

特殊结构裂缝预防和控制措施分析

——以龙湖岛站工程为例

刘子辉

中铁十六局集团北京轨道交通工程建设有限公司，北京

收稿日期：2022年3月31日；录用日期：2022年4月20日；发布日期：2022年4月29日

摘要

针对地下空间结构形式复杂且构件厚重而带来的施工质量控制难题也越来越多，如何采取有效措施对裂缝进行预防和控制，从而来保证结构使用功能以及使用寿命，是长期困扰施工的关键性技术难题。本文结合工程实例，对施工过程中所采取的裂缝预防和控制措施(跳仓法施工、科学降水和沉降监测等)效果进行了探讨；对后期产生的主体结构裂缝进行了检测，并对结构裂缝产生的原因进行分析。结果表明：在采取相应裂缝预防和控制措施情况下，结构裂缝主要受季节性温度影响且与基坑围护结构形式有关。对于采用抗拔桩的地铁车站，当结构形状不规则时，尽量避免采用大放坡的围护结构形式。

关键词

地铁，裂缝控制，统计分析，复杂结构，收缩裂缝

Analysis of Prevention and Control Measures for Cracks in Special Structures

—A Case Study of Longhu Island Station Project

Zihui Liu

China Railway 16 Bureau Group Beijing Rail Transit Engineering Construction Co., Ltd., Beijing

Received: Mar. 31st, 2022; accepted: Apr. 20th, 2022; published: Apr. 29th, 2022

Abstract

There are more and more construction quality control problems caused by the complex structure

of underground space and heavy components. How to take effective measures to prevent and control cracks so as to ensure the function and service life of the structure is a technology that has plagued construction for a long time problem. Based on engineering examples, this paper discusses the effects of crack prevention and control measures (jumping warehouse method construction, scientific precipitation and settlement monitoring, etc.) taken during the construction process, detects the main structural cracks that occur in the later period, and analyzes the structural cracks causes. The results show that, when corresponding crack prevention and control measures are taken, structural cracks are mainly affected by seasonal temperature and are related to the form of the foundation pit enclosure structure. For subway stations with uplift piles, when the structure shape is irregular, the enclosure structure with large slope should be avoided as far as possible.

Keywords

Subway, Crack Control, Statistical Analysis, Complex Structure, Shrinkage Cracks

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市地铁的发展,使得地铁车站与周边配套设施的衔接愈加紧密,同时受功能和防水等因素的限制,结构设计形式也日益复杂[1] [2]。大体积混凝土结构在现代工程建设中得到推广的同时,也带来了许多问题,例如温度裂缝[3] [4] [5] [6] [7]。裂缝的产生,严重影响了建筑结构的使用功能[8]。随着大体积混凝土的广泛应用,由温度所引起的裂缝问题日益突出,受到了工程师们的高度重视,也成当今工程建设亟待解决的关键问题。

为了有效预防和控制混凝土裂缝的产生,国内外研究学者在理论和施工措施方面进行了大量研究。我国著名的裂缝控制专家王铁梦教授[9] [10] [11]通过大量的工程建设实践和试验研究,阐明了变形作用而产生裂缝的原因以及约束变形特征,提出抗与放设计准则及裂缝控制措施。陈志明[12]对大体积混凝土温度变化进行监测,分析了混凝土温度的变化规律,提出了大体积混凝土温度计算公式。Pettersson 等[13]通过有限元软件分析了边界条件对温度裂缝产生和发展的影响,提出了温度裂缝的预防措施。

本文基于郑州地铁四号线龙湖岛站工程,结合工程特征及现场实际情况,对其产生裂缝的可能性进行分析,并给出相应的裂缝预防和控制措施。通过工程实施和监测结果分析,表明所采取的预防措施达到了预期的控制效果,并为今后类似工程的设计、施工、监测提供了参考和借鉴。

2. 工程概况

龙湖岛站是郑州地铁四号线穿越郑州东区金融岛的重要站点(穿越龙湖),结构总长度 222.2 m,两端盾构段均设置抗拔桩。车站采用明挖顺作法施工,基坑形式为大放坡,敞开式降水。因与市政综合管廊工程交叉,车站 13 轴至 21 轴之间为地下二层结构;预留横穿位置,其它段为地下三层结构,如图 1 所示。车站所处地层为富水砂层,鉴于结构缝是工程防水的薄弱环节,处理不当将对结构耐久性和正常使用功能造成不利影响。因此本次设计考虑结构防水功能,取消了变形缝、沉降缝和后浇带设置。而通过提高配筋率和采用补偿收缩混凝土来增强混凝土抗裂能力,实现结构的无缝设计。

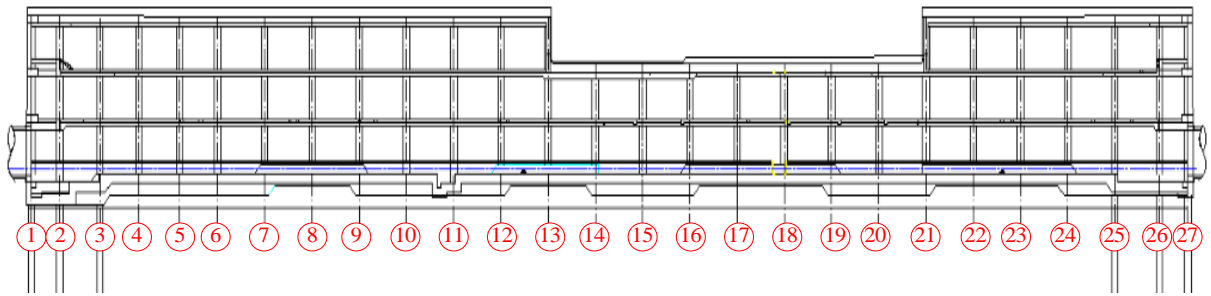


Figure 1. Longitudinal section of the station

图 1. 车站纵剖面图

3. 裂缝预防措施

3.1. 大体积混凝土裂缝成因分析

混凝土浇筑完成后, 因其内部水泥水化热的聚集与扩散以及外界环境因素的影响, 使得混凝土结构不同位置处于各异温度状态, 进而形成温度应力。当温度应力差超过混凝土抗拉强度限值时, 在混凝土表面产生微裂缝。

对温度应力及混凝土应力分析可知, 大体积混凝土裂缝计算公式:

$$\sigma(t) = -\frac{E_{(t)}\alpha\Delta T_{(t)}}{1-\mu} S_{h(t)} R_k \quad (1)$$

式中: $\sigma_{(t)}$: 龄期 t 时混凝土温度应力; $E_{(t)}$: 龄期 t 时混凝土弹性模量; α : 混凝土线膨胀系数, α 取 $10 \times 10^{-6}(1/^\circ\text{C})$; $\Delta T_{(t)}$: 龄期 t 时混凝土综合温差; μ : 混凝土泊松比, 取 $\mu = 0.15$; $S_{h(t)}$: 龄期 t 时混凝土松弛系数; R_k : 外约束系数, 取 $R_k = 0.5$ (普通混凝土)。

当温度应力 $\sigma(t)$ 超过混凝土抗拉强度 σ_p 时, 混凝土表面开始出现产生裂缝。

由式(1)可知, 混凝土内部温度应力与其综合温差呈正相关, 即温度应力随温差增大而提高; 且随龄期增长, 混凝土温度应力随之增大。

从变形角度进行分析, 如式(2)所示:

$$\Delta L = L \times \alpha \Delta T \quad (2)$$

式中: ΔL : 混凝土温度变化引起的变形量; L : 混凝土长度, mm;

由式(2)可以看出, 混凝土体量(长度、厚度)及内外温差增大, 可导致混凝土收缩量增大。当变形量 ΔL 超过一定值时, 即混凝土达到其极限拉应变 ϵ_p , 进而产生温度裂缝。

由上述分析可知, 物理降温、提高混凝土抗拉强度及优化外部约束条件等措施是解决大体积混凝土温度裂缝的直接措施。与普通地铁车站相比, 郑州地铁四号线龙湖岛站未设置沉降缝、变形缝和后浇带。虽然结构设计采取了相应的措施来提高混凝土的抗裂性能, 但由于施工过程中的不确定因素较多以及混凝土结构裂缝控制本身的复杂性等原因, 使得结构裂缝的控制单纯依靠设计措施很难达到预期的效果。龙湖岛站主体结构施工中除采取上述常规的预防措施外, 并结合自身工程的特点, 另外采取了以下预防措施。

3.2. 跳仓法施工

由于主体结构较长(长度为 222.2 m), 底板厚度在标准段为 1.1 m, 盾构段为 1.2 m; 顶板厚度在标准段为 0.8 m, 盾构段为 0.9 m; 结构尺寸和工程量较大, 属于大体积混凝土施工, 加之结构采取无缝设计,

为防止产生温度收缩裂缝，龙湖岛站主体结构采用跳仓法施工。单段混凝土浇筑长度控制在 18 m 左右，如图 2 所示。主体结构侧墙、中部顶板整体对称浇筑，如图 3 所示。封仓间隔时间 7~10 天。

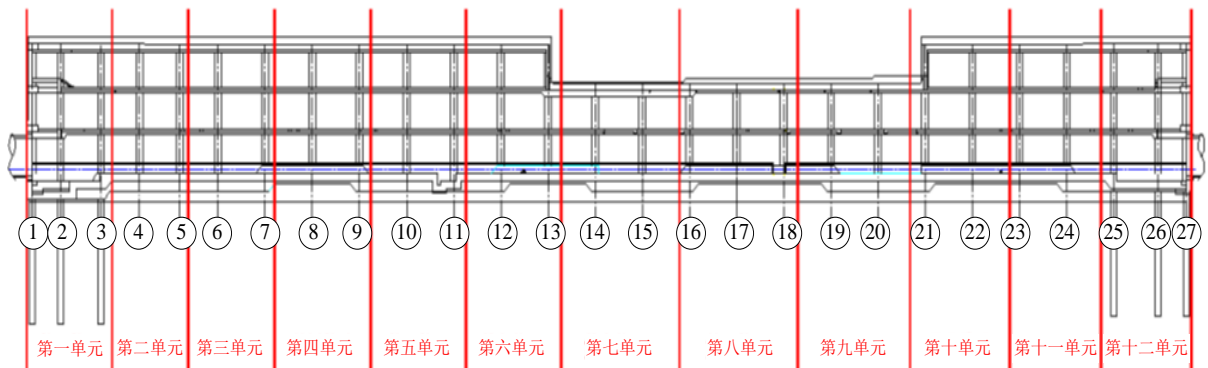


Figure 2. Main structural unit division

图 2. 主体结构单元划分



Figure 3. Overall pouring drawing of side wall and slab

图 3. 侧墙及板整体浇筑图

3.3. 科学降水

基坑降水会形成降水漏斗，地下水位的下降，使地下水的浮托力减小，进而导致地基沉降。降水过程中，降水井数量、布置形式以及降水过程中动态控制不合理等因素会使得降水漏斗在基坑底部产生不均匀沉降，且随建筑荷载不断提高，不均匀沉降易在结构形式转换部位发生，使对应结构部位产生裂缝。龙湖岛站基坑采用大放坡围护形式、敞开式降水。由于主体结构不规则，部分三层，部分两层，因此降水引起的地基不均匀沉降不容忽视。

基于地下水渗流的相关理论和规律，对龙湖岛站水文地质条件下的龙湖岛站降水过程进行科学地深度优化设计，进而得到基坑降水阶段的维稳降水井数量及对应的降水量。为使基坑水位保持稳定，对其采取如下处理措施：

1) 降水井需保证持续不间断的运转，同时杜绝间歇的及反复的抽水作业，使降水漏斗曲线保持稳定平缓，详见图 4。

2) 针对实际地层地质情况，确定对应土层所需的滤网及相应的回填砂滤料；并且在降水过程中时刻观察出水的泥砂含量，若出现含泥量较大情况(抽出水出现浑浊)，需立即进行处理。

3) 整个基坑范围内设置降水监测点, 对所有监测点降水情况实施全过程动态监测。

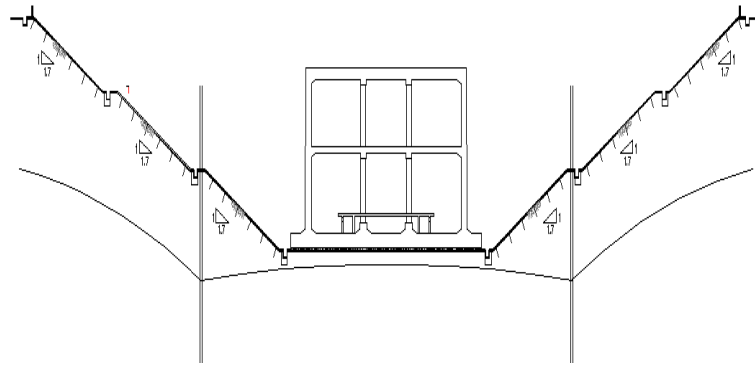


Figure 4. Dewatering curve of foundation pit
图 4. 基坑降水曲线

3.4. 沉降监测

通过科学的降水, 可以防止结构不均匀沉降; 同时进行车站沉降监测, 做好沉降观测记录。依据监测数据, 了解车站在施工过程中和完工后沉降情况, 以便及时对结构裂缝进行预防和控制。

龙湖岛站内部净长为 220.4 m, 共有 27 个轴线, 沉降监测点布置原则: 间隔 2 个轴线为一个断面, 间距为 15~18 m。两端盾构井各有一断面, 一个断面分左、中、右三个测点。共布置 39 个沉降观测基点, 测点位置详见图 5。

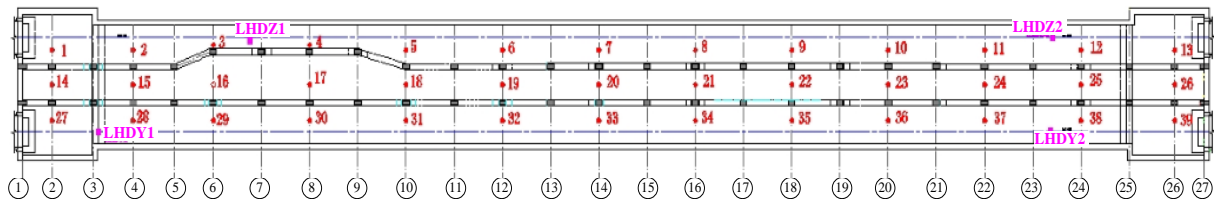


Figure 5. Layout plan of settlement monitoring points
图 5. 沉降监测点布置平面图

3.5. 平面位置监测措施

龙湖岛站附属结构处于主体结构基坑内, 根据设计要求, 附属结构在基坑回填至负三层标高后开始施工。因而, 附属结构将对主体结构基坑施工造成开挖土不能及时回填的影响, 这样主体结构将会长时间暴露在外部环境中。为了监测车站主体结构在平面位置上的变化情况及在外界环境影响下车站结构伸缩变化, 在主体结构全部施工完成, 采取在结构顶板设置四个平面位置监测点, 详见图 5。

4. 裂缝预防控制效果分析

4.1. 裂缝宽度及长度监测

对出现的裂缝进行统计分析: 观测到的 5 条裂缝均位于同一区间(12~13 轴)负一层侧墙处。东侧墙的 3 条裂缝均为斜向裂缝; 西侧墙的 2 条裂缝中, 分别为斜向裂缝和竖向裂缝。裂缝长度采用钢卷尺进行测量, 其宽度采用裂缝宽度观测仪进行测量, 裂缝深度采用超声平测法进行测量。裂缝检测数据详见表 1, 裂缝分布形态, 见图 6 和图 7 所示。

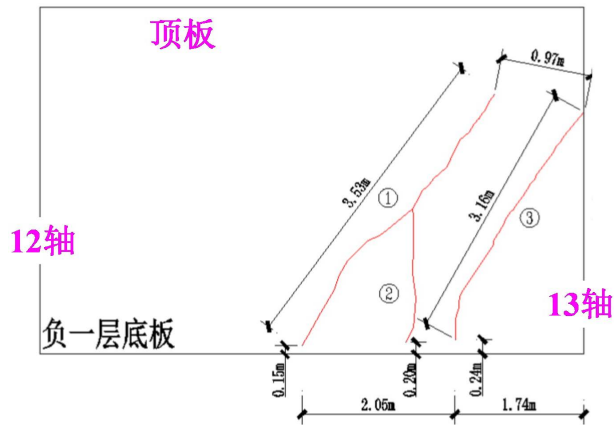


Figure 6. The position of seam 1~3
图 6. 缝 1~3 位置示意图

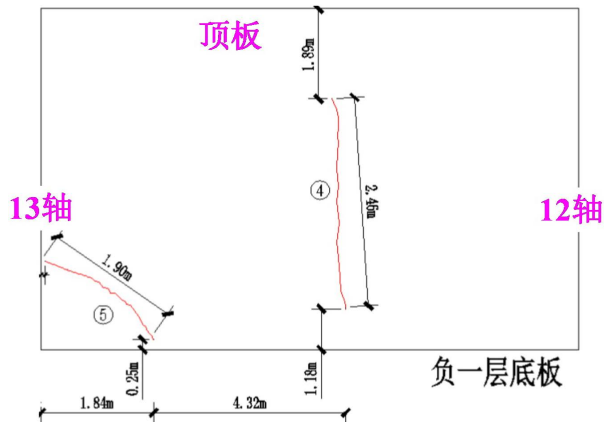


Figure 7. The position of seam 4~5
图 7. 缝 4~5 位置示意图

Table 1. Summary of cracks
表 1. 裂缝情况汇总表

位置(12~13 轴负一层)	编号	最大宽度/mm	长度/m	跨缝测线距地板距离/m	深度/mm
东侧墙	缝 1	0.21	3.53	1.32	93.6
				2.50	103.3
				3.35	91.7
	缝 2	0.25	缝 1 分支	1.54	100.5
	缝 3	0.29	3.16	0.57	45.7
西侧墙	缝 4	0.30	2.46	1.18	46.7
				1.78	124.5
	缝 5	0.24	1.9	1.65	110.2
				1.82	132.5
				1.35	92.9

4.2. 监测数据分析

由表 1 裂缝检测统计数据可知,各条裂缝最大宽度均小于 0.3 mm;东侧墙出现的斜裂缝长度最大为 3.53 m;最大裂缝深度出现在西侧墙竖向裂缝为 132.5 mm。由裂缝深度数据分析可知,该裂缝并不是贯穿裂缝,且最大裂缝宽度也满足普通混凝土结构裂缝最大宽度限制要求。因此,所出现的裂缝并不会使车站结构的正常使用功能受到影响。但无法判断裂缝是否处于发展阶段,所以需对裂缝产生的原因进行进一步分析。

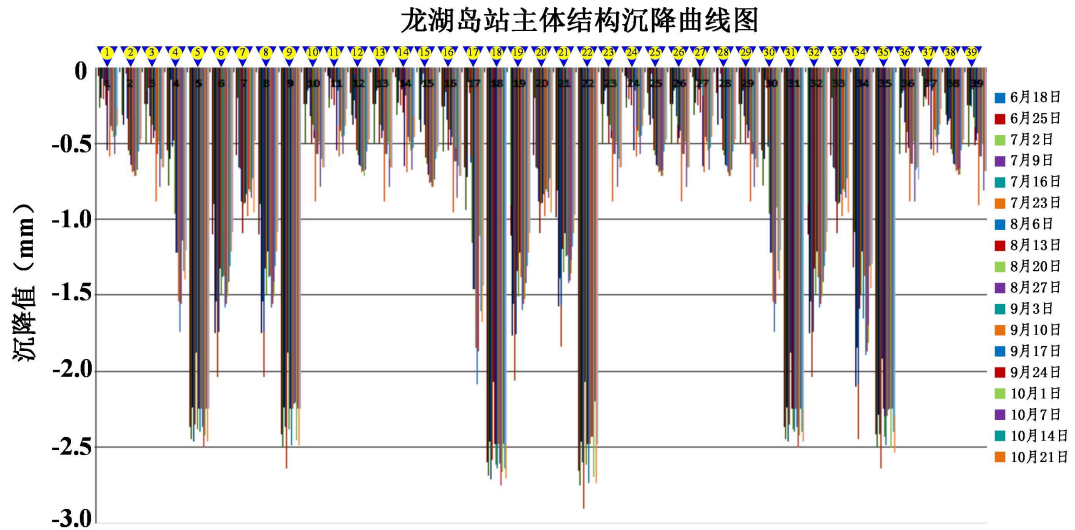


Figure 8. Subsidence curve of Longhu Island Station

图 8. 龙湖岛站沉降曲线图

1) 沉降监测数据分析

在主体结构施工过程中,通过对龙湖岛站主体结构沉降进行监测。各监测点累计沉降值与初始值相比,差值 ≤ 5 mm,不均匀沉降差值 ≤ 3 mm,主体结构未产生裂缝。本次监测时间为主体结构竣工后至裂缝出现,各监测点沉降数值见图 8。从图中可以看出,各监测点累计沉降值不足 3 mm,监测点之间沉降差值不足 3 mm;结合沉降数据及工程施工经验可知,上述所出现的裂缝与结构沉降无关。

2) 平面监测数据分析

由 2.4 节所设置的平面监测点的监测数据,通过各监测点的位置差值变化,对车站主体结构在观测期内的伸缩情况进行计算分析,各监测点的统计数据,如表 2 所示。

由表 2 可知,监测点 LHDZ1 与 LHDZ2, LHDY1 与 LHDY2 之间距离在观测期内,其数值分别为 14.07 mm 和 11.95 mm。由此可见,车站主体结构沿纵向产生了较大的收缩,且沿纵向向两侧伸缩差值为 2.12 mm,这表明两侧纵向伸缩量不一致,导致墙体裂缝斜向发展。

Table 2. Plane monitoring data sheet

表 2. 平面监测数据表

序号	时间	监测点	X/m	Y/m	点位距离/m	距离变化值/m
1	6月20日	LHDZ1	54475.7546	75150.1283	149.8054	0
		LHDZ2	54327.2017	75169.4597		
		LHDY1	54501.9161	75131.1078	177.8294	0
		LHDY2	54325.5183	75153.6271		

Continued

2	7月20日	LHDZ1	54475.7534	75150.1281	149.8006	-4.80
		LHDZ2	54327.2053	75169.4592		
		LHDY1	54501.9152	75131.1066	177.8282	-1.22
		LHDY2	54325.5186	75153.6257		
3	8月20日	LHDZ1	54475.7512	75150.1279	149.7995	-5.95
		LHDZ2	54327.2044	75169.4601		
		LHDY1	54501.9159	75131.1071	177.8279	-1.48
		LHDY2	54325.5196	75153.6265		
4	9月20日	LHDZ1	54475.7529	75150.1289	149.8018	-3.60
		LHDZ2	54327.2036	75169.4601		
		LHDY1	54501.9143	75131.1073	177.8271	-2.29
		LHDY2	54325.5188	75153.6265		
5	10月20日	LHDZ1	54475.7446	75150.1276	149.7914	-14.07
		LHDZ2	54327.2059	75169.4591		
		LHDY1	54501.9051	75131.1071	177.8175	-11.95
		LHDY2	54325.5195	75153.6276		

备注：点位距离 $AB = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$ 。

4.3. 温度变化分析

受附属结构施工影响，主体结构负一层及负二层结构一直暴露在外部环境中。对比有围护结构的地铁车站，龙湖岛站处在敞开式基坑中，如图9所示。因此主体结构受环境温度的影响更大。且龙湖岛站不同于一般地铁站形式，其主体结构两端设置有抗拔桩，进而对主体结构产生了较大的约束，不利于结构在受环境温度影响而自由伸缩。从主体结构形式可以看出，其中间段70.2 m为两层结构，属于异形结构。故主体结构混凝土产生伸缩时，将在结构断面发生变化的部位(即三层结构与二层结构变化处)产生应力集中。



Figure 9. Form of foundation pit of Longhu Island Station
图9. 龙湖岛站基坑形式

由施工环境温度监测数据分析可知,主体结构在6月份施工完成,而进入10月份后,环境平均温度较6月降低了10℃,温差最大达到27℃(见图10、图11)。由此可见,环境温度受季节变化影响发生了巨大的变化。因此,分析原因:主体结构裂缝的产生是由于结构长期暴露在外部环境中,受季节性温度变化影响,体积产生收缩,且端部约束其变形,导致产生的内部应力超过其抗拉强度所致,属于季节性温度收缩裂缝。

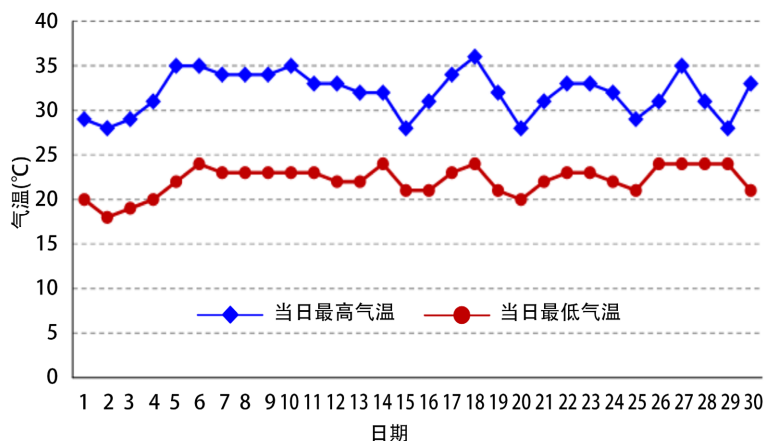


Figure 10. Temperature in June 2014

图 10. 2014 年 6 月气温

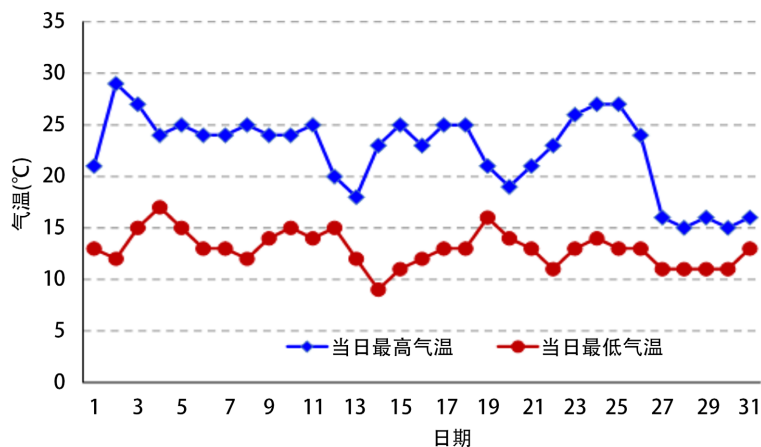


Figure 11. Temperature in October 2014

图 11. 2014 年 10 月气温

5. 裂缝的控制及处理措施

通过上述分析可知,龙湖岛站主体结构裂缝,是由季节性温度收缩产生的。众所周知,季节性温度收缩裂缝一般产生于结构竣工后的第一个秋冬交替季节。故龙湖岛站主体结构所形成的裂缝是裂缝发展的初始阶段,并会随后续季节性的交替发展。因此,此类裂缝如果不能得到及时控制,其将会持续开展、延伸、变宽,最终形成结构性贯穿裂缝,进而对主体结构产生严重影响。

5.1. 收缩裂缝的控制措施

土壤是混凝土最佳养护介质,回填土对混凝土结构具有保温作用,对温度变化引起的收缩裂缝起到抑制作用。因而在对产生的结构裂缝进行监测分析后,采取以下措施进行控制:

- 1) 尽早对主体结构进行回填:通过调整控制附属结构施工进度,使主体基坑内部分尽快优先完成;

所有部位当满足回填条件，应尽早完成回填。

2) 采取双层棉被封闭覆盖结构顶板等受工序影响较大不能及时回填部位，进而起到保温效果。

5.2. 主体裂缝处理措施

在采取尽快回填对季节性收缩裂缝进行控制的同时，对结构已产生的裂缝还需要进行实时监测。通过观测裂缝的发展趋势(长度、宽度及深度)，待裂缝发展趋于稳定时，对所产生的裂缝进行处理。

1) 采用在裂缝两侧粘贴石膏饼的方法，对裂缝发展趋势进行观测。石膏饼尺寸为：10 mm × 80 mm × 500 mm。观测周期为3个月，经连续监测，若石膏板表面未发现裂缝且无新裂缝产生。而此时，主体结构土方回填施工已完成1个多月，结合观测及施工措施，可判定其裂缝已趋于稳定。此时，重新对裂缝进行检测，对比前后检测数据，并未发现有较大差异，表明裂缝处于稳定状态，而后续所出现的裂缝应为表面裂缝。

2) 由表1裂缝观测数据可知，所产生的裂缝深度均大于45 mm，该值已超过地下混凝土构件的钢筋保护层厚度要求(40 mm)。为了满足结构耐久性要求，采用注浆法对裂缝进行修补。本工程所采用的注浆材料为环氧树脂，浆液注满且达到设计强度后，打磨修补处理裂缝表面。

6. 结论

本文结合龙湖岛站项目，针对该项目结构形式及施工方案，采取了一系列裂缝控制措施。通过对主体结构进行沉降、平面位移和温度实时监测，探讨了裂缝控制措施的效果，并对所产生裂缝的原因进行了分析和处理。主要结论如下：

1) 对于敞开式基坑的大体积混凝土结构施工，季节性温差是导致结构产生收缩裂缝的主要原因。对此可采用及时回填土方及覆盖保温材料的方法对裂缝进行控制。

2) 施工过程中应对基坑的沉降、主体结构平面位移及温度进行实时监测，为主体结构裂缝的成因分析及控制措施提供数据。

3) 对端部采用抗拔桩的超长混凝土结构施工，当结构布置不规则时，应尽量避免大放坡的围护结构形式。

基金项目

住房和城乡建设部科学技术计划项目(2019-K-059)。

参考文献

- [1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程裂缝防治技术规程: JGJ/T 317-2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [3] 王军琪, 张坚. 西安地铁区间隧道穿越地裂缝防水设计及其效果研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 197-201.
- [4] 曾晓东. 运营隧道衬砌裂缝及渗漏水病害整治技术研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 201-205.
- [5] 陶桦铭. 高层建筑基础大体积混凝土的温度裂缝问题预防与应对策略[J]. 科技通报, 2014, 30(1): 87-90.
- [6] 王仲平. 温度-约束共同作用下的混凝土裂缝发展特性分析[J]. 建筑施工, 2020, 42(12): 2362-2365.
- [7] 章谊. 跳仓法替代后浇带在大体积混凝土施工中的运用[J]. 建筑施工, 2020, 42(7): 1166-1168.
- [8] 孟召虎, 胡志文, 袁科明, 柳满庆, 王永奇. 大温差干燥环境下超大屋面混凝土裂缝控制关键技术[J]. 建筑施工, 2020, 42(1): 48-50.
- [9] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

- [10] 王铁梦. 工程结构裂缝控制的综合方法[J]. 施工技术, 2000, 29(5): 5-9.
- [11] 王铁梦. 钢筋混凝土的裂缝控制[J]. 安徽建筑, 2001(1): 10-13.
- [12] 陈志明. 大型地下室墙板混凝土裂缝控制技术[J]. 建筑施工, 1995, 17(4): 10-11.
- [13] Pettersson, D., Alemo, J. and Thelandersson, S. (2002) Influence on Crack Development in Concrete Structures from Imposed Strains and Varying Boundary Conditions. *Construction and Building Materials*, **16**, 207-213.
[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00007-7](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00007-7)