

文章编号: 1674-599X(2020)03-0028-09

隧道锚塞体大体积混凝土温控特性研究

张玉平, 曾旅中, 张亚昕, 李思阳

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为研究锚塞体大体积混凝土温度控制的特点和策略, 以太洪长江大桥南岸隧道式锚碇的锚塞体大体积混凝土施工为工程背景。通过 Midas/FEA 有限元软件进行仿真计算, 并开展了工程数据实测, 对比分析了隧道锚第 1~4 层施工时的混凝土内部与洞内环境的温度场。研究结果表明: 混凝土内部温度实测值与计算值基本吻合。锚塞体相对封闭施工环境下, 大气环境温度可考虑取 0.7~0.9 倍外界环境温度。将锚塞体浇筑厚度将 4 m 改为 2 m 时, 混凝土温度峰值降低 1.8 °C, 应力峰值降低 1.06 MPa。混凝土表面对流系数每降低 10 kJ/m²·h·°C, 温度峰值增加 1.0 °C, 应力峰值降低 0.35 MPa。锚塞体各层入模温度每升高 5.0 °C, 温度峰值升高 3.0 °C, 应力峰值也会上升 0.40 MPa。相比于普通水泥, 采用中、低热水泥的温度峰值分别降低 4.6 °C、14.9 °C, 应力峰值降低 0.40、1.51 MPa。将其应用于后续的锚塞体大体积混凝土的施工温度控制, 取得了较好的效果。

关键词: 大体积混凝土; 锚塞体; 温度场; 参数分析; 对流系数

中图分类号: U443.22

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.005

Study on temperature-control characteristics of anchor-plug mass concrete

ZHANG Yu-ping, ZENG Lv-zhong, ZHANG Ya-xin, LI Si-yang

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the characteristics of the temperature-control of anchor-plug mass concrete and further obtain the temperature-controlling strategy, taking the south anchorage concrete-plug mass concrete of Tai Hong Yangtze River Bridge as engineering background, numerical simulation was conducted by the finite element software Midas/FEA, and the field measurement was also carried out. The temperature field inside concrete and tunnel during the construction process of 1st-4th layers anchorage concrete-plug. The results show that the temperature inside concrete from field monitoring basically agrees with that from simulation. Internal temperature is suggested to be 0.7-0.9 times of atmospheric temperature in relatively closed environment of tunnel anchorage concrete-plug. When the pouring thickness of anchorage concrete is changed to 2 m from 4 m, the peak temperature inside concrete decreases by 1.8 °C and the peak stress decreases by 1.06 MPa. When the surface convection coefficient of concrete decreases 10 kJ/m²·h·°C, the peak temperature increases by 1.0 °C, the peak stress decreases by 0.35 MPa. When the molding temperature of each layer increases by 5.0 °C, the peak temperature increases by 3.0 °C, the peak stress increases by 0.40 MPa. When the medium or low heat cement is used, the peak temperature respectively decreases by 4.6 °C or 14.9 °C, and the peak stress decreases by 0.40 MPa or 1.51 MPa compared to normal cement. The research results are applied to the temperature control of the anchor-plug mass concrete in later construction, which obtains good effect.

Key words: mass concrete; anchor body; temperature field; parametric analysis; convection coefficient

收稿日期: 2020-03-16

基金项目: 国家重点发展研究计划发展计划(973)项目(2015CB057702); 湖南省教育厅创新平台资助项目(16K005)

作者简介: 张玉平(1976-), 男, 长沙理工大学副教授, 博士。

大体积混凝土是指混凝土结构物实体的最小几何尺寸不小于1 m,或因混凝土中胶凝材料水化,引起温度变化和收缩,导致有害裂缝产生的混凝土^[1-3]。桥梁建设的快速发展,大体积混凝土在桥梁上的应用越来越多,如:桥梁的承台、主梁0号梁段、横隔梁及地锚式悬索桥的锚碇等。混凝土是脆性材料,其抗拉强度只有抗压强度的1/10左右,大体积混凝土配筋率也较低^[4-8]。在施工和浇筑过程中,由于水化热引起的温度变化,产生较大的拉应力,并与混凝土早期的收缩应力叠加,若不采取措施进行控制,极易使结构产生裂缝,对结构的整体性与耐久性产生影响^[9-11]。因此,针对大体积混凝土的温度场与应力场,国内外进行了大量的研究,但大部分是针对承台、重力式锚碇等,对锚塞体这种侧面被岩土包围的大体积混凝土的研究鲜见^[12-15]。隧道锚深埋在隧洞中,其施工时,洞口不大,隧道锚锚塞体各分层混凝土浇筑,受日照温差和太阳辐射影响较小。且隧洞内的温度变化较外界大气的小,各分层混凝土表面温度变化也较小。但是相对其他大体积混凝土,由于与外界的热量交换

相对较少,大体积混凝土散热也慢,而且隧道锚各分层大体积混凝土受周边岩体约束,其温度与裂缝控制应有其自身的特点。因此,作者以重庆市太洪长江大桥隧道式锚碇锚塞体大体积混凝土为工程背景,拟对现场实测温度数据和有限元仿真计算值进行分析,研究锚塞体大体积混凝土的温度场、应力场及所处环境温度,以期为类似工程施工提供借鉴。

1 工程背景

太洪长江大桥是重庆南川至两江新区高速公路的控制性工程,桥跨布置为 $4\times 40\text{ m}+808\text{ m}+2\times 120\text{ m}+7\times 30\text{ m}$,桥梁全长1 418 m。主桥为主跨808 m的钢箱梁地锚式悬索桥,其主缆矢跨比为1/10,南岸锚碇为隧道式锚碇,北岸为埋置重力式锚碇,如图1所示。南岸隧道式锚碇位于沿江河谷地貌,是由鞍座、前锚室、锚塞体及后锚室组合而成,全长约96.8 m。其中,锚塞体长58 m,锚塞体与水平面倾角为 40° ,如图2所示。从图2可以看

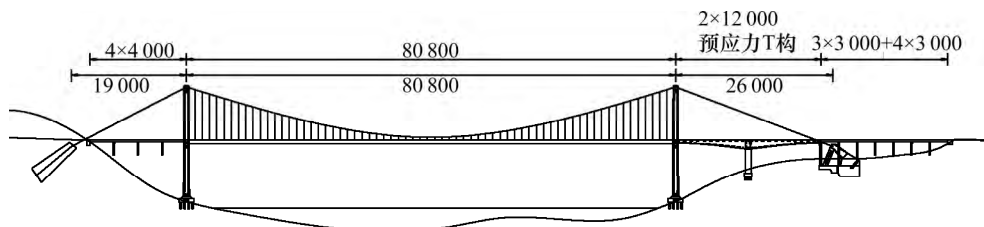


图1 太洪长江大桥立面图(单位: cm)

Fig. 1 General layout of Tai Hong Yangtze river bridge (unit: cm)

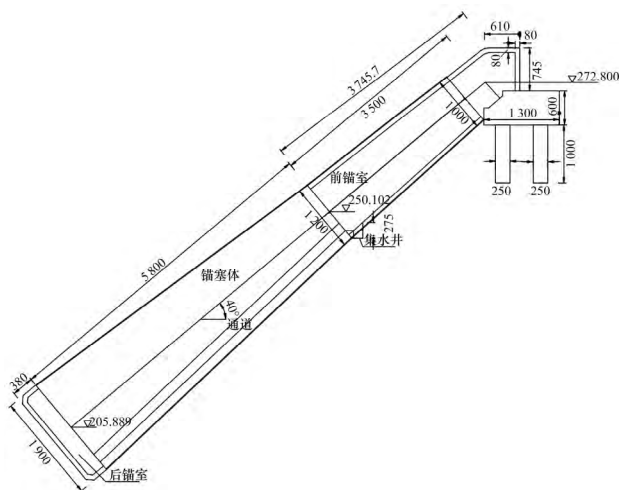


图2 隧道锚立面(单位: cm)

Fig. 2 General layout of tunnel anchorage (unit: cm)

出,锚塞体前断面尺寸为 $12\text{ m}\times 12\text{ m}$,拱顶半径为6 m,后断面尺寸为 $18\text{ m}\times 19\text{ m}$,拱顶半径为9 m,整体呈放射状嵌入中风化岩层中。锚塞体采用C40的微膨胀混凝土,总浇筑量为 $24\,535.6\text{ m}^3$ 。

2 计算参数确定

考虑到实际工程的差异性,为使模拟结果更加精确,计算参数的选取,不仅要参考已建工程的经验公式或数据,而且还要考虑现场施工的实际情况。

2.1 混凝土配合比

锚塞体采用强度等级为C40的微膨胀混凝土,

在混凝土配合比中,水泥、粉煤灰、膨胀剂、砂、碎石、水、减水剂、防水剂及纤维,分别为:341,66,35,770,142,4.11,5.746,22,0.9 kg/m³。

2.2 混凝土力学性能

C40 混凝土力学性能参数通过试验测试得到各参数值。其中,弹性模量为 3.25×10^4 MPa,容重为 $2\ 430\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,泊松比为 0.2,构件理论厚度为 2 m,坍落度为 190 mm,初凝时间为 530 min,7 d 的抗压强度为 43.1 MPa,28 d 的抗压强度为 49.2 MPa。

2.3 混凝土热学性能

由参考文献[14]和[15]可知,C40 混凝土热力学参数比热为 $0.914\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,导热系数为 $10.64\text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$,热膨胀系数为 8×10^{-6} ,最高绝热温升为 $50.44\text{ }^\circ\text{C}$,导温系数为 1.101 03。

2.4 冷却水管设计参数及其布置

隧道锚隧洞开挖深度约 96.8 m,其中,前锚室长 35 m,锚塞体长 58 m,后锚室长 3.8 m,设计分 23 层浇筑,平面最大尺寸为 $15.859\text{ m} \times 25.579\text{ m}$,浇筑厚度分别为 $3.500\text{ m} \times 1$ 层、 $2.000\text{ m} \times 21$ 层和 $3.655\text{ m} \times 1$ 层,其分层如图 3 所示。锚塞体每层混凝土内,设置 $A48 \times 3.5$ 钢管,作为冷却水管,采用蛇形方式布置,水平间距为 1.0 m。锚塞体底层与顶层分别在距离顶面与底面 1.0 m 的位置,布置冷却水管,第 2 层至第 21 层,在距离每层底面 0.5 m 和 1.5 m 的位置,布置一层冷却水管。混凝土升温阶段,为了保证混凝土内部的降温效果,冷却水流速大于 1 m/s。混凝土降温阶段,为了防止降温速率过快,冷却水流速取 0.5 m/s,适当提高水温或使用循环水。

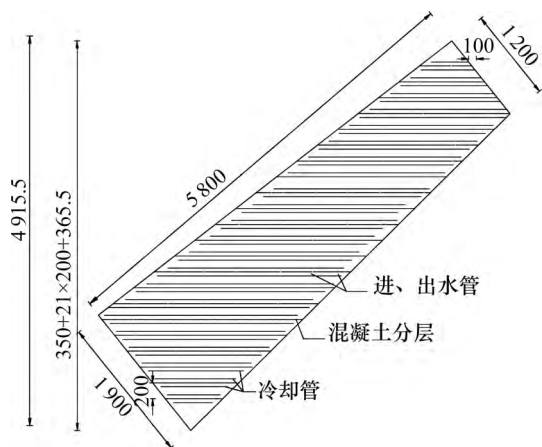


图 3 隧道锚锚碇分层浇筑示意(单位: cm)

Fig. 3 Schematic diagram of layered casting of tunnel anchorage (unit: cm)

2.5 边界条件

锚塞体的底面与侧面是岩土,将其设为固定温度,为第一类边界条件。考虑结构对称性,取锚塞体的一半做模型,对称边界绝热为第二类边界条件。锚塞体每层施工时,顶面与空气进行热传递,为第三类边界条件。设锚塞体与岩土之间接触良好,能进行热量交换,为第四类边界条件。

3 有限元模拟及数据分析

3.1 有限元模型的建立

采用 Midas/FEA 有限元软件,建立锚塞体大体积混凝土,考虑分层施工过程的仿真计算模型。因隧道锚沿顺桥向,分左、右两幅,并且单幅具有对称性,所以取单幅锚塞体的一半建模,模型共计 136 321 个节点,95 018 个实体单元,14 592 个管冷。锚塞体有限元模型如图 4 所示。

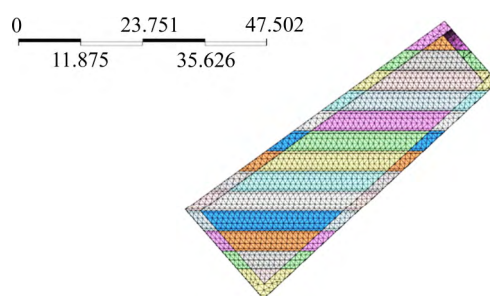


图 4 锚塞体有限元模型

Fig. 4 Finite element model of anchorage concrete-plug

3.2 各层混凝土实测

采用无线实时测温系统,对各层大体积混凝土温度场进行实测,温度测点布置在混凝土浇筑前 1~3 d,锚塞体各结构标准层的温度传感器布置如图 5 所示。

3.3 锚塞体温度实测值与计算值对比分析

在各层大体积混凝土温控过程中,对比实测值和计算值的差别。选取锚塞体第 1~4 层内部最高温度的实测值和计算值,汇总见表 1。

从表 1 可以看出,锚塞体各层混凝土内部最高温度的实测值与计算值基本吻合,差值约 $0.2\text{ }^\circ\text{C} \sim 1.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。之所以第三层锚塞体内部最高温度的实测值和计算值的差值偏大,是因为施工现场有一段时间,由于抽水设施故障,未及时通入冷却水,进行降温。内部最高温度的实测值出现时间相较于计算值的提前了(0,6] h。施工过程中,先浇筑的混凝土,

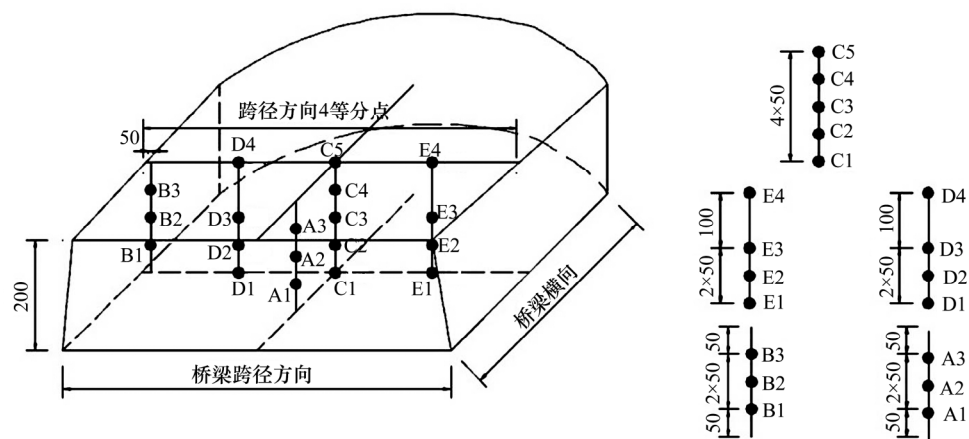


图 5 锚塞体各标准层温度测点布置示意(单位: cm)

Fig. 5 Schematic drawing of temperature measuring point layout in each standard layer of anchorage concrete-plug (unit: cm)

表 1 锚塞体第 1~4 层内部最高温度的实测值与计算值对比

Table 1 Comparison of measured and calculation maximum temperature values of 1-4 layers of anchorage concrete-plug

锚塞体 层数	内部最高温度					
	入模温 度/℃	实测 值/℃	实测值出 现时间/h	计算 值/℃	计算值出 现时间/h	差值
第 1 层	19.5~22.8	57.6	36	57.4	42	0.2
第 2 层	18.9~21.5	60.2	42	59.7	42	0.5
第 3 层	20.1~23.2	60.9	36	59.6	42	1.3
第 4 层	21.9~24.8	64.9	42	64.6	42	0.3

产生水化作用, 促进了后浇混凝土的水化速率, 而模拟计算时, 未考虑这相互促进作用的影响。

3.4 洞内、外环境温度对比

与一般大体积混凝土施工相比, 隧道式锚碇施工是由岩土四周包围且相对封闭的环境进行。收集施工锚塞体第 1~4 层期间, 洞内外环境温度的实测数据。以混凝土浇筑开始时间作为起始点, 比较洞内、外部环境温度, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 洞内温度随时间变化, 幅度

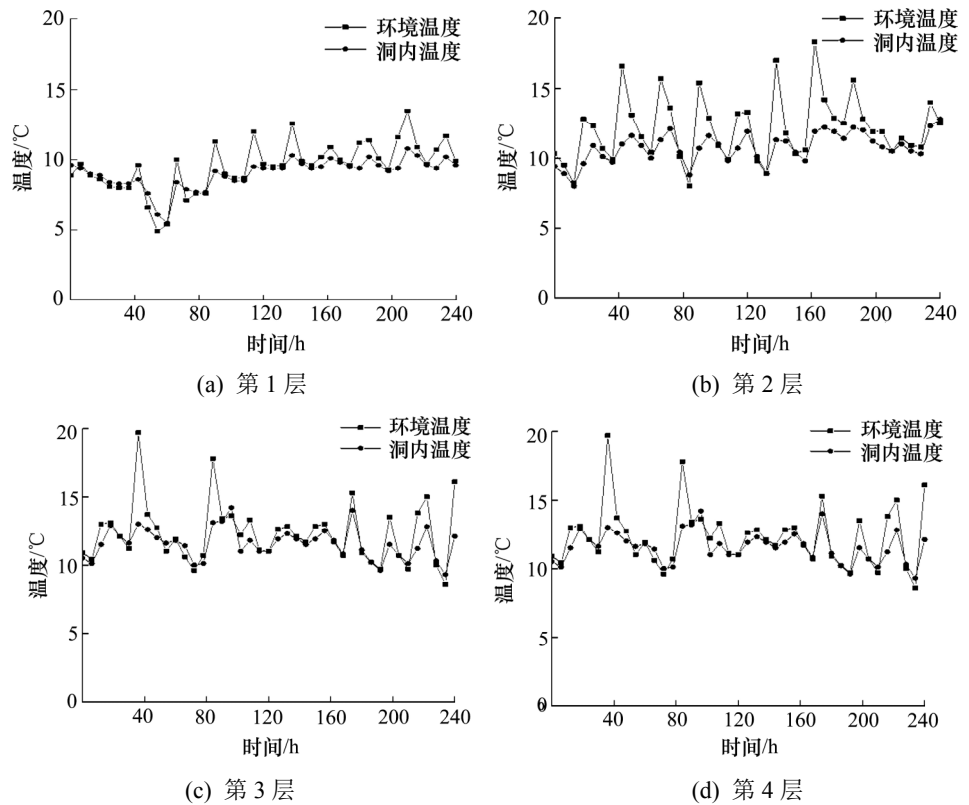


图 6 锚塞体第 1~4 层施工期间洞内外温度时程曲线

Fig. 6 Temperature-time curve of hole inside and outside during 1-4 layers construction of anchorage concrete-plug

小于洞外温度,其温度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上下波动,为使模拟分析的结果尽可能地符合实际情况,在锚塞体相对封闭施工环境下的结构温度场时,可考虑取 0.7, 0.9 倍的外界环境温度,外界温度高时(如午后)取 0.7,外界温度低时(如午夜)取 0.9。因为锚塞体施工四周是被岩土包围,施工场所相当于一个半封闭的空间,离洞口距离越远,受外界因素干扰越小,为锚塞体施工提供了一个天然的保温条件。锚塞体第 1~4 层远离洞口的位置,由于混凝土水化热反应后,洞内空气对流小,剩余水分无法立马蒸发,在混凝土周围形成具有一定湿度的环境,因此,对其具有一定的保湿作用。

4 大体积混凝土参数敏感性分析

为了得到锚塞体大体积混凝土的温控策略,采用有限元软件对分层浇筑厚度、表面对流系数、入模温度、水泥种类、冷却水流速及冷却水温度等参数进行参数敏感性分析。

4.1 分层浇筑厚度

利用有限元模型,当其他参数不变时,分析浇筑厚度分别为 4 m 和 2 m 的 2 种情况下,对锚塞体结构温度场和应力场的影响。绘制浇筑厚度分别为 4 m 和 2 m 的锚塞体大体积混凝土温度和应力峰值时程曲线,如图 7,8 所示。

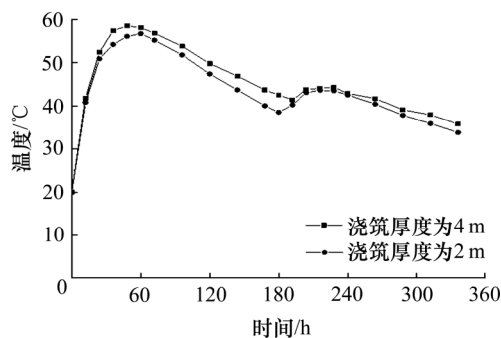


图 7 不同浇筑厚度混凝土温度峰值时程曲线

Fig. 7 Peak value of temperature time curves of different pouring thickness

从图 7 可以看出,浇筑厚度为 4 m 时,锚塞体的温度峰值增长了 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,与浇筑厚度为 2 m 温度峰值进行对比,其出现的时间提前了 12 h。原因是浇筑厚度越大,混凝土内积聚的热量速度快且总量多,所以锚塞体温度峰值越高,造成里表温差也加大。

从图 8 可以看出,浇筑厚度的减小,能有效地降低应力峰值。不管浇筑厚度相差多少,混凝土表面温度均大致相同。但较薄的结构,更容易散热,其内部温度峰值不仅更低,而且高温持续时间更短。浇筑厚度为 2 m 的应力峰值与浇筑厚度为 4 m 的相比,降低了 1.09 MPa 。因此,减小浇筑厚度,能有效地降低锚塞体温度峰值和应力峰值,从而降低了大体积混凝土开裂风险。

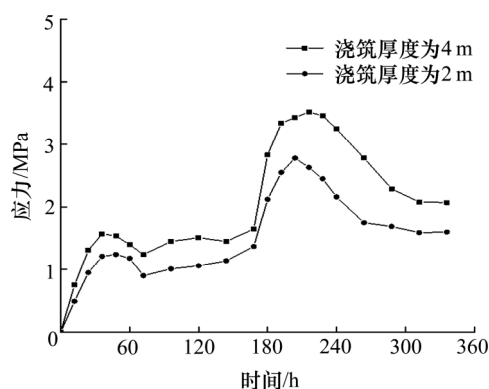


图 8 不同浇筑厚度混凝土应力峰值时程曲线图

Fig. 8 Stress-time curves of different pouring thickness

4.2 表面对流系数

由于锚塞体侧面与岩土接触,施工每一层只有上表面与空气接触。因此,在其他参数不变的情况下,考虑结构上表面的对流系数不同时,对结构温度场和应力场的影响。对流系数分别为 5, 15, 25 $\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ 的锚塞体大体积混凝土温度和应力峰值时程曲线,如图 9,10 所示。

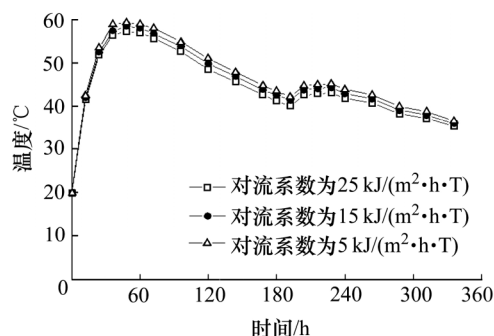


图 9 不同对流系数混凝土中心温度时程曲线

Fig. 9 Center-temperature-time curves of different convection coefficient

从图 9 可以看出,不同对流系数,中心温度随时间变化曲线基本重合,并且到达温峰时间一致。但从中心温度达到峰值开始,对流系数每增加 $10\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$,同一时间的中心温度下降 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

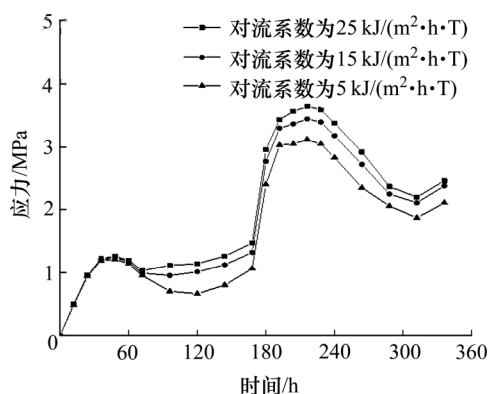


图10 不同对流系数混凝土拉应力峰值时程曲线

Fig. 10 Tensile stress peak-time curves of different convection coefficient

从图10可以看出,不同对流系数混凝土拉应力峰值的影响,主要出现在降温阶段。由于温度下降,混凝土体积收缩,拉应力峰值会出现在混凝土内部。对流系数分别为5,15 kJ/(m²·h·°C)时,降温阶段的应力与对流系数为25 kJ/(m²·h·°C)时的进行对比,对流系数为15 kJ/(m²·h·°C)的应力峰值相比于对流系数为25 kJ/(m²·h·°C)的,下降了0.2 MPa,降幅为5.5%。而对流系数为5 kJ/(m²·h·°C)时,应力峰值下降了0.53 MPa,降幅为14.5%。锚塞体作为侧面,被岩土包围。施工中,主要是上表面与空气接触,而洞内空气流动缓慢,对流系数比较小,相较于重力式锚碇的大体积混凝土施工,其保温措施更加便捷。

4.3 入模温度

入模温度不仅直接与混凝土内部最高温度密切相关,还间接影响里表温差的大小,其主要由原材料温度所决定。因为混凝土的骨料含量较大,所以常对其采用遮挡、浸泡及洒水等措施进行降温,并在混凝土拌和时,使用加入冰块的冷水或深井水方法,来降低混凝土入模温度。利用有限元模型,其他参数不变的前提下,分析不同入模温度对大体积混凝土温度场和应力场的影响。入模温度分别为25,20,15 °C时的锚塞体,大体积混凝土温度和应力峰值时程曲线如图11,12所示。

从图11可以看出,入模温度25 °C时,温度峰值为63.1 °C,出现在浇筑后36 h。入模温度20 °C时,温度峰值为58.5 °C,出现在浇筑后42 h。入模温度15 °C时,温度峰值为56 °C,出现在浇筑后48 h。因此,锚塞体各层入模温度升高5 °C,

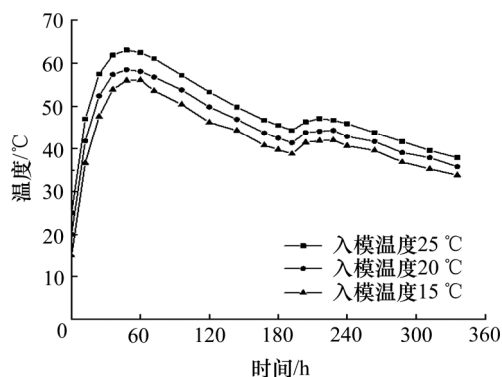


图11 入模温度不同时混凝土温度峰值时程曲线

Fig. 11 Peak temperature value-time curves of different concrete temperature

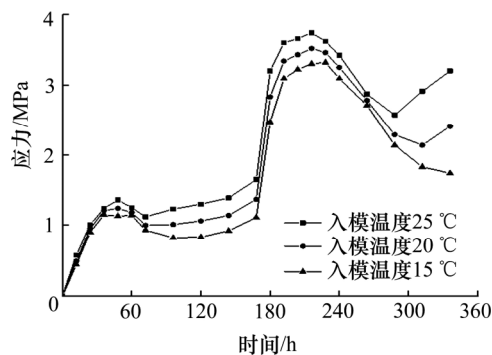


图12 入模温度不同时混凝土应力峰值时程曲线

Fig. 12 Peak stress-time values of different concrete molding temperature

温度峰值升高3.5 °C,且其出现时间提前约6 h。

从图12可以看出,在该层混凝土浇筑期间,入模温度升高5 °C,应力峰值增幅为0.4 MPa,其原因是因入模温度升高,导致混凝土内部温度升高且提前,所以混凝土里表温差也随之增大。当上层新混凝土浇筑时,由于下层老混凝土表面温度较低,造成接触地带出现较大温度梯度。应力峰值出现在上层新混凝土达到最高温度的时刻,印证了模拟结果的准确性。因此,需要采取措施,降低入模温度,减小温度及应力峰值。

4.4 混凝土中水泥种类

利用有限元模型,其他参数不变的前提下,依次选取普通水泥、中热水泥及低热水泥3种不同种类水泥,分析混凝土中不同水泥对大体积混凝土温度场和应力场的影响。分别绘制采用普通水泥、中热水泥及低热水泥锚塞体大体积混凝土的温度和应力峰值时程曲线,如图13,14所示。

从图13可以看出,水泥种类为普通水泥时,

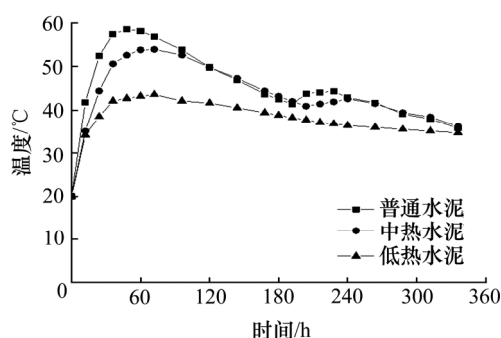


图13 混凝土水泥种类不同时混凝土温度峰值时程曲线

Fig. 13 Peak temperature value-time curves of different concrete-cement

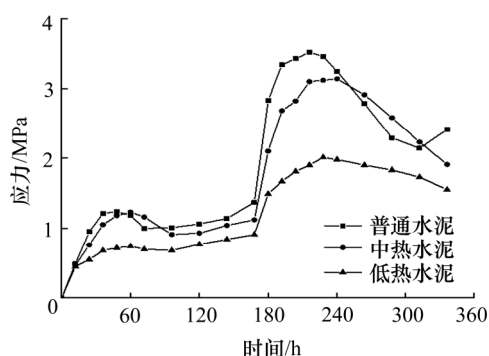


图14 混凝土水泥种类不同时混凝土应力峰值时程曲线

Fig. 14 Peak stress-time curves of different concrete-cement

温度峰值为 58.5°C ，出现在浇筑后 42 h。水泥种类为中热水泥时，温度峰值为 53.9°C ，出现在浇筑后 60 h。水泥种类为低热水泥时，温度峰值为 43.6°C ，出现在浇筑后 72 h。因此，当选用中、低热水泥时，不仅可以显著地降低温度峰值，而且能推迟温度峰值到达时间。此外，当浇筑上层新混凝土时，采用中、低热水泥的混凝土，回升幅度较小。表明：分层浇筑时，中、低热水泥可以减小上、下层混凝土的温差。

从图 14 可以看出，相较于普通水泥的混凝土，中热水泥的应力峰值，降低了 0.4 MPa ，降幅为 11.4%。低热水泥的应力峰值，降低了 1.51 MPa ，降幅为 42.9%。表明：中、低热水泥对温度应力的改善效果非常明显。因此，在进行锚塞体大体积混凝土配合比设计时，应选用中、低热水泥。

4.5 冷却水流速

利用有限元模型，当其他参数不变时，依次选取冷却水流速为 $0.5\sim 2.0\text{ m/s}$ 的梯度变化流速，分析冷却水流速对大体积混凝土温度场和应力场的影响。绘制冷却水流速分别为 $2.0, 1.5, 1.0$ 和 0.5 m/s

的锚塞体大体积混凝土的温度和应力峰值时程曲线，如图 15, 16 所示。

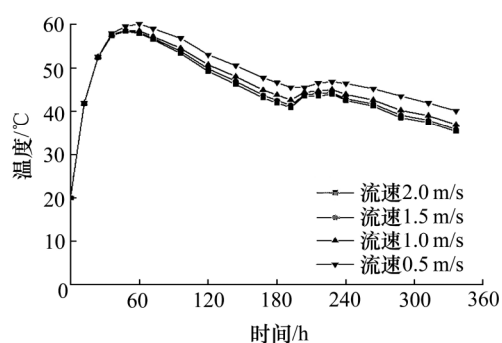


图15 冷却水流速不同时混凝土温度峰值时程曲线

Fig. 15 Peak temperature value-time curves of different cooling water flow velocity

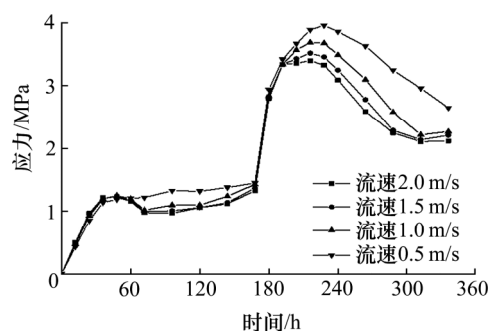


图16 冷却水流速不同时混凝土应力峰值时程曲线

Fig. 16 Peak stress-time curves of different cooling water flow velocity

从图 15 可以看出，混凝土温度达到峰值之前，不同流速对温度的影响可以忽略不计，但之后较慢的流速，不仅使温度峰值更高，而且推迟了温度峰值的到达时间，将冷却水流速从 2.0 m/s 降低到 0.5 m/s ，温度峰值升高了约 1.7°C ，且到达时间延滞了约 12 h。

从图 16 可以看出，流速 2.0 m/s 的冷却水与流速为 0.5 m/s 相比，可以降低混凝土最大拉应力值为 1.04 MPa 。冷却水流速从 0.5 m/s 提高到 1.0 m/s 时，温度应力最大降低 0.74 MPa 。而将冷却水流速从 1.5 m/s 提高到 2.0 m/s ，温度应力峰值仅降低了 0.19 MPa 。流速 1.5 m/s 的应力变化曲线与 2.0 m/s 的基本重合，但流速为 0.5 m/s 时，温度应力上升幅值较大。因此，建议该大体积混凝土在浇筑初期，尽可能使用较大流速的冷却水，进行管冷冷却，以降低最高温度峰值，建议流速大于 1.0 m/s 。在达到温度峰值之后，则可采用较小流速冷却水，以防止混凝土降温速率过快，且可以减少施工成本。

4.6 冷却水温度

以锚塞体第三层为研究对象,其他参数不变条件下,不同入水口温度对大体积混凝土温度场与应力场的影响。绘制冷却水温度分别是 15 °C、20 °C、25 °C 和 30 °C 的锚塞体大体积混凝土,第三层温度峰值和应力峰值时程曲线,如图 17、18 所示。

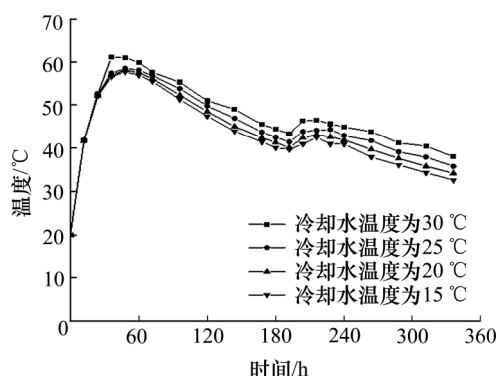


图 17 不同入水口温度混凝土中心温度峰值时程曲线

Fig. 17 Center-temperature-time curves of different inlet water temperature

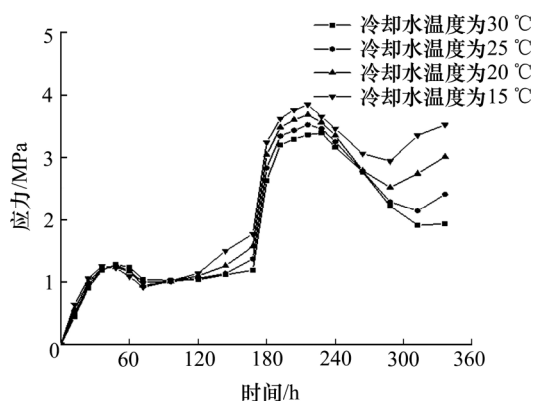


图 18 不同入水口温度混凝土拉应力峰值时程曲线

Fig. 18 Peak tensile stress-time curves of different inlet water temperature

从图 17 可以看出,在混凝土升温阶段,不同入水口温度对温升速度没有影响,入水口温度在 15 °C~25 °C 范围,混凝土中心温度峰值不变。但当入水口温度超过 25 °C,温度峰值有了明显提高,冷却水对混凝土降温效果,大幅度下降。在降温阶段,中心温度随时间的变化趋势基本一致,但入水口温度不同,温度大小稍有差别。

从图 18 可以看出,不同入水口温度在混凝土升温阶段,拉应力峰值与增长速率一致,此时内部温度远高于外表面温度,内胀外缩,拉应力峰值出现在结构的上表面。但在 120~180 h 时,不同入水

口温度引起的混凝土拉应力峰值随时间变化有明显不同。因为这时水化热反应结束,混凝土温度下降。由于混凝土导热性能差,内部温度下降速度要小于外表面温度的,使得外表面混凝土收缩速度快于内部的,拉应力峰值出现在混凝土内部。从图 18 还可看出,冷却水温度每降低 5 °C,拉应力峰值增大 0.15 MPa。因此,从控制应力角度出发,在大体积混凝土升温阶段,冷却水温度在避免冷击的前提下,越低越好。但是,在降温阶段,冷却水温度宜高不宜低。

5 结论

采用 Midas/FEA 软件,建立了锚塞体大体积混凝土第 1~4 层施工过程的有限元模型,将计算得到温度峰值与实测的进行比较,并对部分参数的敏感性进行了分析。得到的结论为:

1) 隧道锚锚塞体洞内温度随时间变化幅度小于洞外温度,其温度在 10 °C 上下波动。为使模拟分析的结果,尽可能符合实际情况,锚塞体相对封闭环境下,大气环境温度可考虑取 0.7、0.9 倍外界环境温度,外界温度高时(如午后)取 0.7,外界温度低时(如午夜)取 0.9。

2) 对该工程锚塞体大体积混凝土温控参数进行敏感性分析,发现将锚塞体浇筑厚度由 4 m 改为设计方案的 2 m,混凝土温度峰值降低 1.8 °C,应力峰值降低 1.06 MPa。混凝土表面对流系数每降低 10 kJ/(m²·h·°C),温度峰值增加 1.0 °C,应力峰值降低 0.35 MPa。锚塞体各层入模温度每升高 5.0 °C,温度峰值升高 3.0 °C,应力峰值上升 0.40 MPa。相比于普通水泥,采用中、低热水泥的温度峰值分别降低 4.6 °C、14.9 °C,应力峰值分别降低了 0.40、1.51 MPa。

3) 对该工程锚塞体大体积混凝土温控参数进行敏感性分析,发现大体积混凝土在浇筑初期,使用较大流速的冷却水,进行管冷冷却,以降低最高温度峰值。在达到最高温度峰值之后,采用较小流速的冷却水,不仅可以防止混凝土降温速率过快,而且可以减少施工的成本。从控制应力的角度出发,在大体积混凝土升温阶段,冷却水温度在避免冷击的前提下,越低越好。但是,在降温阶段,冷却水温度宜高不宜低。

4) 本研究只针对一座桥的隧道锚锚塞体大体积混凝土的温度控制,尚缺少广泛性。此外,针对锚塞体这种处于相对密闭、强约束的大体积混凝土温度控制,有其自身特点,尚需进行深入研究,以制定区别于其他大体积混凝土的施工规范和温控规范的专门条文或标准。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50496—2009,大体积混凝土施工规范[S].北京:中国计划出版社,2009.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.GB 50496—2009, Code for construction of mass concrete[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50496—2018,大体积混凝土施工标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2018. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50496—2018, Code for construction of mass concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2018.(in Chinese))
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GBT 51028—2015,大体积混凝土温度测控技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GBT 51028—2015 Technical code for temperature measurement and control of mass concrete[S].China Architecture & Building Press,2015.(in Chinese))
- [4] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国水利水电出版社,2012.(ZHU Bo-fang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]. Beijing:China Water & Power Press,2012.(in Chinese))
- [5] 张玉平,李传习,张磊,等.张花高速澧水大桥索塔基础大体积混凝土温控[J].科技导报,2012,30(34):55-60. (ZHANG Yu-ping, LI Chuan-xi, ZHANG Lei, et al. Mass concrete temperature control of Lishui bridge tower foundation in Zhanghua Highway[J]. Science & Technology Review,2012,30(34):55-60.(in Chinese))
- [6] 鲁正刚,王修信.考虑水管冷却的大体积混凝土承台温度控制研究[J].铁道科学与工程学报,2015,12(5):1172-1178.(LU Zheng-gang,WANG Xiu-xin.Analysis of temperature control for mass concrete bearing platform with water pipe cooling considered[J].Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(5): 1172-1178. (in Chinese))
- [7] 杨慧,刘军来.某斜拉桥承台大体积混凝土水化热温度场研究与关键施工技术应用[J].公路工程,2018,43(5):152-156.(YANG Hui,LIU Jun-lai.Study on the hydration heat temperature field of mass concrete and the application of key construction technologies for a certain cable stayed bridge cap[J]. Highway Engineering,2018,43(5):152-156.(in Chinese))
- [8] 张玉平,张亚昕,李传习.某桥支墩基础大体积混凝土温控及参数分析[J].交通科学与工程,2019,35(2):51-57. (ZHANG Yu-ping, ZHANG Ya-xin, LI Chuan-xi. Temperature control and parametric analysis of mass concrete construction of buttress pier foundation of a bridge[J].Journal of Transport Science and Engineering. 2019,35(2): 51-57.(in Chinese))
- [9] 刘海宽,张磊,张玉平,等.系统温控技术在桥梁大体积混凝土工程中的应用[J].中外公路,2014,34(1):216-222. (LIU Hai-kuan, ZHANG Lei, ZHANG Yu-ping, et al. Application of system temperature control technology in mass concrete engineering[J]. Journal of China & Foreign Highway. 2014, 34(1): 216-222.(in Chinese))
- [10] 孙维刚,倪富陶,刘来君,等.大体积混凝土水化热温度特征数值分析[J].江苏大学学报:自然科学版,2015,36(4):475-479.(SUN Wei-gang, NI Fu-tao, LIU Lai-jun, et al. Numerical analysis of hydration heat temperature characteristics of massive concrete[J]. Journal of Jiangsu University:Natural Science Edition,2015,36(4):475-479. (in Chinese))
- [11] 蔡文俊,马建林,李军堂,等.桥梁承台大体积混凝土温度控制数值模拟研究[J].铁道建筑,2017(3):1-5.(CAI Wen-jun, MA Jian-lin, LI Jun-tang, et al. Numerical simulation of temperature control for mass concrete in bridge pile cap[J]. Railway Engineering,2017(3):1-5.(in Chinese))
- [12] Kwak H G,Ha S J,Kim J K.Non-structural cracking in RC walls: Part I.Finite element formulation[J].Cement & Concrete Research, 2006,36(4):749-760.
- [13] Yang J K,Yun L,Kim J K. Heat transfer coefficient in flow convection of pipe-cooling system in massive concrete[J].Journal of Advanced Concrete Technology, 2011,9(1):103-114.
- [14] 周世康,康梦安,叶派平.隧道锚锚塞体大体积混凝土温度场监测与数值分析[J].施工技术,2017,46(20):130-134. (ZHOU Shi-kang, KANG Meng-an, YE Pai-ping. Mass concrete temperature field monitoring and simulation for tunnel anchorage concrete-plug[J]. Construction Technology, 2017, 46(20): 130-134. (in Chinese))
- [15] 张亚昕.隧道锚锚塞体大体积混凝土温度及温度应力研究[D].长沙:长沙理工大学,2019. (ZHANG Ya-xin. Tunnel anchor body mass concrete temperature and temperature stress study[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2019.(in Chinese))