

# 明挖装配式地下车站侧墙叠合层现浇混凝土 开裂风险研究\*

徐军林<sup>1</sup> 马树伟<sup>1</sup> 姚 婷<sup>2</sup> 王育江<sup>2,3</sup>

(1. 中铁第四勘察设计集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 江苏苏博特新材料股份有限公司, 211103, 南京;  
3. 东南大学材料科学与工程学院, 211189, 南京//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 采用装配式结构与现浇混凝土施工相结合的方式, 不但能缩短工期、节省造价, 而且可以提高工程质量。依托某轨道交通地下车站工程, 基于室内试验和多场耦合理论模型, 对明挖装配式地下车站侧墙叠合层现浇混凝土开裂风险进行了研究。结果表明: 尽管现浇混凝土厚度较薄, 但仍因强度高而产生明显的温升温降, 且早期收缩大, 当收缩变形受到 C50 高强预制板和底板约束作用时, 导致基准混凝土开裂风险较高; 采用无收缩高性能混凝土可有效降低现浇叠合层混凝土的开裂风险, 当一次性浇筑长度不大于 21 m 时, 可避免混凝土裂缝的产生。

**关键词** 装配式地下车站; 现浇混凝土; 开裂风险; 无收缩混凝土

**中图分类号** TU528.07

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2022.09.034

## Study on the Cracking Risk of the Cast-in-situ Concrete on the Side Wall Laminated Layer of the Open-cut and Prefabricated Underground Station

XU Junlin, MA Shuwei, YAO Ting, WANG Yujia

**Abstract** The method of combining the prefabricated structure and the cast-in-situ concrete construction can shorten the construction period, save the cost, and improve the quality of the project. Based on certain rail transit underground station project and on indoor test and multi-field coupling theory model, study on the cracking risk of the cast-in-situ concrete on the side wall of the laminated layer of the open-cut and assembled integral underground station. The research shows that the cast-in-situ concrete is relatively thin, it still has obvious temperature rise and drop due to high strength, coupled with large early shrinkage deformation and large

constraint of C50 high-strength precast slab and bottom plate, which leads to relatively higher cracking risk of reference concrete. When high performance concrete with non-shrinkage is used, the cracking risk of the cast-in-situ concrete can be effectively reduced. When the one-time pouring length is not more than 21 m, concrete cracks can be avoided.

**Key words** prefabricated underground station; cast-in-situ concrete; cracking risk; non-shrinkage concrete

**First-author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

地下车站装配式结构因其施工对环境的影响小、工程造价低、施工质量易保证, 越来越受到国内外的关注, 并逐渐得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。由于地下水环境较为复杂和地下结构自防水要求, 地下车站整体装配式结构仍需解决接头接缝防水以及现浇部分混凝土收缩开裂问题, 以保障结构的安全使用和长期服役性能<sup>[3-4]</sup>。

某轨道交通车站为地下 2 层单柱双跨标准岛式车站, 站台宽为 11 m, 纵向柱距为 9 m, 车站总长为 195 m。除车站两端盾构井段及风道接口范围采用现浇法施工外, 其余约 150 m 有柱地下车站采用整体装配式叠合墙板施工技术。装配式结构各构件均通过湿节点连接形成整体, 现浇混凝土与预制构件形成叠合构件, 预制构件可兼做永久模板, 与现浇部分通过钢筋连接。由于施工时预制构件混凝土水化已基本完成, 收缩变形很小, 而现浇混凝土强度高, 早期易产生较快的水化放热和较大的收缩变形, 受到高强预制构件的约束也较大, 容易因新老混凝土变形不协调而导致严重收缩开裂问题。

\* 国家重点研发计划项目(2019YFC0605104); 中铁第四勘察设计院重大科研课题(2019K125)

为此,本文针对明挖装配整体式现浇叠合层混凝土易开裂的难题,基于“水化-温度-湿度-约束”多场耦合收缩开裂评估方法<sup>[5]</sup>,对地下车站墙板叠合层现浇混凝土抗裂性进行定量分析,研究此类结构混凝土的早龄期开裂风险规律,可为此类工程的裂缝控制提供参考。

### 1 混凝土配合比与性能测试

地下车站明挖装配整体式叠合层现浇混凝土设计强度等级为 C40,因该工程现浇混凝土位于地

下,一侧模板为预制叠合板,另一边为地下连续墙,均为永久模板,可忽略干燥收缩变形,但需重点考虑自收缩和温度收缩变形对开裂的影响。因此,拟制备无收缩混凝土以提高结构抗裂性。依据 JGJ 55—2019《普通混凝土配合比设计规程》,在满足强度、工作性和耐久性的基础上,制备的混凝土需兼顾低温升、无收缩等抗裂性能和体积稳定性,初步设计了系列 C40 基准混凝土和无收缩混凝土配合比进行试验研究。综合技术性和经济性原则,选择其中有代表性的配合比,如表 1 所示。

表 1 明挖装配式地下车站侧墙叠合层现浇混凝土配合比

Tab.1 Mix proportion of the cast-in-situ concrete on the side wall laminated layer of the open-cut and prefabricated underground station

混凝土类别	混凝土中各种配料的质量/(kg/m <sup>3</sup> )						
	水泥	粉煤灰	矿粉	中砂	5~10 mm 碎石	10.0~26.5 mm 碎石	水
基准混凝土	260	100	40	750	324	755	144
无收缩混凝土	260	80	28	750	324	755	144

根据表 1 所示的混凝土配合比,参照相关标准规范,试验测试了混凝土早龄期绝热温升、弹性模

量、劈裂抗拉强度及自生体积变形等性能指标随龄期的变化曲线,如图 1 所示。

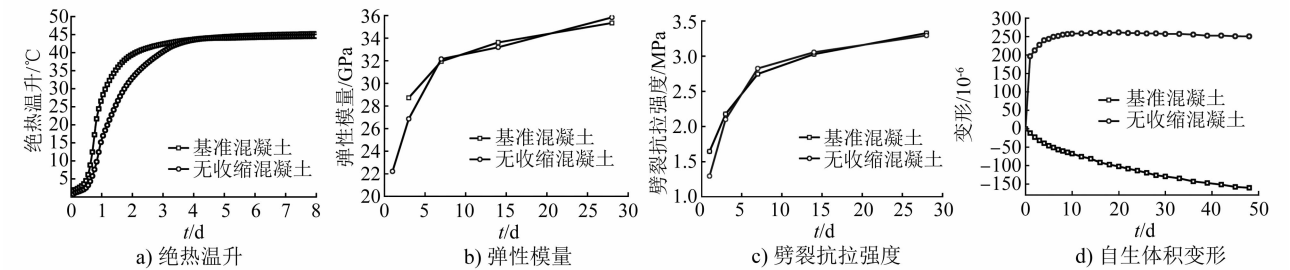


图 1 早龄期混凝土材料性能测试结果

Fig. 1 Test results of material properties of early age concrete

### 2 开裂风险评估方法与计算模型

#### 2.1 评估方法

通常实体结构混凝土从浇筑成型开始一直处于水化、温度、湿度、约束等多种因素共同作用的复杂环境中,本文主要采用课题组提出的基于“水化-温度-湿度-约束”多场耦合机制的抗裂性评估理论与模型<sup>[5]</sup>,参照 DB32/T 3696—2019《江苏省高性能混凝土应用技术规程》中的基本参数取值方法和计算方法,结合明挖装配整体式地下车站侧墙结构特点,对该轨道交通车站侧墙叠合层现浇混凝土温度历程和开裂风险进行评估。定义开裂风险系数  $\eta$  为实时应力与实时抗拉强度之比,如下式所示:

$$\eta = \frac{\sigma(t)}{f_t(t)}$$

(1)

式中:

$\sigma(t)$ —— $t$  时刻混凝土最大拉应力;

$f_t(t)$ —— $t$  时刻的抗拉强度。

一般认为  $\eta > 1.0$  时,混凝土已经开裂; $\eta = 1$  时,混凝土达到理论上的临界开裂状态; $0.7 \leq \eta < 1.0$  时,考虑到混凝土早龄期性质的不确定性以及结构分析时的简化和近似,混凝土有较大可能开裂; $\eta < 0.7$  时,混凝土开裂可能性较小。

#### 2.2 结构形式与计算模型

该轨道交通车站明挖装配整体式侧墙预制构件每节长 3 m,高 4.86 m,现场沿长度方向拼装成一定长度后,作为现浇混凝土的永久模板,另外一侧

为地下连续墙,现浇混凝土浇筑闭合。与底板连接部分内侧采用木模板,预制部分与现浇部分通过钢筋连接,且分别呈凹槽状,两者互相咬合,现浇混凝土侧墙不仅受到底板的约束,还受到预制侧墙的约束。现浇侧墙与地下连续墙之间铺设一层防水卷材,由于防水卷材属于柔性材料,因此假设施工期地下连续墙与现浇侧墙之间仅存在热量的交换与传递,不对现浇混凝土产生约束作用。现浇叠合层

侧墙总高度为 6.46 m,但不同位置处厚度有所不同,主要有 0.35 m、0.6 m 或 0.7 m 几种典型厚度区域,其中与底板连接处现浇层厚度为 0.7 m,上部凹槽处有 0.35 m 和 0.6 m 两种厚度。单块预制板长度为 3 m,所以一次性浇筑长度必须是预制构件长度 3 m 的整数倍。侧墙结构具体布置情况及结构尺寸如图 2 所示。在此基础上,建立开裂风险评估计算模型如图 3 所示。

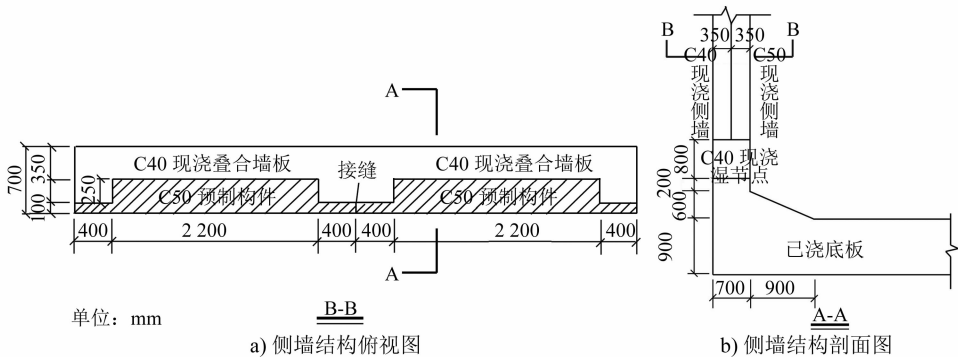


图 2 侧墙结构示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of side wall

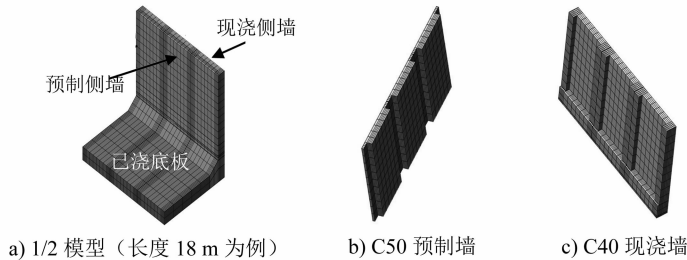


图 3 侧墙结构计算模型  
Fig. 3 Computational model of side wall structure

### 3 侧墙叠合层现浇混凝土开裂风险评估

#### 3.1 材料参数

上述计算模型中的主要材料参数如表 2 所示;其余参数为:取日均气温 20 ℃、入模温度 25 ℃,下部 0.7 m 厚侧墙处采用木模板,3 d 后拆除模板。

#### 3.2 温度结果分析

采用上述结构热分析计算参数、计算方法和计算模型,得到侧墙现浇叠合层混凝土温度计算结果如图 4 所示。从图 4 可以看到:

1) 对于基准混凝土,厚 0.35~0.70 m 侧墙混凝土均在 1.25 d 左右达到温峰值,其中心温升和表面温升分别约为 15.86~21.73 ℃、13.03~15.96 ℃,内外温差均小于 6 ℃。可见,此类结构由内外温差引

起开裂的可能性较小。

表 2 计算模型中的主要材料参数	
Tab. 2 Main material parameters of computational model	
参数名称	取值
混凝土体积质量	2 400 kg/m <sup>3</sup>
混凝土比热	0.98 kJ/(kg·K)
导热系数	8.93 kJ/(m·K·h)
泊松比	0.167
暴露面对流散热系数	82 kJ/(m <sup>2</sup> ·K·h)
木模板对流散热系数	27 kJ/(m <sup>2</sup> ·K·h)
基础初温	20 ℃
线膨胀系数	1×10 <sup>-5</sup> /℃
侧墙混凝土绝热温升	依据图 1 混凝土性能测试结果
侧墙混凝土自收缩	依据图 1 混凝土性能测试结果
侧墙混凝土弹性模量	依据图 1 混凝土性能测试结果
侧墙混凝土抗拉强度	依据图 1 混凝土性能测试结果
无收缩混凝土膨胀变形	依据图 1 混凝土性能测试结果

2) 无收缩抗裂混凝土最大温升发生在 1.75 d 左右,厚 0.35~0.70 m 侧墙混凝土中心温升和表面温升分别约 10.91~16.21 °C、8.47~11.66 °C,内外温差小于 5 °C,与基准混凝土相比,无收缩混凝土温峰值降低了 4.45~5.58 °C。这是因为混凝土中掺加的抗裂材料延缓了早期水化放热速率,在结构具备散热条件下,为叠合层混凝土散热赢得了时间,从而大幅缓解混凝土集中放热程度,削弱温升和温降速度<sup>[6]</sup>。

3) 根据地铁车站实体结构混凝土的跟踪与监测分析结果发现<sup>[7]</sup>,对于 C35 地铁车站叠合墙体体系内衬墙混凝土,尽管温升值基本在 10 °C 以下,但是仍存在较大的开裂风险。此外,本工程结构形式类似于叠合墙结构,在此基础上同时还受到凹槽状

C50 预制板的咬合作用,约束作用更强,混凝土强度更高,温升值也更高,在目前温升值大于 10 °C 的情况下有较大的开裂风险。

### 3.3 基准混凝土开裂风险结果分析

图 5 为一次性浇筑不同长度时侧墙现浇叠合层基准混凝土开裂风险评估结果,可以看到:

1) 由图 5 a)、图 5 b) 可知,一次性浇筑 18~24 m 时,现浇侧墙中心混凝土最大  $\eta$  约 1.17~1.23,大于 1.0,说明该工况下基本上必然开裂;表面最大  $\eta$  约 0.88~0.94,大于 0.7,说明表面混凝土开裂风险也比较大;浇筑长度越长,侧墙混凝土最大开裂风险越大,一次性浇筑长度 18 m 增加到 24 m 时, $\eta$  增大幅度约为 5%~7%。

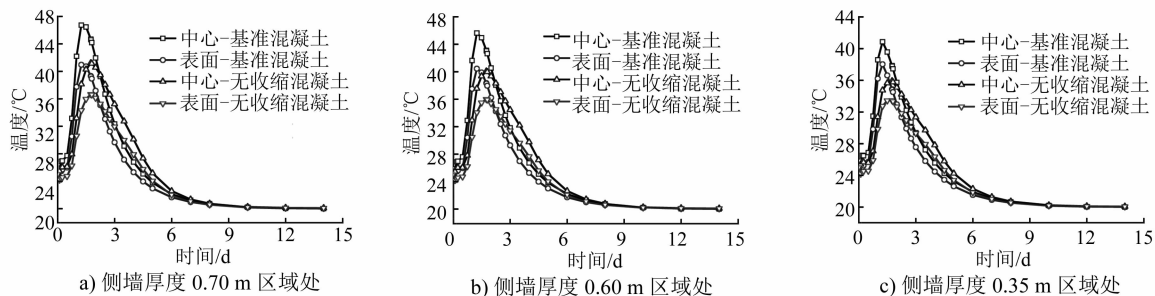


图 4 侧墙现浇混凝土温度计算结果

Fig. 4 Temperature calculation results of the cast-in-situ concrete on the side wall

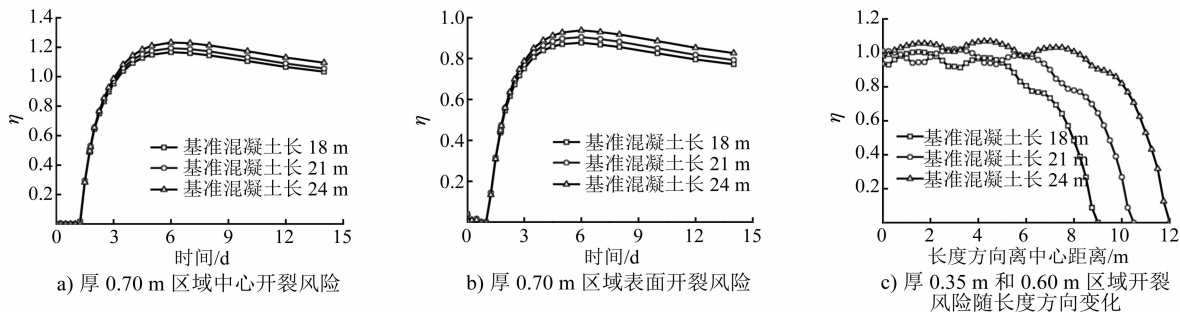


图 5 侧墙现浇叠合层基准混凝土开裂风险计算结果

Fig. 5 Calculation result of cracking risk of the cast-in-situ reference concrete on the side wall laminated layer

2) 由图 5 c) 可知,除了离自由边界较近的地方,其它大部分中部区域混凝土  $\eta$  均超过了 0.7,甚至超过 1.0,厚度 0.35 m 和 0.6 m 区域混凝土仍然有较大的开裂可能性;且同一时刻现浇混凝土侧墙开裂风险在长度方向上有所波动,这是因为 C50 预制板和现浇侧墙截面厚度均是变化的,其现浇混凝土的约束程度和温升值不同位置处也是不一样的,温度高且约束大的地方(预制板较厚的位置处)开裂风险较大,而约束小的地方,开裂风险相对较小。

### 3.4 无收缩混凝土开裂风险结果分析

图 6 为一次性浇筑不同长度时侧墙现浇叠合层无收缩混凝土开裂风险评估结果,可以看到:

1) 一次性浇筑 18~24 m 长时,现浇侧墙无收缩混凝土最大  $\eta$  约 0.66~0.72,除了浇筑长度 24 m 时,最大  $\eta$  稍大于 0.7,有一定的开裂风险;而浇筑 18~21 m 时, $\eta$  小于 0.7,基本可控制混凝土不开裂。表面最大  $\eta$  约 0.45~0.50,小于 0.7,也不大可能开裂;浇筑长度越长,侧墙混凝土最大开裂风险越大;一次性浇筑长度 18 m 增加到 24 m 时, $\eta$  增大幅度约为 9%。

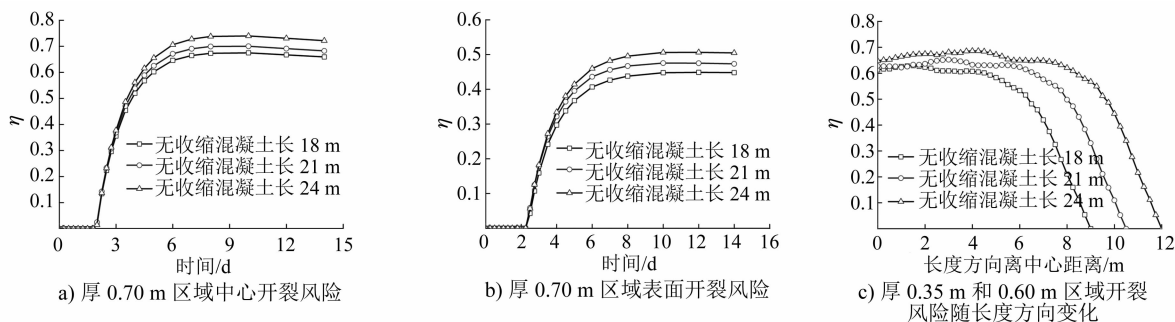


图6 现浇侧墙叠合层无收缩混凝土开裂风险计算结果

Fig. 6 Calculation result of cracking risk of the cast-in-situ non-shrinkage concrete on the side wall laminated layer

2) 采用无收缩混凝土,当一次性浇筑长度不超过 21 m 时,现浇叠合层混凝土最大  $\eta$  不超过 0.7,可避免裂缝产生;从开裂风险随长度变化曲线可以看出,与基准混凝土类似,同一时刻现浇混凝土侧墙开裂风险在长度方向上有所波动,主要是因为结构尺寸和各位置处约束程度不同所致。

综上,采用无收缩混凝土是明挖整体装配式地下车站叠合层现浇混凝土裂缝控制的有效措施。

## 4 结语

综上,采用基于“水化-温度-湿度-约束”多场耦合机制的评估方法,结合明挖装配整体式地下车站侧墙结构特点和室内实测混凝土性能参数,对一次性浇筑不同长度时侧墙叠合层现浇混凝土的温度历程和开裂风险进行了定量分析,结果表明:

1) 尽管该侧墙结构现浇部分整体厚度较薄,尺寸较小,但由于本工程混凝土强度较高,早期水化较快,散热条件差,现浇基准混凝土内部仍然可产生 15.9~21.7 °C 的温升,表面可产生 13.0~16.0 °C 的温升,内外温差小于 6 °C,可见由内外温差产生裂缝的可能性较小,混凝土的开裂风险主要由整体降温过程中收缩变形受到高强预制侧墙和先浇底板对现浇部分混凝土外部约束作用引起;与基准混凝土相比,无收缩混凝土内部产生约 10.91~16.21 °C 的温升,表面可产生 8.47~11.66 °C 的温升,温峰值降低约 5 °C,有利于结构抗裂。

2) 一次性浇筑长度 18~24 m 时,现浇侧墙叠合层基准混凝土内部最大  $\eta$  均大于 1.0,存在比较大的开裂风险;浇筑长度越长,现浇侧墙混凝土开裂风险越大;一次性浇筑长度 18 m 增加到 24 m 时, $\eta$  增大幅度仅 5%~7%,而且增加幅度趋缓。这也从侧面证实了此类结构约束作用较强,到达

一定的长度后,长度的增加对约束贡献有限。因为地下车站叠合层现浇混凝土在温降阶段产生的收缩变形,不仅受到已浇底板混凝土的约束作用,而且受到凹槽状高强预制板的约束,导致混凝土容易产生开裂。

3) 与基准混凝土相比,采用无收缩混凝土,一次性浇筑长度为 18~24 m 时,现浇侧墙无收缩混凝土最大  $\eta$  约 0.66~0.72,当一次性浇筑长度不超过 21 m 时,现浇叠合层混凝土最大  $\eta$  不超过 0.7,可见,理论分析结果表明,对于明挖装配式地下车站侧墙叠合层结构,无收缩混凝土可以有效降低结构开裂风险,提高结构抗裂性,避免裂缝产生。

## 参考文献

- [1] 刘建洪. 明挖装配式地铁车站结构设计优化及施工过程力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.  
LIU Jianhong. Study on the design optimization of the fabricated structure of the subway station constructed by open-cut method and the mechanical behaviour of construction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [2] 王德超,王国富,乔南,等. 预制装配式结构在地下工程中的应用及前景分析[J]. 中国科技论文, 2018(1):115.  
WANG Dechao, WANG Guofu, QIAO Nan, et al. The application and prospect analysis of prefabricated construction in underground engineering [J]. China Science Paper, 2018 (1):115.
- [3] 王大永,刘钊,谢丽霞,等. 装配式混凝土新旧结合面质量检测技术分析与研究[J]. 中国港湾建设, 2019(12):20.  
WANG Dayong, LIU Zhao, XIE Lixia, et al. Analysis and research of testing technology for new and old joints of prefabricated concrete [J]. China Harbour Engineering, 2019 (12):20.
- [4] 刘毅,潘清,张明亮,等. 地铁车站叠合式墙板收缩裂缝控制技术进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(3):69.

(下转第 180 页)