

地下车站的混凝土开裂数值分析及抗裂试验研究

朱继文, 成 琨, 李兆华, 戴慧丽

[上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海市 200030]

摘 要: 针对上海地区富水软土地层中地下车站渗漏水问题,在混凝土开裂原理分析的基础上,建立了地铁车站混凝土结构的有限元损伤模型,揭示了水土荷载作用下混凝土裂缝起裂特点、分布及其发展规律。采用光栅光纤监测技术开展了混凝土温度-应变现场实验,得到了在施工全过程中混凝土结构的温度及应变变化规律,分析了温度、养护时间、抗裂剂等因素对混凝土开裂的影响。研究表明:根据形态特点,裂缝可分为贯通裂缝和非贯通裂缝,其中贯通裂缝可引起车站结构渗漏水。由于约束作用,贯通裂缝主要发生在侧墙靠近中板和底板的位置。添加抗裂剂、延长养护时间可有效提高混凝土抗裂性能和防水抗渗性能。

关键词: 地铁车站;混凝土开裂;数值分析;现场监测;抗裂剂

中图分类号: TU43

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)04-0115-06

0 引 言

随着轨道交通建设在城市发展规划中的作用日益突出,越来越多的城市迈进了“地铁时代”^[1],截止到2019年,中国大陆共有北京、上海、广州等35个城市开通地铁,运营总长度达到5 180.6 km^[2]。其中,上海拥有世界线路总长度最长的城市轨道交通系统。截至2020年底,上海地铁运营线路共18条,共设车站429座,运营总里程730 km^[3]。

地铁车站作为连接城市轨道交通网的关键节点^[4],其设计施工对地铁线路的建设和运营至关重要。在施工阶段,车站基坑可作为盾构始发、接收的工作井以及施工设备、材料的运输通道;在运营阶段,车站是为乘客提供换乘、候车的场所。目前国内外地铁车站形式可分为地下车站、地面车站和高架车站^[5],其中地下车站可充分利用地下空间,不占用地面道路,功能分区灵活合理,因而得到广泛应用。

与其它地上结构相比,由于地下车站环境比较复杂,地下水比较丰富,地下车站面临混凝土防裂抗渗方面的挑战^[6]。地下车站抗裂性能不仅关系到施工阶段的安全性,更关系到后期运营阶段结构的耐久性。由于长期受地下水的侵蚀及压力渗透作用,一旦出现混凝土开裂,就会出现渗漏水问题。渗漏水不但会造成钢筋腐蚀,降低混凝土强度,缩短混凝土结

构的使用寿命,还会影响车站内部的仪器的运行甚至是行车安全。针对地铁车站混凝土开裂问题,工程与科研人员已开展了大量的研究^[7-14],温竹茵等^[15]通过分析大体积混凝土的温度收缩应力对开裂的影响,得到了适用于地铁车站结构的温度收缩应力、裂缝间距及裂缝宽度的计算公式;李华^[16]以表面裂缝和贯穿裂缝两大类分别分析了裂缝发生的机理和影响裂缝开展的原因,提出了控制地铁车站侧墙中裂缝的方法;刘国彬等^[17]在对上海各类地铁车站的综合防水方案进行归纳整理基础上,总结了地铁车站各部位渗漏水的原因并从设计构造和施工等方面提出了相应的改进措施;马宏旺等^[18]以上海地铁某车站为实例,设计了车站顶板预应力设计方案,使混凝土结构在正常使用工况下保持裂缝闭合,从而使地铁车站运营期间绝大部分时间无渗漏。

目前由于混凝土材料及结构特点,无法从根源上解决混凝土开裂问题。另外地铁车站结构复杂,在裂缝的开裂形式及其发展规律方面的研究明显不足,使得车站关键部位开裂问题较为严重,对结构的耐久性和防水产生了较大影响。本文采用数值分析方法建立了荷载-约束耦合作用下的混凝土开裂损伤模型,同时利用光纤光栅传感器开展了混凝土温度及应变现场监测试验。

1 工程背景

上海地铁15号线罗秀路车站位于老沪闵路与罗秀路交叉口,为地下二层岛式车站,地下一层为站厅层,

收稿日期:2020-05-25

作者简介:朱继文(1969—),男,本科,教授级高级工程师,从事市政工程和隧道工程施工和科研等相关工作。

地下二层为站台层,车站平面尺寸为 208.8 m × 20.44 m,主体埋深约为 16.5 m,围护结构为 800 mm 厚的地下连续墙,混凝土强度等级为 C35,抗渗等级为 P8,采用明挖顺筑法施工。

上海地区为典型的富水软土地层,具有含水量高、孔隙比大、抗剪强度低、流变等特点,罗秀路站基坑开挖范围内分布有深厚软土层,具体地层分布为①₁₋₁层人工填土、①₁₋₂层素填土、②₁黏土、③淤泥质粉质黏土、④₁淤泥质黏土、④₁₋₂砂质粉土夹粉质黏土、④₂砂质粉土夹粉质黏土、⑤₂₋₁砂质粉土、⑤₃₋₁粉质黏土、⑥粉质黏土、⑦₁₋₁砂质粉土夹粉质黏土、⑦₁₋₂砂质粉土、⑦₂粉细砂等地层,潜水稳定水位埋深约 0.80 ~ 1.90 m,各土层分布见图 1。

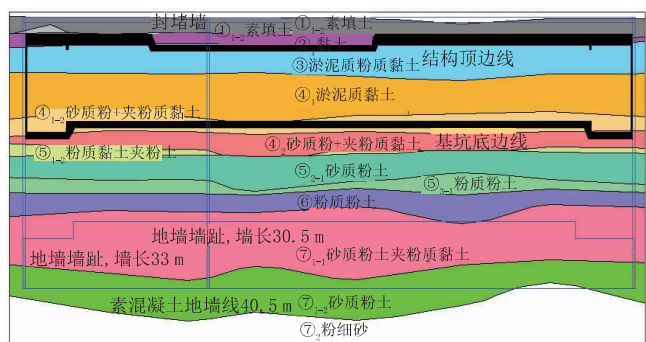


图 1 罗秀路站地质剖面图

2 地下车站混凝土开裂原理

混凝土是由水泥砂浆和骨料组成的非均质复合材料,包含大量的初始微裂纹,特别是在粗骨料和砂浆之间的界面处,在荷载、约束作用下微裂纹会进一步扩展。当微裂缝发展至一定程度时,会对混凝土结构产生不利影响。

如果混凝土发生均匀冷却及自由收缩变形,其内部的应力为零,此时混凝土不会产生裂缝^[19]。但当混凝土受到温度、荷载、约束等的作用时,混凝土内部形变无法协调而产生应力,当拉应力超过混凝土抗拉强度时即发生开裂。由于车站混凝土结构荷载、边界条件比较复杂,其中侧墙受到外部水土荷载作用,同时侧墙的变形受到顶板、中板、底板或支撑的约束,使得混凝土结构无法自由变形,因此在混凝土内部产生应力。在混凝土浇筑、养护过程中会产生大量的水化热,由于表面散热比较快,温度较低,而内部散热条件较差,随着热量不断积聚,温度较高,最高可达 70℃,因此混凝土内外存在温差,使得内外收缩变形不一致,从而使混凝土产生约束拉应力。

3 地下车站混凝土开裂损伤数值分析

3.1 混凝土开裂损伤模型

ABAQUS 提供了混凝土损伤塑性模型 (CDP 模型),用于模拟混凝土材料的拉伸开裂和压缩破碎等破坏,其屈服和破坏面的演化由两个变量:拉伸等效塑性应变 ϵ_t^p 和压缩等效塑性应变 ϵ_c^p 控制。在弹性阶段,该模型采用线弹性模型对混凝土的力学性能进行描述,当混凝土进入损伤阶段后,CDP 模型采用损伤因子 d 和初始无损弹性模量 E_0 来描述损伤后的弹性模量:

$$E = (1-d)E_0 \quad (1)$$

其中损伤因子 d 为应力状态和单轴拉压损伤变量 d_t 和 d_c 的函数,在单轴循环荷载状态下,该关系式为:

$$(1-d) = (1-s_t d_c)(1-s_c d_t) \quad (2)$$

式中: s_t 、 s_c 分别为与应力反向相关的刚度应力状态函数。

3.2 地下车站混凝土开裂损伤模型

选取罗秀路地铁车站中的典型地下二层三跨矩形断面,该断面宽度 25.9 m,高 14.9 m,见图 2,包括地连墙(左右两侧各 1 个)、侧墙(左右两侧各 1 个)、立柱(2 个)、顶板(1 个)、中板(1 个)以及底板(1 个)等部分。和基坑宽度相比,基坑纵向长度较长,模型类型可采用平面应变模型,网格采用为 4 节点双线性平面应变四边形 CPE4R 进行划分,见图 3。

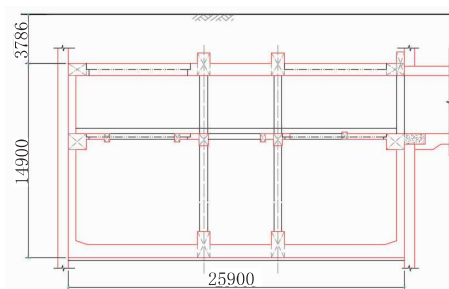


图 2 罗秀路车站横向断面图(单位:mm)

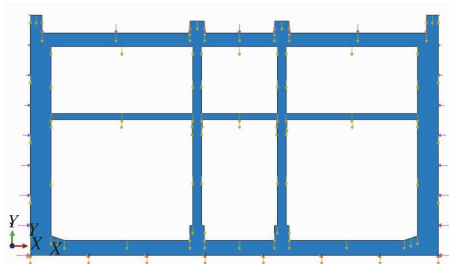


图 3 数值计算模型

荷载包括混凝土结构自重、两侧地连墙的水土压力、顶部的土压力。在约束方面,根据叠合墙结构

特点,地连墙和侧墙之间采取绑定约束,共同承担外部水土压力,同时在模型底部约束水平方向、竖直方向以及转动方向的位移。本数值模型中混凝土结构采用 Abaqus 中自带的混凝土损伤塑性本构模型进行模拟,混凝土型号为 C35,重度为 24 kN/m³,弹性模量为 31.5 GPa,泊松比为 0.2。材料进入塑性后,混凝土损伤模型的应力-非弹性应变关系及损伤因子-非弹性应变关系见表 1~表 3。

表 1 C35 混凝土抗压计算参数		
抗压强度 p/MPa	非弹性应变 $\varepsilon \times 10^{-3}$	损伤因子 d_c
15.45	0.000	0.000
18.48	0.151	0.065
19.93	0.376	0.137
20.10	0.515	0.178
19.61	0.833	0.264
15.88	1.893	0.501
12.49	2.937	0.665
10.07	3.934	0.767
7.50	5.528	0.861
4.89	8.995	0.939

表 2 C35 混凝土抗拉计算参数		
抗拉强度 p/MPa	非弹性应变 $\varepsilon \times 10^{-3}$	损伤因子 d_t
2.010	0.000	0.000
0.660	0.350	0.359
0.419	0.647	0.620
0.319	0.937	0.756
0.226	1.513	0.876
0.180	2.087	0.924
0.152	2.660	0.949
0.130	3.327	0.964

3.3 地下车站混凝土开裂损伤分析

混凝土的损伤开裂是一个动态发展的过程,我们选取了混凝土开裂过程中三个典型阶段进行分析。第一阶段见图 4(a),混凝土裂缝首先发生在下二层两侧侧墙中部位置处,该组裂缝起裂位置为靠近基坑内部的一侧混凝土,由基坑内向基坑外部发展,这是由于在外部水土压力及底板和中板约束的作用下,基坑内侧混凝土受拉,拉应力超过了混凝土抗拉强度导致的。很明显,该裂缝尚未形成贯通裂缝,不

与外部地下水相通,因此对车站的防水问题影响不大。

随着时间原有裂缝继续发展,同时出现了新的裂缝。通过图 4(b)可以看出在荷载作用下下二层两侧侧墙中部的裂缝数量逐渐增多,长度逐渐增大,同时在顶板两端靠近侧墙位置以及靠近底板的地连墙位置开始出现新的裂缝。这两处新生裂缝是从混凝土外部开始起裂,地下水可进入裂缝内部,可能引起混凝土内部钢筋的锈蚀及混凝土的碳化,但由于没有形成贯通裂缝,水流不会渗流进车站内部对车站内部造成影响。

在最后阶段,可以看出裂缝分布越来越广,且混凝土结构已经出现了贯通裂缝。如图 4(c)所示,由于承受较大的弯矩和轴力,中板、顶板、立柱等部位首次出现了开裂的情况,这些裂缝虽然无关结构防水,但从结构强度和耐久性方面还是应引起足够重视。此外,侧墙裂缝数量急剧增多,而且在靠近顶板、中板、底板的侧墙处的已经出现内外贯通的裂缝,为了避免出现渗漏需要采取一定的防渗措施。通过现场观测,发现在车站地下二层侧墙发现一处竖向裂缝,见图 5,该裂缝从侧墙内侧起裂,与数值分析结果相符。

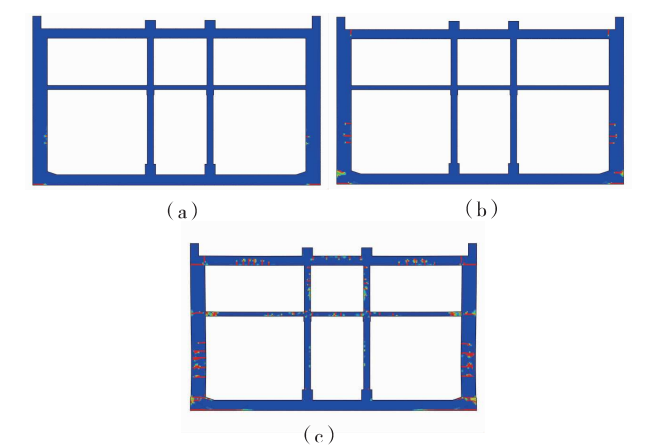


图 4 车站混凝土结构裂缝发展

经过上述分析发现,由于顶板、中板和底板的约束作用,贯通裂缝主要发生在侧墙靠近平板的位置,贯通裂缝已完全将墙体断开,使得基坑内部和外部之间形成了一条通路,该通路为外部水流的渗入提供了可能。而非贯通裂缝并未完全将墙体结构断开,地下水尚且无法渗入到车站内部。根据开裂位置不

表 3 数值模型计算参数							
土重度 $\gamma_{\pm}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	侧压力系数 η	混凝土重度 $\gamma_{\text{混}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	混凝土弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	膨胀角 $\alpha/^\circ$	偏心率 e	双轴极限抗压 / 单轴极限抗压 f_{y0}/f_{c0}
20	0.5	24	31 500	0.2	30	0.1	1.16

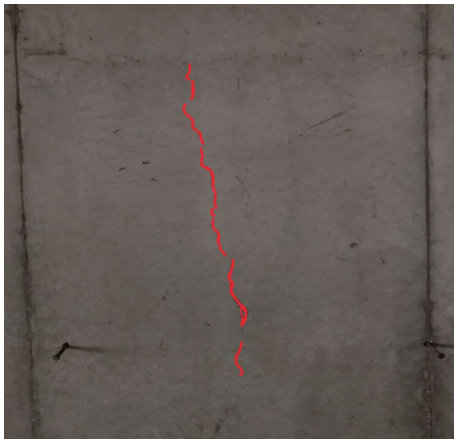


图5 地下二层侧墙裂缝

同,非贯通裂缝包括内侧起裂和外侧起裂两种类型,内侧起裂非贯通裂缝对车站防水无明显影响,外侧起裂非贯通裂缝虽然不会引起基坑渗流,但有腐蚀钢筋、碳化混凝土的风险。

4 车站混凝土温度-应变现场监测试验

为了探究添加剂、养护时间对混凝土开裂的影响,本节利用光纤光栅传感器(包括温度传感器、应变传感器)对水化热温度场变化情况以及应变变化情况进行了现场监测,进而判断混凝土开裂情况。通过第三节数值分析发现,贯通裂缝主要发生在靠近中板的侧墙上,因此在现场监测中传感器埋置在地下一层靠近中板的侧墙位置。

4.1 光纤光栅式技术

光纤光栅(FBG)是一种通过一定方法使光纤纤芯的折射率发生轴向周期性调制而形成的衍射光栅,是一种无源滤波器件。与常规传感器相比,光纤光栅传感器具有防爆、抗强电磁干扰、防雷击、高精度、重量轻、体积小等特点,因此在光纤通信和传感领域得到了广泛的应用。本次监测将采用光纤光栅式应变计和光纤光栅式温度计见图6、图7。



图6 光纤光栅应变计



图7 光纤光栅式温度计

(1)光纤光栅式应变计

光纤光栅式应变计可用于测量混凝土的应变,通过传感器安装座将应变传递到内部的传感芯,高

精度的传感芯将感受到的微小应变转换为极为敏感的光学波长,通过解调仪器进行解析(见表4)。

表4 光纤光栅应变计参数

项目	性能指标
标准量程	$\pm 1\,500\,\mu\varepsilon$
测量精度	0.3%FS
分辨率	0.05%FS
波长范围	1 500~1 590 nm
温度补偿	内置补偿或外置补偿
防护等级	IP68
标距	90 mm
连接方式	选配 FC/APC 接头或熔接
工作环境	温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim+120^{\circ}\text{C}$

(2)光纤光栅式温度计

光纤光栅温度传感器是国内最具代表性的温度计产品,主要用于相关场所温度的精确测量。外界温度通过传感器传递到内部的传感芯,高精度的传感芯将感受到的微小温度变化转换为极为敏感的光学波长,通过解调仪器进行解析(见表5)。

表5 光纤光栅温度计参数

项目	性能指标
标准量程	$-40^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$
测量精度	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
分辨率	0.1 $^{\circ}\text{C}$
波长范围	1 500~1 590 nm
封装形式	抗冲击不锈钢防护壳
防护等级	IP68
抗拉强度	两端光缆至少可以承受 100 N 的拉力
连接方式	熔接或按要求定制

4.2 混凝土抗裂剂

作为混凝土的重要组成成分,添加剂可根据需要改善混凝土性质,提高混凝土各项性能。目前,在混凝土施工中常用的添加剂有:减水剂、引气剂、缓凝剂、早强剂、泵送剂、膨胀剂、速凝剂、防冻剂、防水剂等^[20]。据统计,混凝土结构裂缝中大约 80%是由于混凝土的收缩变形造成的。混凝土的开裂,会影响混凝土工程结构的正常使用和耐久性,为了控制混凝土开裂,提高混凝土防水性能,本工程中将掺混 HME-V 混凝土(温控、防渗)高效抗裂剂,掺量为胶凝材料总量的 6%~10%。

HME-V 混凝土(温控、防渗)高效抗裂剂为兼具混凝土温升抑制和收缩补偿的新型高效抗裂、防渗

添加剂。可以有效降低水泥水化进程中加速期的水化放热速率,延长水泥水化放热时间,并充分利用结构的散热条件,削弱温峰并延长温降过程,降低温度开裂风险;同时调控膨胀组分的膨胀速率,为有效膨胀的产生和膨胀压应力的储存赢得时间,使膨胀材料的补偿收缩性能在高性能混凝土结构中得到优化提升,具体参数见表 6。

表 6 HME-V 混凝土高效抗裂剂参数	
项目	性能指标
水中 7 d 限制膨胀率	≥0.050%
7 d 抗压强度	≥20.0 MPa
1 d 水化热	相对基准的 30%~50%
28 d 抗压强度	≥40.0 MPa
3 d 水化热	相对基准的 60%~80%
7 d 水化热	相对基准的 90%以上

4.3 监测方案

为了研究抗裂剂、养护时间对混凝土温度和应变的影响,设置了四个试验段:(1)标二段添加抗裂剂,养护时间为 28 d;(2)标三段采用普通混凝土配比,无抗裂剂,养护时间为 28 d;(3)标四段添加抗裂剂,养护时间为 14 d;(4)标五段采用普通混凝土配比,无抗裂剂,养护时间为 14 d。在每个标段的负一层侧墙中部埋设温度传感器,在侧墙靠近中板处埋设应变传感器,见图 8、图 9。

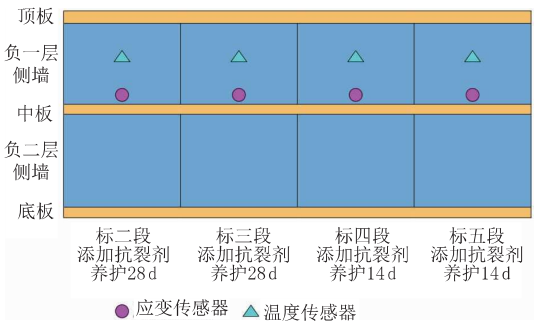


图 8 测点布置图

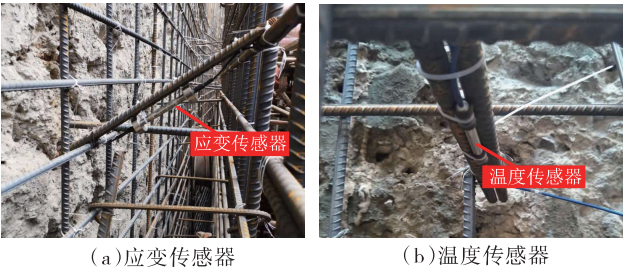


图 9 传感器安装

4.4 混凝土温度 - 应变变化及开裂分析

利用光纤光栅传感器监测得到混凝土温度、应变随时间变化曲线见图 10、图 11,由于现场停电、更改线路等原因,监测数据部分缺失,但仍保留关键数

据,不会对结果产生影响。通过图 10 可以看出混凝土温度变化可分为三个阶段:升温段、快速降温段和缓慢降温段。在混凝土浇筑早期,水泥和水发生水化作用而释放大量的热,水化热积聚在混凝土中不易散发,使得混凝土温度急剧上升,标二段混凝土温度在 1.5 d 内升高至 40.94℃;标三段混凝土温度在 0.75 d 内升高至 51.81℃;标四段混凝土温度在 1.63 d 内升高至 43.70℃;标五段混凝土温度在 1.33 d 内升至 54.10℃。分析发现掺混抗裂剂、延长养护时间可显著降低混凝土的水化热温度。

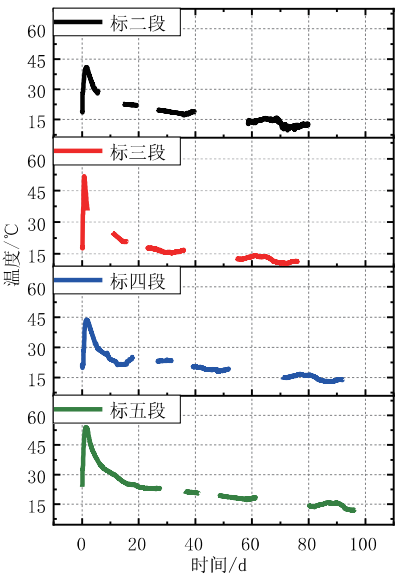


图 10 混凝土温度变化曲线

图 11 为混凝土应变随时间变化曲线,可以看出混凝土应变在短时间内迅速增大,随后逐渐趋于稳定。其中标五段的应变最大,标三段次之,标四段再次之,标二段的应变最小。由于侧墙的浇筑先后顺序为标二、标三、标四、标五,后浇筑标段的混凝土养护阶段的变形受到前一标段的限制,因此在养护的前 14 d 中,在条件相同情况下,后浇筑段的应变普遍大于前浇筑段。

根据《建筑工程裂缝防治技术规程》^[21],混凝土拉应力和拉应变之间的关系为:

$$\sigma_t = \frac{\varepsilon_t E_c}{\varphi_t} \tag{3}$$

式中: σ_t 为混凝土拉应力/MPa; ε_t 为混凝土拉应变; E_c 为混凝土弹性模量/MPa; φ_t 为混凝土徐变系数,取值 2.5。

当拉应力大于 0.4 倍的混凝土抗拉强度时,则认为混凝土发生开裂,即,

$$\sigma_t > 0.4 f_t \tag{4}$$

联立式(3)和式(4),得到,

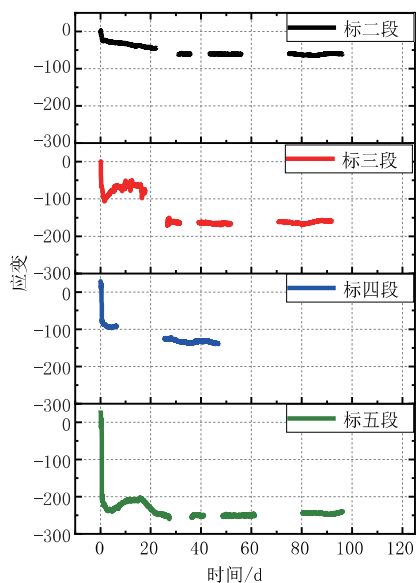


图 11 混凝土应变变化曲线

$$\frac{\varepsilon_i E_c}{\varphi_i} > 0.4 f_t \quad (5)$$

根据式(3)计算得到标二段~标五段的最大拉应力分别为 0.75 MPa、2.11 MPa、1.76 MPa、3.04 MPa。C35 混凝土的抗拉强度为 2.20 MPa,通过式(5)计算认为标二段的混凝土的拉应力尚未达到开裂标准,混凝土不开裂,标三段~标五段混凝土拉应力均大于开裂标准,混凝土发生开裂。经过上述分析认为,掺混添加剂、提高养护时间可有效提高混凝土的抗裂性能。

5 结 论

本文建立了混凝土损伤数值模型,开展了混凝土温度场-应变场现场监测实验,对混凝土的裂缝发展规律及特点进行分析,并重点研究了抗裂剂、水化热温度以及养护时间的影响。得到如下主要结论:

(1)混凝土本身含有大量的原生微裂缝,在荷载、约束等作用下,当拉应力超过混凝土的抗拉强度时,即发生混凝土开裂;

(2)混凝土裂缝发展是一个动态变化过程。首先,侧墙内侧最先发生开裂,随后靠近顶板、中板及底板处的侧墙外侧也出现裂缝,并最终形成贯通裂缝;

(3)根据裂缝形态可分为贯通裂缝和非贯通裂缝,其中贯通裂缝可引起地铁车站渗漏,而非贯通裂缝不会引起渗漏但可造成混凝土碳化和钢筋锈蚀,靠近中板的侧墙位置最容易引起基坑渗漏水;

(4)混凝土温度在 1.5 d 左右可升至最大,随后降低至常温,同时混凝土应变随着温度的升高而逐渐增大。通过对比分析发现通过掺和抗裂剂、适当延

长养护时间可降低混凝土的峰值温度,提高混凝土抗裂性能;

(5)抗裂剂采用内掺,掺量约为胶凝材料总量的 6%~10%,适当优化混凝土区段浇筑顺序,尽量减少混凝土边界约束。

参考文献:

- [1] 梁宇慧,刘新荣,曹学山,等.中国城市地铁建设的现状和发展战略[J].重庆建筑大学学报,2008,30(6):81-85.
- [2] 仇文岗,王焱,宗梓煦,等.隧道施工与运营过程中的可靠度分析方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(3):1-13.
- [3] 智研咨询.2020-2026 年中国地铁系统行业市场分析预测及投资风险预测报告[Z].
- [4] 《中国公路学报》编辑部.中国交通工程学术研究综述·2016[J].中国公路学报,2016,29(6):1-161.
- [5] 曹宗豪.北京轨道交通车站的过去、现在和未来[J].世界建筑,2008(08):74-83.
- [6] 张勇.四城市轨道交通地下结构防水设计综述[J].中国建筑防水,2010(01):14-19.
- [7] Raphaela Fernandes Gomes,Dylmar Penteado Dias,Flavio de Andrade Silva. Determination of the fracture parameters of steel fiber-reinforced geopolymer concrete[J].Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2020,107.
- [8] 高原,张君,罗孙一鸣.基于水泥水化度的混凝土早期力学性能发展预测[J].工程力学,2013,30(10):133-139,153.
- [9] 王冲,张洪波,杨长辉,等.水泥细度对水泥水化及混凝土早期开裂影响[J].建筑材料学报,2013,16(5):853-857.
- [10] 陈波,孙伟,丁建彤.基于温度-应力试验的混凝土抗裂性研究进展[J].硅酸盐学报,2013,41(8):1124-1133.
- [11] 徐红.地铁大体积混凝土结构裂缝防控[J].混凝土,2020(8):147-150.
- [12] 陈聪,杨林德.地下结构混凝土渗透特性试验研究[J].岩土力学,2011,32(8):2379-2385.
- [13] 罗钧,谢传喜,王耀伟.基于有限元模型的混凝土结构裂缝成因分析新方法[J].建筑结构,2019,49(23):134-138.
- [14] 缪昌文,穆松.混凝土技术的发展与展望[J].硅酸盐通报,2020,39(1):1-11.
- [15] 温竹茵,陈宝.地铁车站的裂缝分析与防水技术研究[J].施工技术,2002(3):30-31,54.
- [16] 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(4):82-85.
- [17] 刘国彬,肖勤.上海地铁车站的防水现状及改进措施[J].建筑技术,2003(7):490-493.
- [18] 马宏旺,王益群,陈晓宝,等.预应力技术在地铁车站混凝土车站顶板抗裂防渗中的应用研究[J].建筑结构,2012,42(3):128-131.
- [19] 陈肇元,崔京浩,朱金铨,等.钢筋混凝土裂缝机理与控制措施[J].工程力学,2006(S1):86-107.
- [20] 胡剑涛.预拌混凝土添加剂对混凝土性能的影响[J].科技风,2011(2):198,200.
- [21] JGJ/T 317—2014,建筑工程裂缝防治技术规程[S].