

基于虚拟映射技术的城市地下空间保护开发的应用

张忠宇, 李 奥, 龚丹丹, 梁 顺, 高才驰

(苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019)

摘 要: 通过梳理和分析我国城市地下空间的保护开发现状, 揭示了城市地下空间保护开发存在的问题; 进一步, 为解决传统手段难以实现的地下空间信息整体性和精确性的问题, 基于 BIM 和 GIS 等虚拟映射技术, 建立了城市地下空间信息平台并提出城市地下空间保护开发方法, 明确了该方法的实施细节。研究成果在南京市惠民大道综合改造工程和扬子江大道快速化改造工程中得到成功应用, 可为城市地下空间保护开发提供一定的借鉴和指导。

关键词: 城市地下空间; 开发利用; 虚拟映射; BIM; GIS; 保护开发

中图分类号: TU984.11+3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)04-0198-06

0 引 言

随着社会经济和城镇化的快速发展, 城市将不可避免地面临人口密集、交通堵塞、土地紧缺等问题, 使得城市空间需求急剧增加与地面空间资源稀缺这一矛盾日益突出^[1]。当前单纯地向城市上部发展已无法拓宽城市空间资源, 而向地下要空间、要土地、要资源, 已成为现代化城市发展的必然^[2]。城市地下空间在缓解地面土地紧缺、扩大城市发展空间和功能、减少环境污染、提高城市抵御灾害能力、节约能源等方面发挥了积极的作用, 因此在城市化发展过程中, 各地均加大了对城市地下空间的开发利用^[3]。

进入 21 世纪以后, 中国城市地下空间的开发体量增长快速, 开发体系也不断完善, 在总体规模和发展速度上, 中国的城市地下空间开发利用水平已居世界首位, 在地下空间勘探、规划设计、法规管理、技术创新和人才培养等方面积累了宝贵的经验^[4]。但是我国大规模城市地下空间开发也引发了一些问题, 主要表现为:

(1) 城市地下空间建设引发了一些工程环境灾害问题, 如地下结构变形失稳^[5]、周边道路路面开裂^[6]、周边建(构)筑物破坏、地下水锐减和污染^[7]等。

(2) 一些并不满足财政收入或城市人口要求的城市盲目筹建轨道交通、地下道路和地下综合体, 造成社会资源的极大浪费, 也使得政府面临负债率过高和持续巨额亏损的风险。部分城市地铁项目在全面

开工后, 被政府紧急叫停, 开挖的基坑得到回填, 在城市环境受到破坏的同时也造成了巨大的财政资金损失^[8]。

(3) 城市地下空间规划的协同性和系统性较差, 一些城市地下空间的规划是后来拼贴、修补上去的, 尽管有了相关规划, 但是与地面道路、建筑设施的结合协调性极差。有些城市进行地下空间规划只是向地下要一点建筑空间, 而没有真正将之作为承纳城市发展的一种战略举措^[9]。

当前城市地下空间开发引发的问题已严重影响了地下空间开发的安全性和有效性, 其根本原因在于缺乏对城市地下空间资源属性的深入认识、科学的规划和有效的管理, 也缺乏相应法律法规的合理约束^[10]。同时城市地下空间的不可逆性、与经济发展的适应性、建设需求的动态性以及周边环境不良影响等均要求对地下空间实施保护, 建立系统的地下空间开发规划体制, 完善地下空间开发技术支撑, 以避免盲目跟风建设或无序开发引发的城市环境破坏和资源浪费。本文研究城市地下空间保护性开发策略, 梳理和分析城市地下空间保护性开发的现状, 进一步提出城市地下空间保护开发方法及技术, 旨在为国内大规模的城市地下空间建设提供一定的指导和借鉴。

1 城市地下空间保护开发现状

1.1 城市地下空间开发利用法规体系

近 30 年来, 我国各大城市开始大规模的地铁设施建设, 相应地也极大带动了地铁周边地下空间的开发利用。伴随地铁建设, 各城市相继制定适宜本地城

收稿日期: 2021-06-28

作者简介: 张忠宇(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事隧道与地下工程领域的规划、设计、咨询和科技工作。

市发展的地下空间管理规定(条例、办法、导则、通知),主要内容涉及规划编制审批、用地审批管理、工程建设管理、用地登记测绘、使用管理等方面内容,从法律、法规、规章、技术规范等层面系统性地梳理我国现行的地下空间法规体系。其中地下空间综合性规范主要涵盖了地下空间开发中的多个环节规定,涉及规划、项目立项、建设流程、工程管理、政策扶持、设施维护、法律责任等方面。同时针对专门的地下设施,例如人防设施、地下管线、综合管廊等,也制定了相应的规范性文件。

我国地下空间法规体系(部分)统计见表1。

表1 我国地下空间法规体系(部分)统计^[11-13]

类型	名称
综合性规范	《城市地下空间开发利用管理规定》(1997年)
	《上海市地下空间规划建设条例》
	《天津市地下空间规划管理条例》
	《广州市地下空间开发利用管理办法》
	《南京市地下空间开发利用管理办法》
	《武汉市地下空间开发利用管理暂行规定》
	《南昌市城市地下空间开发利用管理办法》
	《沈阳市城市地下空间开发建设管理办法》
	《西安市地下空间开发利用管理办法》
	《济南市城市地下空间开发利用管理办法》
	《本溪市城市地下空间开发利用管理规定》
	《郑州市城市地下空间开发利用管理暂行办法》
	《长沙市地下空间开发利用管理暂行办法》
	《厦门市地下空间开发利用管理办法》
	《深圳市地下空间开发利用暂行办法》
	《太原市城市地下空间开发利用管理办法》
专门制定的规范性文件	《北京市城市地下管线管理办法》
	《上海市民防工程建设和使用管理办法》
	《深圳市地下铁道建设管理暂行办法》
	《天津市地下空间规划管理条例》
	《广州市城市轨道交通管理条例》

分析我国现行的地下空间法规体系,可以得出如下结论:

(1)规划管理方面。一些城市建立了地下空间规划编制体系,强化了对各级地下空间规划编制内容、成果体系、表达方式等方面的详细规定,进一步规范了地下空间规划的编制工作,也使得城市地下空间规划的严肃性、科学性和规范性得到显著提升。

(2)开发管理方面。现行的相关法规较少,对开发主体、竞争机制、鼓励政策的相关研究严重缺失,制约了地下空间开发利用的活力,对于如何通过鼓励多种主体参与、引入竞争机制和相关优惠政策,实现地下空间的良性发展等方面未有相应的指导性对策。

(3)建设管理方面。现有法规主要对地下室、地铁、人防工程、地下管线的建设作出了相应规定,但缺乏对地下综合体、地下商业街、地下建筑物连通空间等相关研究,对于地下消防和防灾等未有相关规定。

(4)使用管理方面。只是后期运维的安全管理,较为单一。

总体上,当前我国已有一些规划、管理层面的系统性地下空间开发和保护措施,但是技术层面仍十分匮乏,而地下空间建设往往需要具体的解决方法和相应的技术支撑。

1.2 城市地下空间开发利用面临的挑战

《城市地下空间开发利用“十三五”规划》^[14]指出:我国城市地下空间开发利用的系统性不足和基本情况掌握不足问题尤为突出,表现为:(1)城市地下空间之间连通性较差,缺乏联系和贯通;(2)城市地面和地下空间协调不足,缺乏衔接,甚至相互矛盾,安全隐患突出;(3)地下空间开发利用基本现状掌握不足,未能摸清早期建设的地下空间开发利用的基本情况;(4)数据共享不足、沟通不畅、统计口径和标准不一致。

在城市核心区内进行地下空间开发尤其是修建地铁时,由于其埋深较浅,周边建筑及地下设施较多,施工对周围环境的影响更大^[15]。我国地铁建设过程中也多次发生重大安全事故(见图1),造成一定的人员伤亡和重大经济损失,也引发了极为负面的社会影响。运营地铁隧道也发生了多起突发侵限安全事故,比如2021年3月4日深圳地铁1号线深大至桃园下行线区间隧道顶部被勘察钻具击穿(见图2)^[16]、2021年5月24日成都地铁8号线珠江路至顺风上行区间隧道不慎被击穿、2017年12月6日深圳地铁11号线红树湾南-后海(往碧头方向)区间隧道被打桩施工作业击穿等。城市地下空间建设和运营中发生的安全事故表明了当前我国城市地下空间开发中缺乏相关的保护措施。



图1 地铁建设引发的安全事故

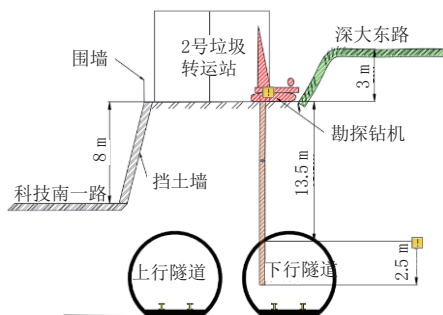
2 城市地下空间保护开发方法

2.1 虚拟映射技术

虚拟映射(数字孪生)是指真实世界中的物理对



(a) 地铁隧道受损情况



(b) 横剖面

图2 深圳地铁1号线深大至桃园下行线区间隧道顶部被勘察钻具击穿事故^[16]

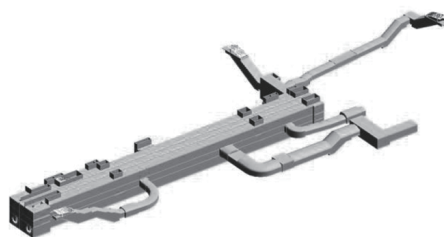
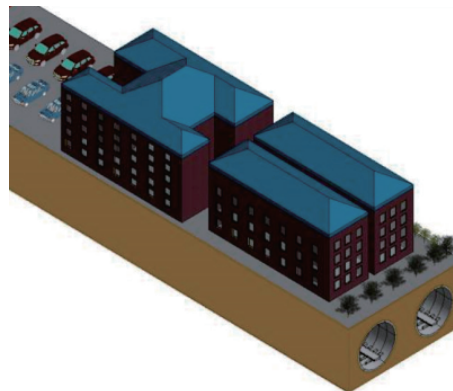
象与其数字模型之间的精确映射关系。虚拟映射技术旨在充分利用物理对象、运行历史和状态等数据,集成多学科、多物理量、多尺度的虚拟仿真,在虚拟空间中完成模型映射,从而实现物理对象的全生命周期过程的精细模拟和精确感知。虚拟映射技术在国内应用最深入的是工程建设领域,其中代表性的技术为建筑信息模型(BIM)和地理信息系统(GIS)技术^[16-17]。

建筑信息模型(BIM)是以三维数字信息为基础,集成了建筑工程项目的工程数据信息和三维模型,着重于分析和存储建筑构件的构造过程和空间基础信息。当前BIM技术的可视化及数据分析特性为快速寻找专业内及专业间的碰撞问题提供了可能。土建专业的碰撞问题主要为“软碰撞”,即净空不足问题,多专业之间的碰撞问题多因实施先后顺序或专业间沟通不畅导致的“硬碰撞”,即空间关系重叠问题^[18]。根据碰撞检查报告的构件ID进行准确定位,并根据属性面板的信息筛选有效的碰撞点,从而清晰明了地找寻碰撞位置、碰撞原因及碰撞类型等信息。BIM能够提供精细化的项目构件信息,但也存在无法加载大范围的地理环境空间信息的弊端,而地理信息系统(GIS)技术侧重于地理空间环境信息的宏观表达,能快速处理大量的地理空间信息数据,但无法创建结构内部精细化的微观模型^[19]。

城市地下空间的开发本质是在复杂的城市地理

环境中建造多种形式的地下结构,因此基于BIM+GIS技术平台建立城市地下空间三维信息模型,能够解决单一技术手段所难以实现的三维信息的整体性和精确性问题。利用GIS平台提供的丰富的空间地理环境信息,使得地下结构BIM信息模型可以在真实的城市地理环境中实现空间定位和周边环境分析,而BIM模型自身包含了地下结构的精确信息,由此可以实现城市地下空间工程的规划、勘察、设计、施工及运营等全寿命周期内的安全管理^[20]。

地铁车站BIM模型^[20]见图3, GIS与BIM融合模型^[21]见图4。

图3 地铁车站BIM模型^[20]图4 GIS与BIM融合模型^[21]

2.2 基于虚拟映射技术的城市地下空间保护开发方法

地下空间开发是一个整体,其规划、开发、管理与信息化建设理应在一个集成与整合的框架中进行。而地下空间开发保护需要涉及城市地下空间开发的各个环节,既要关注地下空间结构的工程安全,也要保障周边建(构)筑物的环境安全。基于BIM和GIS技术,建立城市地下空间保护信息平台,首先加载城市地下空间三维模型库,实现海量三维地理信息数据的整体表达,进而对地下建(构)筑物、工程地质等信息进行管理,开展地下空间分层管理、立体化展示和智能分析,同时形成一套地下空间数据标准,实现地下空间数据的标准化建库和管理。

城市地下空间周边限制条件众多,既要满足规划退距要求,还要考虑重要建筑设施、地下工程、管线及文物等防护要求。因此在城市地下空间开发过程中,应提出基于虚拟映射技术的城市地下空间保

护开发方法,以避免后期盲目建设对既有地下空间的扰动和影响,保护既有的地下空间,以实现地下空间更科学地规划、更合理有序地开发利用。

城市地下空间保护开发方法实施路线图见图5。

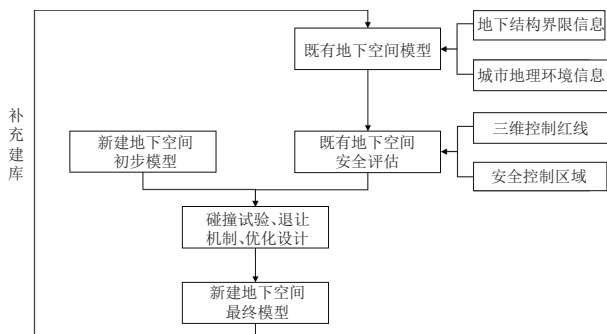


图5 城市地下空间保护开发方法实施路线图

基于虚拟映射技术的城市地下空间保护开发方法实施细节如下:

(1)根据城市地下空间保护信息平台中的既有地下空间三维信息数据,查明既有地下空间的类型和规模,明确既有地下空间的三维界限。

(2)开展城市既有地下空间安全评估,对可能影响既有地下空间安全的三维空间进行风险等级划分,提出既有地下空间三维控制红线和安全控制区域。

(3)建立新建地下空间BIM模型,开展新建地下空间与既有空间碰撞试验,基于退让机制辅助新建地下空间决策,确保新建工程采取合理的线路走向和空间布局,避免对既有地下空间产生不良影响。

(4)城市地下空间建设过程中加强城市地下空间信息的及时采集、建库和管理系统建设,推动城市地下空间保护信息的整体性、精准性。

3 工程应用

3.1 惠民大道综合改造工程

惠民大道是南京市建宁西路过江通道南岸接线第一条高等级被交道路。根据前期建宁西路过江通道研究过程中交通分析成果及专家意见,为避免大量过江车辆涌入城西干道及建宁路,加剧主城区路网拥堵,惠民大道节点宜采用“T型”互通立交“快接快”方式衔接,将过江交通流尽量、尽快引导到快速环路系统进行疏解。结合惠民大道规划及市内各相关部门意见,将惠民路现状双向4车道高架改建为双向6车道隧道,并设置4条匝道实现过江交通与惠民路间交通的快速转换。惠民大道综合改造工程南起惠民大道与新兴路交叉口,北至惠民大道与城

河南路交叉口,长约2.47 km;全线随同路段建设的综合管廊长约2.47 km,其中3仓断面长度约为1.32 km,双仓断面长度约为1.15 km。工程主要包括惠民大道高架桥改建为双向6车道隧道,建宁西路过江通道与惠民大道地下互通匝道,惠民大道干线管廊,沿线辅路、人非慢行系统的改造及相关市政管线的改迁等。

惠民大道综合改造工程平面图见图6。



图6 惠民大道综合改造工程平面图

建立惠民大道综合改造工程BIM模型,对不同方案进行快速三维模拟分析;同时与周边环境结合,以充分展现设计意图,在分析项目经济性、可行性的基础上,缩短决策时间,提高决策精确度。路线方案设计完成后,通过构建三维限界模型,进行限界碰撞检测,复核线路平、纵线位关系,对线路间关系进行精细调整,修正限界错、碰、漏段落,优化断面形式,从而节省工程造价(见图7、图8)。

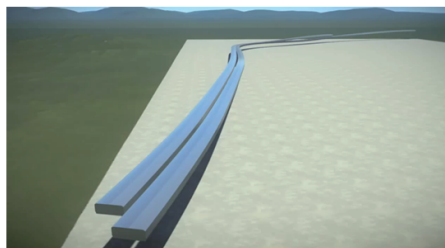


图7 限界碰撞试验



图8 主线结构与建筑限界

通过GIS技术对地下空间周边环境信息进行集成并建立模型,完成周边地形地貌和建筑物的地理位置定位及空间分析;将GIS模型中的数据导入BIM中,通过高精度的参数化建模,准确反映地下空间的边界和参数信息,将数字地形模型与地下空间结构模型无缝融合。在周边地理环境信息的基础上,对地下空间的合理布局进行研究,当现场环境和地下结构变化时,可以在模型中直接修改相关信息。基于三维可视化技术,直观地展示地下空间与周边环

境的关系。通过 GIS 和 BIM 技术的结合,开展了多种地下互通方案和地表建筑物布局的研究(见图 9、图 10)。同时基于构建的三维场地模型,分析工程基坑与周边建筑及其基础间关系(见图 11),使得设计人员对于结构设计边界条件的把控更加精准。

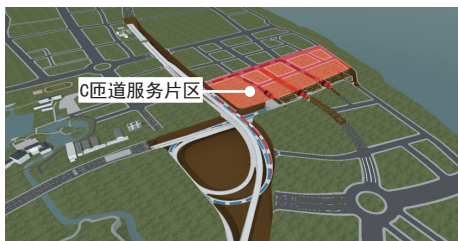


图 9 方案一

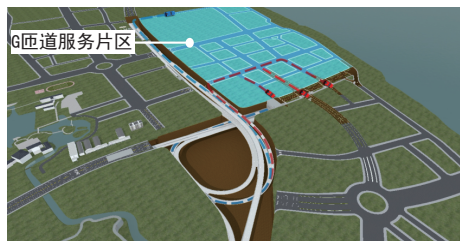


图 10 方案二

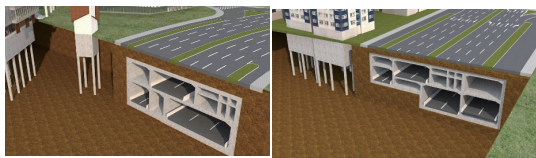


图 11 工程基坑与周边建筑及其基础间关系模型

3.2 扬子江大道快速化改造工程

扬子江大道是南京市规划的重要城市快速路之一,但未实现真正的“快速”。随着城市建设的发展以及滨江风光带的建成,该道路存在着过街设施配套不足、交叉口转向功能不完善、辅道及人非慢行系统缺失等问题(见图 12),因此开展扬子江大道快速化改造对完善南京主城快速路网络格局具有重要的意义。项目主线为双向 6 车道,设计速度 80 km/h;辅道为双向 4 车道,设计速度 40 km/h,路线全长 7.1 km。



图 12 扬子江大道快速化改造工程

项目包含道路工程、城市隧道、综合管廊、人行过街通道、桥梁等多专业内容,特别是隧道穿越申遗保护区、长江防洪堤;综合管廊穿越既有道路、桥梁桩基、地铁车站、既有河道;人行过街通道顶管施工等复杂工况。项目建设过程中,依托无人机为载体的倾斜摄影数据,构建了工程周边建筑物的三维 GIS 模型,使得 BIM 与 GIS 技术得到进一步结合(见图

13、图 14),成功完成了线路设计,完善了沿线被交道转向功能,对汉中门匝道桥爆破拆除和草场门隧道桥静力切割的成功实施、草场门隧道对宝船遗址公园的最大程度避让保护起到了指导作用,确保了工程建设中周边建(构)筑物的安全,并提出了综合管廊与下穿隧道共支护的协同建设技术,减少了远期规划的基础设施建设对现有地下空间的影响。

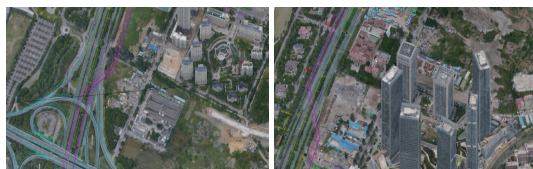


图 13 周边环境模型



图 14 隧道 BIM 模型

4 结 语

(1)基于 BIM+GIS 技术平台建立城市地下空间信息三维模型,能够解决传统手段所难以实现的地下空间信息整体性和精确性的问题。提出了基于虚拟映射技术的城市地下空间保护开发方法,明确了地下空间保护开发的实施细节和步骤。

(2)将基于虚拟映射技术的城市地下空间保护开发方法应用于南京市惠民大道综合改造工程和扬子江大道快速化改造工程,开展了地下结构与地表建筑物优化布局、既有地下结构保护、综合管廊与下穿隧道共支护协同建设等研究和设计工作,实现了城市地下空间的保护开发。

(3)城市地下空间保护开发方法及技术的提出,旨在推动城市地下空间信息技术与行业技术的融合发展,也为城市地下空间保护开发提供新的对策。

参考文献:

- [1] 王秀英,王梦恕.城市的安全发展与地下空间利用[J].中国安全科学学报,2003,13(5):72-74.
- [2] 李鑫.城市地下空间开发利用的若干思考[J].中国建筑金属结构,2021(1):82-83.
- [3] 孔令曦,徐梅.城市地下空间保护性开发必要性和措施[J].上海城市发展,2006,38(1):20-22.
- [4] 钱七虎.中国城市地下空间开发利用的现状评价和前景展望[J].民防苑,2006(增刊1):1-5.
- [5] 张成平,张顶立,王梦恕.等.城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J].岩土力学,2010,31(增刊1):303-309.
- [6] 刘仲武,吴萍,陈帅.等.基于地铁施工安全事故统计规律的致险因

- 素关系研究[J].现代城市轨道交通,2021(2):75-80.
- [7] 薛禹群,张云.长江三角洲南部地面沉降与地裂缝[J].华东地质,2016,37(1):1-9.
- [8] 吴冰柔.内蒙古包头市地铁项目 PPP 融资模式的成本收益分析[D].天津:天津商业大学,2019.
- [9] 陈小坚,李海华.拓展建设“节约型城市”的新思路,合理开发利用城市地下空间——访中国工程院院士钱七虎先生[J].现代城市研究,2005(6):14-16.
- [10] 程光华,苏晶文,李采,等.城市地下空间探测与安全利用战略构想[J].华东地质,2019,40(3):226-233.
- [11] 陈丽.我国城市地下空间开发利用法律规制研究[D].海口:海南大学,2017.
- [12] 季方.我国城市地下空间权法律研究[D].重庆:西南政法大学,2014.
- [13] 邢俊.我国城市地下空间开发法律制度规范化研究[D].苏州:苏州大学,2013.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.住房城乡建设部关于印发城市地下空间开发利用“十三五”规划的通知(建规[2016]95号)[EB/OL].2016-05-25[2016-06-27].http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201606/t20160622_227841.html.
- [15] 张顶立.城市地下工程施工诱发的安全事故及其控制[J].科技导报,2017,35(5):31-37.
- [16] 深圳市南山区应急管理局.深圳地铁1号线“3.4”隧道结构被打穿事故调查报告[R].深圳:深圳市南山区应急管理局,2021.
- [17] 吴浩,杨帆,王斌,等.基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术研究[J].宇航总体技术,2021,5(2):7-13.
- [18] 罗伟,水滨.BIM技术在武汉市轨道交通12号线双墩站初步设计阶段中的应用[J/OL].土木建筑工程信息技术,1-7[2021-06-02].
- [19] 苏立勇,周轶,张志伟,等.基于BIM-GIS技术的城市轨道交通附属一体化工程应用研究——以北京地铁19号线一期工程为例[J].隧道建设(中英文),2020,40(11):1541-1551.
- [20] 邦宁.基于BIM+GIS技术的铁路隧道设计应用研究[J].四川建筑,2017,37(2):128-130.
- [21] 贾斯博,刘慧明,孙晓满,等.基于BIM与GIS技术的地铁隧道三维建模方法的研究[J].中国建材科技,2020,29(4):88-89.

(上接第197页)

从管节边缘渗出,内衬未见破坏。在外水压作用下,HDPE内衬的位移较小,肉眼不易分辨,并且大部分情况下,水在较低的压力时沿内衬与混凝土之间的间隙流出管节,之后水压无法继续上升。观察内衬管节的HDPE内衬与混凝土管壁的黏结界面,可见到HDPE内衬与混凝土基本没有黏结力,外水压可轻易渗透进HDPE内衬与混凝土管壁的缝隙。

所以,内衬管节中HDPE内衬受到外水压力后可以形成畅通的排水通道,不会导致内衬材料损坏。

3 结论

通过对内衬HDPE钢筋混凝土管HDPE内衬材料检测、复合管试验的相关研究,得出以下结论:

(1)根据本次检测结果并结合现有HDPE相关材料标准,提出HDPE内衬材料的耐化学试剂性能和物理性能指标要求。

(2)表面抗拔试验的破坏模式都是锚固键从混凝土中拔出,并且单个锚固键的锚固强度标准值可以

达到1.13 kN。

(3)HDPE材料对内衬钢筋混凝土管节受力没有影响,故HDPE内衬厚度可以计入混凝土保护层厚度。

(4)内衬管节中HDPE内衬受到外水压力后可以形成畅通的排水通道,外水压力不会导致内衬材料损坏。

参考文献:

- [1] 高礼雄,丁汝茜,姚燕,等.混凝土的微生物腐蚀:机理、影响因素、评价指标及防护技术[J].材料导报,2018,32(3):503-509.
- [2] 张小伟,张雄.混凝土微生物腐蚀防治研究现状和展望[J].材料保护,2005(11):52-56.
- [3] 张小伟,张雄.混凝土微生物腐蚀的作用机制和研究方法[J].建筑材料学报,2006(1):52-58.
- [4] 柳献,张宸,叶宇航,等.深层盾构排水隧道PVC防水防蚀内衬力学性能试验研究[J].隧道建设,2016,36(12):1428-1434.
- [5] 朱少锋.聚氯乙烯防蚀内衬材料的应用[J].混凝土与水泥制品,2009(2):38-40.
- [6] JC/T 2280—2014,内衬PVC片材混凝土和钢筋混凝土排水管[S].