

姜叶翔, 黄江华, 羊逸君, 等. 地铁设施安全保护监测技术体系建设研究[J]. 华南地震, 2021, 41(2): 149–156. [JIANG Yexiang, HUANG Jianghua, YANG Yijun, et al. Research on the Construction of Safety Protection and Monitoring Technology System of Subway Facilities[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(2): 149–156]

地铁设施安全保护监测技术体系建设研究

姜叶翔¹, 黄江华², 羊逸君¹, 吴勇^{3,4}, 王烨晟^{3,4}, 张文君², 李忠诚²

(1. 杭州市地铁集团有限责任公司, 杭州 310014; 2. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 杭州 310014; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 210014; 4. 浙江省智慧轨道交通工程技术研究中心, 杭州, 310014)

摘要: 基于当前地铁设施保护安全监测工作实践总结, 针对地铁设施保护监测技术体系建设开展研究。重点阐述了地铁设施安全保护监测技术体系建设意义, 并基于现行规范、规程及实施案例调研分析, 对涉及设施保护监测技术及相关要求的条文中尚未作统一及明确的部分, 以及安全保护监测的对象、监测等级、监测范围、监测项目、监测频率及相关技术要求等进行了系统性梳理研究, 研究建立了一套内容全面、概念清晰、逻辑关系明确的地铁设施安全保护监测技术体系, 该体系可为各类涉及外部影响源情况下各类大型市政地下工程结构保护监测工作的开展提供针对性参考。

关键词: 地铁设施; 安全保护监测; 技术体系

中图分类号: TU476

文献标志码: A

文章编号: 1001–8662(2021)02–0149–08

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.02.21

Research on the Construction of Safety Protection and Monitoring Technology System of Subway Facilities

JIANG Yexiang¹, HUANG Jianghua², YANG Yijun¹, WU Yong^{3,4},
WANG Yesheng^{3,4}, ZHANG Wenjun², LI Zhongcheng²

(1. Hangzhou Metro Group Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 3. China Electric Power Construction Group East China Investigation and Design Research Institute, Hangzhou 310014, China; 4. Engineering Research Center of Smart Rail Transportation of Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Based on the summary of the current work practice of safety protection and monitoring of subway

收稿日期: 2021–02–05

基金项目: 浙江省重点研发计划项目: “地铁隧道保护监控系统及病害防治关键技术研发与应用”(2020C01102); 浙江省重点研发项目: “软弱地基上工程建设对邻近地铁设施的影响机理、结构灾变及防治关键技术与工程应用(2017C03020); 浙江省建设科研项目: “基于物联网杭州地铁建设风险分级管控与隐患排查治理平台研发及应用”(2018K140)

作者简介: 姜叶翔(1979–), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地铁工程建设安全与地铁保护技术。

E-mail: 38919553@qq.com

通信作者: 王烨晟(1984–), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 地下工程安全风险、安全监测技术。

E-mail: wang_yc2@ecidi.com

facilities, the article conducts research on the construction of the subway facility protection and monitoring technology system. The significance of the construction of technical system for safety protection and monitoring of subway facilities is emphasized. Based on the current norms, regulations and implementation case, the provisions concerning facility protection monitoring technology and related requirements that have not yet been unified and clear, as well as the objects, monitoring levels, monitoring scopes, monitoring items, monitoring frequencies of safety protection monitoring, and related technical requirements have been systematically combed and studied. A set of safety protection monitoring technology systems for subway facilities with comprehensive content, clear concepts, and clear logical relationships have been established, which can provide a targeted reference for the protection and monitoring of various large-scale municipal underground engineering structures involving external sources of influence.

Keywords: The subway facilities; Safety protection monitoring; Technical system

0 引言

21 世纪以来,我国地铁建设进入高潮期,据不完全统计,至 2019 年底,国内城市轨道交通运营总里程约 6882.13 km,共有 40 个城市开通城市轨道交通。当前,行业内针对地铁设施及结构保护等方面,已经出台了多个管理规定及技术规程^[1-5],初步明确了相关基本技术和管理要求,对地铁设施监测也提出了政策性、原则性的要求,但内容尚不够细化,特别针对地铁车站、隧道或者其他配套设施监测点布置、监测频率、监测控制值等技术要求有待进一步完善,针对设施本体及其外部作业影响工程的监测实施尚未进行整合统一,其影响区的监测要求尚未明确。

基于上述问题,本文重点研究就现有标准中针对地铁设施保护监测技术中未作明确及不足的部分开展研究,力求形成统一完善的地铁设施安全监测技术体系。

1 地铁设施安全保护监测等级及体系框架

工程监测等级的划分及确定,是各类监测方案设计及监测实施技术的基础,可基于明确监测工作的方向性、针对性及重点部位,是确定监测项目、监测频率、精度指标、控制值指标、监测技术要求等的重要依据。考虑到地铁设施的安全保护监测工作,从对象上涉及本体与其周边环境及外部作业相互影响关系,其监测等级的确定,需综合考虑本体健康状态、抗变形能力以及其周边环境岩土体状况、周边环境状况和外部作业工程自身风险等级及影响程度等安全性要求等多方面。目前,现行相关规范、规程^[1-5]中,针对地铁

设施的监测等级尚未明确并提及,但相关的等级及评定标准主要有如下几个方面表述。

1.1 地铁设施本体安全等级

针对设施本体安全等级,现行相关规范中有“隧道本体自身等级”(结构安全状况)、“现状评估等级”,“服役状态等级”,“健康度”等相关概念用词表述,其一般基于本体的监测数据、巡查检测情况及养护情况进行综合判断。其中,文献[3]中,将其分为 1~4 级(由严重~一般)进行考虑、文献[6]中将其分为 5 级(由一般~严重)进行考虑,现行行业标准 CJJ-T 202-2013^[2],在其第 3.3.3 条“城市轨道交通结构的现状评估应在外部作业实施前,通过现状调查、检测、测量和计算分析等手段,评估当前城市轨道交通结构的安全状态及持续抗变形能力和承载能力,并应确定相应的结构安全控制指标值”,该条款明确了结构自身等级及安全状态的确定应结合检测、测量等手段进行综合确定。综上所述,针对设施本体的安全等级,一般划分为 4 级到 5 级,但前述各文献中,尚未就设施本体安全等级与工程监测等级之间的关联关系予以明确阐述,对应监测实施技术分级缺少。

1.2 外部作业对地铁设施本体影响等级

针对各外部作业工程,其对地铁设施影响程度等级划分,现行各类标准中均有表述,一般按外部作业距离地铁设施本体的远近程度以及作业的类别进行综合考虑,分为 3~5 级^[2,5,7],但同样尚未明确其与工程监测等级的关联关系,在当前的监测实践中,对影响区范围内的监测点布设、监测技术等级选用等存在一定随意性。

1.3 地铁设施安全保护监测等级及其框架搭建

针对地铁设施安全保护监测尚未有明确的监测等级概念阐述，导致现有的地保监测工作实践中，其监测等级的确定依据，基本仍依照 GB50911-2013^[7]执行，但该标准适用于建设期，而相较于运维期，由于在监测对象、监测范围、监测项目及监测技术要求等要素方面均有不同，直接套用存在不合理处。此外，当前的地保监测实践中，基本将设施本体、外部作业及其影响区（影响区内的周边环境）这三类对象，基本作为相互独立的体系进行考虑，进而分别建立独立的监测体系及技术要求，所应用的规范及标准涵盖建设期及运维期^[7-12]两大类，导致其监测基准点、测量部位、测量时间、周期、精度、标准要求等均存在较大差异，尚无法准确反映上述三类监测对象相互影响作用机理以及运维期地铁设施保护监测工作的整体性。

研究明确的保监测合理化的监测等级，进而建立整体统一的监测体系，是当前地铁设施安全监测工作实践中亟需解决的问题。鉴于此，本文将设施本体、外部作业及其影响区（影响区内周边环境）三者及相互影响进行统一考虑，进而制定一体化的监测等级体系框架，设置原则如下：

（1）等级设定体现以设施本体保护为基本原则。针对设施本体，重点考虑其自身安全服役状态，其监测等级应与其安全状态、病害状态及其结构变形剩余允许变形量等相关联；针对外部作业及其影响区，则综合考虑外部作业对本体影响程度及其影响对象的状况进行确定；

（2）当设施本体状态不佳或破坏比较严重的情况下，其对应的外部作业工程自身的变形允许量等，应通过监测等级分级作出明确限制，具体表现为对应的监测项目需增加、监测频率需增加、监测布点密度增高、监测实施精度提高等；

（3）考虑与建设期监测等级分级相^[7-8]统一，其监测等级分级宜按三级划分，以分别设置对应监测技术要求。

基于上述原则，本文建立如下地铁设施安全监测等级划分参考标准：

（1）针对地铁设施本体及外部作业影响等级分级概念，其针对地铁设施本体等级确定的依据如表 1 所示。

（2）表 2 中，其 A、B、C 级确定的具体指标，可参见文献 4 中附录 B 相关内容（表 3），该分级综

合考虑了外部作业影响风险大小、影响程度大小、距离地铁设施本体远近、外部岩土体等因素分级较为合理，其中 A 级表明地铁设施受外部作业工程影响程度最高，需要采取严格的保护措施。

基于等级划分框架，进而建立地铁设施安全保护监测总体技术框架如图 1。

2 监测技术体系建设及应用

2.1 外部作业工程影响区及监测范围体系建设

针对浙江软土地区地质，在图 1 监测技术体系框架下，基于相关文献调研及设施保护安评及监测工作实践案例数据总结，本文建立了较为常见的外部基坑工程、外部隧道工程（穿越工程）、

表 1 地铁设施本体安全保护监测等级参考表
Table 1 Reference table of monitoring level of safety protection of subway facilities

本体等级	保护等级		
	A	B	C
I	一级	一级	一级
II	一级	一级	一级
III	二级	二级	二级
IV	二级	二级	三级

表 2 外部作业工程及其影响区监测等级参考表
Table 2 Reference table of monitoring grade of external work and its affected area

本体等级	保护等级		
	A	B	C
I	一级	一级	一级
II	一级	一级	二级
III	二级	二级	三级
IV	二级	三级	三级

表 3 轨道交通结构安全状况分类^[4]
Table 3 Classification of rail transit structure safety conditions^[4]

轨道交通结构安全状况	轨道交通结构变形或结构损伤情况
I 类	变形大或结构损伤严重；
II 类	变形较大或结构损伤较为严重；
III 类	除 I 类、II 类、IV 类以外的情况；
IV 类	未铺轨运营、变形较小且结构性能良好；

旁侧桩基工程、上覆堆载卸载(包括上方基坑工程),对其影响范围、影响程度、影响分区以及对应的监测范围进行了初步明确,具体可参见表 4。

2.2 外部作业工程监测项目、测点布置、频率体系建设

针对外部作业工程,在表 2 确定的不同监测等级条件下,可进一步分级建立对应的监测项目、

测点布置、监测频率及监测实施精度要求体系,本文以外部基坑工程作业为例进行建设。

(1)外部作业工程监测项目体系。监测项目体系建设,应分别考虑外部作业工程本体特点及其影响区情况,基于不同工程监测等级,建立分级监测项目体系,以求做到分级合理、重点突出、实践有效。

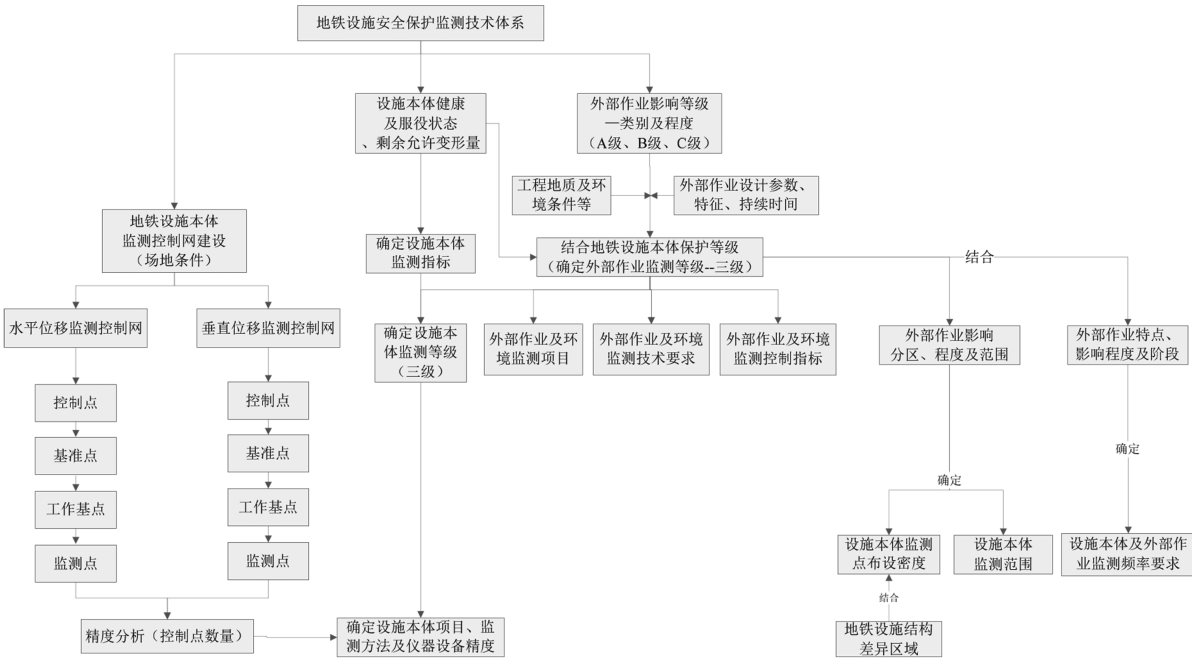


图 1 地铁设施安全保护监测技术体系总体框架

Fig.1 Overall framework of safety protection and monitoring technology system of subway facilities

表 4 软土地区外部工程施工对邻近既有地铁隧道影响监测范围参考体系^[12-15]

Table 4 Reference system for monitoring scope of influence of external engineering construction on adjacent existing subway tunnels in soft soil area^[12-15]

外部作业类型	工程影响区		监测实施范围	
	主要影响区	一般影响区	主要影响监测范围	一般影响监测范围
外部桩基施工	桩基施工及荷载距隧道的水平距离 $2D$ 范围(D 为既有隧道直径)	桩基施工及荷载距隧道的水平距离 $2\sim 4D$ 范围	桩基施工及荷载距隧道的水平距离 $3D$ 包络范围	桩基施工及荷载距隧道的水平距离 $3\sim 6D$ 包络范围
外部基坑工程	$2H$ 范围(H 为基坑开挖深度)	$2\sim 4H$ 范围	$2H$ 范围(H 为基坑开挖深度)	$2\sim 4H$ 范围
盾构穿越工程	隧道正上/下方及 $2D$ 范围(D 为新建隧道直径)	隧道正上/下方及 $2\sim 3.5D$ 范围	隧道正上/下方及新建隧道在既有隧道垂直投影处向两端至少各延伸约 $3.5D$ 且至少需延伸至两隧道净距 $2D$ 处。	新建隧道在既有隧道垂直投影处向两端至少各延伸 $3.5\sim 6.5D$ 范围且至少需延伸至两隧道净距 $4D$ 处。
上覆堆载工程	地面堆载外侧 $1.5B$ 范围内	地面堆载外侧 $1.5\sim 2.5B$ 范围	堆载正下方及堆载边线外侧 $1.5B$ 范围内	地面堆载边线外侧 $H+D$ 或 $2.5B$ 范围

表 5 外部基坑工程监测项目
Table 5 External foundation pit engineering monitoring projects

序号	类别	监测项目	监测等级		
			一级	二级	三级
1	外部工程本体	围护结构深层水平位移	应测	应测	宜测
2		围护结构顶部竖向位移	应测	应测	宜测
3		围护结构顶部水平位移	应测	应测	宜测
4		支撑轴力	应测	可测	可测
5		坑底隆起	应测	可测	可测
6		围护结构内力	宜测	可测	可测
7		围护结构裂缝	应测	宜测	可测
8	工程影响区	土体深层水平位移	应测	应测	应测
9		坑外地下水位	应测	应测	应测
10		地表沉降	应测	应测	应测
11		围护结构侧向土压力	宜测	可测	可测
12		土体孔隙水压力	应测	可测	可测
13		土体分层竖向位移	宜测	可测	可测

基于表 5，针对外部工程本体的监测项目主要体现控制变形为主，内力为辅原则，重点监测区域应为工程所影响地铁设施侧；针对其工程影响区，应对水位、地层变形、地表沉降、孔隙水压力等进行有效监测，严密监控其作为外部影响源对地铁设施的影响情况。

(2)外部作业工程监测布点体系。针对监测点的布设，在图 1 总框架基础上，除应根据监测等

级高低有区分外，还应根据外部作业工程影响区的影响程度划分(表 4)，进行合理化布设，可参见表 6 进行设定。

(3)外部作业工程监测频率体系。针对外部工程监测频率的设定，在对应监测等级分级的基础上，应综合考虑外部作业工程影响阶段进行确定，一般成槽阶段其频率稍低，开挖阶段频率高，且与地质条件相关联(表 7)。

表 6 外部工程及其影响区监测点布设参考(基坑)
Table 6 Reference for layout of monitoring points in external engineering and its influenced area (foundation iit)

序号	监测项目	布设位置	布点间距					
			外部作业工程监测 等级为一级		外部作业工程监测 等级为二级		外部作业工程监测 等级为三级	
			主要影响 区	一般影响 区	主要影响 区	一般影响 区	主要影响 区	一般影响 区
1	墙体深层水平位移	布设在地铁设施侧	10~15 m		15~20 m		20~30 m	
2	围护结构顶部竖向及水平位移	布设在地铁设施侧	10~15 m		15~20 m		20~30 m	
3	坑底隆起	布设在影响地铁设施区域侧	10~15 m		15~20 m		20~30 m	
4	围护结构内力	布设在地铁设施侧	10~15 m		15~20 m		20~30 m	
5	围护结构裂缝	布设在地铁设施侧	裂缝处		裂缝处		裂缝处	
6	围护结构侧向土压力	布设在地铁设施侧	10~15 m		15~20 m		20~30 m	

(转下表)

(接表 6)

序号	监测项目	布设位置	布点间距					
			外部作业工程监测 等级为一级		外部作业工程监测 等级为二级		外部作业工程监测 等级为三级	
			主要影响 区	一般影响 区	主要影响 区	一般影响 区	主要影响 区	一般影响 区
7	土体深层水平位移	布设在影响区范围	10 m	20 m	15 m	25 m	20 m	30 m
8	坑外地下水位	布设在影响区范围	10 m	20 m	15 m	25 m	20 m	30 m
9	地表沉降	布设在影响区范围	5 m	10 m	15 m	25 m	20 m	30 m
10	土体孔隙水压力	布设在影响区范围	10 m	20 m	15 m	25 m	20 m	30 m
11	土体分层竖向位移	布设在影响区范围	10 m	20 m	15 m	25 m	20 m	30 m

表 7 外部作业工程监测频率(基坑)
Table 7 Monitoring frequency of external work(foundation pit)

施工工况		外部基坑工程监测等级		
		外部作业监测等级为一级	外部作业监测等级为二级	外部作业监测等级为三级
围护结构施工期间		1 次/2 d	1 次/3 d	1 次/7 d
基坑开挖 深度(m)	≤10	1 次/1 d	1 次/1 d	1 次/2 d
	>10	2 次/1 d	2 次/1 d	1 次/1 d
底板浇筑完成 14 d 后		1 次/1 d	1 次/1 d	1 次/2 d
底板浇筑完成 28 d 后		1 次/3 d	1 次/3 d	1 次/5 d
顶板施工完成后		1 次/7 d	1 次/10 d	1 次/15 d

2.3 地铁设施本体安全监测项目、测点布设、频率及技术体系建设

(1)设施本体监测项目体系建设。设施本体监测项目的确定应根据本体结构的特点、对应监测等级分级、所处工程影响区分区的要求合理确定，并能准确反映监测对象的变化特征和安全状态。本文结合等级分级框架以及当前地保监测工作实践，建立综合明挖法结构、盾构法及顶管法结构、矿山法结构、高架结构、地面结构以及交界面等特殊结构位置的地铁设施监测项目体系(图 3)。

(2)设施本体监测点布设体系。设施本体监测点布设体系，在不同监测等级分级，应准确能反映监测对象实际状态、位移和内力变化规律，以及可分析当前结构安全状态要求。本文以明挖法车站及盾构法隧道地下结构为例，建立明确地铁设施监测布点体系(表 8)。

(3)设施本体监测频率体系。设施本体的监测频率，应考虑等级分级、外部工程特点，并考虑人工监测及自动化监测项结合方式，本文以明挖法及盾构法地下结构为例，初步建立如下频率体系(表 9)。

3 总结

本文基于当前地铁设施安全保护监测工作实践，综合相关文献、工程案例总结分析，提出了针对地铁设施安全保护监测及其外部作业工程监测等级划分标准。研究建立了地铁设施安全保护监测体系框架；明确了将外部作业影响工程本体、外部工程影响区及其周边环境、地铁设施本体三大类对象作为地铁设施保护的监测实施对象；建立了基于外部作业工程影响分区的监测范围划定标准；制定了针对外部作业影响工程监测的具体技术要求体系，并提出了将监测点布设密度与监测等级及其所处影响区双重关联，以及监测频率与监测等级和外部作业工程施工阶段双重关联的监测实施方案设计理念，并分别以外部基坑工程及明挖法车站及盾构法隧道本体结构为例进行了说明。该体系的建立，有助于促进当前地铁设施监护工作实践更加合理化及针对性，并可为其他涉及各类地下工程保护、监护工作提供重要参考及借鉴意义。

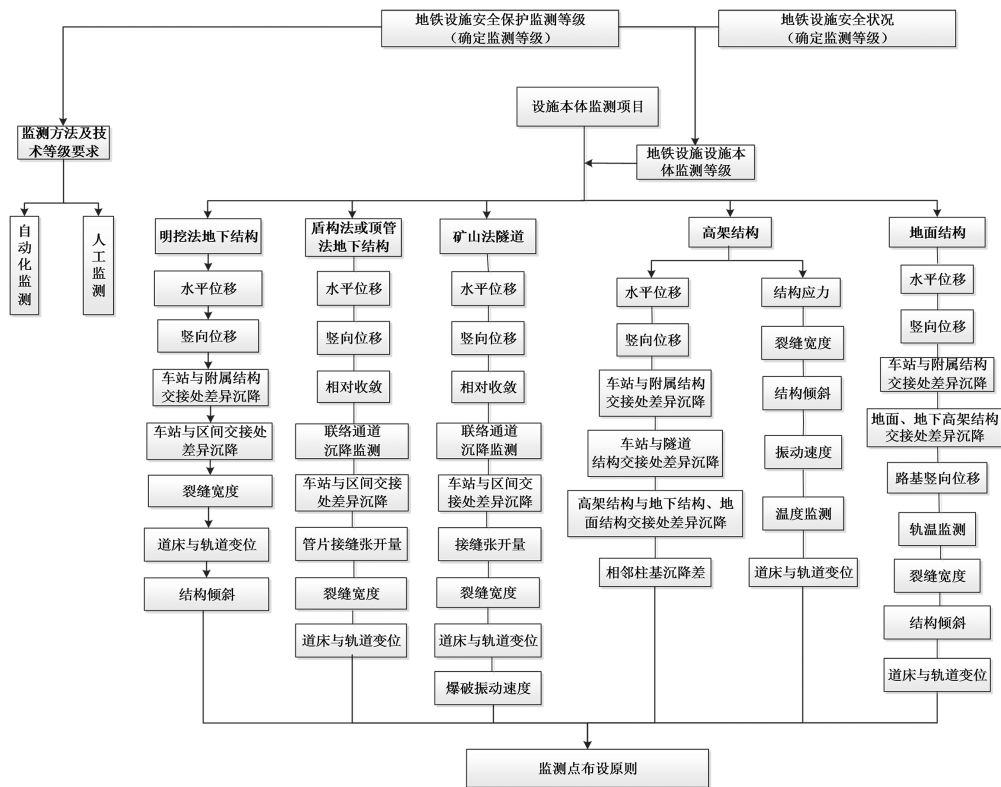


图 3 地铁设施本体安全保护监测项目体系框架图^[16-18]

Fig.3 System framework of safety protection monitoring project of subway facility ontology^[16-18]

表 8 地铁设施监测点布设体系(明挖法车站及盾构法隧道结构)^[2-4]

Table 8 Layout system of subway facilities monitoring points (open-cut station and shield tunnel structure)^[2-4]

序号	监测项目	监测点位置	明挖法车站及盾构法隧道结构监测点布点原则		
			监测等级一级	监测等级二级	监测等级三级
1	车站结构水平位移	设施结构底板、拱顶、侧墙	每 6~10 m 布置一个断面	每 10~20 m 布置一个断面	每 20~50 m 布置一个断面
2	车站结构竖向位移	设施结构底板、拱顶、侧墙	每 6~10 m 布置一个断面,与水平位移同点	每 10~20 m 布置一个断面,与水平位移同点	每 20~50 m 布置一个断面,与水平位移同点
3	车站与附属结构交接处差异沉降	车站与附属结构交接处	宜在交接处两侧各布设 3 组	宜在交接处两侧各布设 2 组	宜在交接处两侧各布设 1 组
4	车站与区间交接处差异沉降	车站与区间交接处	宜在交接处两侧各布设 3 组	宜在交接处两侧各布设 2 组	宜在交接处两侧各布设 1 组
5	裂缝宽度	结构裂缝位置、结构变形缝两侧	裂缝两侧均匀布设	裂缝两侧均匀布设	裂缝两侧均匀布设
6	结构倾斜	车站侧墙	车站侧墙	/	/
7	隧道结构水平位移	设施结构底板、拱顶、侧墙	每 2~6 m 布置一个断面	每 8~12 m 布置一个断面	每 12~18 m 布置一个断面
8	隧道结构竖向位移	设施结构底板、拱顶、侧墙	每 2~6 m 布置一个断面,与水平位移同点	每 8~12 m 布置一个断面,与水平位移同点	每 12~18 m 布置一个断面,与水平位移同点
9	道床与轨道变位	道床的纵、横断面上,两条轨道上	每 2~6 m 布置一个断面	每 8~12 m 布置一个断面	每 12~18 m 布置一个断面

表 9 明挖法及盾构法地下结构监测频率体系

Table 9 Monitoring frequency system of underground structure by open cut and shield tunneling method

类别	地铁设施保护监测等级	施工前准备	外部作业施工前	外部作业施工过程中	外部作业施工完成后	工后沉降
人工复核监测	一级	测点布设、测点高程	1 次/3 d	1 次/3 d	1 次/7 d	1 次/30 d
	二级	程初始值采集(3 次)	1 次/7 d	1 次/7 d	1 次/15 d	1 次/30 d
	三级		1 次/10 d	1 次/10 d	1 次/20 d	1 次/30 d
自动化监测	自动化监测		1 次/4 h	1 次/1 h~3 h	1 次/6 h	1 次/1 d 数据稳定, 停止监测
	自动化监测	测点布设、测点高程初始值采集(3 次)	1 次/6 h	1 次/4 h	1 次/12 h	1 次/1 d 数据稳定, 停止监测
	自动化监测		1 次/8 h	1 次/6 h	1 次/16 h	1 次/1 d 数据稳定, 停止监测

参考文献:

[1] 中华人民共和国建设部.城市轨道交通运营管理办法[S]. 北京:中华人民共和国建设部,2005.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ/T 202-2013 城市轨道交通结构安全保护技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50308-2017 城市轨道交通工程测量规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

[4] 浙江省住房和城乡建设厅. DB33 T1139-2017 城市轨道交通结构安全保护技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

[5] 上海市城乡建设与管理委员会. DG/T J 08-2170-2015 城市轨道交通结构监测量测规范[S]. 上海:同济大学出版社,2015.

[6] 上海市城乡建设和交通委员会. DG/TJ08-2123-2013 盾构法隧道结构服役性能鉴定规范[S]. 上海:上海市建材业市场管理总站,2013.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50911-2013 城市轨道交通工程监测技术规范[S]. 北京:中国建筑出版社,2014.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50308-2008 城市轨道交通工程测量规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[9] 中华人民共和国铁道部. TB10101-2009 铁路工程测量规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2010.

[10] 浙江省住房和城乡建设厅. DB33 T1096-2014 建筑基坑工程技术规程[S]. 浙江:浙江工商大学出版社,2014.

[11] 江苏省住房和城乡建设厅. DGJ32-J195-2015 江苏省城市轨道交通工程监测规程[S]. 南京:江苏凤凰科学技术出版社,2016.

[12] 北京市质量技术监督局. DB11/T 915-2012 穿越城市轨道交通设施检测评估及监测技术规范[S]. 北京:北京市质量技术监督局,2012.

[13] 刘冠兰. 地铁隧道变形监测关键技术与分析预报方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2013.

[14] 徐春明,汪春桃,孙泽信,等. 地铁保护区变形自动化监测技术应用研究[J]. 工程勘察,2014(12): 70-74.

[15] 李日东. 浅埋暗挖地铁车站施工监测技术[J]. 铁道标准设计,2006(7): 64-66.

[16] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2014: 253.

[17] 张笑星. 地铁隧道结构变形和地铁运营安全自动监测的研究和应用[J]. 现代隧道技术,2008(s1): 191-197.

[18] 陈涛.隧道及地铁工程预警控制平台建设[J]. 现代隧道技术,2018,55(6): 42-52.