

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202312041



地铁车站叠合墙内衬早龄期 温度与应变演化规律

陈春超¹, 陈士海¹, 陈建福², 张瀚武³, 曾凡福⁴

- 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
- 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 210000;
- 福建永东南建设集团有限公司, 福建 福州 350700;
- 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710000

摘要: 为探究叠合墙早龄期内衬温度与应变演化规律, 依托地铁车站叠合墙工程开展早龄期内衬墙温度与应变现场监测, 分析内衬墙的裂缝分布特征、温度与应变演化规律。结果表明: 在早龄期, 裂缝多从内衬墙的底部施工缝向上延伸, 大部分裂缝为竖向裂缝, 少量斜裂缝位于墙角; 内衬墙的中部温度高于四周温度, 而墙体中心的温度峰值与降温速率最大, 表面温度峰值最小, 并且墙体存在明显的里表温差; 在早龄期, 内衬墙存在明显的膨胀与收缩现象, 并且不同方向上的应变演化规律存在明显的区别。

关键词: 大体积混凝土; 叠合墙; 早龄期; 内衬墙; 温度; 应变

中图分类号: TU 375 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2024)02-0193-08

Early-Age Temperature and Strain Evolution of Composite Wall Lining in Subway Station

CHEN Chunchao¹, CHEN Shihai¹, CHEN Jianfu²,
ZHANG Hanwu³, ZENG Fanfu⁴

- College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
- China Railway 14th Construction Bureau Great Shield Engineering Group Limited Company, Nanjing 210000, China;
- Fujian Yongdongnan Construction Group Limited Company, Fuzhou 350700, China;
- China Railway First Group Limited Company, Xi'an 710000, China

Abstract: In order to explore the early-age temperature and strain evolution of the composite wall lining, on-site monitoring of the temperature and strain of the early-age lining wall is carried out based on the subway station composite wall project, and the crack distribution characteristics, temperature and strain evolution of the lining wall are analyzed. The results show that in the early-age, most of the cracks extend upward from the bottom of the lining wall construction joint, most of the cracks are vertical, and a few oblique cracks locate at the corner of the wall. The temperature in the middle of the lining wall is higher than the surroundings, the temperature peak and the temperature drop rate in the center of the wall are the maximum, and the surface temperature peak is the minimum, the obvious temperature difference exists between the in-inner and the

收稿日期: 2023-12-26

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

基金项目: 福建省住房和城乡建设厅科学技术计划(2022K202)

surface. In the early-age, there are obvious expansion and contraction phenomena in the lining wall, and obvious differences in the strain evolution in different directions.

Keywords: mass concrete; composite wall; early-age; lining wall; temperature; strain

近年来,为缓解城市交通压力,各大城市开始兴建城市轨道交通,地铁车站也成为了城市交通的重要纽带。目前,为应对复杂的城市环境,减少结构的占地面积,地铁车站开始采用围护结构与主体结构相结合的“两墙合一”结构。根据围护结构与主体结构的连接方式,可将“两墙合一”结构分为复合墙结构与叠合墙结构,前者在地下连续墙与车站外墙间设置复合材料,而后者采用钢筋连接地下连续墙与车站外墙。与复合墙相比,叠合墙可以传递弯矩与剪力,而复合墙仅能传递水平力^[1]。由于地下水环境的影响,地下空间结构对自身的防水性能有较高的要求。但是,作为典型的大体积混凝土结构,先浇筑的地下连续墙对内衬墙混凝土收缩变形的约束作用加剧了叠合墙内衬的开裂,严重影响了结构的抗渗性能、耐久性能与整体性能^[2]。

在混凝土工程中,混凝土裂缝根据形成原因可分为荷载裂缝和非荷载裂缝,荷载裂缝占裂缝总数的20%,非荷载裂缝占裂缝总数的80%,由混凝土的不均匀沉陷、温度变化、收缩变形等引起,主要出现在混凝土结构的施工阶段^[3]。为减少混凝土结构的非荷载裂缝,规范要求混凝土结构的降温速率不大于 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$ 或每4 h降温速率不大于 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时要求混凝土表面温度与环境温度最大温差小于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[4-5]。对此,学者们就抗渗防裂混凝土的配合比设计方法进行研究,引入功能轻骨料、矿物掺合料、纤维、膨胀剂与减缩剂等新型掺和料和外加剂,以提升混凝土的强度,控制早龄期混凝土的收缩变形与温度场^[6-10]。此外,合理的施工方法仍是控制大体积混凝土结构早龄期裂缝的有效手段^[11-13]。随着智能算法的发展,基于智能建造技术的混凝土温控技术得到快速的发展,并取得了不错的施工效果^[14-16]。

现阶段,虽然大体积混凝土结构的抗裂性能已经得到了很大的提升,但是实际工程中仍存在大量的混凝土裂缝与渗漏问题。对于板式大体积混凝土结构,由于结构的厚度较小,在厚度方向上存在较大的温度梯度,承受均匀温度收缩的层厚较小,易出现混凝土裂缝^[3]。学者们就混凝土的强度、绝热温升、自身体积变形、浇筑季节、入模温度、模板类型、拆模时间及结构尺寸等因素对侧墙温度场与开裂风险的影响进行了研究^[17-18]。为减少大体积混凝土侧墙的早龄期裂缝,李志鹏等^[19]利用有限元仿真软件分析了隧道侧墙结构的早龄期温度与应力分布,并根据计算结果提出针对性的裂缝控制措施;郭子奇等^[20]依托地铁车站工程开展早龄期混凝土温度监测,指出侧墙的温度分布与结构的厚度和边界条件有关,当结构尺寸较大时易出现较大的温差;Wang等^[21]对地铁车站的大体积混凝土侧墙开展早龄期温度与应变量现场监测,得到了7 d龄期内的侧墙中心温度演化曲线与侧墙长度方向和厚度方向上的混凝土应变。

目前,相关研究主要利用数值仿真技术与现场监测对大体积混凝土侧墙的中心温度进行分析,对侧墙中心、表面与底面等位置上不同方向的混凝土应变演化规律的研究较少,监测周期也较短,且未明确大体积混凝土侧墙的边界条件。对于叠合墙内衬结构,其裂缝的形成原因不仅与早期混凝土的温度效应有关,还与外部约束有关,由于内衬墙混凝土的收缩变形不仅受到老混凝土的约束作用,还受到地下连续墙的约束作用,不同方向上的混凝土应变存在明显的区别。因此,早龄期侧墙的温度分布与演化规律,以及不同位置上不同方向的早龄期侧墙应变演化规律仍有待进一步研究。本文依托地铁车站叠合墙工程,对内衬墙中心、底面与表面的早龄期温度与相应位置上不同方向的应变进行监测,同时对内衬墙的早期裂缝分布特征进行分析。

1 工程概况

以某地铁车站工程为背景,车站采用围护结构与主体结构相结合的“两墙合一”结构,地下连续墙厚度为0.8 m,内衬墙厚度为0.4 m,地下连续墙与内衬墙采用“凿毛+植筋”方式连接。叠合墙内衬现场施工图,如图1所示。地铁车站1的内衬墙采用抗渗等级为P10的C40混凝土浇筑,地铁车站2的内衬墙采用抗渗等

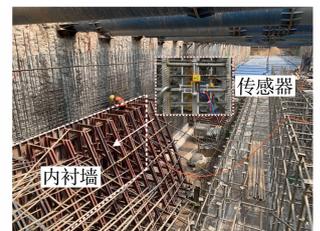


图1 叠合墙内衬现场施工图
Fig. 1 On-site construction drawing of composite wall lining

级为P10的C35混凝土浇筑。内衬墙的浇筑长度为12 m,浇筑高度为4.8 m,在混凝土浇筑完成后48 h拆除模板,并进行养护。

2 早龄期内衬墙温度与应变监测试验

2.1 测点布置

为探究叠合墙内衬早龄期温度与应变的演化规律,采用温度传感器与应变传感器测量内衬墙的温度与应变。由于内衬墙的厚度较薄,为减小传感器预埋线路对混凝土浇筑质量的影响,同时避免混凝土振捣损坏传感器,试验分2次进行。试验1在地铁站1开展,在内衬墙中心设置10个温度测点,分别测量内衬墙不同位置的温度,记录早龄期内衬墙的温度分布。试验1的测点布置,如图2(a)所示。为获得内衬墙表面、中心与底面的温度与不同方向上的应变,试验2在地铁站2开展,在内衬墙中设置6个测点,分别沿墙体的表面、中心与底面设置温度传感器与应变传感器,墙体表面与底面的应变传感器沿内衬墙的纵向和竖向(即长度方向与高度方向)设置,墙体中心的应变传感器沿内衬墙的纵向、竖向和横向(即长度方向、高度方向和厚度方向)设置。试验2的测点布置,如图2(b)所示。

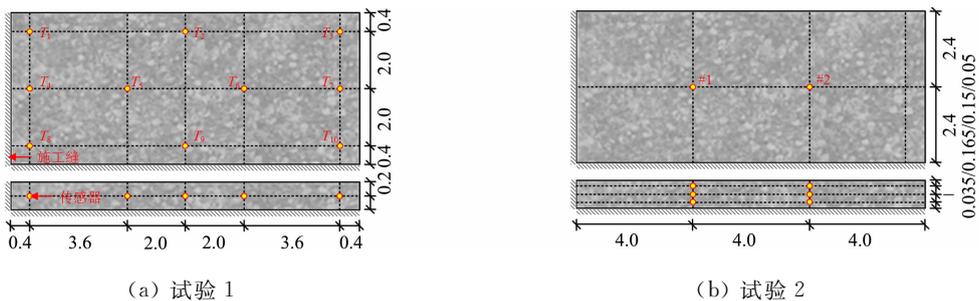


图2 测点布置图(单位:m)

Fig. 2 Measuring point layout (unit: m)

图2(b)中:#1表面、中心与底面温度传感器的编号分别为 T_{1B}, T_{1Z}, T_{1D} ;#1表面纵向与竖向应变传感器的编号分别为 S_{1BZ}, S_{1BS} ;#1中心纵向、竖向与横向应变传感器的编号分别为 $S_{1ZZ}, S_{1ZS}, S_{1ZH}$;#1底面纵向与竖向应变传感器的编号分别为 S_{1DZ}, S_{1DS} ;#2表面、中心与底面温度传感器的编号分别为 T_{2B}, T_{2Z}, T_{2D} ;#2表面纵向与竖向应变传感器的编号分别为 S_{2BZ}, S_{2BS} ;#2中心纵向、竖向与横向应变传感器的编号分别为 $S_{2ZZ}, S_{2ZS}, S_{2ZH}$;#2底面纵向与竖向应变传感器的编号分别为 S_{2DZ}, S_{2DS} 。

2.2 试验设备

采用温度传感器与振弦式应变传感器分别测量早龄期内衬墙的温度与应变,温度传感器的量程为 $-30\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;应变传感器的量程为 $0\sim 4\ 000\times 10^{-6}$,精度为 0.1×10^{-6} 。采用振弦式频率读数仪和JMZX-3001L型综合测试仪分别记录早龄期内衬墙的温度与应变;采用温湿度计记录环境温度与湿度。

2.3 监测方案

在混凝土浇筑完成后,混凝土中的水泥与水发生水化反应,释放大量的热量,内衬墙的温度会急剧上升。为完整记录早龄期内衬墙的温度与应变,试验的监测周期为28 d,其中,0~7 d内每隔2 h监测1次数据;7~14 d内每隔4 h监测1次数据;14~21 d内每隔6 h监测1次数据;21~28 d内每隔8 h监测1次数据。需要注意的是,在混凝土入模后,记录内衬墙的初始应变,以消除混凝土浇筑过程产生的应变误差。在记录早龄期内衬墙温度与应变时,观察并记录侧墙表面的裂缝分布,同时采用温湿度计测量环境的温度与湿度。

3 试验结果与分析

3.1 内衬墙开裂特征

早龄期内衬墙的裂缝分布,如图3所示。由图3(a),(b)可知:当龄期为2 d时,浇筑模板已经被拆除,墙面未出现裂缝;当龄期为4 d时,内衬墙出现9条裂缝,其中,8条竖向裂缝从墙底施工缝向上延

伸,1条斜裂缝位于墙角附近。这是因为早龄期内衬墙的收缩变形受先浇矮墙、先浇内衬墙和地下连墙等老混凝土的约束,收缩主应力沿水平方向,而侧墙端部的约束作用较小,其主要应力方向不一定与墙体的长度方向一致,因此,位于侧墙端部的裂缝多为斜裂缝。由图3(c)可知:当龄期为7d时,裂缝1~9的长度均在增长,并新增裂缝10。此时,内衬墙未出现渗水现象。

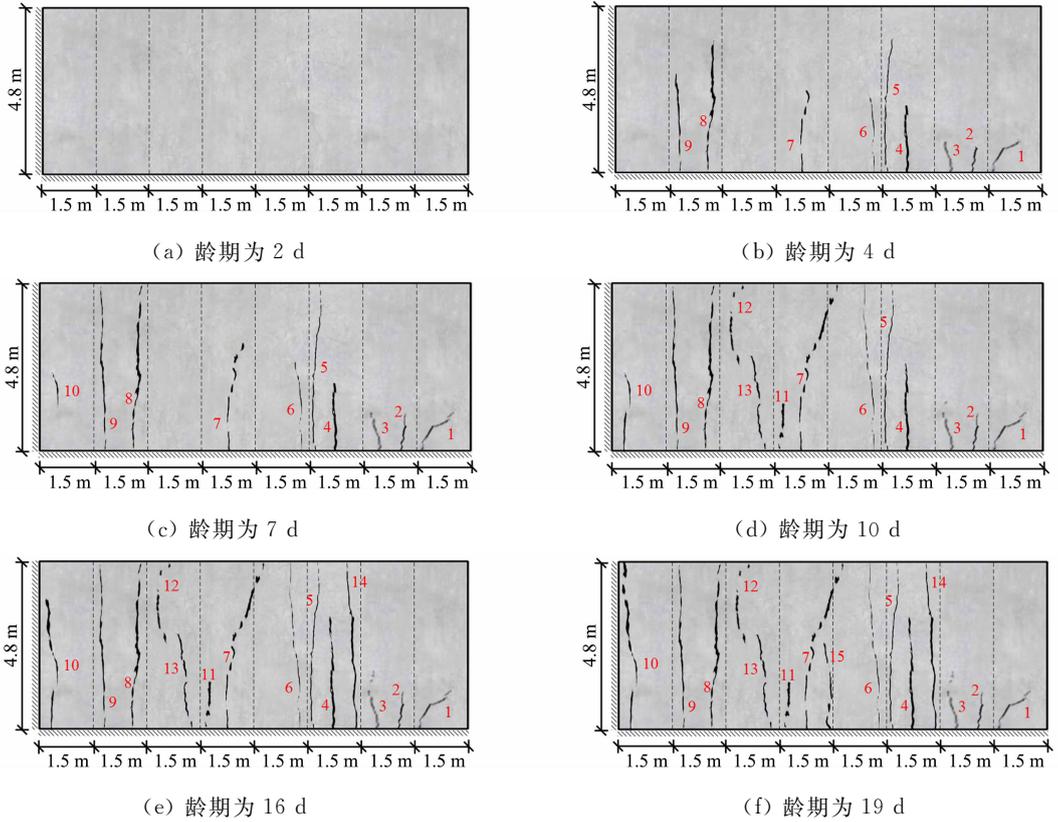


图3 早龄期内衬墙裂缝分布

Fig. 3 Crack distribution of early-age lining wall

由图3(d)可知:当龄期为10d时,裂缝5~9已延伸至内衬墙顶部施工缝,并新增裂缝11~13,此时裂缝1,5,6,9均出现渗水现象,并且裂缝内含有少量的碳酸钙结晶。此外,由于内衬墙顶部存在较大的里表温差,导致内衬墙顶部出现较大的拉应力,使裂缝12从内衬墙顶部起裂。由图3(e),(f)可知:当龄期为16d时,新增裂缝14,而裂缝11与裂缝12均出现渗水现象。当龄期为19d时,新增裂缝15,裂缝10贯穿整幅墙面,并且后者出现了渗水现象;当龄期大于19d时,内衬墙的裂缝均停止增长,并且无新增裂缝,此时,大部分的裂缝仍存在渗水现象,但是少量的裂缝在碳酸钙结晶的作用下停止渗水。

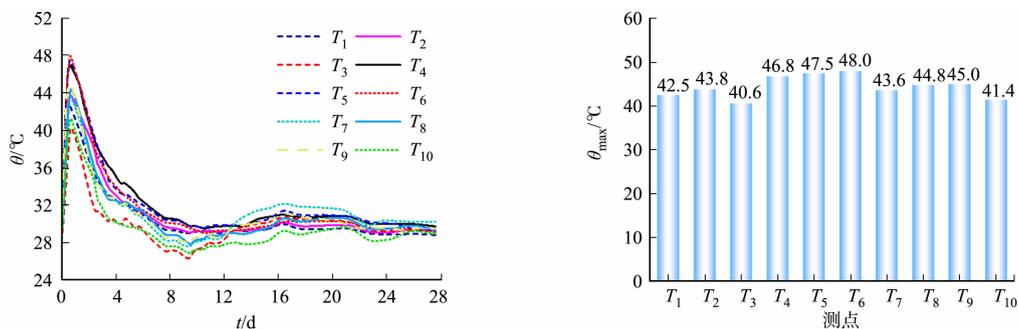
综上所述可知,在内衬墙浇筑完成后两周,墙面出现了大量的竖向裂缝与少量的斜裂缝。内衬墙的裂缝起裂位置与常规大体积混凝土墙的裂缝起裂位置相同,均从墙体的底部施工缝向上延伸,但是裂缝并不集中在墙体中部^[22]。

3.2 温度演化规律

早龄期内衬墙不同测点的温度演化曲线与温度峰值,如图4所示。图4中: θ 为温度; θ_{\max} 为温度峰值; t 为龄期。

由图4可以看出,内衬墙不同测点的温度变化趋势基本一致,但是不同测点的温度峰值存在明显的差异。混凝土浇筑完成后,在水化热的作用下,内衬墙的温度急剧上升,并在龄期为0.65~0.76d时达到温度峰值。此时,测点 T_5 和测点 T_6 的温度峰值分别为47.5,48.0℃,明显高于其他测点,而测点 T_3 的温度峰值最小,比测点 T_5 和测点 T_6 的温度峰值分别小14.53%和15.42%。这是因为混凝土的表面放热系数大于模板的表面放热系数,当龄期小于2d时,混凝土模板还未拆除,测点 T_5 与测点 T_6 仅能通过模板与周围环境进行热交换,而测点 T_3 位于墙角,能够通过内衬墙顶部与右端的墙面将热量扩散至大气中。当龄期大于温度峰值龄期且小于8d时,内衬墙温度急剧下降,此时内衬墙的降温速率最

大。值得注意的是, 当龄期大于 8 d 时, 在环境温度的影响下, 内衬墙的温度演化曲线出现明显的波动。



(a) 温度演化曲线

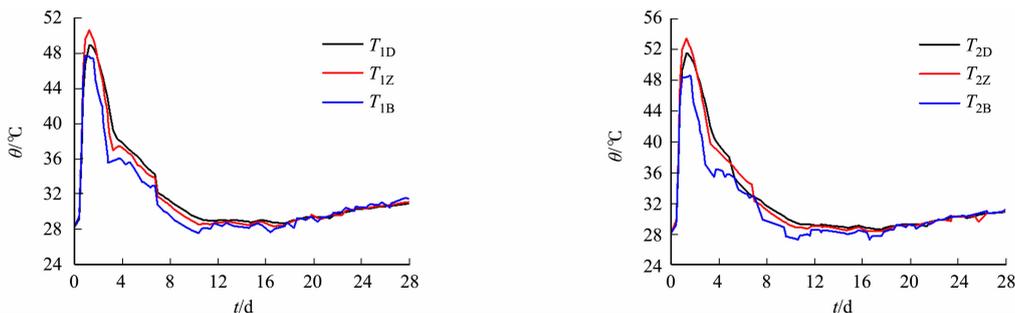
(b) 温度峰值

图 4 内衬墙不同测点的温度演化曲线与温度峰值

Fig. 4 Temperature evolution curves and temperature peak value at different measuring points of lining wall

根据早龄期内衬墙温度演化曲线的变化规律, 可将内衬墙的温度变化分为 3 个阶段: 1) 在混凝土浇筑完成后 1 d 左右, 内衬墙温度急剧上升; 2) 在混凝土浇筑完成后 1~8 d 内, 内衬墙温度急剧下降; 3) 当龄期大于 8 d 时, 在环境温度的影响下, 内衬墙出现明显的温度波动。

早龄期内衬墙底面、中心与表面的温度演化曲线, 如图 5 所示。由图 5 可知: 测点 T_{1Z} 的温度峰值为 50.6 $^{\circ}\text{C}$, 测点 T_{1D} 和测点 T_{1B} 的温度峰值分别为 48.9, 47.7 $^{\circ}\text{C}$, 分别比测点 T_{1Z} 的温度峰值小 3.36% 和 5.73%, 而测点 T_{1D} 的温度峰值比 T_{1B} 的温度峰值大 2.52%; 测点 T_{2Z} 的温度峰值为 53.4 $^{\circ}\text{C}$, 测点 T_{2D} 和测点 T_{2B} 的温度峰值分别为 51.5, 48.4 $^{\circ}\text{C}$, 分别比测点 T_{2Z} 的温度峰值小 3.56% 和 9.36%, 而测点 T_{2D} 的温度峰值比 T_{2B} 的温度峰值大 6.41%。这是由于内衬墙表面与底面的热量能够分别与周围环境和地下连续墙进行热交换, 而内衬墙中心无法与外界进行热交换。



(a) 测点 1

(b) 测点 2

图 5 内衬墙底面、中心与表面的温度演化曲线

Fig. 5 Temperature evolution curves of bottom, center and surface of lining wall

在温降阶段, 当龄期大于温度峰值龄期且小于 8 d 时, 测点 T_{1D} , T_{1Z} 和 T_{1B} 的降温速率分别为 2.7, 3.0, 2.6 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$, 测点 T_{2D} , T_{2Z} 和 T_{2B} 的降温速率分别为 3.0, 3.4, 2.9 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$, 内衬墙中心的降温速率明显大于底面与表面的降温速率。这是因为内衬墙的厚度较薄, 在环境温度作用下, 内衬墙的整体温度急剧下降, 并逐渐趋于环境温度, 而内衬墙中心的温度峰值高于底面与表面, 在相同时间内内衬墙中心的降温速率最大。在混凝土模板被拆除时, 测点 T_{1B} 和 T_{2B} 的温度曲线出现了明显的波动。当龄期大于 8 d 时, 在环境温度的影响下, 内衬墙的温度出现了明显的波动, 同时有逐渐升温的趋势, 并且墙面的温度波动明显大于中心与底面, 表明环境温度对内衬墙的温度有较大的影响。

内衬墙中心与表面、底面的温差曲线, 如图 6 所示。图 6 中: $\Delta\theta$ 为温差。由图 6 可知: 温差曲线随龄期的增大呈先增大、后减小、再趋于 0 的变化趋势, $\Delta\theta_{1Z-1B}$, $\Delta\theta_{1Z-1D}$, $\Delta\theta_{2Z-2B}$ 和 $\Delta\theta_{2Z-2D}$ 的最大值分别为 2.9, 2.5, 7.1, 2.7 $^{\circ}\text{C}$, $\Delta\theta_{1Z-1B}$ 比 $\Delta\theta_{1Z-1D}$ 大 16%, $\Delta\theta_{2Z-2B}$ 比 $\Delta\theta_{2Z-2D}$ 大 163%。由于混凝土模板的厚度较薄, 表面放热系数较大, 导致内衬墙中心与表面的温差大于中心与底面的温差, 表明内衬墙易出现较大的里表温差, 引起温差裂缝。因此, 当施工环境的温度较低时, 需要采用保温性能好的模板, 避免内衬墙出现温差裂缝。

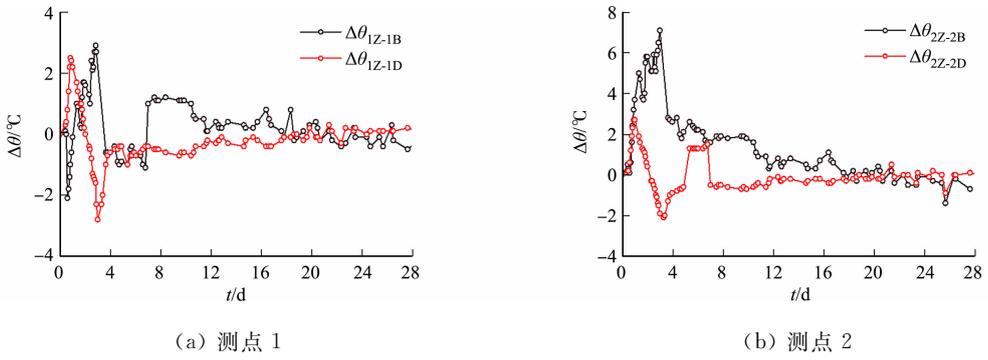


图 6 内衬墙中心与表面、底面的温差曲线

Fig. 6 Temperature difference curves among center, bottom and surface of lining wall

3.3 应变演化规律

早龄期内衬墙中心混凝土应变演化曲线,如图 7 所示。图 7 中: ϵ 为应变。测点 S_{2ZS} 的数据因传感器损坏而缺失。由图 7 可知:早龄期内衬墙不同方向上的应变演化规律存在明显的区别。由测点 S_{1ZZ} , S_{2ZZ} , S_{1ZS} 的应变曲线可知,内衬墙的纵向和竖向应变随龄期的增加呈先受压、后受拉的变化趋势,并在温升阶段出现了明显的压应变峰值,测点 S_{1ZS} 的应变峰值为 -40.8×10^{-6} ,测点 S_{1ZZ} , S_{2ZZ} 的应变峰值分别为 -127.6×10^{-6} , -129.7×10^{-6} ,测点 S_{1ZZ} 的应变峰值比 S_{1ZS} 的应变峰值大 86.8×10^{-6} 。这是因为在温升阶段,受水化热的作用,内衬墙混凝土受热膨胀,在外部约束下出现了明显的压应变;在温降阶段,受约束的内衬墙出现收缩变形,此时压应变补偿混凝土的拉应变。此外,受重力作用,内衬墙的竖向混凝土压应变峰值小于纵向混凝土压应变峰值。对于内衬墙的横向混凝土应变,由于混凝土模板的约束作用,内衬墙的横向变形较小,在模板拆除后出现了明显的应变回弹。当龄期大于 10 d 时,在环境温度的作用下,内衬墙的温度逐渐升高,并伴随膨胀变形。因此,测点 S_{1ZH} , S_{2ZH} 的应变演化曲线无明显的受拉趋势。

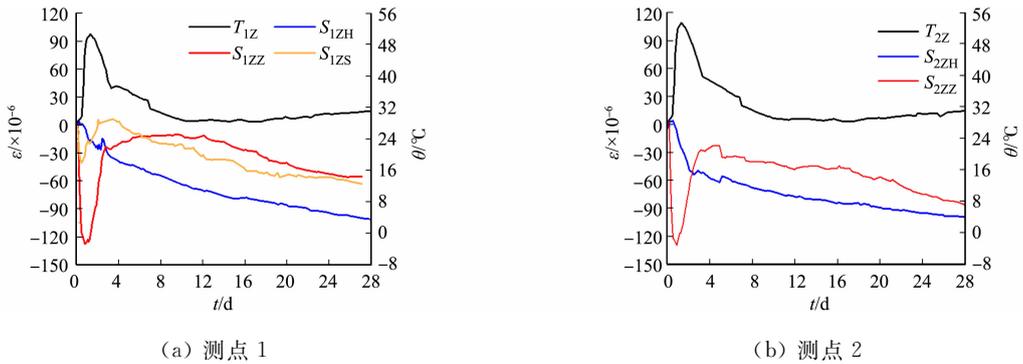


图 7 内衬墙中心混凝土应变演化曲线

Fig. 7 Strain evolution curves of concrete in center of lining wall

早龄期内衬墙纵向与竖向混凝土应变演化曲线,如图 8 所示。测点 S_{1DS} 与 S_{2ZS} 的数据因传感器损

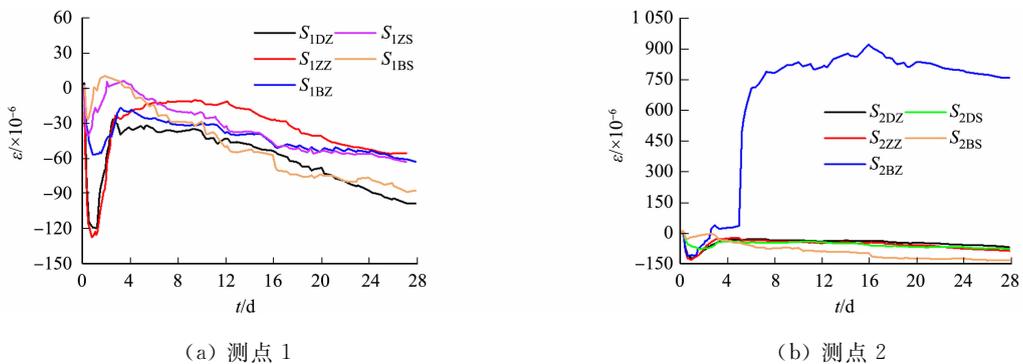


图 8 内衬墙纵向与竖向混凝土应变演化曲线

Fig. 8 Longitudinal and vertical concrete strain evolution curves of lining wall

坏而缺失。由图 8(a)可知:在温升阶段,测点 S_{1ZZ} 的压应变峰值为 -127.6×10^{-6} ,测点 S_{1DZ} 与测点 S_{1BZ} 的压应变峰值分别为 -119.7×10^{-6} 和 -57.1×10^{-6} ,分别比测点 S_{1ZZ} 的应变峰值小 6.19% 和 55.25%。这是由于内衬墙底面与表面的温度峰值均小于内衬墙中心的温度峰值,并且内衬墙底面的变形受地下连续墙的约束作用,内衬墙表面因里表温差存在自身约束作用。内衬墙的竖向混凝土应变具有相同的演化规律。由图 8(b)可知:当龄期为 5 d 时,测点 S_{2BZ} 出现了明显的应变跳点,应变值为 497.0×10^{-6} ,表明此时内衬墙表面已经开裂。

4 早龄期内衬墙裂缝控制措施

综上所述可知,老混凝土对新浇混凝土收缩变形的约束作用及混凝土里表温差引起的自身约束是引起早龄期内衬墙裂缝的主要原因。在实际工程中,可通过合理的施工方法减小外部约束,同时避免形成自身约束,以降低早龄期内衬墙的开裂风险。对于叠合墙内衬结构,外部约束作用主要来自地下连续墙、先浇筑的矮墙和内衬墙等老混凝土,实际工程中,降低内衬墙的单次浇筑长度能够有效减小外部约束作用,降低内衬墙的开裂风险。同时,由早龄期内衬墙的温度与应变演化规律可知,早龄期内衬墙存在较大的温度峰值,且出现了急剧的温升与温降,同时伴有明显的膨胀与收缩现象。

结合早龄期内衬墙的温度与应变演化规律可知,施工过程中采用分层浇筑、冷却管技术与降低混凝土的浇筑温度等方法能够有效降低早龄期内衬墙的温度峰值,避免出现较大的里表温差。需要注意的是,在采用冷却管技术时,需要严格控制水温,避免冷却管周围出现较大的温度梯度。此外,在高温环境下施工时,应选用表面放热系数较大的混凝土模板,能够有效降低内衬墙温度峰值;在低温环境下施工时,应选用表面放热系数较小的混凝土模板,能够有效避免内衬墙出现较大的里表面温差,同时减小内衬墙的降温速率。值得一提的是,减缩剂与微膨胀剂等外加剂均能够有效减小混凝土的收缩变形,前者能够有效减小混凝土的收缩变形,而后者能够补偿混凝土的收缩变形,在实际工程中可考虑使用。

5 结论

依托地铁车站叠合墙工程,开展早龄期内衬墙的温度与应变监测试验,对内衬墙早期的裂缝分布特征、温度场与不同方向上的应变演化规律进行分析,并结合温度与应变演化规律给出了早龄期内衬墙的裂缝控制措施,得到了以下 3 点结论。

1) 在外部约束与自身约束的共同作用下,早龄期内衬墙的裂缝主要出现在混凝土浇筑完成后的前两周,大部分的裂缝为竖向裂缝,少量的斜裂缝位于墙角附近,并且裂缝主要从墙底施工缝向上延伸。

2) 在早龄期,内衬墙出现了急剧的温升与温降,在 1 d 龄期左右达到温度峰值,此时内衬墙的里表温差最大,并且墙体中部温度明显大于四周温度;在 1~8 d 龄期,内衬墙出现了急剧的降温,此时墙体中心的降温速率明显大于底面与表面。在实际工程中,建议采用分层浇筑、预埋冷却管、降低混凝土浇筑温度及合理的混凝土模板等措施严格控制内衬墙的温度峰值、里表温差与降温速率。

3) 早龄期内衬墙纵向与竖向的混凝土应变随龄期的增加呈先受压、后受拉的变化趋势,并且内衬墙的纵向峰值压应变大于竖向,中心的压应变峰值最大,而内衬墙的横向混凝土拉应变并不明显。此外,混凝土的膨胀变形能够补偿混凝土的收缩变形。因此,在实际工程中,除了使用减缩剂减少混凝土的收缩变形外,还可采用微膨胀剂补偿混凝土的收缩变形。

参考文献:

- [1] 王卫东,王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [2] GOTTSÄTER E, JOHANSSON M, PLOS M, *et al.* Crack widths in base restrained walls subjected to restraint loading[J]. *Engineering Structures*, 2019, 189: 272-285. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.089.
- [3] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大体积混凝土温度控制技术规范: GB/T 51028-2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大体积混凝土施工标准: GB 5049-2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,

2018.

- [6] 郭雅峰,陈士海,杨宗桦,等. 地铁站叠合墙抗渗防裂混凝土配合比优化与应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2022,43(5):587-595. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202203056.
- [7] 庞超明,刘钊,冒云瑞,等. 大体积混凝土中功能轻集料的应用与控温技术[J]. 建筑材料学报,2023,26(8):853-861. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.08.005.
- [8] 庞建勇,陈旭鹏. 高活性矿物掺合料混凝土力学性能试验[J]. 硅酸盐通报,2020,39(10):3143-3151. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2020.10.011.
- [9] 郭耀东,刘元珍,王文婧,等. 玄武岩纤维特征参数对混凝土单轴受拉性能的影响[J]. 复合材料学报,2023,40(5):2897-2912. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20220706.003.
- [10] 邓宗才,赵连志,连怡红. 膨胀剂、减缩剂对超高性能混凝土圆环约束收缩性能的影响[J]. 材料导报,2021,35(12):12070-12074. DOI:10.11896/cldb.20030051.
- [11] 闫腾飞,包汉营,吕国鹏,等. 混凝土内外温差置换养护系统及其数值应用[J]. 建筑结构,2023,53(增刊1):1616-1620. DOI:10.19701/j.jzjg.23S1548.
- [12] 霍喆赟,杨超越,王汉伟. 大底盘地下室底板跳仓法应用案例分析[J]. 建筑结构,2022,52(增刊2):2912-2916. DOI:10.19701/j.jzjg.22S2714.
- [13] 汪建群,魏桂亮,刘杰,等. 跨海大桥大体积混凝土承台水化热实测与分析[J]. 桥梁建设,2020,50(3):25-31. DOI:10.3969/j.issn.1003-4722.2020.03.004.
- [14] 宁泽宇,林鹏,彭浩洋,等. 混凝土实时温度数据移动平均分析方法及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版),2021,61(7):681-687. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2020.26.040.
- [15] 刘毅,辛建达,张国新,等. 大体积混凝土温控防裂智能监控技术[J]. 硅酸盐学报,2023,51(5):1228-1233. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20220851.
- [16] 杨宁,刘毅,乔雨,等. 大体积混凝土仓面智能喷雾控制模型[J]. 清华大学学报(自然科学版),2021,61(7):724-729. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.26.008.
- [17] LI Hua, LIU Jiaping, WANG Yujiang, *et al.* Deformation and cracking modeling for early-age sidewall concrete based on the multi-field coupling mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2015, 88: 84-93. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.005.
- [18] 李路,李志全,耿敏,等. 侧墙结构混凝土早龄期开裂风险影响因素定量研究[J]. 混凝土与水泥制品,2018(9):70-76. DOI:10.19761/j.1000-4637.2018.09.017.
- [19] 李志鹏,罗奇星,韩庆华,等. 大体积混凝土墙水化放热温度场分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(8):878-885. DOI:10.11784/tdxbz202204036.
- [20] 郭子奇,杨双锁,李彦斌,等. 地铁站大体积混凝土侧墙浇筑时期温度与应力分布规律研究[J]. 混凝土,2020(12):94-97. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2020.12.021.
- [21] WANG Chenfei, CHEN Yuehui, ZHOU Meili, *et al.* Control of early-age cracking in super-long mass concrete structures[J]. Sustainability, 2022, 14(7): 3809. DOI:10.3390/su14073809.
- [22] KLEMCZAK B, KNOPPIK-WRÓBEL A. Reinforced concrete tank walls and bridge abutments: Early-age behaviour, analytic approaches and numerical models[J]. Engineering Structures, 2015, 84: 233-251. DOI:10.1016/j.engstruct.2014.11.031.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)