

# 基于 BIM 技术的隧道全生命周期管理及应用研究

宋战平<sup>1,2,3</sup>, 肖珂辉<sup>1,2,3</sup>, 成 涛<sup>4</sup>, 郭 魏<sup>4</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;  
3. 西安建筑科技大学 隧道与地下结构工程研究所, 陕西 西安 710055; 4. 中铁北京工程局集团第一工程有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 建筑信息模型(BIM)是以数字技术为基础对工程项目进行管理的一种技术手段, 该技术正在引发一场建筑行业的革新。然而有两方面原因导致目前隧道领域对 BIM 技术的应用相对落后, 一是由于隧道工程领域引进 BIM 技术较晚, 二是因为其自身特点, 不能直接效仿民用建筑领域的相关标准及技术路线。本文以银西铁路环县隧道为依托, 将 BIM 技术引入到隧道工程的全生命周期管理之中; 介绍了 BIM 技术在各阶段的作用和优点, 并根据研究成果和工程实例的总结, 对 BIM 技术在中国隧道工程领域的发展做出了展望, 提出了两点建议, 为构建包括设计-施工-工后的全生命周期一体化管理提供了指导。

**关键词:** BIM 技术; 隧道工程; 全生命周期

**中图分类号:** U455.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2020)01-0047-07

## Study on tunnel whole life cycle management and application based on BIM technology

SONG Zhanping<sup>1,2,3</sup>, XIAO Kehui<sup>1,2,3</sup>, CHENG Tao<sup>4</sup>, GUO Wei<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China;

3. Institute of Tunnel and Underground Structure Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

4. China Railway Beijing Engineering Bureau Group First Engineering Co. Ltd., Xi'an 710100, China.)

**Abstract:** The Building Information Model (BIM) is a technical means of managing engineering projects based on digital technology. And it triggers a revolution in the construction industry. However, there are two reasons why the current application of BIM technology in the tunnel field is relatively backward in the field of housing construction. Firstly, the introduction of BIM technology in the field of tunnel engineering is relatively short time. Secondly, because of its' characteristics, tunnel can not directly follow the relevant standards and technical routes in the field of civil construction. Based on the Huanxian tunnel of Yinxi Railway, this paper introduces the BIM technology into the whole life cycle of tunnel engineering. This paper describes the functions and advantages of BIM technology at various stages. According to the summary of research results and engineering examples, this paper prospects the development of BIM technology in the field of tunnel engineering in China. And it puts forward two suggestions, which provides guidance for the construction of whole life cycle management, including design-construction-post-construction.

**Key words:** BIM technology; tunnel engineering; whole life cycle

建筑信息模型作为一种新的技术和理念, 是以三维数字技术为基础, 对工程项目设施实体与功能特性的数字化表达, 最大的优点在于集成化管理<sup>[1]</sup>, 建筑信息模型能够作为一个可视化模型引入建筑工程设计阶段, 能够作为施工信息数据库引入建筑工程施工阶段<sup>[2-4]</sup>, 同时还可以在运维阶段为维护人员提供一套基于 BIM 的设施维护管理系统<sup>[5,6]</sup>, 基于完整的 BIM 模型可描述建筑实体各

阶段(包括设计、施工、运维)的所有数据和信息, 各参与方可随时查询、利用、更新和完善 BIM 模型信息, 提高工程管理及决策水平。该技术最早在 2003 年起源于美国<sup>[7]</sup>, 随后在日本、韩国和欧洲各国大力发展。中国的 BIM 技术起步较晚, 但随着社会的快速发展, 随着人们可持续发展的意识逐渐增强, 国家开始大力号召发展绿色建造, 绿色建筑核心理念是“四节一环保”即节能、节

收稿日期: 2019-05-06

修改稿日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578447); 陕西省建设厅科技发展基金项目(2019-k39)。

第一作者: 宋战平(1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程领域的教学与科研工作。E-mail: songzhpyt@xauat.edu.cn

地、节水、节材与环境保护,而建筑企业借助 BIM 技术强大的信息管理和视觉展示能力<sup>[8]</sup>,可以更好地贯彻这一理念。因此,在过去的几年中 BIM 技术在中国飞速发展:秦海洋<sup>[9]</sup>以新鼓山隧道为依托工程,将 4D 模拟引入了隧道工程建设当中,为合理安排施工计划提供了参考依据。唐艳梅<sup>[10]</sup>以佛山地铁 2 号线为依托工程,将 BIM 技术运用到了隧道管片的排列中,利用 BIM 技术的可视化功能对隧道采用盾构法开挖中的管片排列问题进行了优化。但隧道工程 BIM 技术构件库平台缺失、相关标准的缺乏、管理混乱、利用率低、意识差等问题的存在<sup>[11]</sup>,导致其设计和施工的信息化管理明显落后于民用建筑工程领域。

由于隧道工程有其自身特点:首先,隧道工程呈带状分布,长度从几百米到几十千米,这与工业、民用建筑位于一个集中的区域截然不同;其次,隧道位于地下,与地质关系密切,往往地质勘察的准确度决定了隧道的设计质量;再者,隧道工程与民用建筑工程内容和属性截然不同。因此,BIM 技术在隧道工程领域的发展不能直接模仿民用建筑。综上可知,进一步开展 BIM 技术在隧道工程领域内的应用研究意义重大。

## 1 工程背景

以银西铁路环县一号隧道工程为依托,环县一号隧道位于甘肃省环县东山(见图 1),隧道全长 4 331.345 m,为一座单洞双线高速铁路黄土隧道,洞身围岩为 IV、V、VI 级土质围岩,围岩软弱,由于黄土本身具有极强的湿陷性和膨胀性,导致施工难度较大;该隧道开挖断面大,施工不当易导致坍塌,尤其环县一号隧道 DK372+870~DK372+925 段长 55 m,下穿浅埋沟,埋深最浅处仅约 5 m,围岩等级为 VI 级,这极大增加了隧道的施工难度。



图 1 隧道位置示意图

Fig. 1 Sketch of tunnel location

本文着重针对银西铁路环县一号隧道,介绍 BIM 技术从设计阶段到施工阶段再到后期运维阶

段的应用,真正意义地将 BIM 贯彻到建设工程的全生命周期之中。

## 2 设计阶段

由于黄土的特殊性,随着黄土开挖隧道断面的增加,施工难度急剧增加,再加上施工过程中开挖的多次扰动,导致围岩受力情况复杂且多变,极易发生围岩失稳,甚至发生崩塌,因此,合理的设计对大断面黄土浅埋隧道意义重大。

### 2.1 建立模型

一般而言,模型分为三类<sup>[12]</sup>:结构模型、施工设施模型和环境模型。本工程在设计阶段不考虑施工设施的扰动,故本项目模型一共分为两种,地层模型(环境模型)和结构模型。

#### 2.1.1 地层模型

高程点的采集是建立地形图的关键,高程点的密集程度和准确性影响着地形图的准确程度。因此,高程点的采集对地层模型的建立至关重要。目前高程点的采集主要有三种方式:人工测量法、无人机测绘法和地面三维激光扫描法。(1)人工测量法即测量人员利用水准仪或全站仪对指定点的高程进行测量记录,是最传统的高程点采集方式,该方法的优点是可根据精度、密度需要获得高程数据,但对于大区域、高精度、高密度地形图而言,该方法工作量大,且存在测量无法到达的限制区(如大峡谷、悬崖、峭壁等);(2)无人机测绘法是利用无人机为航摄平台获得某一区域的正射影像图和 DEM,从而获得相应地形图的方法,该方法有绘制速度快,对大比例尺地形图而言精度有保证等优点,但对于小比例尺地形图而言,其精度明显不足,且目前无人机航行时间较短,抗风能力差,导致该方法不适用于多风季节和大面积区域内的地形图绘制;(3)三维激光扫描技术是目前世界上最先进的 3D 数据获取方式,该方法可快速、无接触、高精度、高密度地获取高程点信息,且可方便地测绘到悬崖、断壁等一般测量技术难以达到的位置,但该方法采用的仪器价格昂贵,且由于引入国内时间较短,导致其兼容性较差,对采集到的数据处理软硬件要求高,处理周期较长。

本研究主要采用人工测量法对工程地段的高程数据进行采集,并利用 Autodesk 公司的 3D max 软件来完成地层模型建立,将前期所测得的高程点信息录入到 3D max 中,如图 2(a),即可生成相应的地形图,如图 2(b)。

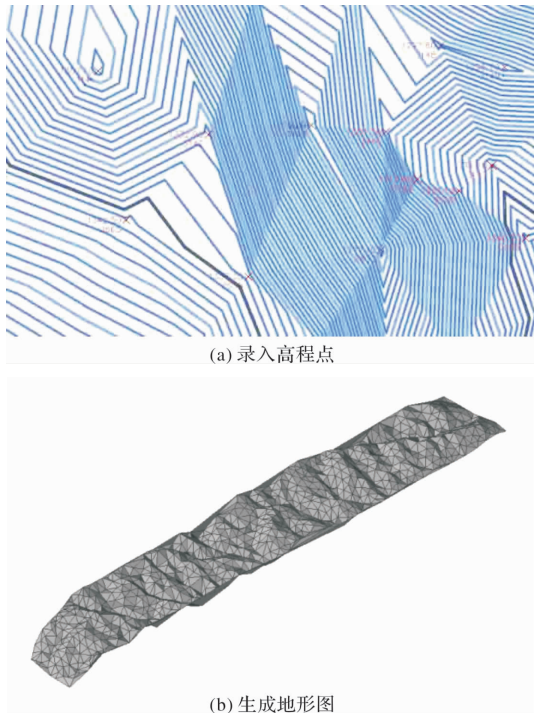


图 2 隧道地形图的可视化

Fig. 2 Visualization of tunnel topographic map

### 2.1.2 结构模型

隧道结构是隧道设计的关键, 隧道的支护方式、跨度大小等都对隧道的稳定性起到了巨大的影响. 结构模型的建立主要是利用 Revit 软件建立隧道施工过程中的各个构件(如钢架、锚杆、衬砌等). 由于 BIM 在很早之前就已经应用于民用建筑工程领域, 因此, 在建立结构(建筑)模型时, 可借助族库大师等插件直接从族库中导入所需构件并精确定位进行拼接, 同时可以便捷地改变构件参数. 但 BIM 技术在隧道工程领域的应用较晚, 目前并没有线上族库软件服务于隧道模型的建立, 针对此问题, 本工程在建立结构模型的同时构建了线下构件族库, 并且为了方便后续工作, 对构件进行参数化设置, 以便于构件参数的调整, 建立完成后的隧道支撑钢架模型如图 3 所示.

### 2.2 稳定性验算

隧道结构的稳定性影响着隧道使用的安全性和耐久性, 因此, 隧道设计过程中如何保证隧道的稳定性是隧道设计考虑的关键问题. 除支护方式以外, 初支时间、开挖方式和二衬时间等也对隧道的稳定性有显著影响, 选择合理的开挖方式和支护时间对隧道的安全性意义重大. 目前, 数学解析法和数值模拟法是隧道变形与受力分析的两大方法: 数学解析法是利用力学手段获得围岩变形和受力的闭合解, 该方法适用于简单受力的椭圆形洞室; 数值模拟法是利用基于有限元

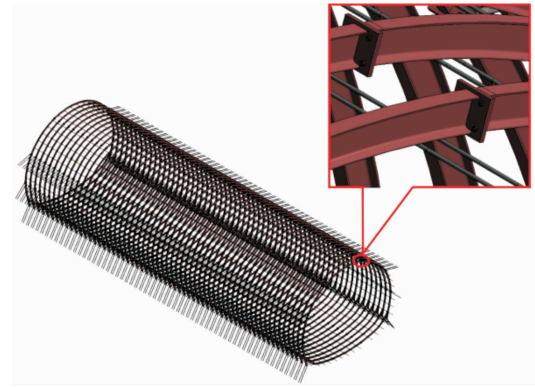


图 3 隧道支撑钢架模型

Fig. 3 Steel frame model for tunnel support

和离散元理论的分析软件对受力复杂的隧道和洞室进行施工模拟和分析, 从而获得变形和受力的一种方法, 该方法是目前最普遍使用的一种围岩稳定性验算方法.

对于任何数值模拟软件而言, 数值模型的建立都是第一步, 同时也是最基础的一步. 本工程借助 Revit 进行结构建模, 利用 Midas 有限元分析软件对不同开挖方法、支护时间等因素进行优化选择. Revit 最大的优点就在于它提供了可二次开发的 API 端口, 通过二次开发可直接与多种软件进行模型共享<sup>[13]</sup>. 有限元分析时将借助 Revit 建立的结构模型和 3DMax 建立的地层模型进行组合, 再通过适用于 Midas 的二次开发插件导入到 Midas 软件中, 直接设置参数、划分网格(见图 4)、设置施工步, 然后进行分析, 经过对多种施工技术的对比分析, 综合考虑经济 and 安全性等因素, 最终确定银西铁路环县一号隧道里程标号为 DK372+870~DK372+925 的大断面黄土隧道浅埋段采用双侧壁导坑法进行施工.



图 4 结构模型导入 Midas 网格划分后效果

Fig. 4 Effect of introducing structural model into Midas mesh generation

利用二次开发端口将模型导入有限元分析软件主要有三大优点: (1)减少了有限元分析软件本身的建模过程, 减小了设计者的工作量, 提高了经济效益; (2)若验算初步设计的支撑方式或断面形式发现变形过大或受力过大, 对隧道的安全性产生了不稳定因素, 需要改变设计方案时, 则可以通过 BIM 技术的参数化功能, 直接改变构件参



数以实现构件尺寸的快速变化,再次通过二次开发端口导入有限元模型进行验算,可方便快速地解决设计问题,提高了设计效率和质量;(3)利用有限元软件进行建模时,个别点的位置误差可能导致主隧道、附属洞室和土层间划分网格时出现不耦合问题,而通过二次开发端口直接导入的模型,能显著减少网格划分不耦合的现象。

### 3 施工阶段

#### 3.1 施工重难点可视化

以往由于技术限制,建筑模型设计的表现方式一直是二维图纸,而施工者往往要通过多张设计图相互对应的方式在自己的脑海中构造出设计者所设计的建筑物。但由于信息的不对等,施工人员会意错误,导致建筑工程违背原本设计意图的事件也不无发生。随着 BIM 可视化技术的发展和虚拟现实技术的诞生,空间建造及其施工方案的展示也有了强大的技术支持。BIM 技术以“所见即所得”的形式,将建筑物展示在人们的面前,为工程施工的重点和难点提供了清晰、直观地展示施工方案的可能。BIM 技术的可视化功能将复杂的平面布置简单化、空间化,让施工人员可以清楚而准确地了解到每一个构件的具体位置,为施工方案的选择和优化提供了便利条件。同时,还可以在此基础上进行 3D 虚拟漫游设置,将整个项目清楚、完整地表现出来。对于环县一号隧道而言,由于其围岩级别及埋深多变,隧道受力情况复杂,因此不同分段采用不同的开挖方法(见图 5),并对每种开挖方法进行了可视化展示,其中,三台阶法的施工展示动画截图如图 6 所示。

#### 3.2 施工控制

施工控制是建设项目管理的目标,它包括施工进度控制、施工质量控制和施工成本控制。

序号	分段里程		长度 m	围岩 级别	建议施工方法	地形及地质条件
	起始里程	终止里程				
1	DK370+386.31	DK370+406.31	20	V	明挖法	洞口浅埋段
2	DK370+406.31	DK370+406.58	0.27	V	明挖法	洞口浅埋段
3	DK370+406.58	DK370+436.58	30	V	三台阶预留核心土法	洞口浅埋段
4	DK370+436.58	DK370+460	23.42	V	三台阶预留核心土法	洞口浅埋段
5	DK370+460	DK370+600	140	V	三台阶预留核心土法	洞口深埋段
6	DK370+600	DK371+300	700	IV	三台阶法	洞口深埋段
7	DK371+300	DK371+350	50	V	三台阶法,设临时仰拱	下穿浅埋沟谷
8	DK371+350	DK371+780	430	IV	三台阶法	洞口深埋段
9	DK371+780	DK371+830	50	V	三台阶法,设临时仰拱	洞口浅埋段
10	DK371+830	DK372+110	280	IV	三台阶法	洞口深埋段
11	DK372+110	DK372+180	70	V	三台阶法,设临时仰拱	洞口浅埋段
12	DK372+180	DK372+620	640	IV	三台阶法	洞口深埋段
13	DK372+620	DK372+870	50	V	三台阶预留核心土法	洞口深埋段
14	DK372+870	DK372+925	55	VI	双侧壁导坑法	洞口深埋段
15	DK372+925	DK373+475	550	V	三台阶预留核心土法	洞口深埋段
16	DK373+475	DK374+535	1060	IV	三台阶法	洞口深埋段
17	DK374+535	DK374+640	105	V	三台阶预留核心土法	洞口深埋段
18	DK374+640	DK374+664.34	23.34	V	三台阶预留核心土法	洞口浅埋段
19	DK374+664.34	DK374+664.34	30	V	三台阶预留核心土法	洞口浅埋段
20	DK374+664.34	DK370+717.655	23.315	V	明挖法	洞口浅埋段

图 5 环县一号隧道围岩级别及开挖工法  
Fig. 5 Surrounding rock classification and excavation method of No. 1 tunnel in Huanxian county

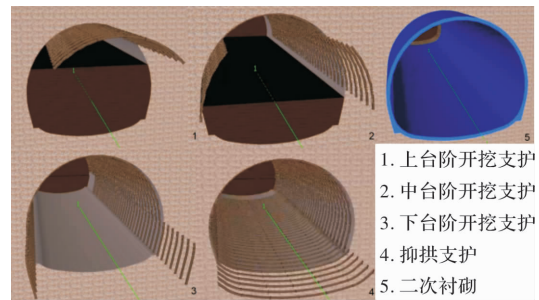


图 6 三台阶法施工展示动画  
Fig. 6 Animation of three-step method construction demonstration

Navisworks 软件即可简便地完成施工进度控制和成本控制。将先期模型导入到 Navisworks 当中,通过利用 TimeLiner 功能对隧道施工过程中每部分的计划开始、计划完成时间进行设定,在施工过程中实时更新实际开始和完成时间来实现对施工进度的控制,并及时根据要求工期调整施工任务。TimeLiner 的设置界面如图 7 所示(由于涉及商业机密,图中任务划分、进度计划与费用仅为

TimeLiner													
任务 数据源 配置 模拟													
添加任务 删除任务 复制任务 粘贴任务 删除任务 复制任务 粘贴任务 删除任务 复制任务 粘贴任务 删除任务 复制任务 粘贴任务 删除任务													
已激活	名称	状态	计划开始	计划结束	实际开始	实际结束	任务类型	附着的	材料费	人工费	机械费	分包商费用	总费用
<input checked="" type="checkbox"/>	DK374+717~DK374+723		2018/9/4	2018/9/8	2018/9/3	2018/9/7	构造	显式...	3,000...	2,000...	6,000...	800.00	11,80...
<input checked="" type="checkbox"/>	DK374+723~DK374+730		2018/9/9	2018/9/14	2018/9/7	2018/9/12	构造	显式...	3,250...	2,100...	5,800...	800.00	11,95...
<input checked="" type="checkbox"/>	DK274+730~DK374+736		2018/9/15	2018/9/19	2018/9/13	2018/9/18	构造	显式...	2,980...	1,900...	6,100...	750.00	11,73...
<input checked="" type="checkbox"/>	DK374+736~DK374+742		2018/9/20	2018/9/24	2018/9/19	2018/9/24	构造	显式...	2,800...	2,200...	5,900...	900.00	11,80...
<input checked="" type="checkbox"/>	DK374+742~DK374+750		2018/9/25	2018/10/1	2018/9/24	2018/9/30	构造	显式...	3,000...	2,100...	6,100...	800.00	12,00...

图 7 TimeLiner 设置界面  
Fig. 7 Setup interface of TimeLiner

说明举例, 无现实意义, 具体任务划分方法和精细化程度根据项目要求确定)。施工的费用控制同样可以利用该功能进行对比把控, 实时记录费用详情核算费用开支情况, 该功能还可以自定义费用项目, 可按企业要求对工程项目开销进行分类统计, 便于成本控制和优化。

对于施工质量控制, 本工程基于 BIM 的思想, 对隧道建设期进行数字化管理, 主要包括以下内容: 根据实际揭露的地层信息(含超前地质预报、地质素描等), 结合工程经验对地层进行动态更新; 根据施工过程中的地质条件的变化, 修改隧道设计参数; 对整个施工工况及进度进行记录, 并加以直观地显示, 以动态平衡的方式保证隧道施工的安全性和隧道的稳定性, 完成对施工质量的严格把控。

#### 4 工后阶段

对于隧道而言, 由于隧道开挖造成掌子面附近围岩应力重分布, 这种重分布应力绝大部分由隧道初支承担, 但不可避免的会产生围岩变形。对于本工程而言, 由于隧道开挖断面大, 且最浅埋深仅为 5 m 左右, 其开挖后应力重分布和围岩变形更加明显。因此, 建立隧道自动化实时监测预警系统至关重要。该系统不仅可以确定围岩稳定时间, 还可以延用至运维阶段, 监测运维阶段隧道稳定情况, 避免由隧道衬砌内部隐患累积导致重大安全事故的发生。综上可知, 工后阶段应包括二衬完成后的养护阶段和整个工程交付使用后的运维阶段。

自动化监测的内容主要包括应力监测和变形监测, 监测方案的实施主要依赖于施工阶段指定监测点预埋的传感器及其他软件、硬件系统。其中, 隧道应力监测是将固定测点钢筋计采集到的钢架受力情况和土压力盒采集到的支护结构与围岩间的受力情况, 通过数据传输系统传输到 PC 机进行显示并记录。当监测值大于设置预警值时, 系统将自动发出警报, 提醒施工人员或运维人员及时采取措施以免发生重大质量事故或安全事故。图 8 给出了自动化监测情况。在以往的隧道工程中, 变形监测往往是通过人工测量, 再将人工测量数据输入到管理平台上, 从而实现施工的信息化管理。但这种监测方法往往滞后于隧道真实变形发生时间, 不能及时监测到隧道变形。而本工程采用提前布置反光板和激光传感器, 通过激光传感器测量指定测点间的距离, 通过数据传输系

统传输到 PC 机端, 再通过数据处理系统计算获得并记录变形情况, 通过这种方法实现了隧道变形的实时监测。隧道的实时变形数据传输到平台后, 通过平台设置预警值, 当实时监测的隧道变形值超过预警值, 平台就会发出警报提醒管理者及时采取措施, 通过这种方法实现了隧道变形的实时预警。这种实时监测实时预警的隧道施工方法大大降低了安全事故的发生, 具有较好的社会效益和经济效益。图 9 给出了隧道自动化监测拓扑示意图。图 10 给出了隧道拱顶沉降和净空收敛进行实时监测的计算方法示意图。

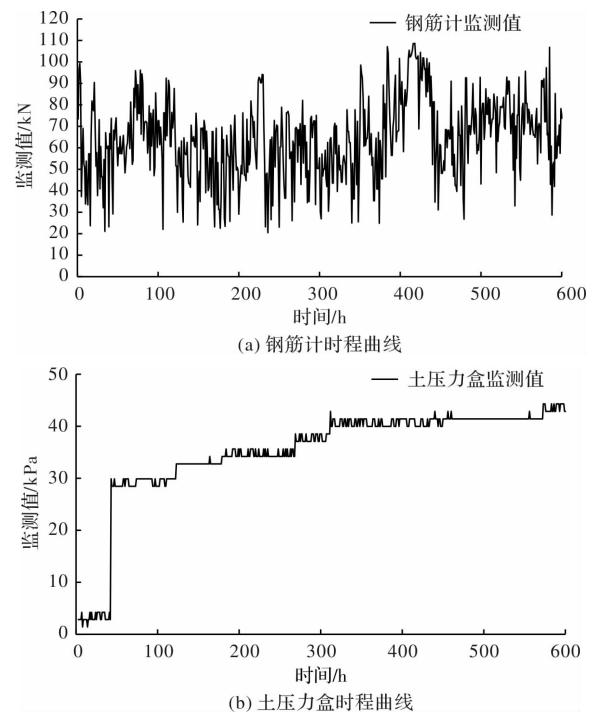


图 8 隧道受力自动化监测

Fig. 8 Automatic monitoring of tunnel stress



图 9 隧道自动化监测拓扑示意图

Fig. 9 Topological schematic diagram of tunnel automation monitoring

净空收敛监测: 假设  $AD$  间距初测值为  $L$ , 二次测得值为  $L_{AD}$ , 则净空收敛量  $\Delta L = L - L_{AD}$ , 如

图 10(a).

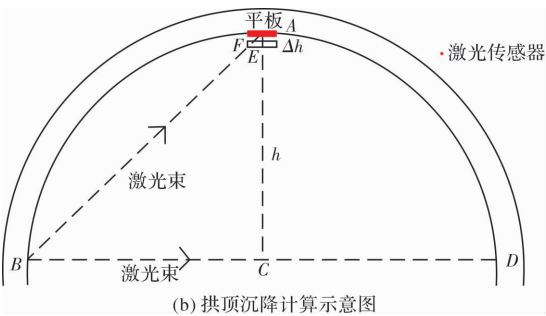
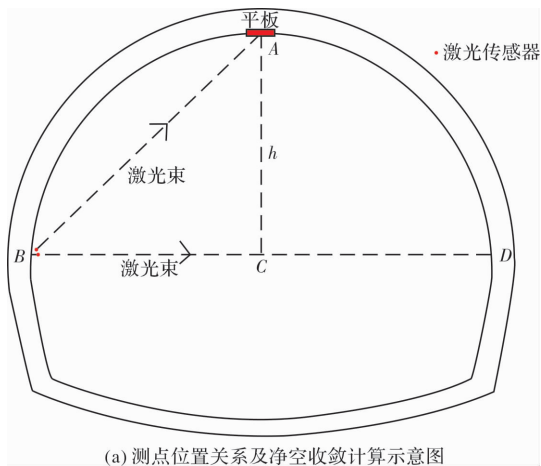


图 10 净空收敛及拱顶沉降技术示意图

Fig. 10 Sketch of clearance convergence and arch settlement technology

拱顶沉降监测：通过在拱顶布设一水平板，拱腰处布设二个激光位移传感器，通过激光测距仪测定传感器安装位置与平板的初始距离  $L_{AB}$ ；通过全站仪测出平板距  $BD$  水平线的初始垂直距离  $L_{AC}$ 。当拱顶下沉时，通过测量出三角形此刻斜边  $BF$  的长度  $L_{BF}$ ，如图 10(b)。由等比关系可知拱顶沉降量  $\Delta_h$  为

$$\Delta_h = \frac{(L_{AB} - L_{BF}) \cdot L_{AC}}{L_{AB}} \quad (1)$$

## 5 成果与展望

### 5.1 成果

设计阶段，本工程利用 BIM 技术参数化功能提高了模型稳定性验算和施工技术的选择效率。施工阶段，本工程利用 BIM 技术可视化功能，实现了施工技术的动态展示，为重难点施工提供了有力的技术支持；同时，依靠 BIM 技术强大的多维处理能力，进行了施工的质量、成本和进度控制，保证了工程高质量如期完成。施工完成后阶段，基于 BIM 的理念对隧道实施长期自动化监控，将 BIM 技术融入到了隧道的全生命周期，达到了问题及时发现及时处理的效果，保障了人民生命

安全和工程经济效益。虽然本工程的实时监测预警施工方法具有较好的效果，但缺乏多阶段和多专业间的数据信息协同管理方案和标准，信息交换存在障碍，仍然是 BIM 技术在隧道工程中的应用中亟待解决的问题。

### 5.2 展望

由于我国引入 BIM 技术相对较晚，且最早应用于民用建筑工程领域，虽然相较于欧美国家，我国的 BIM 技术发展并不缓慢，但 BIM 技术在隧道工程领域的应用仍然有待进一步研究与发展。

#### 5.2.1 构件库平台的建立

目前，国内已经存在多个民用建筑工程领域构件库平台，房屋建模仅需选择相应构件设置参数精确定位即可，其建模速度远高于隧道建模。究其原因，隧道工程领域尚未存在共享构件库，对于首次建模的设计者而言，每个构件都需要通过复杂的绘制方法建立族构件。因此，建立构件库平台是推动 BIM 技术在隧道工程领域高速发展的必要条件，同时也是隧道工程实现突破的必要条件。

#### 5.2.2 信息统一化隧道监测平台的建立

建立信息统一化隧道监测平台是实现集成管理的重要方法，是将建设方、设计方、施工方、监理方、项目咨询机构的项目管理工作有机统筹起来的重要手段。通过软件二次开发，研发出将施工进度信息、质量信息和自动化监测结果与模型相结合的 API 接口，让监测点的位置更直观的展示在人眼前；让任何参与方的任何工作人员能够基于同一数据库，获取该工程从设计阶段起的所有所需信息，实现工程设计和建设的信息对等。

### 参考文献 References

- [1] 何清华,陈发标. 建设项目全寿命周期集成化管理模式的研究[J]. 重庆建筑大学学报,2001,26(4):75-80.  
HE Qinghua, CHEN Fabiao. A research of life cycle integrated management pattern of construction project [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University,2001,26(4):75-80.
- [2] 胡长明,熊焕军,龙辉元,等. 基于 BIM 的建筑施工项目进度-成本联合控制研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(4):474-478.  
HU Changming, XIONG Huanjun, LONG Huiyuan, et al. Study on cost and schedule combined control of 4D model based on building information modeling (BIM) [J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(4):474-478.

- [3] 宋战平,史贵林,王军保,等. 基于BIM技术的隧道协同管理平台架构研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 117-121.  
SONG Zhanping, SHI Guilin, WANG Junbao, et al. Framework of collaborative management platform for tunnels based on BIM technology[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 117-121.
- [4] 林佳瑞,张建平. 我国BIM政策发展现状综述及其文本分析[J]. 施工技术, 2018, 47(6): 73-78.  
LIN Jiarui, ZHANG Jianping. A visual analysis of the research hotspot and evolution of BIM in China[J]. Construction Technique, 2018, 47(6): 73-78.
- [5] 王茹,孙卫新,张祥. 明清古建筑构件参数化信息模型实现技术研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(4): 479-486.  
WANG Ru, SUN Weixin, ZHANG Xiang. Research on parametric information model of ancient buildings of Ming and Qing Dynasties[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2013, 45(4): 479-486.
- [6] 何清华,钱丽丽,段运峰. BIM在国内外应用的现状及障碍研究[J]. 工程管理学报, 2012, 26(1): 12-16.  
HE Qinghua, QIAN Lili, DUAN Yunfeng. Current situation and barriers of BIM implementation[J]. Journal of Engineering Management, 2012, 26(1): 12-16.
- [7] ZHANG Limao, WU Xiangguo, DING Lieyun, et al. BIM-based risk identification system in tunnel construction[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 22(4): 529-539.
- [8] 肖珂辉,宋战平,史贵林,等. BIM技术及其在隧道工程中的应用[A]. 昆明:中国水利水电出版社, 2017.  
XIAO Kehui, SONG Zhanping, SHI Guilin, et al. BIM technology and its application in tunnel engineering[A]. Kunming: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2017.
- [9] 秦海洋,赖金星,唐亚森,等. BIM在隧道工程中的应用现状与展望[J]. 公路, 2016(11): 174-178.  
QIN Haiyang, LAI Jinxing, TANG Yasen, et al. Application status and prospect of BIM in tunnel engineering[J]. Highway, 2016, (11): 174-178.
- [10] 唐艳梅,张晨晨,王新龙. BIM技术在隧道管片排版中的应用[J]. 土工基础, 2019, 33(3): 290-294.  
TANG Yanmei, ZHANG Chenchen, WANG Xinlong. Application of BIM technology in tunnel segments[J]. Soil Engineering and Foundation, 2019, 33(3): 290-294.
- [11] 张建新. 建筑信息模型在我国工程设计行业中应用障碍研究[J]. 工程管理学报, 2010, 24(4): 387-392.  
ZHANG Jianxin. Study on barriers of implementing BIM in engineering design industry in China[J]. Journal of Engineering Management, 2010, 24(4): 387-392.
- [12] 高瑞龙,陈宜晨. 我国BIM研究热点及演进的可视化分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(4): 578-584.  
GAO Ruilong, CHEN Yichen. A visual analysis of the research hotspot and evolution of BIM in China[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(4): 578-584.
- [13] 史贵林,宋战平,户若琪,等. BIM在隧道工程中的应用及开发前景分析[A]. 昆明:中国水利水电出版社, 2017.  
SHI Guilin, SONG Zhanping, HU Ruoqi, et al. Application and development prospect analysis of BIM in tunnel engineering[A]. Kunming: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2017.

(编辑 沈 波)