2,3}, 陈 健^{1,2}, 陈国良^{1,2}, 吴佳明^{1,2}

(1. 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 ;
2. 中国科学院大学, 北京 100049 ; 3. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘 要 :为解决隧道工程建设各阶段之间的信息交流和数据共享困难的问题,前期在工业基础类(industry foundation classes, 简称 IFC)标准的基础上实现了盾构隧道建模数据模型。在此基础上,提出基于建筑信息模型(building information modeling, 简称 BIM)技术的盾构隧道结构信息模型建模方法。根据扩展的盾构隧道结构信息模型的 IFC 表达,提出了单个管片块建模方法和隧道线路解算流程和步骤。在此基础上,进行盾构管片拼装与隧道建模,建立了盾构隧道建模流程和参数化建模方法,形成了基于 BIM 技术的盾构隧道结构信息模型建模方法。最后,通过实例验证了建模方法的可行性。工程应用表明,通过借鉴和引入 BIM 技术,建立基于统一 IFC 数据标准的盾构隧道结构信息模型,可以实现盾构隧道信息的无损交换与充分共享,从而进一步验证了前期提出的基于 IFC 的盾构隧道建模数据模型的正确性。研究成果可为隧道数值计算分析提供初始模型,为实现隧道三维可视化模型和分析计算模型的无缝对接提供基础。

关 键 词 :建筑信息模型;工程基础类扩展;盾构隧道信息模型;建模方法

中图分类号 : TU 717

文献标识码 : A

文章编号 : 1000 - 7598 (2018)05 - 1867 - 10

Shield tunnel structure information modelling method based on building information modeling technology

ZHONG Yu^{1,2,3}, CHEN Jian^{1,2}, CHEN Guo-liang^{1,2}, WU Jia-ming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;
3. Wuhan Metro Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: With the purpose of solving the problem of model sharing among stages of shield tunnel construction, an IFC-based data model of shield tunnel was built in previous research. Based on the IFC-based data model, a BIM-based shield tunnel structure information modelling method is introduced in this paper. According to the extended IFC description of shield tunnel information model, the modelling method of single segment and flow and process of tunnel axis are proposed. Based on this, a shield tunnel assembling method is built, as well as a flow chart and a parametric modelling method of shield tunnel. By this way, the BIM-based shield tunnel structure modelling method is formed. The modelling method is examined by applying it to a metro shield tunnel case. The research shows that, by introducing the concept and technology of BIM, it is suitable for the communication and sharing of the information of shield tunnel structure that builds the shield tunnel structure information model based on the uniform IFC standard. The validity of the IFC-based data model of shield tunnel is verified further. The result in this paper can provide the initial model for numerical calculation and analysis, and provide foundation for realizing seamless connection of visualization model and analytical model.

Keywords: building information modelling; extension of industry foundation class; shield tunnel information model; modelling method

1 引 言

盾构隧道正逐渐成为软土地区地下空间开发

的主要方法之一。随着承载功能的不断增加,盾构隧道的建设规模和建设速度都达到了一个新的高度,与隧道建设同期产生的各类工程信息也呈几何

收稿日期: 2016-05-27

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划(STS)(No. KFJ-EW-ST-122); 中国科学院重点部署项目、百人计划项目(No. KZZD-EW-TZ-12)

This work was supported by the Science and Technology Service Network Initiative(KFJ-EW-ST-122), the Key Programs of the Chinese Academy of Sciences and One Hundred Person Project of the Chinese Academy of Sciences(KZZD-EW-TZ-12).

第一作者简介: 钟宇,男,1988年生,博士研究生,主要从事 BIM 及其在岩土工程中的应用方面的研究工作。E-mail : qaz8761@163.com

通讯作者: 陈健,男,1972年生,博士,研究员,博士生导师,主要从事岩土工程数值分析的理论和应用方面的研究工作。E-mail : jchen@whrsm.ac.cn

级的井喷式增长。传统的二维图表形式的信息利用和共享方式已无法适应不断提高的工程信息处理能力要求，因此，如何更好地实现盾构隧道工程建设不同阶段、不同专业之间的信息交流和数据共享，促进建设效率的提升成为一个亟待解决的问题。

目前，国内外关于隧道信息管理和共享应用的研究主要有地理信息系统^[1-4]、三维虚拟技术^[5-7]、计算机辅助设计^[8]等方向，这些信息管理技术采用不同格式的数据源和信息处理结果，其信息流转方式都基于各自独立的数据标准和组织结构，无法与其他工程软件形成较好的数据共享和交流。

建筑信息模型 (building information modeling, 简称 BIM) ^[9-10]作为一种新兴的信息管理思想，基于统一的数据标准——工业基础类 (industry foundation class, 简称 IFC), 组织和规范各类工程信息的表达和使用，减少信息在工程各阶段流转时因数据标准不一致导致的信息流失和错误。BIM 自提出以来，在全球各地得到了普遍应用，成为一股席卷全球的建筑思想浪潮。为此，借鉴 BIM 在建筑工程中的成功应用经验，将 BIM 理念和技术引入到隧道工程建设和管理中已成为国内外学者的研究热点^[11-14]，但这些研究多集中于矿山法隧道，缺乏基于 BIM 技术的盾构隧道建模方法方面的研究。

在本系列文章的第 1 篇^[15]中，形成了完整的基于 IFC 标准的盾构隧道数据结构和存储型式，为实现基于 BIM 的盾构隧道信息模型建模提供了数据模型。本文在上述数据模型的基础上，首先从盾构隧道的核心结构——管片结构出发，实现了单环管片的参数化建模技术，进而形成了基于单环管片的盾构隧道管片拼装方法，并在具体的建模软件中开发了相应的建模模块，建立了盾构隧道信息模型。最后以某市地铁盾构隧道的实际应用验证了方法的有效性和可行性。

2 盾构隧道建模流程

为了保证盾构隧道数据存储的一致性和共享交流的准确性，按照基于 IFC 标准的盾构隧道数据标准组织数据，采用相关的 BIM 技术，建立盾构隧道信息模型，实现盾构隧道模型相关信息的高效流动。建模流程如图 1 所示，包含的主要步骤如下：

(1) 信息输入 根据扩展的各个 IFC 实体的属性集合，按要求输入管片形状、半径、宽度、管片块数量、角度等参数信息和隧道线路组成、端点坐标、曲线参数等信息，为各种参数信息分别创建能够包含这些 IFC 实体所有属性的数据类，利用类

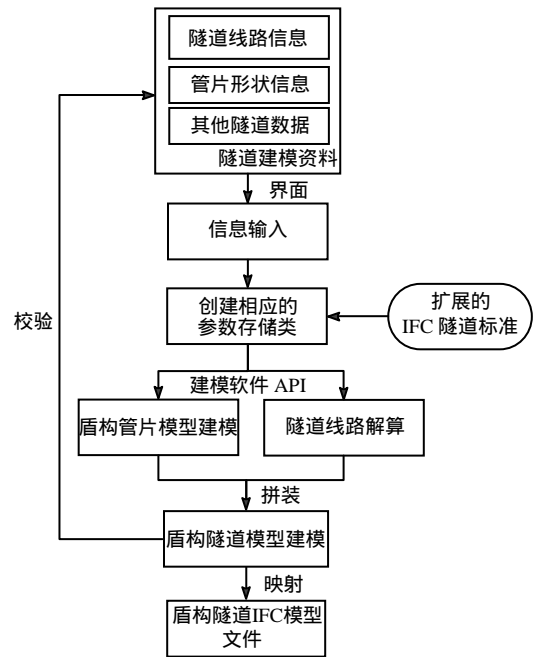


图 1 基于 IFC 的盾构隧道建模流程图

Fig.1 IFC-based flow chart of shield tunnel modelling

的实例存储和管理这些属性信息；

(2) 盾构管片模型建模 将输入的各类参数按数据模型的要求组织、读取、分析和计算，利用 BIM 建模软件 API 提供的各类建模函数，根据计算结果按照该建模软件的模型构成方法建立管片的单体模型，图 2 为管片模型的部分参数示意图；

参数	值	公式
IFC 参数		
类型	STANDARD	=
空间结构实体	IfcRingSpace	=
环号 (默认)	1	=
IFC 实体	IfcSegmentBlock	=
标识数据		
注释记号		=
型号		=
制造商		=
类型注释		=
URL		=
说明		=
部件代码		=
成本		=

图 2 盾构隧道构件模型 IFC 参数

Fig.2 IFC parameters of shield tunnel model

(3) 隧道线路解算 利用自己编写的隧道线路解算程序，根据输入的隧道线路坐标、半径等参数自动计算每环管片的安装位置坐标和方向向量；

(4) 盾构隧道模型建模 按上述信息，分别计

算每环管片的位置参数并依次创建管片模型的实例，最终组合拼装形成盾构隧道整体结构模型；

(5) 盾构隧道模型向 IFC 映射 通过以上步骤创建的盾构隧道结构模型，在其每个管片模型中都包含了将模型数据映射为对应 IFC 实体的函数，调用这些函数生成整个盾构隧道模型的 IFC 实体及其与模型映射关系。在后续输出为 IFC 文件时，直接调用这些 IFC 实体将盾构隧道结构的几何形状、位置方向等信息完整输出，便于形成 IFC 模型文件。

上述建模方法与矿山法隧道的建模技术有很大的不同，后者的建模过程大都采用由横断面沿纵曲线平行移动生成扫描体的方法生成隧道模型^[5, 8]，这种方法简易快速，但精度不高，且通常只能用于初始建模环境中，工程信息很难重复利用。而由本文所提出的基于 IFC 的盾构隧道建模流程是基于 BIM 技术和 IFC 理念，将盾构隧道的结构分解到每个管片块，盾构隧道由一个个管片块拼装形成，每个管片块的信息被单独描述、存储和利用，这种方式有利于所建模型被精确定位、提取和修改，大大提高了盾构隧道工程信息的利用率。

3 盾构隧道建模主要技术

3.1 主要对象类

根据上述建模流程，创建盾构隧道模型的首要步骤是建立各种对象类，用以存储经输入、计算分析得到的各类建模参数。根据数据模型中所描述各几何元素和空间对象之间的层次组成关系，可以抽象出盾构隧道建模过程中主要的对象类如下：

(1) 盾构隧道类 (Class CTunnel)

该类负责建立隧道本身及与其他隧道关系的属性，成员变量包括隧道标识号、类型、管片数量、管片模型词典、隧道线路、相邻隧道和隧道描述等。

(2) 管片类 (Class CSegment)

该类表示管片结构组成及与其他管片的关系，成员变量包括管片标识号、类型、管片块数量及词典、前后管片标识号、整体中心位置和管片描述等。

(3) 管片块类 (Class CSegmentBlock)

该类表示组成一个完整管片的各类管片分块，成员变量包括管片块标识号、类型、构成管片块的前后轮廓、宽度、楔形角、正面和负面相邻的管片块等。

(4) 截面轮廓类 (Class CProfile)

该类表示形成一个管片块模型的各种形状的截面轮廓，成员变量包括轮廓标识号、类型、对应管片块、包含曲线数量、内外径、方向等。

(5) 线段类 (Class CCurve)

表示组成截面轮廓多边形的各类线段，成员变量包括线段标识号、类型、起点、终点、半径、正负面方向线段等。

(6) 点类 (Class CVertex)

点是组成模型的最小单元，该类的成员变量包括点标识号、类型、所属线段、坐标、属性描述等。

除此之外，还有一些非实体类，如代表所有类型的管片块的基类 Class CSegmentBlockGeom，代表所有几何线段的基类 Class CCurveGeometry 等，这些类为其他类的成员变量提供类型定义或者作为其他建模函数的参数使用。

在这些类的使用过程中，所有构件都各自建立了对象类型的枚举型，如：

隧道类型 public enum tunneltype={metro=0, water=1, userdefined=2};

隧道线路类型 public enum tunnelcurvetype={line=0, arc=1, transition=2, vLine=3, vArc=4, userdefined=5};

管片块类型 public enum segmentblocktype={KBlock=0, LBlock=1, BBlock=2, userdefined=3};

此外，还有管片类型枚举、线段类型枚举、点类型枚举等。

另外，为主要的对象类建立成员函数 convert ()，调用该函数可将实体的成员变量，按要求转换为对应的 IFC 实体并初步填充 IFC 实体的参数，为后续形成 IFC 模型数据文件提供数据接口，实现由盾构隧道信息模型向 IFC 模型文件的映射。如图 3 所示，当 CCurve 类需要转换为对应的 IfcCurve 实体时，调用 convert 函数将 CCurve 类的 startpoint 信息赋予 IfcLine 的参数 Pnt，将由 CCurve 类的 startpoint 和 endpoint 计算得到的方向向量信息赋予 IfcLine 的参数 Dir，这样 IfcLine 的主要参数全部得到，为后续建立 IfcLine 实体提供了一定的基础。

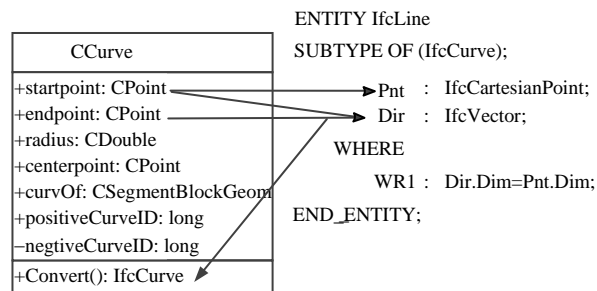


图 3 建模对象类与 IFC 实体的参数的映射
Fig.3 Parameters mapping between IFC entity and modelling class

通过对这些概念的进一步分析，可以建立盾构隧道结构模型建模过程的类图，主要的类及类间的

关系用 UML (unified modeling language) 类图表示如图 4 所示。

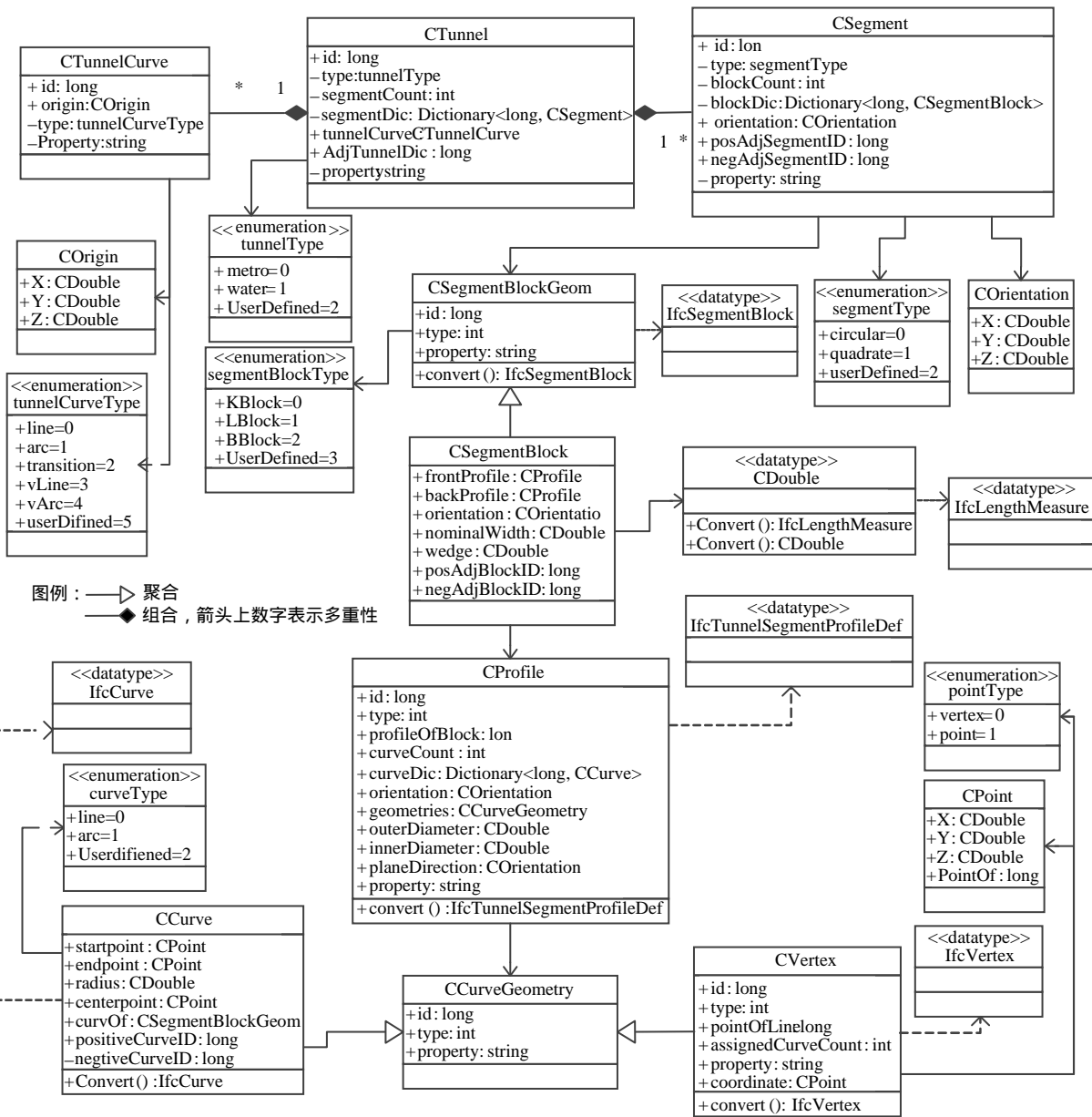


图 4 基于 UML 的盾构模型建模类图
Fig.4 UML-based class graph of shield tunnel modelling

对于对象类管片块和线段中的“正面 (positive)”和“负面 (negative)”定义如下：形成对象的任何一个环形范围内，逆时针为正，处于正方向的对象位于正面，反之位于负面；对于对象类管片和管片块中的“前面 (front)”和“后面 (back)”定义如下：按隧道里程数大小排列，定位于较大里程的对象位于前面，反之位于后面。

对于盾构隧道结构的其他组成，如注浆层、螺栓和二次衬砌都可以按此方法建立数据结构，此处不再赘述。

3.2 单个管片建模方法

定义了建模数据的组织结构后，即可实现将输入的建模信息接收、存储和转化，建立盾构隧道信息模型。盾构隧道是由盾构管片按照对应的定位点入的建模信息接收、存储和转化，建立盾构隧道信息模型。盾构隧道是由盾构管片按照对应的定位点及方向排列形成的，这些定位信息根据隧道线路解算得到。由于管片是工厂预制的，相同形状参数的管片模型是一样的，只是排列形成隧道的每一个管片的位置与方向不同。根据管片结构的这种特点，

可以采用基于多个剖面的建模方法建立管片中每个管片块的三维模型。

基于多个剖面的实体模型形成方法是指将三维空间中一系列的平面截面轮廓按一条中轴曲线的方向串联起来,所形成的实体起于第 1 个截面轮廓,终于最后 1 个截面轮廓。其特点是灵活性大、可以添加和删减剖面而改变模型的外形、表达精度较高,特别适合于实体截面的形状和方向有改变的情形。

根据上述分析,管片建模的流程如图 5 第一部分所示。包括以下主要步骤:

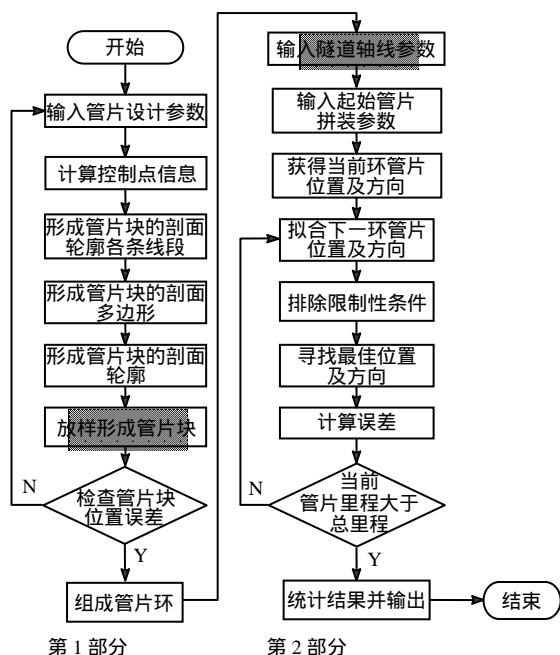


图 5 管片建模及隧道线路解算流程图
Fig.5 Flow chart of segment modelling and tunnel curve calculation

(1) 读取输入的管片几何形状参数信息,主要

形状参数如表 1 所示。接收到的输入信息按上节所示的数据组织结构创建对象类并存储,作为后续盾构隧道建模的数据基础。

(2) 根据参数计算组成管片块的剖面轮廓各条线段的端点坐标和控制点坐标。对于各剖面来说,主要计算各管片块的内外圆起始点和终止点 (P1 ~ P4)、各孔洞的中心点和定位点 (P5 ~ P9) 等,如图 6 所示。

(3) 由以上端点坐标,调用相应线段函数形成不同类型的线段。

(4) 将上述线段按照逆时针为正的顺序首尾相连形成闭合的管片块剖面多边形。

(5) 调用管片块轮廓类将上述多边形转换成形成管片块所需的前轮廓和后轮廓。

(6) 由于楔形角的存在,管片块的各个剖面所在平面并不是平行的,各剖面在基准平面的基础上朝各自的方向平移并旋转一定的角度,如图 7 所示。根据管片块类型和楔形角的要求,计算各剖面轮廓所在平面与竖直方向的夹角,并将剖面平面旋转到该角度,形成各剖面的作业面。

采用同样的方法,将各剖面轮廓类平移并旋转到各自的剖面作业面上,保证各个剖面按顺序排列起来。

(7) 调用实体建模函数,以各剖面轮廓类组成的数组作为建模参数,放样形成管片块实体。其函数原型为

```
public Form NewLoftForm (bool isSolid, Reference ArrayArray profiles)
```

其中, isSolid 表示所形成的实体是空心还是实心, profiles 是所有建模剖面轮廓的集合,每个轮廓有且只能有一个闭合的环,且同一个轮廓必须位于同一个平面上。

表 1 管片块建模主要形状参数表
Table 1 Main shape parameters of segment model

参数名称	参数变量	变量类型	说明
初始环中心点坐标	origin	三维点(Point3D)	管片初始拼装参数
初始环法向量	direction	三维点 (Point3D)	管片初始拼装参数
管片中心宽度	width	双精度型 (Double)	管片环中心处的宽度 (mm)
管片环楔形角	deltangle	双精度型 (Double)	整个管片的楔形角,若为双侧楔形,每侧楔形角为 deltangle/2
管片块数	bN	整数型 (int)	每环管片包含的管片块数量
剖面数量	pN	整数型 (int)	使用基于多个剖面的建模方法
封顶块位置	aF	双精度型 (Double)	以封顶块偏离竖直方向的角度表示
各剖面中所有管片块的圆心角	blockAngleArrArray	数组型 (Array)	多个剖面的所有管片块的圆心角的数组
管片块外径	RadiusArr	数组型 (Array)	(mm)
管片块内径	radiusArr	数组型 (Array)	(mm)
环间螺栓孔的数量	boltNumDic	词典型	管片块序号与对应的环间螺栓孔的数量组成的 key-value 数对
环间螺栓孔的角度	boltAngDic	词典型	管片块序号与其包含的各环间螺栓孔的角度数组组成的 key-value 数对

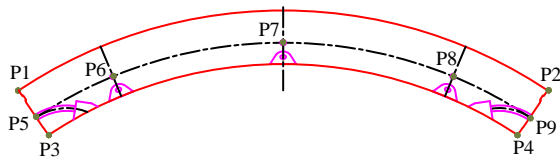


图6 管片块中的控制点示意图

Fig.6 Schematic of control points of segment

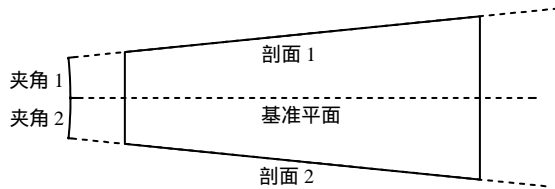


图7 管片剖面示意图

Fig.7 Schematic of segment section

(8) 判断管片块之间的位置误差是否满足条件, 如果不满足, 则返回检查输入的参数, 调整部分参数或者计算默认设定, 反之, 继续;

(9) 一般管片环由一个封顶块、两个邻接块和若干个标准块组成, 设定封顶块的位置(为简单起见, 一般设为正上方中央位置)后, 其余管片块的位置也随之确定, 以此拼装组成完整的管片环。

3.3 隧道线路解算及管片拼装

盾构隧道最终是由管片拼装而成的, 如果将每环管片看作一条短折线, 整条隧道可以看作是由一组短折线(折线长度为一环管片的中心宽度)的集合来近似地拟合而成。因此, 对隧道线路的解算是确定每个管片环模型位置及方向的重要依据。

隧道的设计轴线由若干条不同类型的三维曲线段首尾相连而成。将三维的隧道轴线在平面上和纵剖面上投影得到轴线的平曲线和竖曲线, 其中平曲线一般可以分为直线、圆曲线、缓和曲线(直缓、缓直)3种主要线型, 竖曲线一般可以简单地分为直线和圆曲线两种主要线型。各类型曲线段的参数见表2, 隧道线路分类见表3。

隧道线路计算及盾构隧道建模的流程如图5第2部分所示, 包括以下主要步骤:

(1) 输入隧道线路参数, 包括各段曲线的起点和终点的坐标、里程, 圆曲线的半径和转弯方向, 缓和曲线的长度和方向等;

表2 隧道线路参数

Table 2 Parameters of tunnel line

参数序号	参数名称	参数序号	参数名称
	起点里程		圆半径
	终点里程		转弯方向
	起点坐标		平面长度
	终点坐标		

表3 隧道线路类型

Table 3 Types of tunnel line

分类	线型	参数序号
平曲线	直线	
	直缓曲线/缓直曲线	
	圆曲线	
竖曲线	直线	
	圆曲线	

(2) 输入拟定的盾构隧道第1环管片的位置、方向及旋转角度等参数;

(3) 以第1环管片参数作为计算的初始条件, 通过前述盾构隧道线路计算方法^[16-17]和管片拼装参数计算方法, 分别计算位于直线段、圆曲线段、缓和曲线段上的管片的位置和方向;

(4) 重复步骤(3)计算下一环管片的位置参数, 根据错缝、封顶块位置等限制性条件排除不合适的位置;

(5) 计算下一环管片的拟合中心坐标与该里程对应的隧道设计轴线上的点坐标之间的误差;

(6) 判断当前计算的管片的中心里程是否大于隧道总里程。小于总里程, 则将当前管片里程向前推进一个环宽, 改变拟合参数, 返回步骤(4)继续计算后续管片位置参数, 反之, 结束解算过程;

(7) 将组合的管片模型按计算的各环位置参数调整、排列, 形成完整的盾构隧道模型;

(8) 统计并输出建模结果, 包括各环管片中心点坐标、方向、旋转角度及与设计轴线的误差等信息, 完成盾构隧道信息模型建模过程。

4 实例应用

4.1 盾构隧道建模模块

综上所述, 本文提出和形成了基于BIM理念和技术的盾构隧道信息模型建模方法。为验证该建模方法的有效性和可行性, 利用面向对象的编程思想, 采用Visual C#语言和Microsoft Access数据库, 在Autodesk Revit建模软件的基础上, 利用Revit软件, 进行二次开发, 实现基于IFC标准和BIM技术的盾构隧道管片结构建模模块, 图4所示的类图作为其基本逻辑结构指导, 主要界面如图8所示, 实现了盾构隧道管片结构的自动参数化建模、输入输出IFC格式文件等功能。

现以某市轨道交通1号线盾构隧道工程为具体工程实例, 对上述方法和建模模块进行验证。该盾构隧道埋深为10.06~11.60 m。采用通用型管片, 管片外径为6 200 mm, 内径为5 500 mm, 管片厚

度为 350 mm，管片宽度为 1 200 mm，双面楔形，楔形量为 20 mm。管片由 1 封顶块+2 邻接块+3 标准块的组合组成，3 种类型管片块的圆心角分别为 20°、68°、68°，其中封顶块窄端两侧各缩进 1°，相应邻接块窄端各扩大 1°。

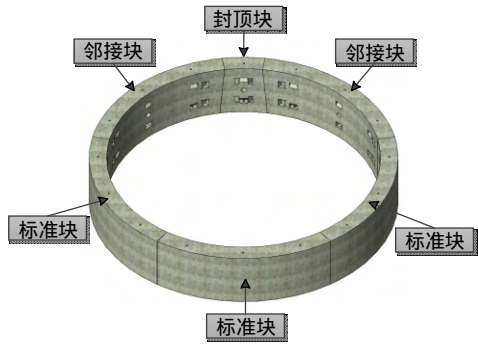


图 10 管片三维模型分块

Fig.10 Section of a segment 3D model

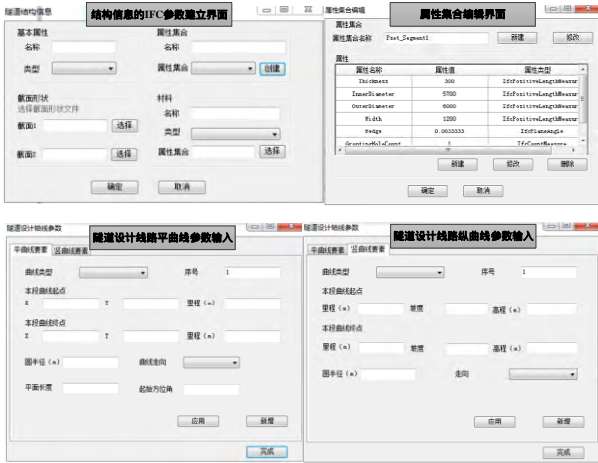


图 8 盾构隧道信息模型实施及设计线路参数界面
Fig.8 User-interface of shield tunnel information modelling and line information

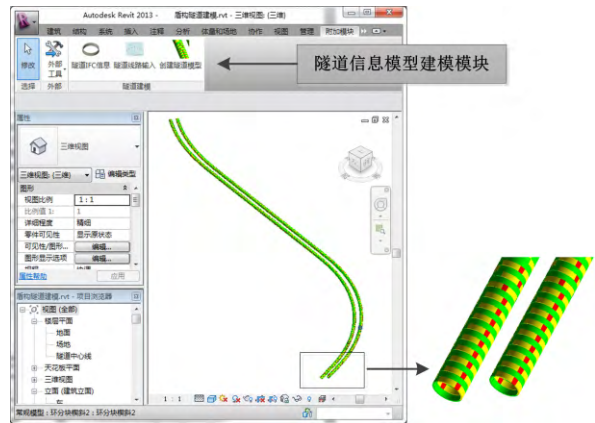


图 11 Revit 隧道建模模块及生成的盾构隧道模型
Fig.11 Revit plug-in of tunnel modelling and generated shield tunnel model

4.2 盾构隧道建模结果

在 Revit 建模软件中，加载上述建模模块，输入相关建模信息，建立了盾构隧道的管片结构模型和隧道整体三维模型。3 种管片块的建模过程示意图如图 9 所示，图 10 为最终形成的管片结构的三维模型，图 11 为 Revit 中盾构隧道建模模块及本区间盾构隧道三维模型。

本区间建模里程长 868.8 m，管片错缝拼装，建模结果数据如图 12 所示，管片共 725 环，与设计线路的最大误差为 15.8 mm。

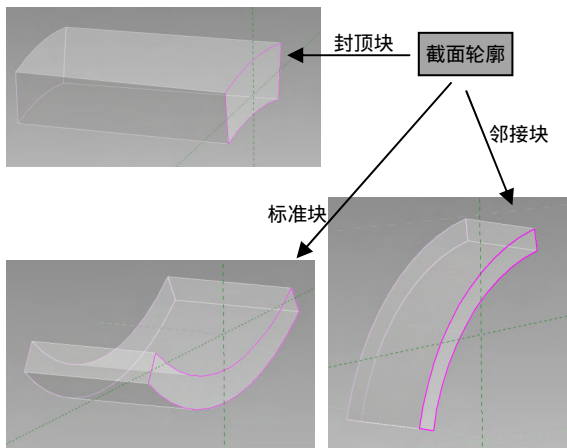


图 9 3 类管片块的轮廓形状
Fig.9 Profile of three types of segment block

建模结果数据 - Excel										
文件 开始 插入 页面布局 公式 数据 审阅 视图 ACROBAT 登录										
L22										
fx										
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
2	旋转角度	管片中心点坐标			管片法向向量			与设计线路偏差 (mm)		当前里程
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.955	0.298	-0.003	0.000	0	
4	2.749	3.758	1.174	0.000	0.955	0.298	-0.003	0.348	1.2	
5	5.498	7.515	2.352	0.001	0.954	0.301	-0.003	0.746	2.4	
6	1.963	11.272	3.526	-0.001	0.955	0.296	-0.002	1.291	3.6	
7	5.105	15.029	4.704	0.002	0.953	0.302	-0.001	2.658	4.8	
8	1.963	18.786	5.881	0.004	0.955	0.296	-0.002	4.780	6	
9	1.963	22.543	7.058	0.006	0.953	0.302	-0.001	0.381	7.2	
10	5.105	26.293	8.238	-0.001	0.951	0.308	-0.003	4.228	8.4	
11	5.890	30.042	9.458	-0.009	0.953	0.302	-0.001	0.215	9.6	
12	2.356	33.797	10.642	0.001	0.954	0.299	0.005	5.372	10.8	
13	2.356	37.551	11.830	0.013	0.953	0.304	0.001	3.795	12	
14	0.393	41.298	13.036	0.007	0.951	0.308	-0.004	1.069	13.2	
15	3.534	45.042	14.255	0.003	0.950	0.311	0.002	0.769	14.4	
16	0.393	48.785	15.474	0.000	0.951	0.308	-0.004	1.084	15.6	
17	2.356	52.529	16.693	-0.003	0.950	0.311	0.002	1.221	16.8	
18	5.890	56.268	17.926	-0.004	0.949	0.315	-0.002	0.443	18	
19	2.356	60.005	19.163	-0.001	0.950	0.313	0.004	2.057	19.2	
20	1.571	63.742	20.404	0.004	0.948	0.317	-0.001	0.548	20.4	
21	5.105	67.471	21.666	0.000	0.946	0.324	-0.001	0.192	21.6	
22	1.963	71.200	22.929	0.001	0.948	0.318	0.002	3.556	22.8	
23	1.571	74.929	24.192	0.001	0.946	0.324	-0.001	2.896	24	
24	0.785	78.650	25.479	-0.003	0.944	0.330	-0.001	1.505	25.2	

图 12 盾构隧道模型建模结果数据
Fig.12 Result data of shield tunnel modelling

4.3 盾构隧道模型数据共享

本文方法生成的盾构隧道模型数据与其他支持 IFC 软件的软件之间的数据互操作性得到了检验，如图 13、14 所示。

```

ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION(('ViewDefinition [CoordinationView]'),'2:1');
FILE_NAME('Xiamen','2015-08-06T11:51:45','(Zhongyu)',('','Autodesk Revit 2013','20120221_2030(x64)',));
FILE_SCHEMA(('IFC2X3'));
ENDSEC;
DATA;
#42= IFCGEOMETRICREPRESENTATIONCONTEXT($,'Model',3,1.000000000000000E-6,#39,#40);
#53= IFCPROJECT('3MOAhM68H9zRqMB6cvca00',#52,'ShieldTunnel_Project',$,$,$,#42,#35);
#33048= IFCCOMPOSITECURVE((#32947),.F.);
#33070= IFCCOMPOSITECURVE((#372,#374,#376,#378),.F.);
#33071= IFCCOMPOSITECURVE((#380,#382,#384,#386),.F.);
#33080= IFCARBITRARYCLOSEDPROFILEDEF(.AREA., $, #33070)
#33081= IFCARBITRARYCLOSEDPROFILEDEF(.AREA., $, #33071)
#33611= IFCSECTIONEDSPINE(#33408,(#33080,#33081),(#14));
#33612= IFCSECTIONEDSPINE(#33409,(#33082,#33083),(#15));
#33614= IFCSECTIONEDSPINE(#33411,(#33084,#33085),(#17));
#33615= IFCSECTIONEDSPINE(#33412,(#33086,#33087),(#18));
#33709= IFCSHAPEREPRESENTATION(#44,'Body',$,#33611);
#33710= IFCSHAPEREPRESENTATION(#44,'Body',$,#33612);
#33759= IFCSHAPEREPRESENTATION(#44,'Body',$,#33689);
#33760= IFCSHAPEREPRESENTATION(#44,'Body',$,#33690);
#33845= IFCSHAPEREPRESENTATION(#44,'Body',$,#33804);
#33887= IFCSHAPEREPRESENTATION(#44,'Body',$,#33836);
#34014= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,#33709);
#34015= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,#33710);
#34022= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,#33759);
#34023= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,#33760);
#34032= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,#33845);
#34033= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,#33887);
#34144= IFCARTESIANPOINT(51338.5614670169,25978.2865530568,-1.22681838681515);
#34146= IFCDIRECTION((0.345325670829692,-0.93848291463711,5.07629689339151E-7));
#34148= IFCDIRECTION((0.900752192321097,0.33144206220737,-0.280698499156059));
#34150= IFCAXIS2PLACEMENT3D(#34144,#34146,#34148);
#34151= IFCLOCALPLACEMENT(#359,#34150);
#34257= IFCPROXY('3MOAhM68H9zRqMB6cvca01',#52,'IcfTunnel',$,$,#338,#34014,.NOTDEFINED.,'ShTunnle_1');
#34259= IFCPROXY('3tqlS1ZfPlzgN2Ie5gIAIU',#52,'IcfTunnel',$,$,#339,#34015,.NOTDEFINED.,'ShTunnle_2');
#34261= IFCRELAGGREGATES($,$,$,#353,(#34257));
#34262= IFCRELAGGREGATES($,$,$,#34257,(#34342));
#34265= IFCRELDEFINESBYPROPERTIES($,$,$,#34342),#34311);
#34268= IFCRELDEFINESBYPROPERTIES($,$,$,#34679,#34680,#34681,#34682,#34683,#34684,...),#34316);
#34311= IFCPROPERTYSET($,$,'Pset_TunnelPart_1','TunnelPart_1',(#34321,#34322,...,#34327));
#34316= IFCPROPERTYSET($,$,'Pset_SegmentBlock_1','SegmentBlock_Property Set',(#34328,#34329,...,#34339));
#34321= IFCPROPERTYSETVALUE('PartType','IFCLABLE('Shield'),$);
#34329= IFCPROPERTYSETVALUE('Thickness','IFCPOSITIVELENGTHMEASURE('1200.',$);
#34342= IFCPROXY('35Q19xjZPC9ujc0BMSGhmX',#52,'IcfTunnelPart',$,$,#45,#34022,.NOTDEFINED.,'ShTunnlePart_1');
#34345= IFCPROXY('27zwQADVPA$0LYEKM1pj_2',#52,'IcfLiningSpace',$,$,#46,#34023,.NOTDEFINED.,'ShTunnleLin_1');
#34678= IFCPROXY('1vPaWwV1n3XOZybjOJIW41',#52,'IcfSegmentSpace',$,$,#34151,#34032,.NOTDEFINED.,'290910');
#34679= IFCPROXY('3Q4ikU2Iz4wwzMp_hnERWr',#52,'IcfSegmentBlock',$,$,#34151,#34033,.NOTDEFINED.,'290911');
#34680= IFCPROXY('3Q4ikU2Iz4wwzMp_hnERWr',#52,'IcfSegmentBlock',$,$,#34151,#34104,.NOTDEFINED.,'290912');
#34681= IFCPROXY('3Q4ikU2Iz4wwzMp_hnERWr',#52,'IcfSegmentBlock',$,$,#34151,#34125,.NOTDEFINED.,'290913');
#34682= IFCPROXY('3Q4ikU2Iz4wwzMp_hnERWr',#52,'IcfSegmentBlock',$,$,#34151,#34130,.NOTDEFINED.,'290914');
#34683= IFCPROXY('3Q4ikU2Iz4wwzMp_hnERWr',#52,'IcfSegmentBlock',$,$,#34151,#34137,.NOTDEFINED.,'290915');
#34684= IFCPROXY('3Q4ikU2Iz4wwzMp_hnERWr',#52,'IcfSegmentBlock',$,$,#34151,#34142,.NOTDEFINED.,'290916');
#34701= IFCRELCONTAINEDINSPATIALSTRUCTURE($,$,$,#34679,#34680,#34681,#34682,#34683,#34684),#34678);
...
ENDSEC;
END-ISO-10303-21;

```

图 13 盾构隧道 IFC 模型文件
Fig.13 IFC model file of shield tunnel

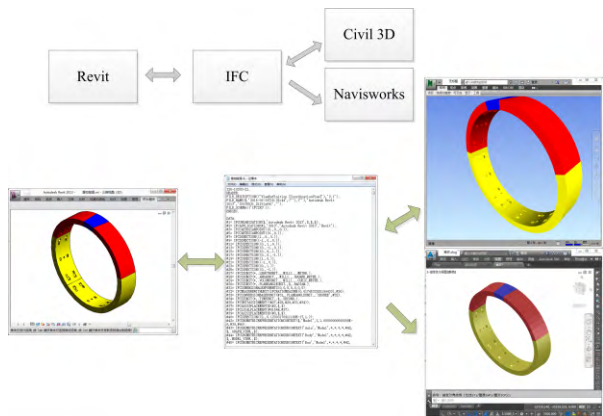


图 14 管片模型在 Revit、Civil3D 和 Navisworks 软件的数据共享示意图
Fig.14 Data sharing among Revit, Civil3D and Navisworks

图 13 是整个盾构隧道 IFC 模型文件的一部分，文献[15]提及的盾构隧道空间结构元素和物理结构元素均通过 IcfProxy 实体扩展的方式^[17]表达出来：#34257(IcfTunnel) #34342(IcfTunnelPart) #34345 (IcfLiningSpace)、#34678 (IcfSegmentSpace) #34679(IcfSegmentBlock)其中 #34257(IcfTunnel)和#34342(IcfTunnelPart)通过聚合关系语句#34262 (IcfRelagGregates) 关联。隧道管片块由两个截面轮廓 (#33080 , #33081) 通过#33611 (IcfSectioned Spine) 放样形成，所有的管片块都通过包含关系语句 (#34701) 包含在对应的管片块空间 (#34678) 中。#34342(IcfTunnelPart)通过属性定义实体#34265 (IcfRelDefinesByProperties) 与其属性集合#34311

(IfcPropertySet) 关联起来,隧道分部类型(PartType) 是#34311 的众多属性之一,其值为#34321 (shield)。

由于本文所扩展的 IFC 实体是通过将 IfcProxy 实体实例化的方式表达出来的,而 IfcProxy 是 IFC 标准框架支持的扩展方式之一^[18]。因此,本文所创建的 IFC 模型文件可以被所有支持 IFC 2x3 版本的 BIM 软件所识别。将使用本文所示的 Revit 建模模块所建立的管片模型输出为 IFC 文件后,可以被通用土木工程建模软件 Autodesk Civil 3D 和工程模拟软件 Autodesk Navisworks 完整的展示出来(图 14),表明了本文提出的方法形成的 IFC 文件可以较好地实现工程信息共享。

5 结 论

为更好地实现盾构隧道工程建设不同阶段、不同专业之间的信息交流和数据共享,促进建设效率的提升,本文借鉴 BIM 理念,针对盾构隧道的特点,开展了基于 BIM 技术的建模方法研究。

(1) 根据扩展的盾构隧道结构信息模型的 IFC 表达,提出了基于 BIM 技术的单个管片块建模方法,形成了参数化的管片块三维模型,为构建盾构隧道信息模型提供了基础构件。

(2) 结合盾构隧道的特点,分析隧道中心线路的组成,提出了详细的线路解算流程和步骤,在此基础上,进行盾构管片拼装与隧道建模,建立了盾构隧道建模流程和参数化建模方法,形成了基于 BIM 技术的盾构隧道结构模型建模方法。

(3) 对 Autodesk Revit 建模软件进行二次开发,实现了盾构隧道管片结构建模模块,并应用于某市地铁盾构隧道工程中,验证了本文所提方法的有效性和实用性。

(4) 研究表明,在统一的数据标准的基础上,建立基于 BIM 理念的盾构隧道信息模型,为实现工程信息的无损交换与充分共享探索了可行的途径和方法。本文所提出的基于 BIM 技术的盾构隧道信息模型建模方法,可为构建集三维地质、基坑工程结构、隧道工程结构、地面建筑结构于一体的岩土工程信息模型提供有益参考与技术支撑,有助于实现岩土工程信息化。

参 考 文 献

[1] LI XIAOJUN, ZHU HEHUA. Development of a web-based information system for shield tunnel construction projects[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 37(6): 146 - 156.

- [2] GRÖGER G, PLÜMER L. Topology of surfaces modelling bridges and tunnels in 3D-GIS[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2011, 35(3): 208 - 216.
- [3] VAN DER POEL J T, GASTINE E, KAALBERG F J. Monitoring for construction of the North/South metro line in Amsterdam, The Netherlands[C]//5th International conference on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Amsterdam: Taylor & Francis Group, 2006: 745 - 750.
- [4] YOO C, JEON Y, CHOI B. IT-based tunnelling risk management system (IT-TURISK) - development and implementation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(2): 190 - 202.
- [5] 宋仪, 郭年根, 李俊波, 等. 数字化隧道三维建模分析[J]. *隧道建设*, 2013, 33(2): 98 - 102.
- SONG Yi, GUO Nian-gen, LI Jun-bo, et al. Digital 3D modeling analysis on tunnels[J]. *Tunnel Construction*, 2013, 33(2): 98 - 102.
- [6] 苏伟伟. 隧道三维模型的建立与仿真实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- SU Wei-wei. The building of the 3D model and simulation for the tunnel[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [7] 高华, 蒋红斐, 张嘉峻, 等. 基于 OpenGL 的隧道三维建模[J]. *中南公路工程*, 2007, 32(3): 137 - 139.
- GAO Hua, JIANG Hong-fei, ZHANG Jia-jun, et al. The three-dimensional visualization of tunnel based on OpenGL[J]. *Central South Highway Engineering*, 2007, 32(3): 137 - 139.
- [8] 张建斌, 朱合华, 朱岳明, 等. 厦门翔安海底隧道数字化建模技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(6): 1237 - 1242.
- ZHANG Jian-bin, ZHU He-hua, ZHU Yue-ming, et al. Digital strata modeling and its application to Xiang'an subsea tunnel in Xiamen[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(6): 1237 - 1242.
- [9] 张洋. 基于 BIM 的建筑工程信息集成与管理研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- ZHANG Yang. Research on BIM-based building information integration and management[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [10] DAEGU CHO, NAM SEOK CHO, HUNHEE CHO, et al.

- Parametric modelling based approach for efficient quantity take off of NATM-Tunnels[C]//29th International Symposium of Automation and Robotics in Construction (ISARC2012). Eindhoven: [s. n.], 2012.
- [11] ANDRÉ BORRMANNA, MATTHIAS FLURLB, JAVIER RAMOS JUBIERREA, et al. Synchronous collaborative tunnel design based on consistency- preserving multi-scale models[J]. **Advanced Engineering Informatics**, 2014, 28(4): 499 - 517.
- [12] HEGEMANN F, LEHNER K, KÖNIG M. IFC-based product modeling for tunnel boring machines[C]// Proceedings of the 9th European Conference on Product and Process Modeling 2012. London: CRC Press, 2012: 289 - 296.
- [13] YABUKI N. Representation of caves in a shield tunnel product model[C]//Proceedings of the 7th European Conference on Product and Process Modelling 2008. London: CRC Press, 2009: 545 - 550.
- [14] LEE S, PARK S I, PARK J. Development of an IFC-Based data schema for the design information representation of the NATM tunnel[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2016, 20(6): 2112 - 2123.
- [15] 钟宇, 周少东, 陈健, 等. 基于 IFC 标准的盾构隧道结构数据模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊 2): 613 - 622.
- ZHONG Yu, ZHOU Shao-dong, CHEN Jian, et al. Study on shield tunnel structure data model based on IFC standard[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2017, 13(Supp.2): 613 - 622.
- [16] 张文萃, 穆世旭, 李家涛, 等. 盾构隧道通用管片排版设计与纠偏研究[J]. 施工技术, 2013, 42(13): 89 - 92.
- ZHANG Wen-cui, MU Shi-xu, LI Jia-tao, et al. Research on layout design and deviation correction of the general segment in shield tunnels[J]. **Construction Technology**, 2013, 42(13): 89 - 92.
- [17] 宋瑞恒. 盾构隧道通用管片排版与动态纠偏管理软件开发[D]. 上海交通大学, 2008.
- SONG Rui-heng. Development of software for composition and dynamic deviation correction of universal segments for shield tunnel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [18] 王勇, 张建平, 李久林. 基于 IFC 的建筑结构施工图设计信息模型描述[J]. 土木建筑工程信息技术, 2014, 6(4): 30 - 35.
- WANG Yong, ZHANG Jian-ping, LI Jiu-lin. IFC-based model description for structural working drawing[J]. **Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture**, 2014, 6(4): 30 - 35.
-
- 上接第 1866 页**
- [31] 刘华北, 宋二祥. 可液化土中地铁结构的地震响应[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 381 - 386.
- LIU Hua-bei, SONG Er-xiang. Earthquake induced liquefaction response of subway structure in liquefiable soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 381 - 386.
- [32] 邹德高. 地震时浅埋地下管线上浮机理及减灾对策研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- ZOU De-gao. Study on uplifting mechanism and mitigation measurement of the pipelines buried at shallow depth during the earthquake[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [33] 大崎顺彦. 地震动的谱分析入门[M]. 北京: 地震出版社, 1980.
- YORIIHIKO Ohsaki. An introduction to spectral analysis of seismic[M]. Beijing: Seismological Press, 1980.
- [34] 王振宇, 刘晶波. 成层地基非线性波动问题人工边界与波动输入研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1169 - 1173.
- WANG Zhen-yu, LIU Jing-bo. Study on wave motion input and artificial boundary for problem of nonlinear wave motion in layered soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(7): 1169 - 1173.
- [35] 卢华喜, 梁平英, 尚守平. 地基非线性波动问题中黏-弹性人工边界研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1911 - 1916.
- LU Hua-xi, LIANG Ping-ying, SHANG Shou-ping. Research on viscoelastic artificial boundary for problem of nonlinear wave motion in soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1911 - 1916.