

地下车站侧墙混凝土结构抗裂技术研究与应用^{*}郇 亮¹ 王全超^{2,3} 程 璐^{2,3} 占 文^{2,3}

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315101, 宁波; 2. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 430040, 武汉;

3. 海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室, 430040, 武汉)

摘 要 [目的]城市轨道交通工程地下车站侧墙混凝土开裂,会威胁地铁车站结构安全,需分析其开裂的原因,并提出地下车站侧墙混凝土控裂的关键技术。[方法]通过降低水泥用量及掺加高效抗裂剂,制备了低水化速率、微膨胀混凝土;对比研究了组分优化前后的混凝土对结构力学性能、绝热温升及体积变形的影响,从而验证地下车站侧墙混凝土组分改善后抗裂性能提高;在此基础上,对地下车站混凝土侧墙结构进行有限元模型仿真分析,计算不同侧墙厚度、分段长度对抗裂安全系数的影响,从而在满足抗裂安全系数前提下,确定不同季节地下车站混凝土侧墙分段浇筑的最佳长度;最后通过监测地下车站试验段各典型分段的温度变化规律,提出了侧墙混凝土温度控制指标。[结果及结论]地下车站侧墙混凝土收缩及侧墙混凝土受约束是引起地下车站混凝土侧墙开裂的主要原因。关键控裂措施为:引入高效抗裂剂提高混凝土抗裂性能,优化不同季节地下车站混凝土侧墙分段浇筑长度降低混凝土约束,严格控制混凝土温度指标。采用上述关键控裂措施后,地下车站侧墙混凝土裂缝数量极大减少。

关键词 地铁车站;侧墙开裂;抗裂技术;抗裂混凝土

中图分类号 TU755.9:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.026

Research and Application of Crack-resistance Technology for Underground Station Side-wall Concrete Structure

LI Liang¹, WANG Quanchao^{2,3}, CHENG Lu^{2,3}, ZHAN Wen^{2,3}

(1. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China; 2. CCCC Wuhan Harbour Engineering Design and Research Co., Ltd., 430040, Wuhan, China; 3. Hubei Key Laboratory of Advanced Materials and Reinforcement Technology Research for Marine Environment Structures, 430040, Wuhan, China)

Abstract [Objective] Cracking in the concrete of urban rail transit project underground station side-walls can pose a threat to the structural safety of metro stations. It is essential to ana-

lyze the causes of cracking in the concrete of USSW (underground station side-walls) and propose key technologies for controlling it. [Method] Low hydration rate and slightly expansive concrete is prepared by reducing cement usage and adding highly effective anti-cracking agents. Its impacts on structural mechanical properties, thermal insulation temperature rise, and volume deformation are compared before and after the composition optimization, which verifies the improvement of USSW concrete composition crack-resistance performance after optimization. Based on this, a finite element model simulation analysis is carried out on USSW concrete structures, and the influence of different wall thicknesses and segment lengths on crack-resistance safety factor is calculated. Thus, under the premises of satisfying crack-resistance safety factor, the optimal lengths of USSW segmented concrete-pouring for different seasons are determined. Finally, the temperature change law of typical segments in the experimental section of the underground station is monitored to propose temperature control indicators for side-wall concrete. [Result & Conclusion] The contraction of USSW concrete and the constraints on it are the main causes of cracking in USSW concrete. Key crack control measures include introducing highly effective anti-cracking agents to enhance concrete crack-resistance performance, optimizing the USSW segmented concrete-pouring lengths for different seasons to reduce concrete constraints, and strictly controlling concrete temperature indicators. Implementing these key crack control measures significantly reduce the number of cracks in the concrete of USSW.

Key words metro station; side-wall cracking; crack-resistance technology; crack-resistant concrete

近年来,我国的城市轨道交通地下工程向大型化、超长、复杂化方向发展。混凝土工程质量对建设投资、后期运营维护的影响极为深远。由于地下水的存在,若地铁车站混凝土结构产生裂缝,就会造成主体结构板间渗水。可见,混凝土开裂是威胁地铁车站结构安全的主要原因之一。地铁工程的

^{*} 宁波市科技项目(2019C50019)

相关调查表明:在天津地铁既有线隧道及车站结构的侧壁上,有一定数量的裂缝出现,其中有恶性贯穿裂缝,长度约 2~3 m,宽度约 0.4~5.0 mm 不等,并伴有地下水的渗漏现象;北京和上海等城市的地铁也发现了侧墙的开裂现象。可见,地下工程的侧墙的开裂比较普遍,在地下工程中是一个尚未解决的难题。

分析侧墙结构可知,现浇大体积混凝土侧墙受底板的约束较大且结构超长,受温降收缩及自收缩的叠加效应影响,很容易出现裂缝,且后期的干燥收缩会进一步加剧裂缝产生^[1-2]。对此,本文以宁波轨道交通 4 号线丽江路站侧墙为研究对象,配制抗裂混凝土,以降低混凝土材料收缩,并设计合适的侧墙尺寸,以减小内外约束。

1 抗裂混凝土的配置试验

1.1 原材料

试验抗裂混凝土所用原材料包括 PO 42.5 普通硅酸盐水泥、Ⅱ级粉煤灰、S95 级矿粉、粗集料为

5~25 mm 的连续级配碎石、细度模数为 2.8 的河砂,苏博特的 HME-V 型抗裂剂,聚羧酸系高性能减水剂(减水率为 26%,含固量为 21%)。拌合用水采用洁净自来水。

1.2 抗裂混凝土的配合比设计及性能

配合比设计原则:①降低水泥用量;②采用粉煤灰、矿粉双掺的胶凝材料体系,降低混凝土水化热;③掺加高效抗裂剂,复合氧化钙膨胀剂及缓凝成分,补偿混凝土自收缩,降低水化热。

根据大量混凝土试验结果,按上述配合比设计原则,优选出混凝土性能要求推荐配合比。根据 JGJ 55—2019《普通混凝土配合比设计规程》,参考宁波地铁 4 号线其他站地下侧墙 C35 混凝土现场使用情况,确定基本配合比。不同配合比下的侧墙 C35 混凝土掺和量如表 1 所示。按推荐配合比和基准配合比制作混凝土试件(A 组试件为采用推荐配合比的抗裂混凝土,B 组试件为采用基准配合比的基准混凝土),并测试混凝土试件的相关受力性能,结果如表 2 所示。

表 1 不同配合比下的侧墙 C35 混凝土掺和量
Tab.1 Side wall C35 concrete mixing amount under different mix ratios

配合比	掺和量/(kg/m ³)								
	水泥	矿粉	粉煤灰	HME-V 型抗裂剂	砂	大石	小石	减水剂	水
推荐配合比	250	55	54	31	745	790	320	7.31	145
基准配合比	265	55	69	0	745	790	320	7.31	145

表 2 不同混凝土试件的受力性能
Tab.2 Stress performance of different concrete specimens

龄期/d	抗压强度/MPa		劈拉强度/MPa	
	A 组试件	B 组试件	A 组试件	B 组试件
3	18	22	1.50	1.21
7	33	34	2.35	2.12
28	46	45	3.04	2.64

与 B 组试件相比,A 组试件采用了 HME-V 型抗裂剂取代部分水泥及粉煤灰掺量。由表 2 可知:A 组试件 3 d、7 d 的抗压强度较低,28 d 后的抗压强度略高;HME-V 型抗裂剂的掺入,可有效提升混凝土的劈拉强度,这将有利于提高混凝土的抗裂性能。

测试两组试件的绝热温升及自生体积变形,结果如图 1 及图 2 所示。

由图 1 可知,抗裂剂的掺加能有效延缓混凝土水化速率的进行,从而降低混凝土早期的绝热温升,却不会影响混凝土最终的水化程度;未掺加抗

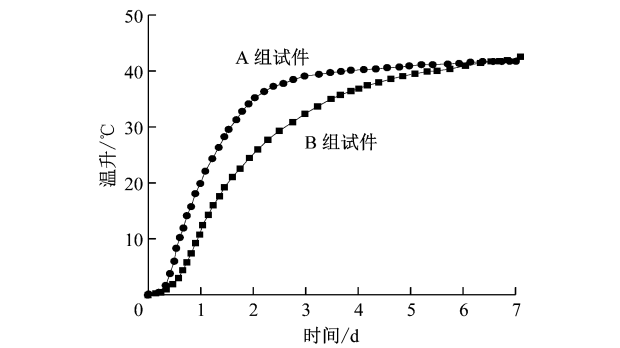


图 1 不同配合比混凝土试件的绝热温升
Fig. 1 Adiabatic temperature rise of concrete specimens under different mix ratios

裂剂的混凝土随龄期增加,其体积逐渐收缩——7 d 至 50 d 时体积收缩较大,此后体积变形逐渐减少,140 d 后体积基本稳定;掺加抗裂剂后,混凝土在早期体积膨胀明显,当混凝土温度达到峰值后,混凝土发生温降收缩、塑性收缩及干燥收缩,其体积不

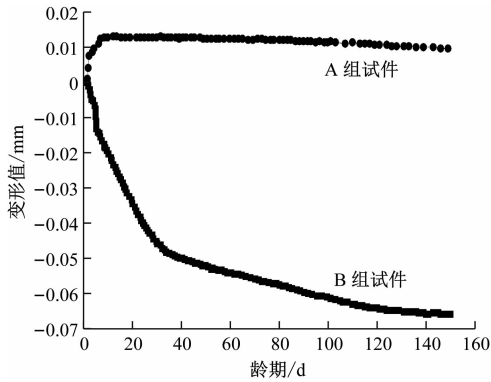


图2 不同配合比混凝土试件的自生体积变形
Fig.2 Autogenous volumetric deformation of concrete specimens under different mix ratios

断减小,但在抗裂剂的补偿作用下,混凝土体积仍在膨胀,随着抗裂剂的不断消耗,其补偿能力不断减弱,使得混凝土的总膨胀值在7 d至11 d时不断减小,并在后期使混凝土产生较少的收缩。

HME-V型抗裂剂有利于混凝土到达温度峰值后降温过程中的体积稳定,在混凝土继续水化且强度增长过程中,避免了体积收缩,实现了水化速率和膨胀历程协同调控,增大了膨胀材料在降温阶段的膨胀,降低了开裂风险。因此,现场浇筑的侧墙混凝土应优先采取使用推荐配合比的抗裂混凝土。

2 侧墙结构抗裂技术

2.1 侧墙厚度

宁波地铁车站主体结构侧墙厚度大多为0.7 m,车站两端头处侧墙厚度为0.8 m。为了探究侧墙厚度对开裂风险及分段长度的影响,采用midas FEA软件建立混凝土结构有限元模型进行仿真分析。

有限元模型中,侧墙厚度 h 分别选取为0.35 m、0.50 m、0.70 m、0.90 m,混凝土强度等级为C35,抗渗等级为P8,浇筑季节为夏季,环境气温为30℃,入模温度为35℃,采用钢模施工,分段浇筑长度为30 m。计算得到不同厚度墙体的抗裂安全系数 K 如图3所示。

一般认为,当 $K \geq 1.4$ 时,混凝土开裂风险较小,基本不会开裂。由图3可知,当 $h = 0.35$ m时,夏季浇筑的开裂风险最小;当 h 为0.50~0.90 m时,开裂风险极大。

2.2 侧墙的分段浇筑长度

分段浇筑长度 L 会影响混凝土收缩变形及所受到的外约束; L 越长,则混凝土开裂的风险就越

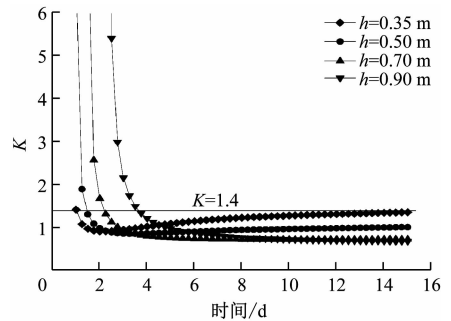
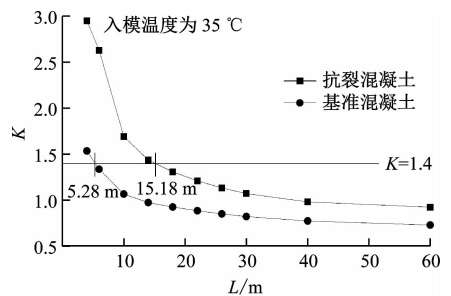


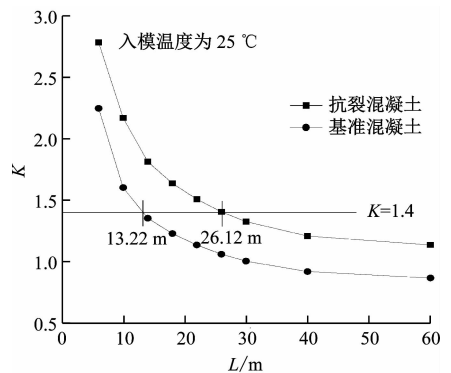
图3 不同厚度墙体 K 的计算结果
Fig.3 Calculation results of crack resistance safety coefficient K for walls with different thicknesses

高。因此,确定合适的分段浇筑长度可以降低混凝土的开裂风险。

基于混凝土不裂、不渗的目标,计算安全浇筑的最大分段浇筑长度 L_a 作为最佳分段浇筑长度,对构造措施进行优化。为明确不同浇筑季节的 L_a ,结合工程测试数据,利用有限元模型,计算分段浇筑长度不同时侧墙中下部混凝土的 K 。在其他参数不变情况下,选取春、秋季日均气温为20℃,夏季日均气温为30℃,冬季日均气温为10℃,入模温度比日均气温高5℃。计算得到不同浇筑季节不同分段浇筑长度下基准混凝土和抗裂混凝土的 K ,如图4所示。按 $K = 1.4$ 得到不同季节两种混凝土的 L_a 如表3所示。



a) 夏季浇筑



b) 春、秋季浇筑

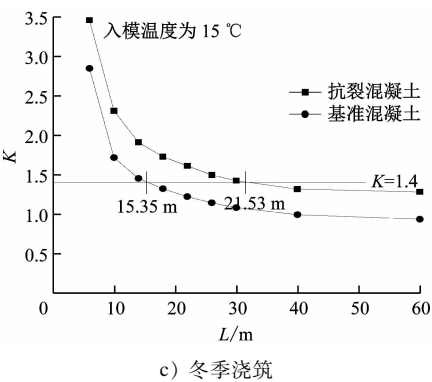


图 4 不同浇筑季节不同分段浇筑长度下的 K 计算结果
Fig. 4 Calculation results of crack resistance safety coefficient K under different pouring seasons and segmented pouring lengths

表 3 不同季节两种混凝土的 L_a

施工季节	日平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	入模温度/ $^{\circ}\text{C}$	L_a/m	
			基准混凝土	抗裂混凝土
夏季	30	35	5.28	15.18
春、秋季	20	25	13.22	26.12
冬季	10	15	15.35	31.53

结合图 4 及表 3 可知,当 L 增加时,外约束增强, K 降低,开裂风险明显上升;当 L 增加至一定长度时, K 趋于稳定;夏季入模温度较高, L_a 最短,春、秋季次之,冬季最长;夏季施工时,基准混凝土侧墙 L_a 仅为 5.28 m,抗裂混凝土侧墙 L_a 显著增至 15.18 m,说明采取抗裂混凝土可进一步降低开裂风险;当入模温度降低时,与基准混凝土相比,抗裂混凝土侧墙 L_a 显著增大,春、秋季施工增大约 12.90 m,冬季增大约 16.18 m。由此可见,抗裂混凝土能有效降低开裂风险系数,抑制开裂,在车站施工中建议按照表 3 中的 L_a ,合理划分施工段,降低混凝土开裂风险。

3 实体结构监测与分析

为了研究侧墙墙体内部的温度发展规律,并验证抗裂混凝土使用高效抗裂剂效果,选取丽江路站主体结构作为试验段进行分段浇筑。试验段侧墙尺寸为 84.0 m(长)×5.6 m(高)×0.7 m(宽)。参考表 3,兼顾经济性与施工质量,将每层试验段侧墙按 $L_a=16$ m 大致划分为 5 个施工段。因试验段的中板、顶板与侧墙须一致分段浇筑,且分段节点须同中板开孔、构造柱等结构错开,故在 $L_a=16$ m 的

基础上进行修正。修正后,丽江路站试验段各分段实际长度依次为 16 m、17 m、17 m、19 m、15 m。

为采集侧墙墙体内部的温度数据,在试验段侧墙内部,在各层每段混凝土侧墙测温面的垂直中位面按 1/4 块布置测点,采用热电偶式温度计测温,并用自动巡检记录仪记录。第一段侧墙内部的温度测点布置如图 5 所示。

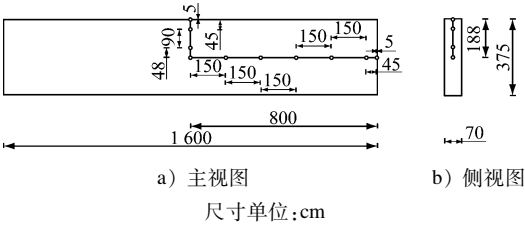


图 5 第一段侧墙内部的温度测点布置图
Fig. 5 Layout of temperature measuring points inside the first section side wall

根据温度采集数据,计算侧墙内部最高温度、内表温差、环境与混凝土表面温度之差等相关温度特征指标,并绘制温度特征指标曲线。丽江路站侧墙典型分段的温度特征指标曲线如图 6 所示。

结合温度检测结果及现场实施效果可知:

1) 负二层第四段:温度峰值为 59.87 $^{\circ}\text{C}$,最大内表温差为 19.78 $^{\circ}\text{C}$,最大表面与环境温度差为 16.50 $^{\circ}\text{C}$ 。负一层第三段:温度峰值为 56.37 $^{\circ}\text{C}$,最大内表温差为 25.62 $^{\circ}\text{C}$,最大表面与环境温度差为 27.03 $^{\circ}\text{C}$ 。负二层第三段:温度峰值为 62.24 $^{\circ}\text{C}$,最大内表温差为 28.9 $^{\circ}\text{C}$,表面与环境温差为 25.00 $^{\circ}\text{C}$ 。

2) 混凝土浇筑后约 30 h,混凝土内部温度达到峰值;之后,混凝土温度逐渐降低。内表温差升高出现于混凝土降温阶段。负一层第三段与负二层第三段的温度指标异常时段,均出现于浇筑后 10 d 内。

3) 经现场检查,负二层第四段出现裂缝 0 条,负一层第三段出现裂缝 10 条,负二层第三段出现裂缝 16 条,未采取控裂措施的非试验段开裂情况严重,每 1.0~1.5 m 就会出现 1 条裂缝。

由上述分析可知,若能有效控制入模温度,合理选择分段浇筑长度,适当延长拆模时间、保温保湿养护等相关温度指标,则可明显降低开裂风险。根据仿真计算结果及现场监测结果,以及 $K\geq 1.4$ 的原则,提出侧墙混凝土温度控制指标,如表 4 所示。

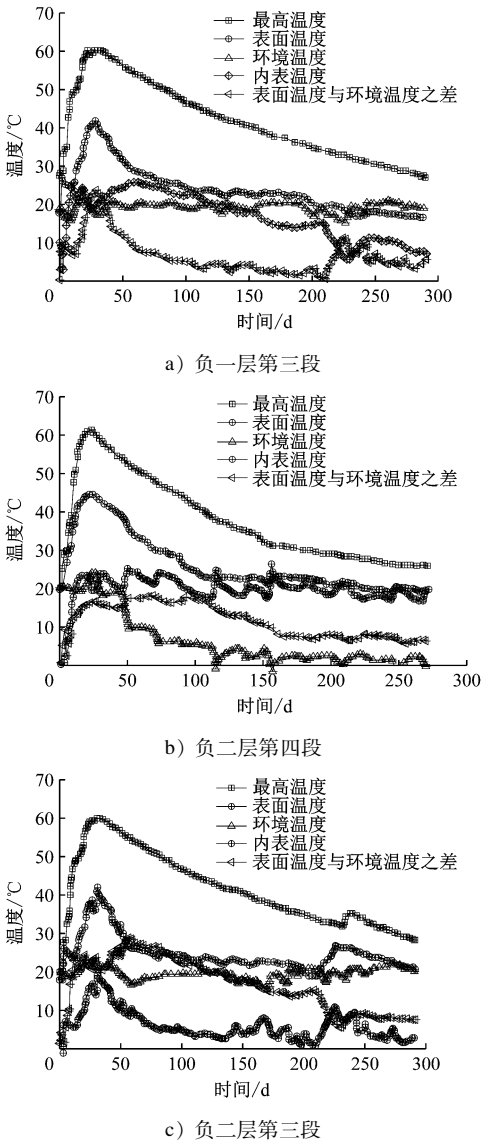


图 6 丽江路站侧墙典型分段的温度特征指标曲线

Fig. 6 Temperature characteristic index curves of typical sections of the side wall at Lijiang Road Station

表 4 侧墙混凝土温度控制指标

Tab.4 Temperature control indicators for side wall concrete

季节	混凝土 浇筑最高 温度/℃	混凝土 内部最高 温度/℃	内表温差 最大值/ ℃	表面与环 境温差最 大值/℃	养护水与 表面温差 最大值/℃
夏季	33	65	25	20	15
春、秋季	28	65	25	20	15
冬季	25	65	25	20	15

4 结语

1) 降低水泥用量,采用矿物掺合料双掺并加入具有控制温升及温度变化历程与体积膨胀协调发展的抗裂剂材料,制备了低水化热、高抗裂的地下车站混凝土。其早期微膨胀,避免了早期约束,140 d 后体积稳定,有效解决了混凝土降温阶段收缩,从应力分布和发展角度降低了混凝土结构外应力,混凝土抗裂安全系数控制在 1.4 以上。浇筑温度控制在 35 ℃ 以下时,在施工、养护条件均较优良的情况下,可保证减少温度收缩裂缝 90% 以上。

2) 为减小侧墙结构的后期开裂风险,优化设计了混凝土一次分段浇筑长度,通过试验段分段长度复核仿真计算分析,丽江路站侧墙大体积混凝土按最佳分段浇筑长度为 16 m 时的理论抗裂安全性较好。结合现场实施效果,该车站侧墙裂缝发生概率大幅降低,与宁波地铁其他类似工程相比,裂缝总数减少 70%。这不仅延长了结构使用寿命,也降低了后期修补费用,具有极大的经济效益。

参考文献

[1] 高德风,周欣,费晓春,等. 现浇隧道大体积侧墙结构混凝土裂缝控制技术[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(3): 4.
GAO Defeng, ZHOU Xin, FEI Xiaochun, et al. Crack inhibiting technology of mass sidewall concrete in cast-in-situ tunnel[J]. New Building Materials, 2020, 47(3): 4.
[2] 齐锋,都成. 地铁工程混凝土开裂原因及综合防治[J]. 工程建设与设计, 2006(4): 115.
QI Feng, DU Cheng. Comprehensive analysis and treatment on concrete crack of subway station[J]. Construction & Design for Project, 2006(4): 115.

· 收稿日期:2021-06-21 修回日期:2023-08-08 出版日期:2024-01-10
Received:2021-06-21 Revised:2023-08-08 Published:2024-01-10
· 第一作者:邴亮,高级工程师,2578662973@qq.com
通信作者:王全超,工程师,whutwqc@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license