

基于双光栅传感器隧道混凝土温度应变发展特性研究

方建平¹, 张孟喜², 姚潇南²

(1.衢州市交通设计有限公司, 浙江 衢州 324000; 2.上海大学 力学与工程科学学院, 上海市 200444)

摘要:为了更好地预防隧道混凝土开裂,对混凝土温度、应变的发展规律进行研究,该文依托衢州市智慧新城三江中路连通工程,建立数据采集系统,现场监测混凝土温度与应变,该监测方法克服了传统方法温度、应变监测不灵敏以及监测数据不连续的缺陷,并且所采用的高性能双光栅温度-应变式传感器可同时监测同一位置的温度与应变,利用温度补偿的方法克服了环境温度对监测结果的影响,提高了监测结果的精度,对监测结果进行分析,揭示隧道混凝土施工期温度、应变的发展规律。分析表明:温度随时间的变化可以分为初始阶段、快速升温阶段、缓慢降温阶段与趋于稳定阶段,应变的变化趋势与温度类似,应变峰值出现的时间稍微滞后于温度;由于养护条件、边界条件、钢筋布置等多种因素的影响,不同测点的应变在水平方向存在较大差异。

关键词:明挖隧道;长大尺度混凝土;现场试验;温度;应变

中图分类号:U454

文献标志码:A

Temperature and Strain Development Characteristics of Tunnel Concrete Based on Double Grating Sensors

FANG Jianping¹, ZHANG Mengxi², YAO Xiaonan²

(1.Quzhou Traffic Design Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang 324000, China; 2.School of Mechanics and Engineering Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to better prevent tunnel concrete from cracking, the development law of concrete temperature and strain was studied. Based on the connection project of Sanjiang Middle Road in the Smart New City of Quzhou, a data acquisition system was established to monitor concrete temperature and strain on site. The defects of the traditional method that the temperature and strain monitoring are insensitive, and the monitoring data is discontinuous were overcome. In addition, the high-performance double grating temperature-strain sensor was used to simultaneously monitor the temperature and strain at the same position, and the temperature compensation method was used to overcome the influence of the ambient temperature on the monitoring results and improve the accuracy of the monitoring results. The monitoring results were analyzed to reveal the development law of temperature and strain during tunnel concrete construction. The analysis shows that the change of temperature with time can be divided into the initial stage, rapid heating stage, slow cooling stage, and stable stage. The variation trend of strain is similar to that of temperature, and the strain peak appears slightly later than the temperature. Due to the influence of various factors such as maintenance conditions, boundary conditions, and reinforcement arrangement, the strains of different measuring points are quite different in the horizontal direction.

Keywords: open-cut tunnel; large and long-scale concrete; field test; temperature; strain

0 引言

近年来,随着中国经济的不断发展以及城市建筑用地的稀缺,地下隧道成为城市发展的新常态,而大体积混凝土的应用越来越广泛^[1-2]。大体积混凝土在浇筑以及养护过程中,水泥水化热会产生大量的热量,积聚于混凝土结构内部,且混凝土热传导能力差,导致混凝土内部温度升高较快,形成较大的内外温差^[3-4]。混凝土的抗拉强度较小,当混凝土内外温差产生的温度应力大于混凝土抗拉强度时,很容易产生温度裂缝。在工程界中更是有无“隧”不裂的说法,因此研究隧道的温度裂缝具有重要的现实意义。

国内外众多学者对大体积混凝土开裂现象的研究已持续多年,开裂问题一直是混凝土科学研究的难点和热点。国外对于大体积混凝土的研究相对较早,美国在进行胡佛大坝施工之前进行了使用冷却水管降低混凝土内部温度的试验^[5],并将这种方法应用到胡佛大坝施工中;Witasse等^[6]运用Diana分析软件对大体积混凝土倒T形墙进行模拟,分析了大体积混凝土的水化热量以及裂缝的开展情况;Azenha等^[7]对早龄期大体积混凝土墙板进行了有限元分析,得到了干缩差异是造成混凝土表面开裂的重要原因;Yu等^[8]利用光纤光栅传感器监测混凝土内部的温度以及应变,并以此推导出混凝土的受热特性;Do等^[9]利用数值模拟方法预测了大体积混凝土的温度、应力以及早期开裂情况。

中国学者对大体积混凝土温度裂缝的研究起步较晚。朱伯芳^[10]提出了混凝土的表面保温能力和保温层厚度的计算方法;张永健等^[11]通过有限元方法计算桥塔承台混凝土温度和应力,发现低热水泥混凝土可以有效降低温升值和平均升温速率;孔令琨^[12]根据现场环境温度和大型桥墩的温度场测量结果,得出了桥墩温差作用的模型;古铮等^[13]对大型筏板混凝土的浇筑养护过程进行了实时监测及温度场分布分析;吕彬等^[14]基于算法模型对比,得出改进遗传算法预测模型能更好地反映出大体积混凝土早龄期温度场的变化趋势;宁泽宇等^[15]提出了一种基于时间、空间、质量3个维度的实时温度测量平均值的新方法;林志斌^[16]通过三维仿真分析了箱形梁腹板裂缝成因,并提出了相应的防裂措施;胡健中等^[17]通过有限元软件对大体积混凝土桥梁的水化热进行了分

析,提出了施工优化措施。

综上所述,关于大体积混凝土温度、应变发展规律的研究,大多基于理论研究以及有限元分析。但理论与有限元分析在使用过程中往往会对边界条件进行简化,只能近似模拟实际工况。故针对实际工程,对大体积混凝土的温度以及应变进行实测,并分析温度以及应变的变化规律具有重要的工程价值。目前在温度、应变现场监测的过程中,所采用的现场监测方法大多存在较大的时间间隔,不仅会遗漏温度、应变发生异常变化的时间点,并且所采用的监测工具多为热电阻温度传感器等传统监测仪器,对温度、应变的监测是单独进行的,将监测数据作为同一个点的温度、应变存在一定的偏差。本文依托衢州市智慧新城三江中路连通工程,采用高性能双光栅温度-应变式传感器对现场混凝土温度与应变进行监测,揭示了隧道混凝土温度与应变随时间的发展规律,为及时调整施工控制措施,减少隧道混凝土裂缝提供了理论支撑。

1 双光栅温度-应变式传感器

1.1 工作原理

高性能双光栅温度-应变式传感器,利用布里渊光时域(BOTDR)技术,光纤中的光信号在光纤中传播时,会产生布里渊背向散射光,其频移随光纤温度、应变的变化而变化,从而监控温度和应变。

高性能双光栅温度-应变式传感器的工作原理如图1所示,探测脉冲在光纤上传输时,会产生布里渊背向散射光,由监控系统接收到布里渊背向散射光,并通过布里渊背向散射光的频移来计算出其温度和应变。利用BOTDR技术,将探测脉冲注入光纤一端,即可实现布里渊频移的测量。

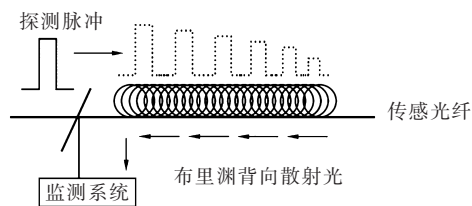


图1 双光栅温度-应变式传感器工作原理

Figure 1 Working principle of double grating temperature-strain sensor

双光栅温度-应变式传感器可将被测体本身的温度特性及传感器本身的温度特性通过自身结构实

现补偿,通过微小的温度修正后能实现精确测试外力对被测体的影响。温度补偿原理如图2所示。 F_1 为向外热膨胀的力, F_2 为向内热膨胀的力。

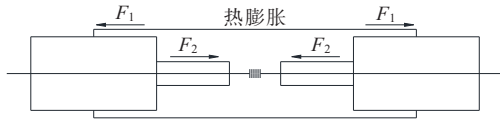


图2 温度补偿原理图

Figure 2 Principle of temperature compensation

为了减少混凝土裂缝的产生,及时掌握混凝土内温度效应特征,建立了现场监测数据采集系统,如图3所示,实时获取混凝土温度以及应变监测数据,根据混凝土内温度、应变发展情况,及时调整和优化现场混凝土养护措施。

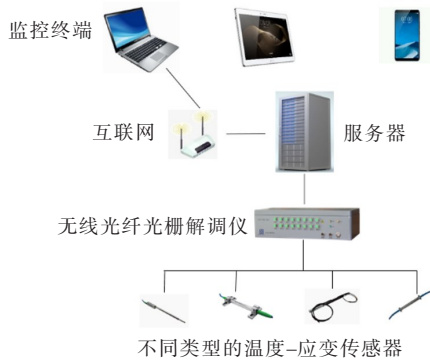


图3 混凝土温度应变数据采集系统

Figure 3 Concrete temperature-strain data acquisition system

1.2 物理量计算公式

在数据采集的同时进行数据处理,依据式(1)~(3)对监测数据进行计算,分别得到不同时间点的混凝土温度与应变。

混凝土温度 T 根据光纤光栅波长标定系数计算:

$$T = a_3 x^3 - a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (1)$$

$$x = \frac{\lambda - \lambda_t}{\lambda_t} \quad (2)$$

式中: $a_0 \sim a_3$ 为波长标定的相关系数; λ 为环境温度下的波长值,即测试波长值; λ_t 为35℃的特征波长值,传感器的型号不同,特征波长取值不同; x 为任意角度。

混凝土应变的计算公式如下:

$$\epsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0) - (\lambda_T - \lambda_{T_0}) \cdot k_T}{k} + \Delta T \cdot \alpha_1 \quad (3)$$

式中: ϵ 为应变; λ_0 为零点波长; λ_T 为温补波长; λ_{T_0} 为温补零点波长; k 为灵敏度系数; k_T 为温度补偿系数; ΔT

为温差; α_1 为线膨胀系数。

2 现场监测方案

2.1 测点布置

衢州市智慧新城三江中路隧道长度704 m,为双向四车道,设计速度40 km/h,其中敞口段138 m,明挖暗埋段358 m,浅挖暗埋段111 m,明洞回填段97 m。为了减少隧道混凝土裂缝,研究温度、应变的发展规律,对隧道混凝土的温度以及应变进行现场监测,光纤监测段的长度为60 m,高度7.2 m,监测断面位于监测段长度的1/3处,隧道在施工过程中先浇筑底板,再浇筑侧墙,最后浇筑顶板,按照此浇筑顺序完成对隧道混凝土温度和应变的监测,测点布置如图4所示。

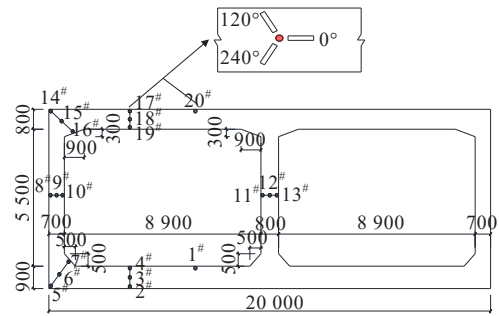


图4 测点布置断面图(单位:mm)

Figure 4 Cross-section of measuring point layout (unit:mm)

根据断面中隧道结构及其所在位置,考虑隧道剖面的对称性,隧道混凝土墙板的监测关键点主要为顶板、底板、顶板与侧边墙体的转角处、底板与侧边墙体的转角处以及侧边墙体,同时因为底板与顶板跨度较大,故在底板与顶板各布设两个监测位,因此断面共布设8个测位。每个测点各设1支温度-应变传感器,部分测点还布置了120°“应变花”式光栅传感器,并及时测量环境温度。

其中,底板处测点4#、3#、2#距离上表面分别为100 mm、450 mm、800 mm,侧墙测点8#、9#、10#距离左表面100 mm、350 mm、600 mm,顶板测点17#、18#、19#距离上表面100 mm、400 mm、700 mm。

2.2 传感器的埋设

数据采集系统建立的关键工作是传感器的现场埋设,埋设过程中将传感器捆绑在钢筋的底部,埋入混凝土的光纤熔接点越少越好,确保所埋设传感器的存活率(图5)。传感器埋设完成之后,随着隧道混

凝土的浇筑,进行温度应变的监测,混凝土浇筑完成之后,混凝土膨胀,光纤产生轴向拉伸应变,同时光纤产生波长偏移。同时,在这个过程中,混凝土水化反应放出大量的热量,混凝土温度升高,由于热膨胀系数不同,传感器中向内的热膨胀力 F_2 更大,光纤在温度的作用下出现收缩应变,同时光纤产生波长偏移,从而减少了温度变化对光纤波长的影响,实现了温度补偿。



图5 传感器现场埋设

Figure 5 Sensor buried in the field

3 混凝土温度随时间变化特性

现场对多个断面进行了监测,考虑到断面测点较多,本节主要选取了底板处测点2[#]、3[#]和顶板处测点14[#]、17[#]、18[#]、20[#],对温度以及内外温差的规律进行分析。

3.1 中心位置温度变化特性

图6为不同部位中心测点(测点3[#]、测点9[#]、测点18[#])温度时程曲线。

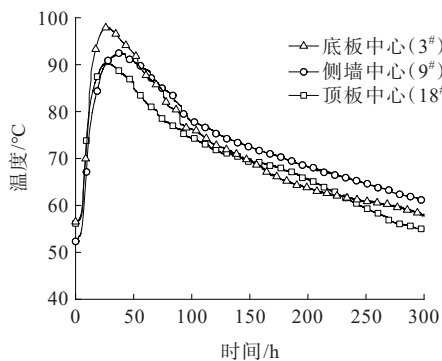


图6 不同部位中心测点温度时程曲线

Figure 6 Time curves of temperature at central measuring points in different parts

从图6可以看出:从混凝土浇筑完成开始,底板以及顶板在大约28 h温度达到最大值。侧墙达到最高温度的时间有所推迟,在大约37 h时出现,主要是

因为侧墙的养护条件与底板以及顶板不同。底板、侧墙、顶板温度分别上升了41.4 °C、39.9 °C、34.7 °C,平均温升速率分别为1.48 °C/h、1.08 °C/h、1.24 °C/h。其中,底板温升值最大,这是因为底板厚度最大,而侧墙采用木模板进行养护,温升值相对较大。在达到温度峰值之后,中心测点温度开始下降,与升温相比,降温速率明显减小,底板为0.15 °C/h,侧墙为0.12 °C/h,顶板为0.13 °C/h。

根据上述现象,不同部位中心测点的温升速率远大于温降速率。这是因为在升温阶段,混凝土水化反应剧烈,产生的热量远大于混凝土表面的散热量,温度急剧升高,随着水化反应减弱,混凝土内部的热量逐渐散失,温度下降。

3.2 表面温度及内外温差随时间的变化特性

不同部位表面测点(测点2[#]、测点8[#]、测点17[#])的温度时程曲线如图7所示。

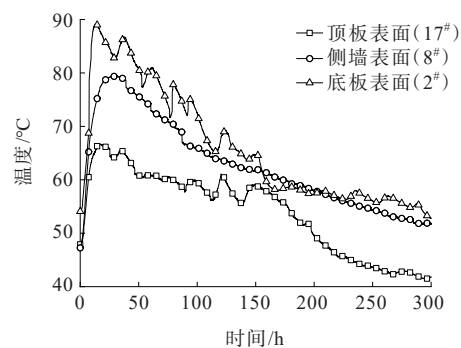


图7 不同部位表面测点温度时程曲线

Figure 7 Time curves of temperature at surface measuring points in different parts

从图7可以看出:表面测点温度变化趋势与中心测点温度变化趋势基本一致,包括温升阶段与温降阶段,且温降速率明显小于温升速率。与中心测点相比,表面测点的温峰出现时间更早,其中底板与顶板大致在混凝土浇筑完成后15 h,与中心测点相似。侧墙表面测点峰值温度出现的时间与底板与顶板相比出现了延期,为混凝土浇筑完成后30 h。底板、侧墙、顶板温度分别上升了35.0 °C、32.1 °C、18.8 °C,平均温升速率分别为2.33 °C/h、1.07 °C/h、1.25 °C/h,温降速率分别为0.13 °C/h、0.10 °C/h、0.06 °C/h。

与中心测点相比,表面测点的温升值更小,混凝土表面更易受到环境温度的影响,热量更易散失,表面温度达到峰值以后,混凝土水化反应减弱,混凝土

表面主要受到环境温度影响,温度会出现类似于环境温度的起伏波动。而侧墙采用了木模板进行养护,因为木模板具有一定的保温作用,所以混凝土表面受到环境温度影响较小,温度没有明显的波动。

不同时刻顶板、侧墙和底板的内外温差变化如图8所示。

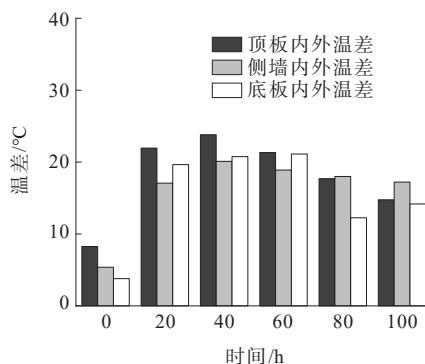


图8 不同部位内外温差变化

Figure 8 Internal and external temperature difference of different parts

由图8可知:自混凝土浇筑完成,随着水泥水化反应的不断进行,混凝土内部温度增加更加迅速,内外温差逐渐增大,底板内外温差从3.8 °C增加到23.2 °C,增加了19.4 °C;侧墙内外温差从5.4 °C增加到20.1 °C,增加了14.7 °C;顶板内外温差从8.0 °C增加到22.9 °C,增加了14.9 °C;底板内外温差增加最大,这是因为底板厚度最大,混凝土浇筑量多,水泥水化反应更加剧烈,且热量更不容易散失,积聚在混凝土内部。

其中,侧墙的内外温差时程曲线大致分为3个阶段:增加阶段、减小阶段以及稳定阶段。在增加阶段,由于混凝土的传热能力较差,内部的热量难以快速传到混凝土表面,内外温差增大;随着水化反应减弱以及热量的向外传递,内外温差逐渐减小;最终,水化反应停止,热量在整个混凝土结构逐渐散失,混凝土内外温差趋于稳定。

3.3 同一深度温度分布

以顶板为例,混凝土外表面测点(测点14[#]、测点17[#]、测点20[#])的温度时程曲线如图9所示。

由图9可知:由于养护条件和外界环境的热交换条件一致,测点17[#]与测点20[#]的温度变化趋势基本一致。测点17[#]以及测点20[#]的上表面养护条件是一致的,但由于侧表面与基坑接触,使养护条件发生了变化,且基坑具有一定的保温作用,散热量减小,最高温

度偏大。测点14[#]达到温度最大值,其上方在顶板浇筑完成后会浇筑压顶梁,压顶梁浇筑完成后会改变测点14[#]上表面的养护条件,避免了混凝土与外界环境直接接触,在降温阶段,测点14[#]的温度未出现大幅度波动。

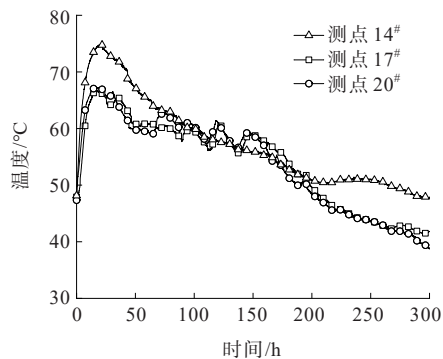


图9 不同测点温度沿水平方向分布

Figure 9 Distribution of temperatures at different measuring points along horizontal direction

3.4 隧道混凝土温度发展阶段划分

依据现场监测数据,温度随时间的变化可以分为初始阶段、快速升温阶段、缓慢降温阶段与趋于稳定阶段,如图10所示。从混凝土浇筑完成到时间 t_1 为初始阶段,混凝土刚刚浇筑完成,水化热反应不稳定;时间 $t_1 \sim t_2$ 为温度迅速增加阶段,随着水化热的持续进行,热量不断积聚,温度迅速升高;时间 $t_2 \sim t_3$ 为温度缓慢减小阶段,水化反应减弱,放出的热量逐渐小于混凝土的散热量;在时间 t_3 以后,积聚在混凝土内部的热量逐渐散去,温度趋于稳定。应变的变化趋势与温度变化趋势类似。

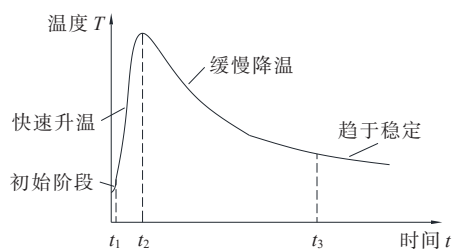


图10 温度随时间发展阶段划分

Figure 10 Development stage division of temperature over time

4 混凝土应变随时间变化特性

选取底板中心测点3[#],侧墙中心测点9[#],顶板中心测点18[#]及顶板上表面测点20[#]的应变随时间的变化规律进行分析。

4.1 中心测点应变变化特性

图 11 为不同部位中心测点(测点 3[#]、测点 9[#]、测点 18[#])应变时程曲线,其中拉应变为正,压应变为负。

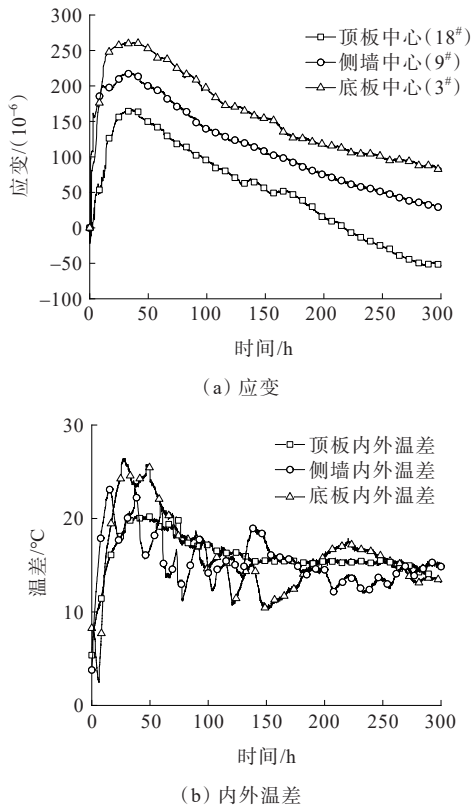


图 11 不同部位中心测点应变与内外温差时程曲线
Figure 11 Time curves of strain at central measuring points in different parts and internal and external temperature difference

由图 11 可知:3 个部位的应变发展趋势基本一致,到达应变峰值的时间为混凝土浇筑完成后 34 h,底板应变从 -19.5×10^{-6} 增加到 260.1×10^{-6} ,应变增加速率为 $8.22 \times 10^{-6}/\text{h}$,侧墙应变从 -22.2×10^{-6} 增加到 218×10^{-6} ,应变增加速率为 $7.06 \times 10^{-6}/\text{h}$,顶板应变从 -8.6×10^{-6} 增加到 166.2×10^{-6} ,应变增加速率为 $5.14 \times 10^{-6}/\text{h}$ 。在应变增加阶段,混凝土内部温度升高,混凝土受热膨胀,拉应变迅速增大,随着混凝土内部的热量逐渐消散,拉应变进入减小阶段,因为混凝土导热能力较差,混凝土散热速度较慢,混凝土应变减小速率远小于增加速率。混凝土应变与混凝土内外温差存在着一定的关系,将应变监测结果与内外温差监测结果进行对比分析。从图中可以看出,随着内外温差的不断增加,应变不断增大,内外温差峰值出现的时间与应变峰值出现的时间相近,随后内外温差开始减小,应变也不断下降。混凝土的应变

与内外温差的变化阶段是彼此对应的。

4.2 应变沿水平方向分布规律

选取顶板上表面测点 20[#]的应变随时间的变化规律进行分析,结果如图 12 所示。

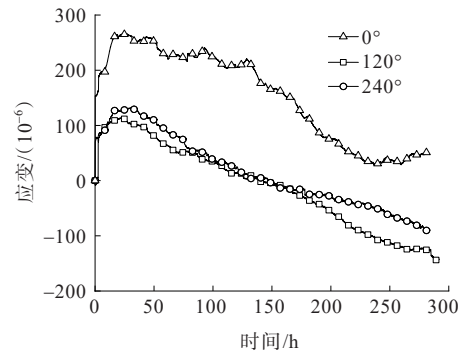


图 12 测点 20[#]应变监测结果

Figure 12 Strain monitoring results of measuring point 20[#]

从图 12 可以看出:测点 20[#]不同方向的应变监测结果存在较大差异,这是因为应变除了与混凝土温度有关,还与混凝土结构的边界条件存在关系,对于测点 20[#],120°与 240°方向的监测值接近,但小于 0°方向的监测值,这说明在混凝土结构中,某一点应变较大值的方向不是确定的,这和现场调研的裂缝情况吻合,现场裂缝走向大部分垂直于隧道走向,另有一部分走向与隧道方向存在一定的夹角。

基于应变花测试原理,根据监测的 3 个方向应变 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 ,分别计算最大、最小主应变 ϵ_{\max} 、 ϵ_{\min} 及主应变方向 α ,计算公式如下:

$$\epsilon_{\max} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (4)$$

$$\epsilon_{\min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3} - \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{\sqrt{3} (\epsilon_2 - \epsilon_3)}{2\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3} \right] \quad (6)$$

根据最大、最小主应变及其方向可计算得到测点处任意角度 x 的应变,即:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{\max} + \epsilon_{\min}}{2} + \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{2} \cos[2(x + \alpha)] \quad (7)$$

利用 Matlab 绘制测点处各个方向的应变玫瑰花图,如图 13 所示。

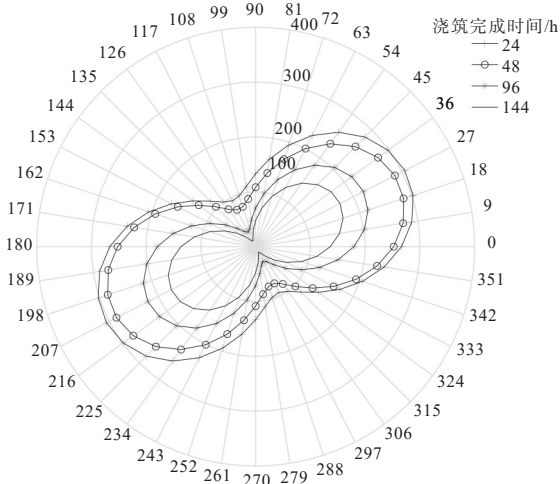


图13 测点20#应变玫瑰花图(10^{-6})

Figure 13 Rose diagram of strain of measuring point 20# (10^{-6})

从图13可以看出:在混凝土浇筑完成后24 h到混凝土浇筑完成后144 h,在 $18^{\circ} \sim 36^{\circ}$,测点20#最大主应变的方向基本上是保持不变的。在混凝土浇筑完成后24 h到混凝土浇筑完成后48 h时间段,水化热基本完成,热量积聚在混凝土内部,散热较小,混凝土最大主应变变化幅度很小。而在混凝土浇筑完成后48 h到混凝土浇筑完成96 h,应变值变化较大,最大主应变减小约 65×10^{-6} ,混凝土迅速凝结硬化。

5 结论

通过对明挖隧道长大尺度混凝土的温度、应变进行现场监测,对温度、应变的规律进行分析,得出如下结论:

(1) 从混凝土浇筑完成开始,底板以及顶板在大约28 h温度达到最大值。侧墙达到最高温度的时间有所推迟,在大约37 h时出现,主要由于养护条件的区别。

(2) 与中心测点相比,表面测点的温升值更小,混凝土表面更容易受到环境温度的影响,温度将会出现起伏波动。

(3) 在应变增加阶段,混凝土内部温度升高,混凝土受热膨胀,拉应变迅速增大,随着混凝土内部的热量逐渐消散,拉应变进入减小阶段,混凝土导热能力较差,混凝土散热速度较慢,混凝土应变减小速率要远小于增加速率。

(4) 温度随时间的变化可以分为初始阶段、快速升温阶段、缓慢降温阶段与趋于稳定阶段,应变的变

化趋势与温度类似,应变峰值出现的时间稍微滞后于温度。

(5) 对于处于相同深度的不同测点,当养护条件相同时且环境温度基本相同时,温度变化趋势基本一致。

(6) 对于测点20#, 120° 与 240° 方向的监测值接近,但小于 0° 方向的监测值;在 $18^{\circ} \sim 36^{\circ}$,最大主应变的方向基本保持不变。

参考文献:

References:

- [1] 范中晶,郑晨路.基于深度学习的隧道混凝土温度滚动预测方法研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(4):611-617.
FAN Zhongjing, ZHENG Chenlu. Rolling prediction method of tunnel concrete temperature based on deep learning[J].Tunnel Construction,2023,43(4):611-617.
- [2] 傅奕帆,王林峰,程平,等.箱式隧道现浇大体积混凝土温度应力场及裂缝控制研究[J].现代隧道技术,2021,58(6):173-181.
FU Yifan, WANG Linfeng, CHENG Ping, et al. Study on thermal stress field and cracking control of cast-in-situ mass concrete in a box tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology,2021,58(6):173-181.
- [3] 陈龙.大体积承台混凝土施工温度场及温控技术研究[J].中外公路,2021,41(3):83-88.
CHEN Long. Research on temperature field and temperature control technology of mass concrete of pile cap[J].Journal of China & Foreign Highway,2021,41(3):83-88.
- [4] 蒋浩博,宋志仕,朱伟华,等.承台大体积混凝土风冷却温度控制研究[J].中外公路,2021,41(5):160-163.
JIANG Haobo, SONG Zhishi, ZHU Weihua, et al. Research on temperature control of wind cooling for mass concrete of pile cap[J].Journal of China & Foreign Highway,2021,41(5):160-163.
- [5] MAYS J R, DOLLAR D A, ROEHM L H. A concrete cracking analysis for the proposed arch raise of Roosevelt Dam[J].Computers & Structures,1989,32(3/4): 679-689.
- [6] WITASSE R, HENDRIKS M A N. Finite element modeling of early age concrete behavior using DIANA[M]//Finite Elements in Civil Engineering Applications. London: CRC Press,2021:129-134.
- [7] AZENHA M, FARIA R, FERREIRA D. Identification of early-age concrete temperatures and strains: Monitoring

- and numerical simulation[J]. *Cement and Concrete Composites*,2009,31(6):369-378.
- [8] YU X Z, CHEN J Y, XU Q, et al. Research on the influence factors of thermal cracking in mass concrete by model experiments[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(8):2906-2915.
- [9] DO T A, HOANG T T, BUI-TIEN T, et al. Evaluation of heat of hydration, temperature evolution and thermal cracking risk in high-strength concrete at early ages[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, 21:100658.
- [10] 朱伯芳. 大体积混凝土表面保温能力计算[J]. *水利学报*, 1987, 18(2):18-26.
- ZHU Bofang. Design of the superficial insulation of mass concrete[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1987, 18(2): 18-26.
- [11] 张永健, 李鸥. 洞庭湖大桥承台大体积混凝土温控试验研究[J]. *桥梁建设*, 2016, 46(4):45-50.
- ZHANG Yongjian, LI Ou. Test study of temperature control of mass concrete for pile caps of Dongting Lake Bridge[J]. *Bridge Construction*, 2016, 46(4):45-50.
- [12] 孔令琨. 混凝土高桥墩温度场特性的实测研究[J]. *公路*, 2020, 65(7):181-186.
- KONG Lingkun. Experimental study on temperature field characteristics of concrete high pier[J]. *Highway*, 2020, 65 (7):181-186.
- [13] 古铮, 李盛, 刘亚朋, 等. 超高层筏板基础大体积混凝土温度场分布现场试验研究[J]. *材料导报*, 2018, 32(增刊 2): 446-451.
- GU Zheng, LI Sheng, LIU Yapeng, et al. Field test study on temperature field distribution of mass concrete in raft foundation of super high-rise building[J]. *Materials Reports*, 2018, 32(sup 2):446-451.
- [14] 吕彬, 李莹炜, 雷永军, 等. 基于改进遗传算法的大体积混凝土温度场预测模型[J]. *中外公路*, 2021, 41(5):155-159.
- LYU Bin, LI Yingwei, LEI Yongjun, et al. Prediction model of temperature field of mass concrete based on improved genetic algorithm[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2021, 41(5):155-159.
- [15] 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.
- NING Zeyu, LIN Peng, PENG Haoyang, et al. Moving-average calculations for real-time concrete temperature monitoring[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(7):681-687.
- [16] 林志斌. 连续刚构箱形梁腹板早龄期裂缝成因及防裂措施仿真分析[J]. *中外公路*, 2022, 42(5):124-131.
- LIN Zhibin. Simulation analysis on causes of cracks in the web of continuous rigid frame box girder in early age and preventive measures[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2022, 42(5):124-131.
- [17] 胡健中, 李阳, 张申昕. 大体积混凝土施工水化热分析与控制[J]. *中外公路*, 2020, 40(4):110-115.
- HU Jianzhong, LI Yang, ZHANG Shenxin. Control and analysis of hydration heat for mass concrete during construction[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(4):110-115.