

地下车站主体结构混凝土裂缝控制工艺的计算分析

刘伟¹,谷坤鹏²

(1.上海城建养护管理有限公司,上海市 200023; 2.中交上海港湾工程设计研究院有限公司,上海市 200032)

摘要: 采取有限元分析和理论计算相结合的方法,对车站侧墙和底板内部的混凝土温度和应力进行分析,研究了车站主体结构侧墙和底板的温度、应力分布情况对混凝土裂缝控制的影响。结果表明:车站 C45 混凝土不采取控制措施时,混凝土抗裂安全系数为 0.96,不满足规范大于 1.15 的要求,开裂风险很大;在采取侧墙降温 and 底板升温的技术措施后,混凝土抗裂安全系数可达到 1.16;与不布设冷却水管的底板和侧墙相比,布设冷却水管的底板温升和侧墙温降分别约为 3~8℃和 4~6℃,且布设冷却水管后拉应力在后期减少幅度可达到 0.9 MPa,能有效减少混凝土开裂风险。

关键词: 有限元分析;混凝土结构;地下车站;裂缝控制

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)07-0223-05

0 引言

随着我国对基础交通建设的需求加大,地下或水下混凝土工程结构建设的比重日趋增加,海底、江底和湖底隧道建设量也逐渐增加。受现场施工条件的限制,大尺寸现浇隧道不可能像预制沉管一样进行全断面一次性浇筑。传统的明挖现浇车站混凝土一般分 3 步浇筑(见图 1),此工艺受混凝土不同步收缩、混凝土温度应力及结构应力等影响,特别是后浇筑混凝土存在严重的开裂风险,此类裂缝问题也是一直困扰工程界的技术难题^[1]。

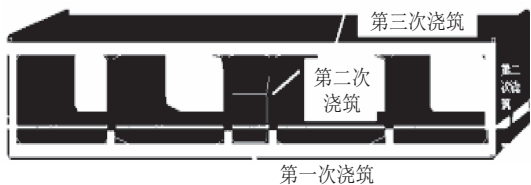


图 1 传统车站 3 步浇筑工艺

大量研究表明,对于图 1 中车站施工工艺,侧墙和底板由于存在浇筑时间差,侧墙浇筑后与地板收缩不同步导致侧墙底部产生应力集中,现场的统计结果也显示该部位是渗漏水裂缝的高发区域。为了降低侧墙与底板的应力差,底板和侧墙混凝土的同步浇筑是关键,因此有研究者开展了对底板和侧墙同时浇筑的施工工艺研究,结果表明,底板和侧墙同时浇筑可降低侧墙与底板的应力差,减少裂缝的发

生概率,结构的渗漏水现象得到控制,基本解决了明挖车站的裂缝控制问题。但该工艺存在以下问题:一是底板和侧墙作为整体一次性浇筑时,需要铺设大量型钢和满堂支架对模板加固,施工操作步骤繁琐,对工期和成本有一定的影响;二是第二次浇筑的顶板与侧墙的接缝部分仍存在一定程度的裂缝。也就是说,虽然同时浇筑的 2 个部位之间几乎没有裂缝,但由于该工艺仍不可避免地要分次浇筑,分次浇筑部位仍会产生裂缝^[2]。

因此,本文采取有限元分析和理论计算相结合的方法,对该工艺下浇筑的车站侧墙和底板内部的混凝土温度以及应力水平进行分析,研究车站主体结构侧墙和底板的温度、应力分布情况对混凝土裂缝控制的影响,为现场车站主体结构混凝土施工裂缝控制提供理论依据。

1 新型混凝土裂缝控制工艺

1.1 原理

在原创新工艺的基础上,通过大量的多因素耦合条件下混凝土受力理论计算和有限元仿真计算,创新性地初步提出了利用上部后浇筑混凝土的水化热加热下部老混凝土的措施,并结合可改变新浇筑混凝土变形量的减缩剂、抗裂剂、可调节新浇筑混凝土水化放热速率和历程的水化热抑制剂、相变材料等新技术手段,在不显著增加成本和工期的情况下来解决此类结构的裂缝问题。

收稿日期: 2023-06-09

作者简介: 刘伟(1992—),男,硕士,工程师,从事工程施工、养护运营管理工作。

运用新型裂缝控制工艺的侧墙和底板应力分布见图2。有限元模拟结果显示,墙身和顶板的最大应力降至约1.0 MPa和1.3 MPa,开裂风险极小^[3-4]。

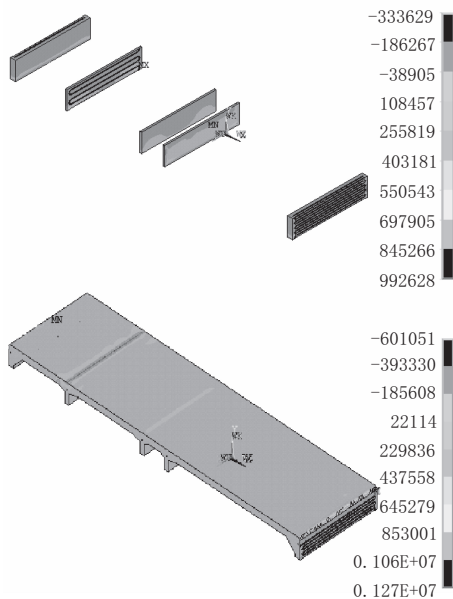


图2 运用新型裂缝控制工艺的侧墙和底板应力分布(单位:N/m²)

1.2 工艺流程

(1)抗裂高性能混凝土生产—开展混凝土配合比设计—得出抗裂混凝土相应的施工配合比。

(2)温度场平衡系统布设:明确冷却水管布置方案,分为底板、侧墙、底板非倒角处、底板倒角处冷却水管的布置;之后,进行水管安装、通水系统设计。

(3)进行地下车站混凝土分段浇筑施工,施工过程中进行温度控制:控制入模温度,运输时采取一定措施对混凝土进行保温,开启冷却水管通水控制系统,平衡上下部新老混凝土的温度差。浇筑完成后对混凝土进行养护。

2 混凝土裂缝控制计算

2.1 墙体裂缝控制理论

本文针对有地基约束时墙体的变形计算。王铁梦^[5]和徐丽^[6]对混凝土底板上长墙应变、应力进行推导时,采取的计算模型如图3所示。借鉴此模型,截取墙体微元 dx ,墙体和底板分别降温 T_1 、 T_2 ;墙体自由变形墙端位置在 A 点,墙板整体无地基约束时的变形在 B 点,有地基约束时的变形在 C 点,因此墙体总的约束变形为 AC ,其中 AB 为墙体受底板约束时的变形(相应的应变为 ε_1), BC 为地基对墙板整体的约束变形(相应的应变为 $\varepsilon_2(x)$),则墙体总的约束应变 $\varepsilon(x)$ 为 ε_1 与 $\varepsilon_2(x)$ 的叠加,即:

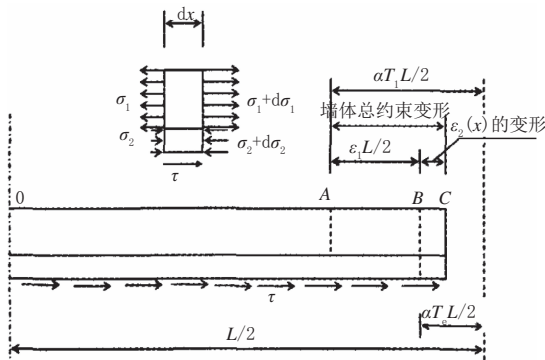


图3 有地基约束时墙板受力及变形计算模型

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2(x) = \alpha T_1 - \alpha T_e \frac{\cosh \beta x}{\cosh \frac{\beta L}{2}} \quad (1)$$

因此,约束应力为:

$$\sigma(x) = \alpha E_1 \left(T_1 - T_e \frac{\cosh \beta x}{\cosh \frac{\beta L}{2}} \right) H_1 \quad (2)$$

其中:

$$\beta^2 = \frac{C_x b_2}{E_1 A_1 + E_2 A_2} = \frac{C_x b_2}{E_1 A_1} \frac{1}{1+m} \quad (3)$$

上述式中: C_x 为地基的阻力系数; b_2 为底板的宽度; E_1 、 E_2 分别为墙体、底板的弹性模量; A_1 、 A_2 分别为墙体、底板的截面积; α 为线膨胀系数; $T_e = (T_1 + mT_2)/(1+m)$, 为等效温差,其含义为墙体和底板分别降温 T_1 、 T_2 时的变形,可以用墙板整体降温 T_e 时的变形代替; $m = E_2 A_2 / E_1 A_1$, 为底板与侧墙的刚度比; H_1 为考虑徐变的应力松弛系数; T_1 、 T_2 、 T_e 均取降温时为正。

2.2 车站侧墙混凝土裂缝计算

车站主体结构断面图见图4。第一次浇筑底板,第二次浇筑高5.0 m侧墙。根据混凝土收缩规律,混凝土浇筑28 d以后收缩均比较小,本次计算取最不利情况,底板和侧墙浇筑间隔时间28 d。另外根据类似地铁站侧墙混凝土降温情况,混凝土浇筑10 d之后基本上温度不再下降,而侧墙混凝土裂缝大多发生在早期,因此本次计算取侧墙浇筑完成后第10 d进行计算。10 d之后通过保温保湿养护,以降低混凝土收缩,控制后期裂缝。单段浇筑长度为20 m^[7]。

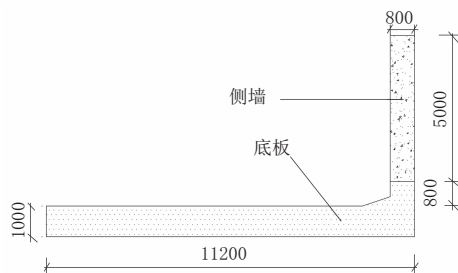


图4 车站主体结构断面图(单位:mm)

2.2.1 不布设冷却水管、不进行底板加热情况

墙体计算龄期为变形完成之后,相应的底板浇筑龄期比墙体提前 28 d。

墙体: $H_1=4\ 000\text{ mm}$ (取 $0.2L$), $b_1=800\text{ mm}$, $A_1=H_1 \times b_1=3\ 200\ 000\text{ mm}^2$; $E_1(10\text{ d})=28\ 000\text{ Pa}$ (28 d 弹性模量 $\times 85\%$)。

底板: $H_2=1\ 000\text{ mm}$, $b_2=11\ 200\text{ mm}$, $A_2=H_2 \times b_2=11\ 200\ 000\text{ mm}^2$; $E_2=35\ 000\text{ Pa}$ 。

(1)墙体的综合温差(T_1):水化热降温差取 $30\text{ }^\circ\text{C}$;根据实测收缩数据,从浇筑开始到第 10 d,收缩值取 1.0×10^{-4} ,收缩当量温差为 $1.0 \times 10^{-4}/10^{-5}=10\text{ }^\circ\text{C}$;则墙体综合温差 $T_1=30+10=40\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(2)底板综合温差(T_2): $T_2=0\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(3)等效温差(T_e): $m=\frac{E_2 A_2}{E_1 A_1}=\frac{35\ 000 \times 11\ 200\ 000}{28\ 000 \times 3\ 200\ 000}=4.375$; $T_e=7.442\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(4)墙体中部最大拉应力:地基为 C30 混凝土垫层,取 $C_x=1$;取 $H_t=0.283$;由式(3)得:

$$\beta=\sqrt{\frac{1 \times 11\ 200}{28\ 000 \times 3\ 200\ 000 \times (1+4.375)}}=1.52 \times 10^{-4};$$

由式(2)得:

$$\sigma(20\text{ m})=10^{-5} \times 28\ 000 \times \left(40-7.442 \times \frac{1}{\cosh \frac{1.52 \times 10^{-4} \times 20\ 000}{2}}\right) \times$$

$$0.283=2.92\text{ MPa}。$$

根据《大体积混凝土施工规范》(GB 50496—2009),C45 混凝土抗拉强度标准值为 2.58 MPa,由配合比查询粉煤灰和矿粉的系数为 1.03 和 1.06,根据规范公式计算得出 10 d 后 C45 混凝土抗拉强度为 2.81 MPa。混凝土抗裂安全系数为 $2.81/2.92=0.96$,不满足规范大于 1.15 的要求,若不采取控裂措施,则车站 C45 混凝土开裂风险很大^[8]。

2.2.2 侧墙布设冷却水管,并对底板加热情况

墙体计算龄期为变形完成之后,相应的底板浇筑龄期比墙体提前 28 d。

墙体: $H_1=4\ 000\text{ mm}$ (取 $0.2L$), $b_1=800\text{ mm}$, $A_1=H_1 \times b_1=3\ 200\ 000\text{ mm}^2$; $E_1(10\text{ d})=28\ 000\text{ Pa}$ (28 d 弹性模量 $\times 85\%$)。

底板: $H_2=1\ 000\text{ mm}$, $b_2=11\ 200\text{ mm}$, $A_2=H_2 \times b_2=11\ 200\ 000\text{ mm}^2$; $E_2=35\ 000\text{ Pa}$ 。

(1)墙体的综合温差(T_1):墙体通过降温措施,降低温升 $5\text{ }^\circ\text{C}$,水化热降温差取 $25\text{ }^\circ\text{C}$;根据实测收缩数据,从浇筑到第 10 d,收缩值取 1.0×10^{-4} ,收缩

当量温差为 $1.0 \times 10^{-4}/10^{-5}=10\text{ }^\circ\text{C}$;则墙体综合温差 $T_1=25+10=35\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(2)底板综合温差(T_2):通过加热措施,使底板升温 $5\text{ }^\circ\text{C}$,底板综合温差取 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(3)等效温差(T_e): $m=\frac{E_2 A_2}{E_1 A_1}=\frac{35\ 000 \times 11\ 200\ 000}{28\ 000 \times 3\ 200\ 000}=4.375$, $T_e=10.581\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(4)墙体中部最大拉应力:地基为 C30 混凝土垫层,取 $C_x=1$;取 $H_t=0.283$;由式(3)得:

$$\beta=\sqrt{\frac{1 \times 11\ 200}{28\ 000 \times 3\ 200\ 000 \times (1+4.375)}}=1.52 \times 10^{-4};$$

由式(2)得:

$$\sigma(20\text{ m})=10^{-5} \times 28\ 000 \times \left(35-10.581 \times \frac{1}{\cosh \frac{1.52 \times 10^{-4} \times 20\ 000}{2}}\right) \times$$

$$0.283=2.42\text{ MPa}。$$

同样根据《大体积混凝土施工规范》计算得出 10 d 后 C45 混凝土抗拉强度为 2.81 MPa。采取控裂措施后混凝土抗裂安全系数为 $2.81/2.42=1.16$,满足规范大于 1.15 的要求。因此车站控裂需采取侧墙降温 and 底板升温的技术措施,并控制侧墙降温幅度不小于 $5\text{ }^\circ\text{C}$,底板升温幅度不小于 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3 混凝土温度场仿真分析

3.1 车站混凝土绝热温升

《大体积混凝土施工规范》中的绝热温升计算公式为:

$$T(t)=\frac{WQ}{C\rho}(1-e^{-mt}) \quad (4)$$

式中: $T(t)$ 为混凝土龄期为 t 时的绝热温升, $^\circ\text{C}$; W 为每 m^3 混凝土的胶凝材料用量, kg/m^3 ; C 为混凝土比热容,一般为 $0.92\sim 1.0\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; ρ 为混凝土的重力密度, $2\ 400\sim 2\ 500\text{ kg}/\text{m}^3$; m 指与水泥品种、浇筑温度等有关的系数, $0.3\sim 0.5\text{ d}^{-1}$ 。

车站所使用的春驰水泥的 7 d 水化热为 282 g/J,根据配合比掺量,20%粉煤灰和 10%矿粉的水化热调整系数分别为 0.95 和 1.0,计算得出 $t=7\text{ d}$ 时,胶凝材料的水化热为 268 g/J;现场混凝土比热容 C 为 $0.96\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,密度 ρ 为 $2\ 450\text{ kg}/\text{m}^3$, m 取值为 0.4 d^{-1} 。

将上述数值代入式(4),计算得出车站主体结构 C45 混凝土绝热温升为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 车站混凝土温度场和应力场有限元分析

3.2.1 建模计算

依据 3.1 节中水化热测试和计算获得的混凝土

绝热温升数据,对车站底板和侧墙的结构尺寸进行建模,采用数模仿真分析软件来分析计算车站混凝土浇筑施工时的温度场和应力场。具体计算如下^[9-11]:

气温取 15℃,入模温度取 15℃,侧墙带模养护混凝土对流系数取 16.74 kJ/(m²·h·℃),底板混凝土对流系数取 25.12 kJ/(m²·h·℃),混凝土绝热温升取 50℃。2道侧墙相距较远,相互影响,建模时,在一道侧墙和底板上布设冷却水管,以降低侧墙温度和提升底板温度,另一道则不安装冷却水管。车站底板和侧墙建模见图 5,车站底板和侧墙冷却水管布设见图 6。水管直径 50 mm,水温按照 28℃选取,流速取 1.0 m/s,自浇筑覆盖冷却水管开始通水,通水周期 120 h。底板和侧墙的温度、应力分布见图 7、图 8。

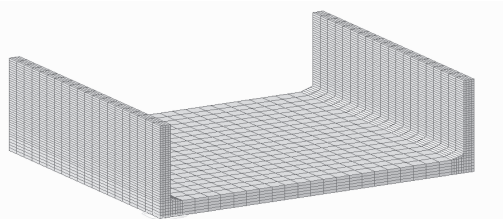


图 5 车站底板和侧墙建模

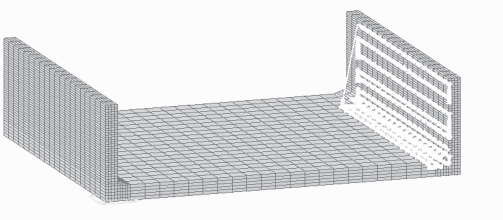


图 6 车站底板和侧墙冷却水管布设

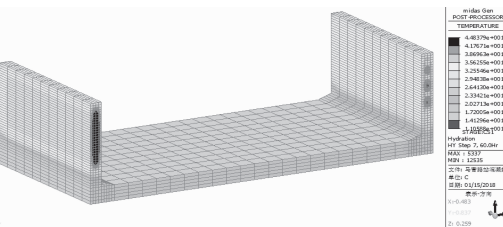


图 7 车站底板和侧墙温度分布(单位:℃)

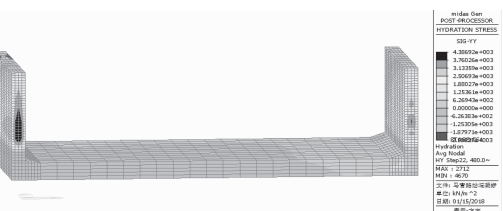


图 8 车站底板和侧墙应力分布(单位:kN/m²)

3.2.2 温度计算结果分析

取 1/2 截面的分析计算结果,在每边底板上分别取不同高度的 3 个节点,在每边的侧墙上分别取 3

个不同高度的节点。具体节点位置见图 9。底板温度计算结果见图 10;侧墙温度计算结果见图 11。结果表明,通水后,与不布设冷却水管的底板和侧墙相比,布设冷却水管的底板温升约 3~8℃,侧墙温降约 4~6℃。



图 9 节点的分布位置

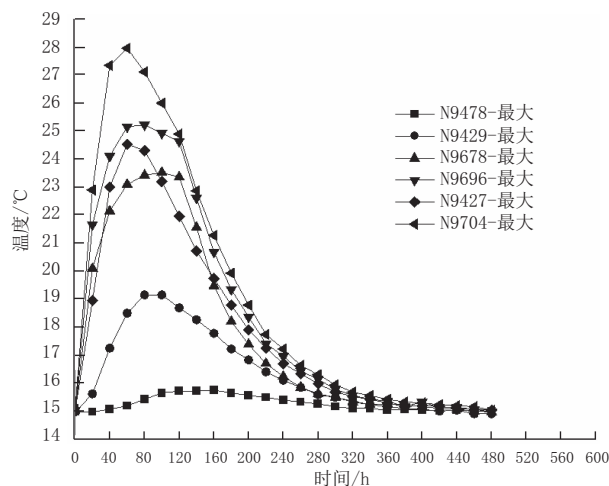


图 10 底板有限元温度计算结果(N代表“节点”)

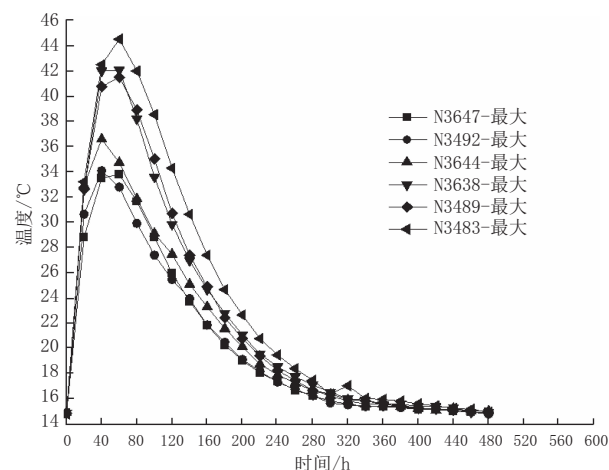


图 11 侧墙有限元温度计算结果(N代表“节点”)

3.2.3 应力计算结果分析

取侧墙的 2 个关键节点(节点 3489 和节点 3644)进行抗裂性分析,其有限元应力计算结果见图 12。由图 12 可见:布设冷却水管的侧墙节点 3644 其 10、20 d 拉应力分别为 2.42、3.2 MPa;未布设冷却水管的侧墙节点 3489 其 10、20 d 拉应力分别为 2.9、4.1 MPa。可以看出,布设冷却水管后,侧墙拉应力早期有一定程度的减少,后期减少幅度加大,可有效减

少开裂风险。

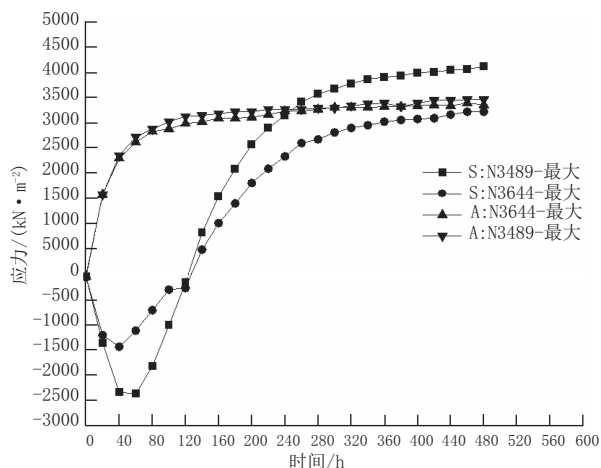


图 12 侧墙有限元应力计算结果(N 代表“节点”;S 为布设冷却水管的测试结果,A 为未布设冷却水管的测试结果)

4 结 语

(1)如不采取控裂措施,混凝土抗裂安全系数为 0.96,不满足规范大于 1.15 的要求,车站 C45 混凝土开裂风险很大。

(2)采取侧墙降温 and 底板升温的技术措施,并控制侧墙降温幅度不小于 5℃,底板升温幅度不小于 5℃,可使混凝土抗裂安全系数达到 1.16,满足规范大于 1.15 的要求。

(3)与不布设冷却水管的底板和侧墙相比,布设冷却水管的底板温升约 3~8℃,侧墙温降约 4~6℃,

可有效降低混凝土开裂风险。

(4)与不布设冷却水管的底板和侧墙相比,布设冷却水管后其拉应力在早期有一定程度的减少,后期减少幅度加大,20 d 拉应力下降值可达到 0.9 MPa,可有效减少开裂风险。

参考文献:

- [1] 于连山,谢清泉,刘维正,等.轨道交通车站主体结构混凝土开裂分析与控制措施[J].铁道科学与工程学报,2019,16(10):2562-2571.
- [2] 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):8-12,36.
- [3] 耿敏,李志全,李路,等.徐州轨道交通地下车站侧墙结构高性能混凝土早期抗裂性能研究[J].施工技术,2018(增刊1):1759-1761.
- [4] 苏有文,古松.大体积混凝土施工过程温度应力场监测及有限元分析[J].浙江工业大学学报,2010,38(4):442-447.
- [5] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [6] 徐丽.混凝土底板上长墙的温度应力计算[J].工程质量,2009(3):60-63.
- [7] 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.
- [8] 王同炎.福田火车站超长混凝土结构抗裂技术[J].施工技术,2013(18):44-47.
- [9] 王一凡,宁兴东,陈尧隆,等.大体积混凝土温度应力有限元分析[J].水资源与水工程学报,2010,21(1):109-113.
- [10] 王江锋,杜春雪,黄志全,等.暗涵墙体混凝土温度场与应力场仿真分析[J].水利水电技术,2017,48(11):83-88.
- [11] 丁兵勇,杨忠良,唐瑜莲,等.水电站厂房大体积混凝土温度应力分析与防裂措施[J].南水北调与水利科技,2015,13(2):362-365.

(上接第 197 页)

参考文献:

- [1] 杨秀仁.明挖地铁车站预制装配式结构理论与实践[D].北京:北京交通大学,2020.
- [2] 杨秀仁.我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望[J].隧道建设(中英文),2021,41(11):1849-1870,41-62.
- [3] 艾永飞,吴宝游,艾永林,等.无轨工装模式下预制板式轨道施工技术研究——以苏州轨道交通 5 号线工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(S2):597-604.

- [4] 苏立勇,路清泉,张志伟,等.地铁车站轨顶风道装配式技术研究:以北京地铁 19 号线一期工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(5):814-821.
- [5] 喻波,王呼佳,高鲲,等.预制装配式 UHPC 站台板结构技术研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(11):1898-1905.
- [6] 王占生,杨秀仁,陈鹏,等.便于快速施工的预制板式轨道结构及施工方法:CN111877054A[P].2020-11-03.
- [7] 李虎,韩刚,周志宇,等.一种隧道承插式道床构件及施工方法:CN115788499A[P].2023-03-14.