

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202111036



地铁车站叠合墙内衬墙混凝土 施工优化及开裂原因分析

陈经鹏¹, 李少波², 陈士海^{1,3}, 陈春超¹, 罗小峰²

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 福建省厦门轨道交通集团有限公司, 福建 厦门 361001;

3. 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: 为解决地铁车站叠合墙内衬墙混凝土开裂渗水问题,以福建省厦门市轨道交通 6 号线杏滨站和董任站工程为背景,研究地铁车站叠合墙内衬墙混凝土施工优化及开裂原因.根据内衬墙的实际开裂情况,研究内衬墙混凝土的不同现场坍落度、混凝土的不同强度等级、跳仓浇筑法、冷却管技术和施工分段长度等施工因素对内衬墙开裂的影响情况.结果表明:叠合结构内衬墙所受约束作用的强弱、混凝土水泥水化的温度效应,以及施工分段长度是引起内衬墙开裂的主要原因;各施工因素对提高内衬墙抗裂能力的重要性依次是跳仓浇筑法、冷却管技术、混凝土现场坍落度、混凝土强度等级和施工分段长度.

关键词: 叠合墙内衬墙; 地铁车站; 裂缝; 混凝土材料; 工艺优化

中图分类号: U 455.452; U 214.18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)04-0448-13

Construction Optimization and Cracking Reasons Analysis of Lining Wall Concrete of Composite Wall in Subway Station

CHEN Jingpeng¹, LI Shaobo², CHEN Shihai^{1,3},
CHEN Chunchao¹, LUO Xiaofeng²

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Xiamen Rail Transit Group Limited Company, Xiamen 361021, China;

3. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: To solve the problem of cracking and seepage of the lining wall concrete of the composite wall in subway station, Fujian Province Xiamen City rail transit line 6 Xingbin station and Dongren station projects are takend as the background, the construction optimization and cracking reason of the lining wall concrete of the composite wall in subway station are studied. According to the actual cracking situation of the lining wall, the influence of various construction factors on the cracking of lining wall is studied, such as different site slump for the lining wall concrete, the different strength grades of concrete, the sequence casting method, the cooling pipe technology and the length of construction section. The results show that the cracking of the lining wall is mainly caused by the strength of the restraint action, the temperature effect of concrete cement hydration and the length of construction section; according to the importance of construction factors to improve the anti-crack ability of the lining wall, the ranking list is sequence casting method, cooling pipe technology, site slump for concrete, the strength grade of concrete and the length of construction section.

收稿日期: 2021-11-03

通信作者: 陈士海(1964-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事岩土工程的研究. E-mail: cshblast@163.com.

基金项目: 地铁车站深基坑叠合墙结构设计与施工关键技术研究(厦轨道(合)[2020]0851 号)

Keywords: lining wall of composite wall; subway station; crack; concrete material; process optimization

随着地面交通压力的增大,地铁以其高效性成为人们出行的首选方式之一,而地铁车站在整个过程中起到了关键性作用.叠合墙便是地铁车站主体结构形式的一种,叠合墙是将地下连续墙与车站内衬墙做成一个整体,使地下连续墙与后期浇筑的车站内衬墙形成共同受力的整体,两者间能够传递剪力与弯矩,在提高材料利用率与提高地铁车站整体抗侧刚度和强度方面有着较明显的优势.国内一些地铁车站叠合墙施工经验表明,车站内衬墙开裂和渗水是制约叠合墙施工质量的关键因素.广东省深圳市地铁 9 号线的大剧院站是一座典型的叠合墙车站,其内衬墙的渗水点数量占总的渗水点数的 40%^[1].若地铁车站在运营期间出现较为严重的渗水现象,需要投入大量的资金用于结构堵漏,堵漏过程对环境造成严重影响,甚至会影响列车的行驶安全,给群众的生命财产安全造成威胁.因此,研究影响叠合墙内衬墙混凝土开裂的因素是很有必要的.

谢咸颂^[2]认为混凝土的非荷载裂缝的产生与混凝土的组成材料、配合比、施工工艺、养护工艺及混凝土所受到的外部约束等有关.叶以挺等^[3]从混凝土配合比角度,尽可能减少水泥用量和含砂率,保证一定的粗骨料含量并优化粗骨料级配,有效提高混凝土的抗裂性和体积稳定性.胡匡艺等^[4]提出地铁车站侧墙等超长大面积混凝土板结构不宜使用早强水泥.张坚等^[5]通过添加抗裂剂和调整矿物掺合料的比例对混凝土配合比进行优化.吴栋彦^[6]从水灰比、骨料粒径、含砂率、混凝土含气量和在内衬墙钢筋笼外侧铺装防裂钢筋网片等角度,分析地铁车站叠合墙内衬墙混凝土的防裂问题.汤继新等^[7]通过降低水泥与矿粉用量,减小混凝土自收缩.朱银虎等^[8]认为水泥水化调控材料可以明显减小混凝土温升速率、温升值、温降速率及温降体积收缩值.谢小利等^[9]认为温度收缩和湿度收缩同时发生并相互作用.曾文波等^[10]认为混凝土的裂缝是由温度应力与收缩应力共同作用产生的,不均匀的混凝土温度收缩和湿度收缩使混凝土内部的拉应力超过了抗拉强度,产生贯穿裂缝.徐文等^[11]研究不同施工季节、模板材料和拆模时间等工况对侧墙混凝土开裂风险的影响.张翠强等^[12]认为控制温差是控制开裂的必要条件而不是充分条件,且混凝土内部的温度应力主要由约束产生.刘加平等^[13]认为地铁车站内衬墙的收缩变形主要发生于硬化阶段,裂缝出现时间较早,间距规整,且大多为贯穿性裂缝.张雪松等^[14]对易引起干缩裂缝的因素(如拆模时间和养护条件)进行控制,认为车站纵向的不均匀沉降不是引起结构开裂的主要原因.李明等^[15]认为自收缩造成的裂缝不可忽略,常采用添加外加剂并合理控制内衬墙分段长度控制结构开裂.徐文等^[16]认为水管冷却技术可以显著降低内衬墙早龄期开裂风险.陈坤泉^[17]研究了跳仓浇筑法在地铁车站顶板中的应用技术.国内跳仓浇筑法的应用案例主要为超大基坑工程,且主要在基础底板和结构顶板的浇筑中应用^[18-24].

目前,对地铁车站复合墙内衬墙混凝土开裂渗水问题研究较多,主要集中在混凝土配合比优化、外加剂使用、控制入模温度、水管冷却和养护等方面.现场主要通过监测混凝土的温度和应变分析结构的开裂风险,缺乏详细记录内衬墙裂缝特征的数据,且针对叠合墙内衬墙混凝土的研究较少,跳仓施工技术在地铁车站主体结构中的应用案例更是鲜有.因此,本文对地铁车站叠合墙内衬墙混凝土施工优化及开裂原因进行分析.

1 工程概况

福建省厦门市轨道交通 6 号线(林埭西站至华侨大学站段)工程设 13 个车站,区间 13 段(12 段正线区间+1 段联络线区间),线路总长度为 18.8 km.其中,杏滨站为第 8 个车站,采用明挖法施工,车站主体结构外包长度为 258.5 m,主体结构标准段宽度为 21.1 m;董任站为第 10 个车站,采用明挖顺筑法及局部顶板盖挖顺作法施工,车站主体结构外包长度为 286.4 m,主体结构标准段宽度为 19.1 m,2 个车站均为地下二层岛式车站,属于单柱双跨(局部双柱三跨)闭合框架结构.2 个车站主体结构均采用 800 mm 地下连续墙及 400 mm 内衬墙叠合受力的结构形式,杏滨站主体结构混凝土强度等级为 C40,董任站为 C35,防水等级均为 P10.

2 原材料对内衬墙开裂的影响

2.1 内衬墙混凝土的现场坍落度

2.1.1 现场坍落度为(140±20) mm 的混凝土施工 杏滨站内衬墙混凝土强度较高,在前期施工过程中,为提高内衬墙混凝土早龄期强度值,采用大体积混凝土 28 d 的抗压强度,水胶比为 0.35,外加剂为外掺,现场坍落度为(140±20) mm. 混凝土原材料参数及混凝土原材料信息,如表 1、2 所示. 表 1 中:ρ 为密度;S 为现场坍落度.

表 1 混凝土原材料参数
Tab. 1 Concrete raw parameters

| 编号 | ρ/kg·m ⁻³ | | | | | | | 外加剂 1 | 外加剂 2 | 掺合料 1 | 掺合料 2 | 砂率/% | 水胶比 | S/mm | 强度等级 |
|----|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|------|
| | 水 | 水泥 | 砂 1 | 砂 2 | 石 1 | 石 2 | 石 3 | | | | | | | | |
| A | 154 | 287 | 369 | 369 | 518 | 362 | 155 | 10.14 | — | 66 | 88 | 42 | 0.35 | 140±20 | C40 |
| B | 154 | 268 | 363 | 363 | 525 | 368 | 158 | 8.95 | — | 107 | 51 | 41 | 0.38 | 180±20 | C40 |
| C | 153 | 263 | 496 | 212 | 535 | 374 | 160 | — | 8.21 | 104 | 65 | 40 | 0.37 | 180±20 | C40 |
| D | 160 | 250 | 363 | 363 | 532 | 372 | 160 | 7.56 | — | 100 | 48 | 41 | 0.42 | 180±20 | C35 |

混凝土采用汽车泵进行泵送,现场坍落度会有一定的损失,导致混凝土的入模坍落度进一步减小、易性变差,加之内衬墙宽度较小(400 mm),钢筋分布比较密集. 若混凝土的流动性太差,将给现场的振捣工作造成极大的困难,若混凝土振捣不够密实,将降低结构的抗裂能力,现场内衬墙常因混凝土振捣不充分、不密实出现蜂窝、麻面、露筋等现象. 采用现场坍落度为(140±20) mm 的混凝土浇筑内衬墙时,出现的质量问题图,如图 1 所示.

表 2 混凝土原材料信息

Tab. 2 Information of concrete's raw material

| 材料名称 | 原材料 | 规格 |
|-------|---------|------------------|
| 水泥 | 普通硅酸盐水泥 | 品种等级为 P.O 42.5 |
| 砂 1 | 机制砂 | 细度模数为 2.9 |
| 砂 2 | 河砂 | 细度模数为 2.6 |
| 石 1 | 碎石 | 级配为 16.0~31.5 mm |
| 石 2 | 碎石 | 级配为 5.0~20.0 mm |
| 石 3 | 碎石 | 级配为 5.0~10.0 mm |
| 掺合料 1 | 粉煤灰 | F 类Ⅱ级 |
| 掺合料 2 | 矿渣粉 | S95 |



图 1 浇筑内衬墙时出现的质量问题图

Fig. 1 Quality problems during lining wall casting

某 12 m 内衬墙段 28 d 龄期的裂缝分布,如图 2 所示. 图 2 中:蓝色虚线为钢模板拼接缝位置;数字 1~15 为裂缝的排号(下同,略). 图 3 为图 2 的部分裂缝现场照片.

2.1.2 现场坍落度为(180±20) mm 的混凝土施工 水泥水化反应后,水化产物的体积比水化前(水泥与水的体积之和)更小,这种收缩称为化学收缩^[4],化学收缩将引起混凝土自收缩^[25]. 矿粉对降低水

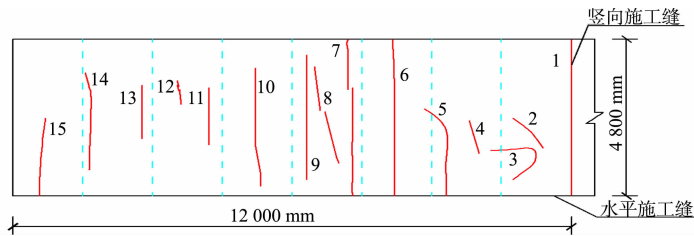


图 2 某 12 m 内衬墙段 28 d 龄期裂缝分布

Fig. 2 Distribution of 12 m 28 d lining wall section crack

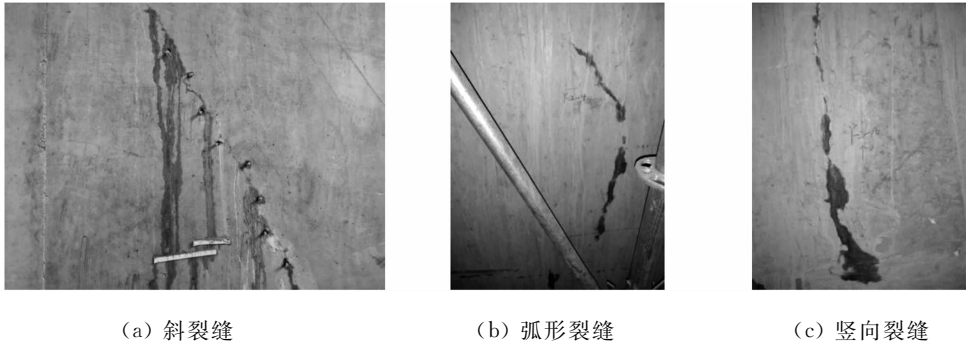


图 3 现场部分裂缝照片(12 m)

Fig. 3 Photos of partial crack on site (12 m)

泥水化放热速率没有明显效果,且增加混凝土的自收缩,降低膨胀剂的膨胀效果^[26].降低水泥与矿粉用量可减小混凝土自收缩^[7],提高粉煤灰掺量(质量分数),可有效延缓水泥水化放热速率,有利于控制大体积混凝土的温度^[3].杏滨站前期施工过程中,由于采用的现场混凝土坍落度较小,混凝土的和易性较差,施工质量较不理想,开裂现象比较明显.采用大体积混凝土 60 d 抗压强度,将水胶比增大至 0.38,适当减少水泥和矿渣粉的用量,以减小混凝土的自收缩;将粉煤灰的掺量提高至 25.12%,以减弱混凝土水化过程的温度效应;现场坍落度提高到 (180 ± 20) mm,以提高混凝土施工过程中的和易性.

采用现场坍落度为 (180 ± 20) mm 的混凝土浇筑内衬墙时,现场施工效果图,如图 4 所示.采用现场坍落度为 (180 ± 20) mm 的混凝土浇筑的某 18 m 内衬墙段 28 d 龄期裂缝分布,如图 5 所示.图 6 为图 5 的部分裂缝现场照片.



图 4 现场施工效果图

Fig. 4 Effect of construction on site

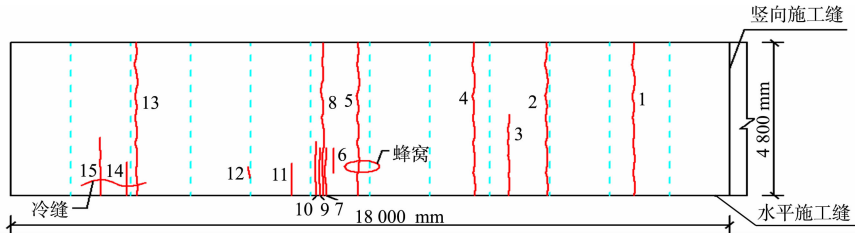


图 5 某 18 m 内衬墙段 28 d 龄期裂缝分布

Fig. 5 Distribution of 18 m 28 d lining wall section crack

混凝土从汽车泵入模后,浆体能够包裹着石子很好地流动,使工人的振捣工作能够很好地进行,混凝土的振捣效果比较理想.拆除钢模板后,未在内衬墙表面发现麻面、露筋、沉降缝等施工缺陷,墙体表



图 6 现场部分裂缝照片(18 m)
Fig. 6 Photos of partial crack on site (18 m)

面比较光滑,施工质量较好.

2.1.3 两种混凝土的使用效果及开裂原因 1) 两种现场坍落度混凝土的试验数据对比,如表 3 所示.表 3 中: t 为时间; f_{cu} 为抗压强度; Q 为电通量; D 为扩散系数.

由表 3 可知:将混凝土的现场坍落度从 (140 ± 20) mm 提高到 (180 ± 20) mm 后,混凝土的 7,28 d 龄期抗压强度分别下降了 8.00%和 4.30%,但混凝土的 7,28 d 龄期抗压强度均能满足现场施工的抗压要求,分别达到设计强度的 106.50%和 129.25%;两种混凝土的初凝时间和终凝时间基本一致,未发生明显变化;但混凝土的坍落度提高后,扩散系数下降了 15.2%,说明随着混凝土现场坍落度的提高,混凝土变得更为密实.

2) 两种现场坍落度混凝土的浇筑质量对比,如图 7 所示.图 7 中: l 为裂缝长度; n 为数量.

由图 7 可知:内衬墙的分段浇筑长度由 12 m 增加至 18 m 后,裂缝总长度基本未变;生成的裂缝总数量未增加,渗水裂缝数量减少了 15.38%,且内衬墙未出现点渗的现象,裂缝的形状更加规整,未出现诸如弧形裂缝这样的异形裂缝,内衬墙的整体浇筑质量得到较大幅度提升.进一步说明,提高内衬墙混凝土的现场坍落度,不仅有利于现场施工,还可以在确保内衬墙施工质量的前提下,增大内衬墙浇筑时的分段长度,有利于缩短施工工期,具有显著的社会经济效益.

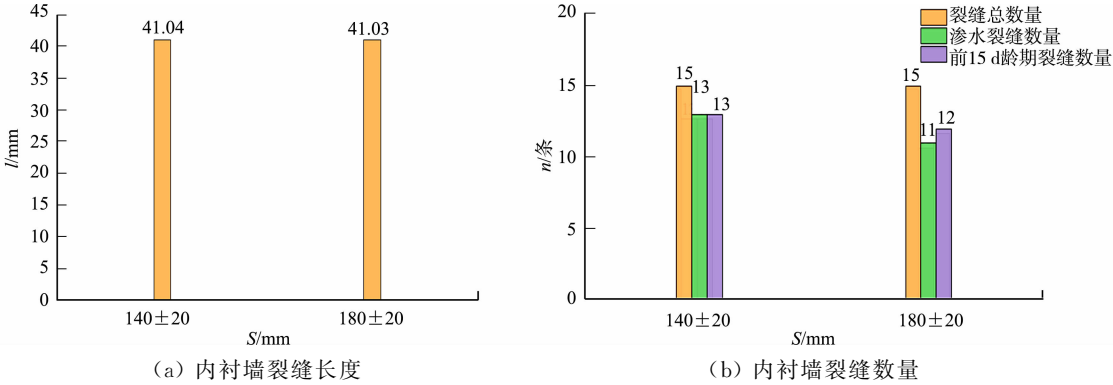


图 7 两种现场坍落度混凝土的浇筑质量对比
Fig. 7 Comparison of concrete casting quality between two kinds of site slump

3) 混凝土若振捣不均匀,成型后,内衬墙混凝土上、下部分差异性沉降会造成体积收缩,形成沉降缝^[13].混凝土前期水泥水化产生大量的水化热,使混凝土内部温度急剧升高,当降温时,混凝土开始收缩产生变形,压应变逐渐转变为拉应变.由于混凝土收缩的不同步性,当混凝土中累计的应变能超过了极限值时,发生的能量释放导致混凝土开裂,这种不同步的收缩主要包括温度收缩和湿度收缩^[9].

对于采用现场坍落度为 (140 ± 20) mm 的混凝土浇筑的内衬墙,由于混凝土流动性差、墙体宽度小、钢筋分布密集等,使混凝土振捣得不充分、不密实,加剧了收缩的不同步性,因此,开裂程度较大且易

形成蜂窝、麻面、露筋、沉降缝、渗点开裂等现象. 对于采用现场坍落度为 (180 ± 20) mm 的混凝土浇筑的内衬墙,内衬墙分段长度由 12 m 增加至 18 m 后,内衬墙受到来自凿毛后的地下连续墙的约束作用加强,开裂程度理应增大,但由于单方混凝土水泥用量和矿粉用量减少,粉煤灰掺量增加,混凝土的温度效应和自收缩变形减小,且由于流动性的增强,混凝土振捣得更为均匀、密实,结构抗裂能力增强. 因此,在施工分段长度增大的情况下,内衬墙开裂程度并未增大.

若保湿养护工作不及时、不到位,也会导致内衬墙内外失水程度差异大,并产生表面裂缝^[27](图 6(a)),及时的保湿养护即可避免此类裂缝的产生. 在分层浇筑内衬墙的过程中,浇筑相邻层的时间间隔过长会导致冷缝的产生(图 6(b)),合理调度混凝土和控制好浇筑间隔时间即可避免此类裂缝的产生. 位于溜槽下方的混凝土未振捣充分(图 5),导致了蜂窝的产生,由于蜂窝附近的混凝土未振捣密实,致使该处混凝土抗裂能力下降,所以该处裂缝分布比较密集,施工过程中,对于溜槽下方和施工缝侧等不易振捣的部位,可通过安装附着式振动器等加强振捣.

2.2 混凝土强度等级

混凝土的强度等级越高,水胶比越小,单方混凝土中的水泥用量越高,温度效应越明显,自收缩变形量越大,早龄期的混凝土强度,徐变越小,这对利用混凝土的徐变减小混凝土在收缩变形过程中受到的约束作用是不利的. 为分析混凝土的混凝土强度等级对内衬墙开裂的影响,在施工方法和养护方法均相同的情况下,分别对杏滨站某 12 m 内衬墙段和董任站某 12 m 内衬墙段 28 d 龄期的裂缝生成情况进行统计,两种强度等级混凝土的内衬墙裂缝分布,如图 8 所示. 图 8 中:杏滨站内衬墙混凝土的设计参数为配合比 B(表 1);董任站内衬墙混凝土的设计参数为配合比 D(表 1),混凝土原材料信息参见表 2. 两种强度等级混凝土内衬墙的浇筑质量对比,如图 9 所示.

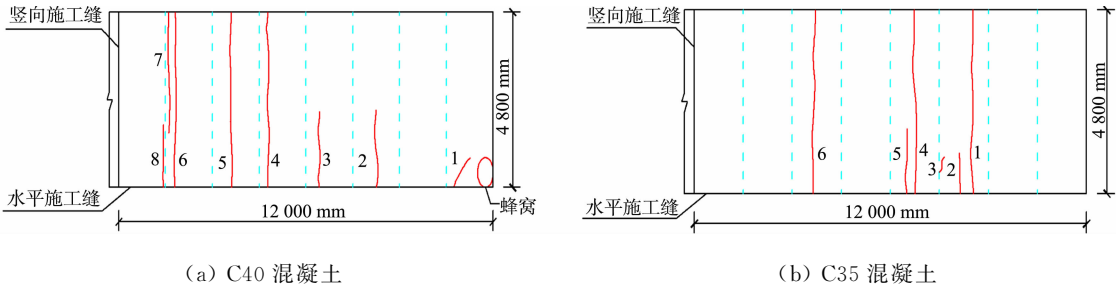


图 8 两种强度等级混凝土的内衬墙裂缝分布

Fig. 8 Distribution of lining wall crack between two strength grades of concrete

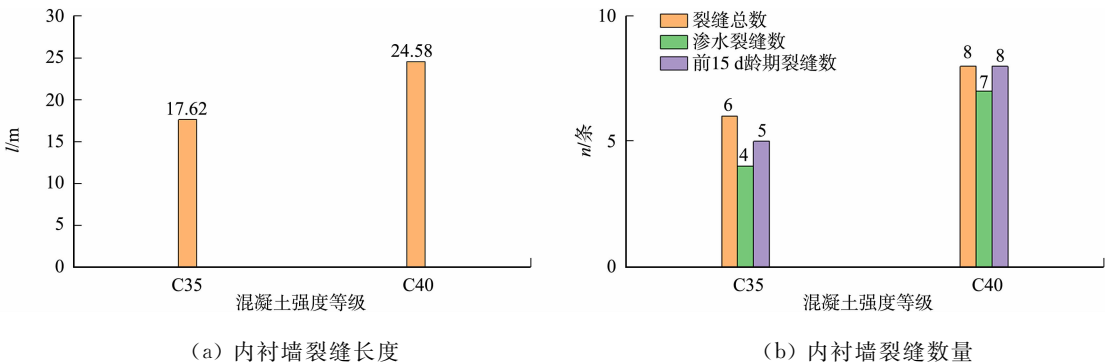


图 9 两种强度等级混凝土的内衬墙的浇筑质量对比

Fig. 9 Comparison of concrete casting quality between two strength grades of concrete lining wall

由图 9 可知:C40 混凝土浇筑的内衬墙裂缝总数量和裂缝总长度相较于 C35 混凝土浇筑的内衬墙分别增加了 33.33%和 39.50%,裂缝数量增加了 75%;混凝土的强度等级对内衬墙开裂有较为明显的影响,对于叠合墙结构,由于内衬墙受到了凿毛后的地下连续墙及施工缝侧先期浇筑成型的混凝土的约束作用,内衬墙混凝土收缩变形越大,所受约束作用就越强,开裂风险就越高. 因此,对于水灰比较小的高强度混凝土,可通过添加混凝土外加剂,减小水泥用量,或在保证混凝土的强度和施工性能的前提下,提高粉煤灰的掺量以替代部分水泥和矿粉,减小混凝土的自收缩和温度效应,降低混凝土的开裂风险.

3 施工工艺对内衬墙开裂的影响

3.1 跳仓浇筑法

跳仓浇筑法将内衬墙结构分隔成若干不连续的区块,并对其进行施工,先行施工的混凝土区块的温度应力和收缩变形得到较大程度的释放;待先行施工的混凝土区块的温度和收缩趋于稳定后,再施工其余区块,使各混凝土区块连接成整体;后期混凝土结构依靠自身的抗拉强度抵抗温度应力和收缩变形.内衬墙跳仓浇筑法施工图,如图 10 所示.

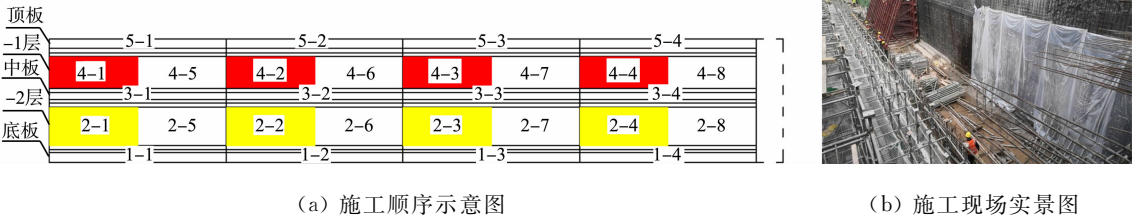


图 10 跳仓浇筑法施工图

Fig. 10 Construction of sequence casting method

分别对杏滨站采用配合比 B 的 37.5 m 墙段(分 3 段施工)和采用配合比 C 的 36.0 m 墙段(分 3 段施工)的跳仓浇筑法.划分的 6 段内衬墙除施工顺序不同外,浇筑方法和养护方法均相同,并对其 28 d 龄期裂缝生成情况进行统计,不同墙段裂缝具体分布,如图 11 所示.图 11 中:单侧约束段内衬墙受到了地连墙、单侧竖向施工缝和底部水平施工缝侧先期浇筑成型的混凝土的约束;“跳仓”段内衬墙受到了地连墙和底部水平施工缝侧先期浇筑成型的混凝土的约束;双侧约束段内衬墙受到了地连墙、两侧竖向施工缝和底部水平施工缝侧先期浇筑成型的混凝土的约束.

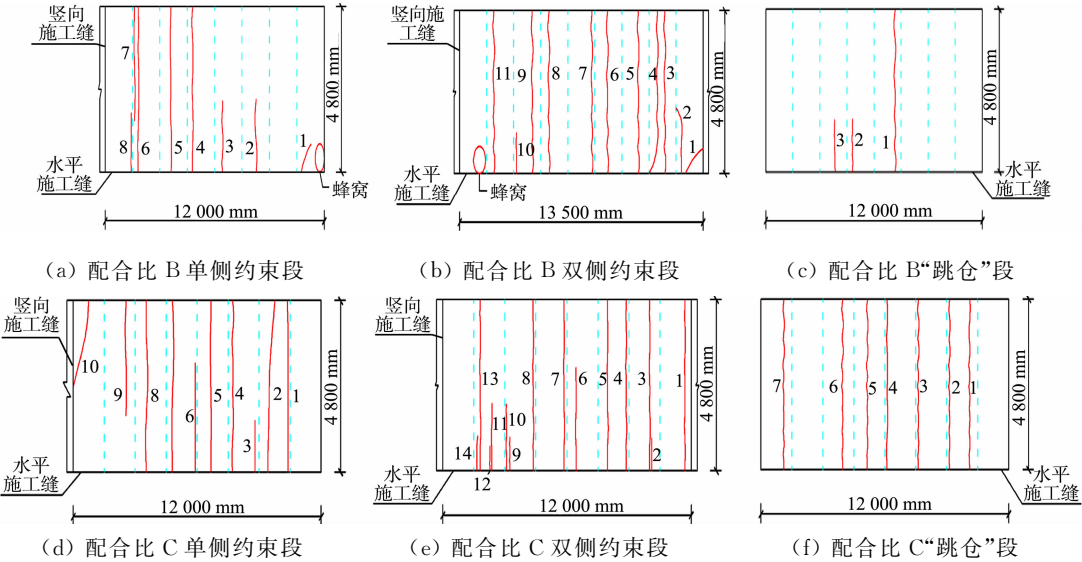


图 11 采用跳仓浇筑法施工时不同墙段的裂缝分布

Fig. 11 Distribution of different wall sections crack using construction of sequence casting method

采用跳仓浇筑法各墙段的浇筑质量对比,如图 12 所示.

由图 12 可知:对于采用配合比 B 的 37.5 m 墙段,“跳仓”段内衬墙的裂缝数量和裂缝长度相较于单侧约束段内衬墙分别减小 62.50%和 67.74%;双侧约束段内衬墙的裂缝数量和裂缝长度相较于单侧约束段内衬墙分别增加 37.50%和 74.86%;单侧约束段内衬墙的裂缝数量和裂缝长度位于二者之间.

由图 12 还可知:对于采用配合比 C 的 36.0 m 墙段,“跳仓”段内衬墙的裂缝数量和裂缝长度相较于单侧约束段内衬墙分别减小 30.00%和 14.28%;双侧约束段内衬墙的裂缝数量和裂缝长度相较于单侧约束段内衬墙分别增加 40.00%和 12.15%;单侧约束段内衬墙的裂缝数量和裂缝长度位于二者之间.无论是采用配合比 B 的 37.5 m 墙段还是采用配合比 C 的 36.0 m 墙段,“跳仓”段内衬墙的裂缝数

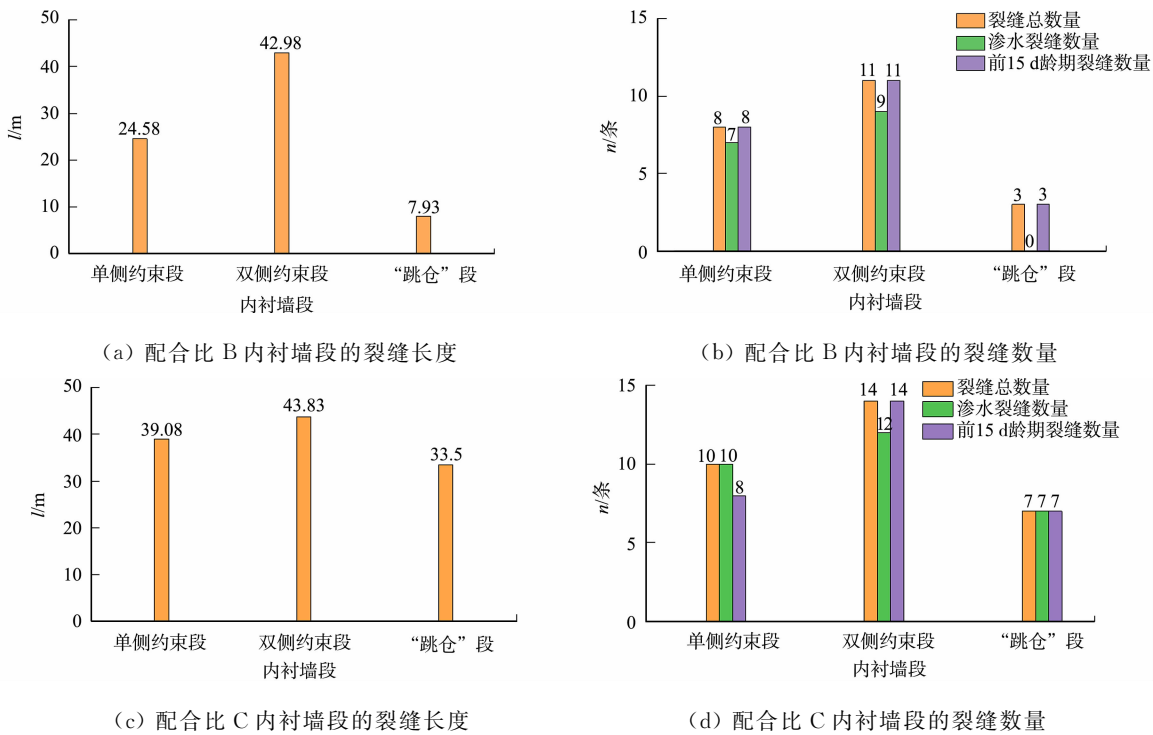


图 12 采用跳仓浇筑法各墙段的浇筑质量对比

Fig. 12 Comparison of casting quality of each wall section using sequence casting method

量最少,单侧约束段内衬墙次之,双侧约束段内衬墙的裂缝数量最多.

随着内衬墙所受约束作用的加强,内衬墙的裂缝数量、裂缝长度和贯穿性裂缝数量随之增加.因此,内衬墙所受约束作用的强弱是造成内衬墙开裂的主要原因之一.采用跳仓浇筑法施工可以减小混凝土收缩变形过程中受到的约束作用,减少收缩裂缝的产生,有利于防水性能要求较高的地铁车站.

3.2 冷却管技术

混凝土在前期升温的过程中,体积有一定程度的膨胀,在降温的过程中,体积则会有一定程度的收缩,即混凝土有明显的温度变形过程,混凝土体积的温升膨胀对混凝土的抗裂是有利的,体积膨胀在混凝土中产生预压应力,能够有效减少混凝土拉应力的产生,而混凝土体积的温降收缩变形则是造成混凝土开裂的主要原因,混凝土的温降收缩变形会受到先期浇筑成型的混凝土的约束作用,从而导致混凝土受拉开裂.若通过一定的技术手段减少混凝土的温降收缩变形量,则可较好起到减少混凝土开裂的效果.因此,考虑采用冷却管技术,对冷却管通水减小混凝土的温升幅度、温升速率、温降幅度和温降速率,以达到减小混凝土的温降收缩变形量的效果.

对内衬墙采用冷却管技术与未采用冷却管技术的施工效果进行对比,现对杏滨站某 12 m 内衬墙段采用冷却管技术,另一 12 m 内衬墙段未采用冷却管技术,对某 24 m 内衬墙段一半采用冷却管技术,另一半未采用冷却管技术.内衬墙冷却管布置示意图,如图 13 所示.图 13 中:冷却管为内径 30 mm、壁厚 1.5 mm 的铁皮管.在其他养护方式均相同的情况下,采用与未采用冷却管技术的内衬墙段裂缝分

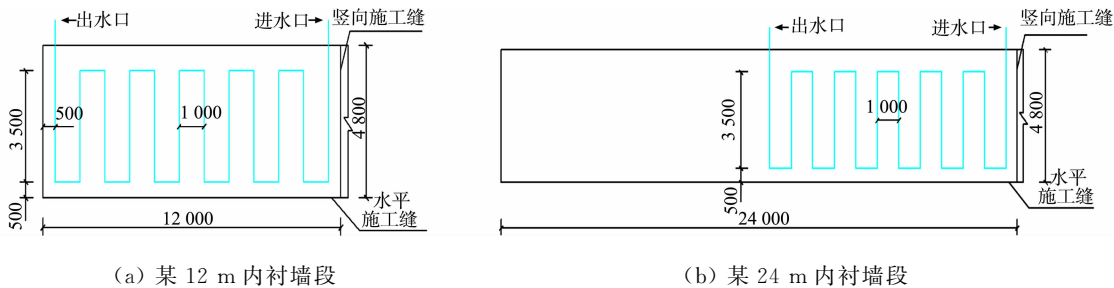


图 13 内衬墙冷却管布置示意图(单位:mm)

Fig. 13 Layout diagrams of cooling pipes of lining wall (unit: mm)

布,如图 14 所示.采用与未采用冷却管技术的内衬墙段的浇筑质量对比,如图 15 所示.

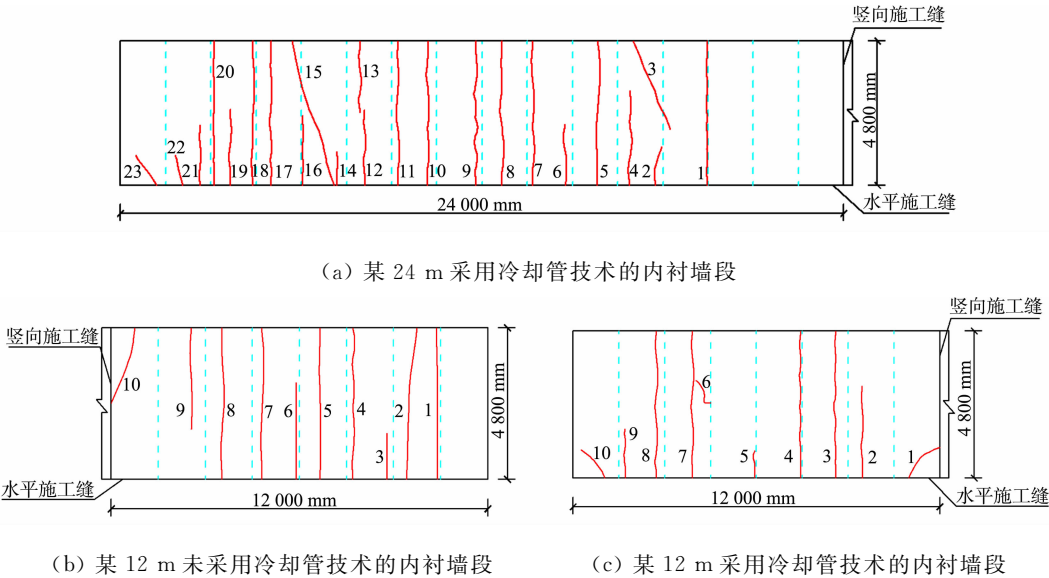


图 14 采用与未采用冷却管技术的内衬墙段裂缝分布

Fig. 14 Distribution of lining section crack with and without cooling pipe technology

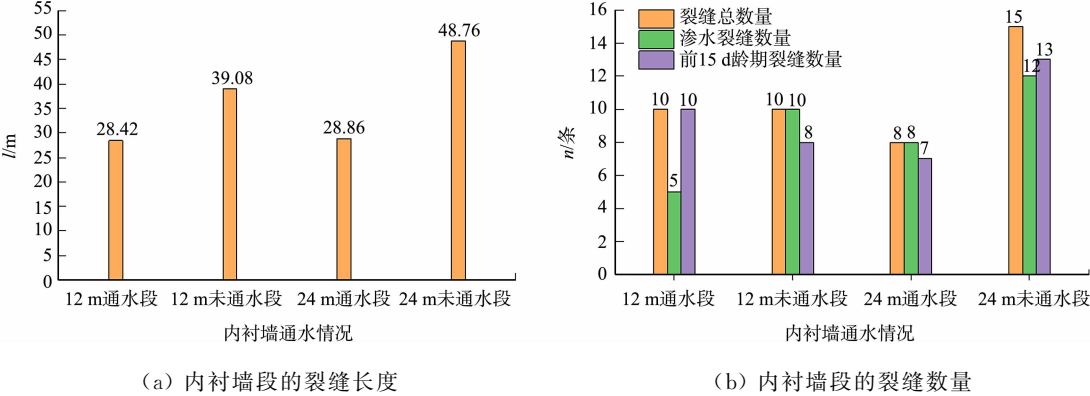


图 15 采用与未采用冷却管技术的内衬墙段的浇筑质量对比

Fig. 15 Comparison of casting quality of lining wall section with and without cooling pipe technology

由图 15 可知:两段 12 m 内衬墙生成的裂缝数量相同,但采用冷却管技术的内衬墙段裂缝长度相比于未采用冷却管技术的内衬墙段下降了 27.28%,渗水裂缝数量减少了 50.00%;对于 24 m 的内衬墙段,采用冷却管技术的 12 m 墙段的裂缝数量相较于未采用冷却管技术的部分墙段下降了 46.67%,裂缝长度下降了 40.81%,裂缝数量减少了 33.33%.

冷却管技术能够降低内衬墙的开裂程度,减少贯穿性裂缝数量,进一步说明混凝土水泥水化的温度效应是内衬墙开裂的主要原因之一.

3.3 施工分段长度

内衬墙所受约束作用的强弱是造成内衬墙开裂的主要原因之一.叠合墙结构是将地下连续墙内侧凿毛,并预埋钢筋接驳器和拉结钢筋,使地下连续墙与后期浇筑的内衬墙连接成整体的一种结构形式.因此,凿毛后的地下连续墙对内衬墙有着较强的约束作用,施工分段长度越长,墙体受到的约束就越强,开裂风险就越高.

为分析内衬墙的分段长度对开裂的影响,在施工方法和养护方法均相同的情况下,分别对杏滨站某 12 m 内衬墙段和某 18 m 内衬墙段的 28 d 龄期的裂缝生成情况进行统计.

不同施工分段长度(L)的内衬墙段裂缝分布,如图 16 所示.不同施工分段长度的内衬墙段的浇筑质量对比,如图 17 所示.由图 17 可知:当内衬墙的分段长度增加 50%,即由 12 m 增大到 18 m 后,裂缝数量增长了 87.50%,裂缝长度增长了 66.92%,渗水裂缝数量增加了 57.14%.因此,施工分段长度越长,结构的开裂程度越高,说明施工分段长度是影响内衬墙开裂的主要原因之一,在施工条件允许的情

况下,应尽可能采用较小的分段长度施工。

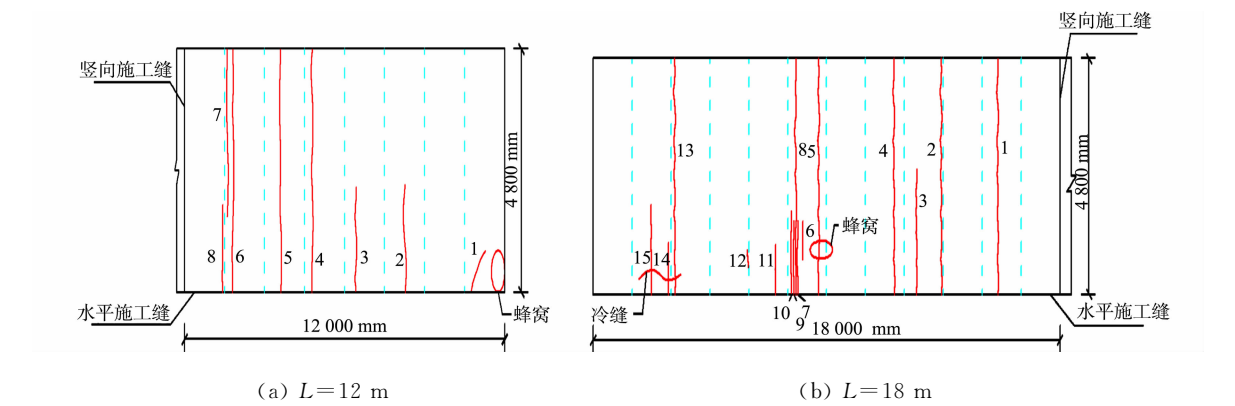
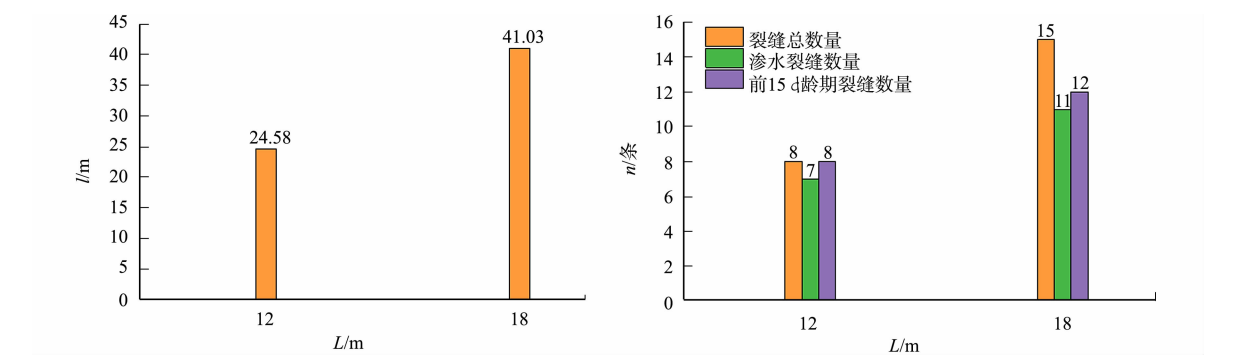


图 16 不同施工分段长度的内衬墙段裂缝分布

Fig. 16 Distribution of lining wall section crack of different construction section lengths



(a) 内衬墙段裂缝长度 (b) 内衬墙段裂缝数量

图 17 不同施工分段长度的内衬墙段的浇筑质量对比

Fig. 17 Comparison of casting quality of lining wall sections of different construction section lengths

4 地铁车站叠合墙内衬墙混凝土裂缝整体分析

为进一步分析叠合墙内衬墙混凝土的开裂特点,对除现场坍落度为 (140 ± 20) mm 的 12 m 内衬墙段和采用 C35 混凝土浇筑的 12 m 内衬墙段外的其余重任站 9 段共计 127.5 m 内衬墙的 28 d 裂缝生成情况进行整体分析,该 9 段内衬墙共生成裂缝 101 条。内衬墙裂缝形态及首裂部位,如图 18 所示。

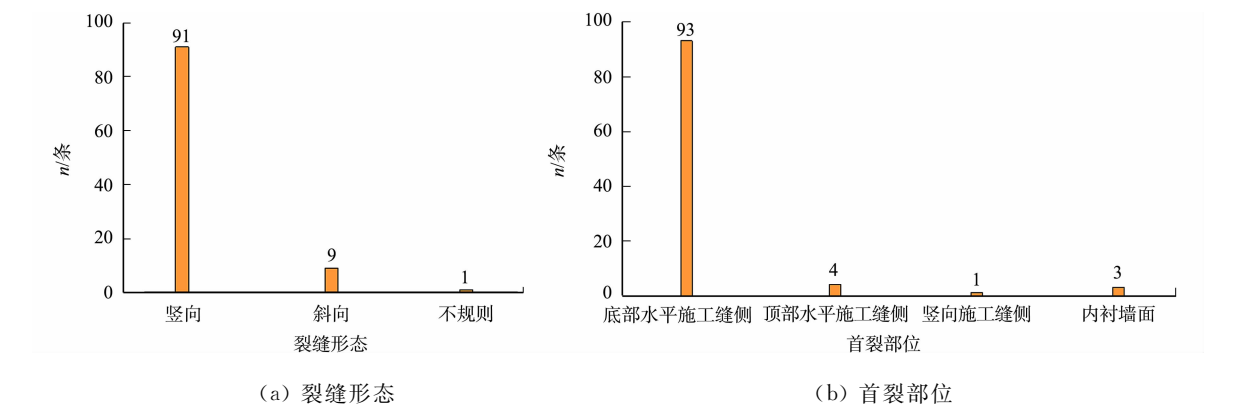


图 18 内衬墙裂缝形态及首裂部位

Fig. 18 Cracking form and earliest cracking location of lining wall

由图 18(a)可知:地铁车站叠合墙内衬墙混凝土的裂缝以竖向裂缝为主,竖向裂缝占裂缝总数的 90.10%,斜裂缝和不规则裂缝分别占比 8.91% 和 0.99%。竖向裂缝分布比较均匀,斜裂缝的角度也较为接近,结合分析内容判断,竖向裂缝和斜裂缝是由于内衬墙混凝土的温度收缩和自收缩受到了凿毛后的地下连续墙、施工缝侧先期浇筑成型的混凝土和混凝土自身基体的约束作用,导致内衬墙混凝土中产

生拉应变,当拉应变超过了混凝土材料的极限抗拉应变时,结构即开裂。

由图 18(b)可知:首裂部位位于内衬墙底部水平施工缝处、顶部水平施工缝处、竖向施工缝处和内衬墙面上的裂缝,其分别占裂缝总数的 92.08%,3.96%,0.99%和 2.97%。

裂缝从内衬墙底部水平施工缝处首先开裂的原因是施工缝处存在先期浇筑成型的混凝土,该处混凝土已经稳定,新浇筑的混凝土在早龄期中,随着温度的下降,结构的体积不断收缩,体积收缩受到了底部水平施工缝侧混凝土和地下连续墙的约束作用,且施工缝侧混凝土进行了凿毛并承受了内衬墙的重力,这种约束作用更为强烈,致使新浇筑的结构中逐渐产生拉应变,随着龄期的增长,新浇筑的混凝土结构的弹性模量不断增大,徐变不断减小,这种约束作用越来越强,结构中的拉应变越来越大,当拉应变超过了混凝土材料的极限抗拉应变时,结构体便开裂,一般为贯穿性的裂缝。

裂缝从内衬墙顶部水平施工缝处首先开裂是由于地铁车站从下至上采取分断面施工的方法,早龄期内衬墙还未施工车站中板,该部位直接与空气接触,混凝土散热速度快,温降速率大,温度收缩变形量大,温度收缩会受到凿毛后的地下连续墙和混凝土自身基体的约束作用,导致靠近施工缝侧的混凝土产生拉应变,当拉应变超过了混凝土材料的极限抗拉应变时,结构即开裂。

裂缝从内衬墙面上开裂的原因是内衬墙面直接与空气接触,接触面积较大,若保湿养护不及时或不到位,混凝土表面极易散失一定的水分,且表面散失水分多,内部散失水分少,导致混凝土表面的干燥收缩变形大,内部干燥收缩变形小,表面的收缩变形受到内部收缩变形的约束作用^[27],从而使混凝土表面产生拉应变,当拉应变超过了混凝土材料的极限抗拉应变时,结构即开裂,该类裂缝为表面裂缝,宽度较其他裂缝更小,深度较浅且无渗水,图 14(c)中的 6 号裂缝,图 16(b)的 6 号和 12 号裂缝均为此类裂缝。

裂缝从内衬墙竖向施工缝处首先开裂是由内衬墙施工工艺决定的,在浇筑下一段内衬墙前,会拆除内衬墙竖向施工缝处的钢筋格栅,并对该处混凝土进行凿毛,因此,该处混凝土对新浇筑的混凝土具有较强的约束作用,新浇筑混凝土的收缩变形在竖向施工缝侧混凝土与地下连续墙的共同约束作用下,最终在该处受拉开裂。

内衬墙裂缝出现龄期及渗水情况分析,如图 19 所示。图 19 中: T 为龄期。由图 19 可知:在内衬墙浇筑完成后的 15 d 龄期内生成的裂缝数量占裂缝总数的 92.08%,渗水裂缝数量占裂缝总数的 80.20%;地铁车站叠合墙内衬混凝土生成的裂缝主要为收缩裂缝,且大多数为贯穿性裂缝。

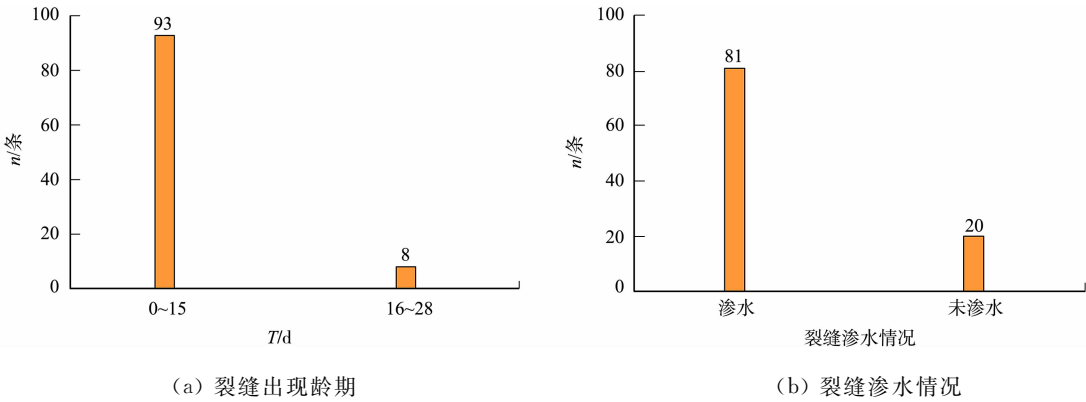


图 19 内衬墙裂缝出现龄期及渗水情况

Fig. 19 Concrete age of crack occurring and water seepage situation of lining wall

5 不同施工因素重要性等级划分

以单位长度内衬墙的裂缝数量为判断依据,将混凝土现场坍落度、混凝土强度等级、跳仓浇筑法、冷却管技术和施工分段长度对提高内衬墙抗裂能力的重要性进行划分。各施工因素重要性等级划分,如表 4 所示。表 4 中:视跳仓浇筑法的重要性系数为 1.00,其余施工因素对应的优化前、后的裂缝密度比值与跳仓浇筑法对应的优化前、后的裂缝密度比值 2.68 即为相应重要性系数; ρ_L 为裂缝密度。由表 4 可知:各施工因素对提高内衬墙抗裂能力的重要性依次是跳仓浇筑法、冷却管技术、混凝土现场坍落度、混凝土强度等级和施工分段长度。

表 4 各施工因素重要性等级划分

Tab. 4 Classification of importance of each construction factor

| 施工因素 | 条件 | ρ_L /条·m ⁻¹ | 优化前、后比值 | 重要性系数 |
|----------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
| 混凝土现场坍落度 | (140±20) mm | 1.25 | 1.51 | 0.56 |
| | (180±20) mm | 0.83 | | |
| 混凝土强度等级 | C40 | 0.67 | 1.34 | 0.50 |
| | C35 | 0.50 | | |
| 跳仓浇筑法 | 单侧约束段 | 0.67 | 2.68 | 1.00 |
| | “跳仓”段 | 0.25 | | |
| 冷却管技术 | 未采用 | 1.25 | 1.87 | 0.70 |
| | 采用 | 0.67 | | |
| 施工分段长度 | 18 m | 0.83 | 1.24 | 0.46 |
| | 12 m | 0.67 | | |

6 结论

1) 地铁车站叠合墙内衬混凝土生成的裂缝主要为收缩裂缝,且大多数为贯穿性裂缝,形态以竖向为主,且分布较为均匀.新浇筑的内衬墙的底部水平施工缝侧最容易开裂,且墙面存在少许表面裂缝.该类裂缝是由于混凝土内、外失水程度差异较大所致,可在拆除内衬墙钢模板后,加强内衬墙的保湿养护,避免此类裂缝.

2) 将强度为 C40 内衬墙混凝土的现场坍落度由(140±20) mm 提高至(180±20) mm 后,混凝土的 7 d 龄期和 28 d 龄期强度值会有小幅度下降,但均能满足现场施工要求.此外,流动性的提高可以增大内衬墙分段浇筑长度,而不降低施工质量,缩短施工工期.混凝土的强度等级对内衬墙开裂有较为明显的影响,随着混凝土强度等级的提高,内衬墙开裂程度增大,若无特殊要求,不建议使用 C40 混凝土.

3) 叠合结构内衬墙所受约束作用的强弱是造成内衬墙开裂的主要原因之一,采用跳仓浇筑法施工内衬墙时,可以较大程度地减小内衬墙混凝土所受的约束作用,减小内衬墙的开裂程度,不仅可以降低地铁车站后期的结构维护成本,而且极具环境效益.混凝土水泥水化的温度效应是引起内衬墙开裂的主要原因之一,使用冷却管技术可以降低这种温度效应,减小内衬墙的开裂程度,地铁车站叠合墙的内衬墙厚度为 400 mm 时,建议使用冷却管技术,通水时长至少保证 4 d.施工分段长度是引起内衬墙开裂的主要原因之一,内衬墙的施工分段长度越长,受到的约束作用越强,开裂程度越大,在施工条件允许的情况下,应尽可能减小内衬墙的施工分段长度,建议一次浇筑长度为 12 m.

4) 各施工因素对提高内衬墙抗裂能力的重要性依次是跳仓浇筑法、冷却管技术、混凝土现场坍落度、混凝土强度等级和施工分段长度.

参考文献:

[1] 赵铭. 地铁车站叠合墙质量控制要点分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(11):915,679.

[2] 谢咸颂. 提高混凝土抗裂性能的配合比优化设计方法[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2010, 40(4):426-429. DOI: 10.15991/j.cnki.411100.2010.04.009.

[3] 叶以挺,李东,郑伟敏. 超长地下工程大体积混凝土温控抗裂技术[J]. 混凝土, 2008(12):113-115. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2008.12.037.

[4] 胡匡艺,孙振平,徐忠伟,等. 地铁车站混凝土开裂原因及修补措施[J]. 江苏建材, 2017(2):29-32. DOI:10.3969/j.issn.1004-5538.2017.02.008.

[5] 张坚,张士山. 地下车站侧墙抗裂混凝土配合比设计及裂缝控制[J]. 江苏建筑, 2018(3):72-74,90. DOI:10.3969/j.issn.1005-6270.2018.03.019.

[6] 吴栋彦. 地铁车站工程中叠合墙渗漏的原因分析及预防[J]. 建筑施工, 2011, 33(6):506-508. DOI:10.3969/j.issn.1004-1001.2011.06.030.

[7] 汤继新,周俊宏,王育江,等. 宁波地铁车站混凝土刚性自防水技术研究及应用[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(9):49-53,93. DOI:10.3969/j.issn.1001-702X.2020.09.011.

[8] 朱银虎,孟庆超,徐文. 抗裂自防水混凝土性能研究及其在南京地铁 10 号线中的应用[J]. 中国建筑防水,2020(6): 34-38. DOI:10. 15901/j. cnki. 1007-497x. 2020. 06. 009.

[9] 谢小利,朱惠英,卢凌寰,等. 地铁车站超长结构混凝土梁的裂缝控制研究[J]. 混凝土,2017(3):150-153. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-3550. 2017. 03. 037.

[10] 曾文波,孙振平,宋益晓,等. 江西省某地铁车站混凝土结构裂缝控制研究[J]. 混凝土世界,2017(3):44-48. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-7011. 2017. 03. 006.

[11] 徐文,李忠超,张建亮,等. 施工因素对地铁车站侧墙混凝土早期裂缝影响监测分析[J]. 混凝土与水泥制品,2020 (9):84-87. DOI:10. 19761/j. 1000-4637. 2020. 09. 084. 04.

[12] 张翠强,田力达,李六连,等. 基于监测数据的地铁车站混凝土早期开裂风险评估[J]. 建筑结构,2017,47(增刊 1): 939-943. DOI:10. 19701/j. jzjg. 2017. s1. 202.

[13] 刘加平,田倩,李华,等. 城市轨道交通地下车站抗裂防渗新技术[J]. 江苏建筑,2018(2):8-13. DOI:10. 3969/j. issn. 1005-6270. 2018. 02. 002.

[14] 张雪松,邓景纹,董云德. 上海地铁车站结构防水措施评述[J]. 土木工程学报,2000,33(5):107-110. DOI:10. 3321/j. issn:1000-131X. 2000. 05. 020.

[15] 李明,姚婷,王育江,等. 基于多场耦合机制的混凝土墙板结构裂缝控制[J]. 混凝土,2017(11):58-62. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-3550. 2017. 11. 014.

[16] 徐文,李忠超,张建亮,等. 水管冷却控制地铁车站侧墙混凝土早期开裂研究[J]. 中国建筑防水,2019(12):51-55. DOI:10. 15901/j. cnki. 1007-497x. 2019. 12. 014.

[17] 陈坤泉. 地铁车站顶板施工阶段开裂分析及“跳仓法”应用[D]. 厦门:厦门大学,2017.

[18] 梁传浩,袁渊,王珂昊. 深圳国际会展中心超长地下室裂缝控制技术[J]. 工程建设与设计,2020(17):16-18. DOI: 10. 13616/j. cnki. gcjsysj. 2020. 09. 006.

[19] 庞程程,付敏,王刚,等. 大型国际航站楼超长、大体积混凝土结构的跳仓法施工技术[J]. 建筑施工,2020,42(7): 1169-1170,1177. DOI:10. 14144/j. cnki. jzsg. 2020. 07. 019.

[20] 陈李超. 筏板大体积混凝土跳仓法施工技术研究[J]. 工程技术研究,2020,5(14):64-65. DOI:10. 3969/j. issn. 1671-3818. 2020. 14. 024.

[21] 何淳健,胡德军,雷华兴,等. 富水地层地下结构跳仓法施工技术的应用研究[J]. 建筑,2020(18):76-78.

[22] 史宏刚,刘振华,齐国刚,等. 巧用跳仓法取消施工后浇带[J]. 建设科技,2021(1):93-96. DOI:10. 16116/j. cnki. jskj. 2021. 01. 022.

[23] 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. DOI:10. 14144/j. cnki. jzsg. 2020. 07. 018.

[24] 沈萍. 雄安站超长大体积混凝土跳仓法施工技术[J]. 施工技术,2020,49(21):58-60,66. DOI:10. 7672/sgjs2020210058.

[25] 周文芳,陈瑜. 水泥基材料化学收缩和自收缩研究综述[J]. 中外公路,2013,33(4):300-303. DOI:10. 14048/j. issn. 1671-2579. 2013. 04. 004.

[26] 徐文,王育江,姚婷,等. 温度场与膨胀历程双重调控抑制混凝土开裂技术[J]. 新型建筑材料,2014,41(1):39-41, 45. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-702X. 2014. 01. 011.

[27] 李华,项彦勇. 地铁车站侧墙裂缝机理分析和控制[J]. 城市轨道交通研究,2005,8(4):82-85. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-869X. 2005. 04. 021.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)