

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.05.023

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

林志斌

(中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南 昆明 560000)

摘要:连续刚构箱形梁体型复杂,早龄期养护不到位极易发生裂缝。该文以某工程现浇箱形梁实际发生的腹板斜裂缝为例,实测混凝土力学性能、热学性能和变形性能,基于混凝土成熟度理论,采用三维仿真分析技术研究裂缝成因。结果表明:混凝土开裂的主因是环境温度低,拆模后混凝土温度快速降至环境温度,导致混凝土内部形成较大的拉应力;沿波纹管位置开裂的原因是该处混凝土截面减小,容易发生应力集中。可采取的防裂措施为:拆模前尽量保持通风,控制混凝土最高温度,拆模后采用遮盖和蒸气养护,避免混凝土直接暴露于冷空气中,延长混凝土降温时间。采用仿真计算优选的养护措施后,实测温度历程和应力历程与计算结果趋势一致,实体结构未再开裂。

关键词:刚构桥;箱梁;混凝土;开裂;仿真;防裂措施

中图分类号: U448.23

文献标志码: A

随着中国山区高速公路建设规模扩大,连续刚构桥作为一种横跨山谷、连接陡崖的常用结构,应用越来越多。连续刚构现浇箱梁体型复杂,一般采用高扬程泵送浇筑混凝土,对混凝土流动性要求高,并且出于结构受力需求,混凝土强度等级高,因此胶凝材料用量往往比较大。胶凝材料水化放热会导致混凝土内部急剧升温,增加混凝土开裂风险^[1-2]。公路工程相关规范虽然提出要重视大体积混凝土开裂问题^[3],但是并未提出如何选择防裂措施或开展温控设计,公路行业也缺少混凝土热学性能试验方法,因此借鉴其他行业的试验方法,深入开展箱梁混凝土温度场、应力场的分

析,对于揭示箱梁混凝土开裂机理、提出防裂措施具有重要意义。

由于混凝土内部水化放热导致的开裂,通常称之为温度裂缝。但根据温度裂缝形成的时间和过程不同,大体可以将温度裂缝分为温度梯度裂缝和温度历程裂缝。温度梯度裂缝是指混凝土体型较大,由于胶凝材料水化放热,导致混凝土内部温度高、表面温度低,形成较大的温度差,从而在混凝土表面形成较大拉应力,当温度梯度足够大,产生的拉应力超过混凝土表面抗拉强度时,混凝土开裂,典型结构如大坝、大体积基础等;温度历程裂缝是指混凝土整体经历较大的温

- *****
- [11] 徐力斌.玄武岩—聚丙烯混杂纤维活性粉末混凝土力学性能试验研究[D].吉林:东北电力大学,2018.
- [12] 张哲,邵旭东,李文光,等.超高性能混凝土轴拉性能试验[J].中国公路学报,2015,28(8):50—58.
- [13] GRAYBEAL B, BABY F, MARCHAND P, et al. Direct and Flexural Tension Test Methods for Determination of the Tensile Stress-Strain Response of UHPFRC[C]. Kassel International Conference, HIPERMAT, 2012: 395—418.
- [14] FUJIKAKE K, SENG T, UEDA N, et al. Effects of Strain Rate on Tensile Behavior of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1): 79—84.
- [15] WILLE K, KIM D J, NAAMAN A E. Strain-Hardening UHP-FRC with Low Fiber Contents[J]. Materials and Structures, 2011, 44(3): 583—598.
- [16] 刘建忠,韩方玉,周华新,等.超高性能混凝土拉伸力学行为的研究进展[J].材料导报,2017,31(23):24—32.
- [17] 清华大学,江西贝融循环材料股份有限公司,南京倍立达新材料系统工程股份有限公司,等.超高性能混凝土基本性能与试验方法:T/CBMF 37—2018[S].北京:中国建材工业出版社,2018.
- [18] 清华大学.活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.

收稿日期:2020—08—21

作者简介:林志斌,男,大学本科,高级工程师, E-mail:linzhi.987@163.com

度起伏,由于热胀冷缩,在受到强约束时,在降温过程中就会形成较大的拉应力,典型结构如衬砌、实心墩柱等。由于箱梁造价高,在实体结构上进行裂缝分析或防裂措施尝试代价较高,而利用三维数值仿真分析技术对箱梁温度场、应力场进行模拟^[4-5],可以较快速地揭示开裂原因,并比选防裂措施^[6]。三维数值仿真分析技术目前已经比较成熟^[4-7]。

该文针对某工程现浇箱梁混凝土腹板实际发生的斜裂缝开展研究,借鉴 DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》中混凝土热学性能的试验方法,实测 C55 箱梁混凝土的绝热温升、导热系数和比热,基于成熟度理论进行三维有限元仿真分析,研究箱梁不同位置温度

历程和应力发展过程,揭示开裂原因并提出防裂措施。

1 配合比和分析方法

1.1 混凝土配合比

水泥:华新 P. O52.5 普通硅酸盐水泥;粉煤灰:宜宾元亨 I 级粉煤灰;减水剂:长安育才缓凝型聚羧酸高性能减水剂,减水率为 29%;砂:天然河砂,表观密度为 2 690 kg/m³,细度模数 2.6;石:石灰岩碎石,表观密度为 2 670 kg/m³。

典型桥梁工程用配合比及拌和物性能见表 1。混凝土具有良好工作性。

表 1 混凝土配合比及拌和物性能

水胶比	砂率/ %	配比/(kg·m ⁻³)					减水剂/ %	坍落度/ mm	密度/ (kg·m ⁻³)
		水泥	水	粉煤灰	砂	石子			
0.31	40	374	145	94	728	1 092	1.0	220	2 390

1.2 理论计算和试验方法

(1) 热传导基本理论

混凝土是热的不良导体,当截面尺寸较大时,混凝土内部由于水泥水化放出的热量主要通过热传递进行转移^[8]。将混凝土假设为各向同性的均质体,热传导方程可简化为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{k}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \tag{1}$$

式中: k 为导热系数; c 为比热; ρ 为密度; T 为温度; θ 为绝热温升; τ 为时间。

热传导方程反映的是混凝土温度随时间、空间的分布。从式(1)中可以看出,影响混凝土不同位置温度变化的主要有绝热温升、比热、导热和密度等混凝土自身的性质。要求得实际结构中的温度场,除了上述参数需要测试外,还需已知初始条件和边界条件。初始条件指混凝土浇筑时的初始温度,边界条件指混凝土浇筑后所处的环境条件,包括混凝土表面的覆盖物(如模板)、环境温度、风速等。

(2) 测试方法

按照 DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》分别进行混凝土绝热温升、比热、导热系数、线膨胀系数、自生体积变形测试。热学性能试验设备为 HR-3 型混凝土热物理参数测定仪。力学性能主要测试混凝土的抗压强度、轴拉强度、轴拉弹性模量,抗压强度按

照 JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》进行测试,轴拉强度和轴拉弹性模量按照 DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》进行。

2 开裂情况简介

箱梁浇筑时间为 12 月,环境温度在 5~15℃ 波动,平均气温 7℃,混凝土入仓温度 15℃,浇筑后 5 d 拆模,裂缝出现时间一般在浇筑后 7~8 d。裂缝位于节段腹板中部,位置基本与预应力钢绞线预留波纹管位置重合,见图 1。裂缝左右对称,水平方向位于节段中部,节段边缘位置未见裂缝。裂缝宽度 0.1 mm 左右,深度 50~100 mm。



图 1 箱梁裂缝

裂缝原因初步判断:从裂缝出现时间看,与大体积

混凝土温度裂缝的特征基本吻合,裂缝走向特殊,估计与波纹管位置有关,由于开裂时尚未张拉预应力钢绞线,因此可以排除由张拉引起裂缝的可能。

3 试验结果

3.1 混凝土基本力学性能

混凝土的抗压强度、轴拉强度以及轴拉弹模见表 2。为了得到任意龄期内混凝土的力学性能,参考 CEB—FIP 提出的强度预测公式^[9][式(2)]拟合混凝土的抗压强度、抗拉强度、弹性模量。

表 2 混凝土基本力学性能

龄期/ d	抗压强度			抗拉强度			弹性模量		
	测试值/ MPa	拟合 s 值	相关系 数 R^2	测试值/ MPa	拟合 s 值	相关系 数 R^2	测试值/ MPa	拟合 s 值	相关系 数 R^2
3	54.2			2.9			40.0		
7	59.6	0.142	0.969	3.3	0.109	0.997	43.7	0.077	0.979
28	71.0			3.65			46.5		

表 3 混凝土热学性能

绝热温升公式	比热/ [kJ · (kg · °C) ⁻¹]	导热系数/ [kJ · (m · h · °C) ⁻¹]	线膨胀系数/ [10 ⁻⁶ · (°C) ⁻¹]
$T = \frac{56.61(t^{2.167} + 2.426)}{7.051 + t^{2.167}}$	0.932	8.710	8.2

3.3 混凝土自生体积变形

混凝土的自生体积变形是指混凝土处于恒温绝湿条件下,由水泥水化导致的体积变形。混凝土自浇筑以后,内部发生的变形主要包括温度变形和自生体积变形。混凝土自生体积变形测试结果如图 2 所示。

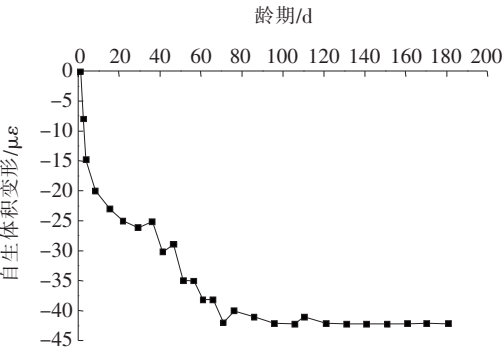


图 2 混凝土自生体积变形

由图 2 可知:自生体积变形最大值稳定在 42 με。

$$f_{cm}(t) = \exp \left[s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right] f_{cm} \tag{2}$$

式中: $f_{cm}(t)$ 为龄期 t 时的抗压强度、抗拉强度或弹性模量; f_{cm} 为 28 d 平均抗压强度、抗拉强度或弹性模量; s 为强度发展系数,取决于水泥类型、掺合料类型及掺量,通过拟合得到。

3.2 混凝土热学性能

实测混凝土热学性能见表 3。混凝土放热较快,该文采用带指数双曲函数拟合绝热温升曲线,可以将此函数输入到计算模型中,得到任意龄期下混凝土的发热量。

由于试验测试精度有限,实测数据点有小幅起伏,在输入计算模型时进行了平滑处理。

4 仿真分析

4.1 模型建立

该文采用 B4cast 三维仿真分析软件进行计算分析。B4cast 是丹麦一种基于有限元分析和 3D 模拟的混凝土结构温度历程和应力发展分析软件,能够为不同混凝土结构建模,不要求设置网格划分细节,只需提供施工方法、热边界条件和混凝土热物理性能参数和力学性能参数,建模后即可计算温度场和应力场。该软件可以将不同温度历程下的混凝土性能转换成 20 °C 等效龄期成熟度下的混凝土性能进行对比分析。B4Cast 软件的一个最大特点是基于成熟度原理,考虑了结构不同部位在不同温度下混凝土的各项性能的真

实发展历程。

采用实体结构的尺寸(图 3)建立箱梁节段的几何模型,见图 4。将混凝土热学、力学、变形性能等材料参数输入模型,计算结构体的温度场和应力场。如图 3 所示,整个结构左右对称,且主要分析腹板开裂趋势,因此在网格划分时将腹板网格细化,而对底板、顶板则采用较粗网格,为了减少计算量,左侧腹板采用细分网格,右侧采用粗网格。整个网格包含 17 139 个节点,重点分析箱梁腹板内侧波纹管旁靠近表面的 a 点(距混凝土表面 5 cm)、腹板中心靠近表面点 b 点(距混凝土表面 5 cm)以及腹板中心点 c 点(距混凝土表面 40 cm),温度测点布置见图 5。

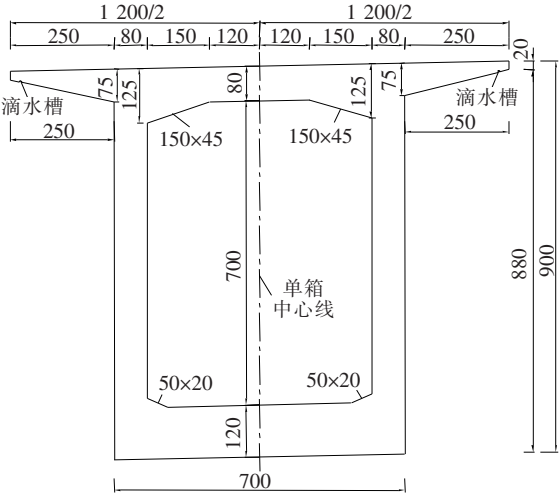


图 3 箱梁构造尺寸(单位:cm)

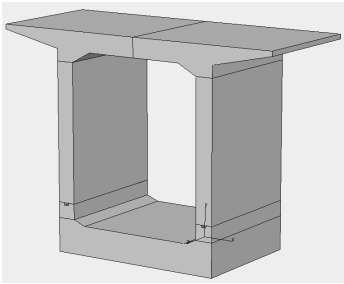


图 4 几何模型示意图

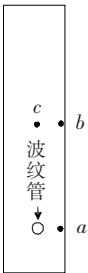


图 5 温度测点

4.2 结果分析

将前述实测混凝土各项性能输入模型中,设置模板厚度 20 mm,导热系数 $0.5 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,分 4 种工况进行分析。

(1) 工况 1

无遮盖,浇筑混凝土后 120 h 拆除模板,环境温度 5°C ,风速 5 m/s 。温度计算结果见图 6、7。

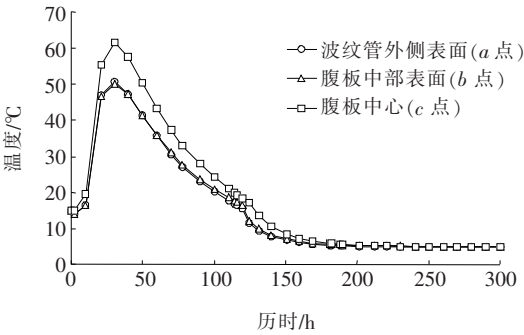


图 6 典型位置混凝土温度发展曲线

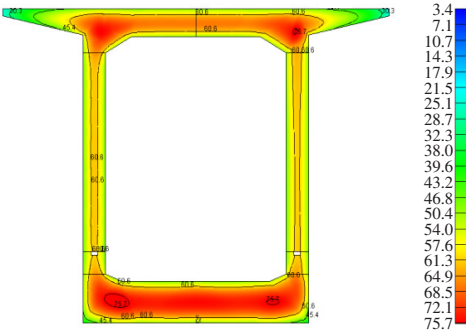


图 7 历时 30 h 混凝土温度分布云图(单位:°C)

图 6 为典型位置温度发展曲线,可以看出混凝土浇筑后由于水泥水化放热,混凝土内部的温度迅速上升,腹板中心最高温度达到 61.6°C ,达到温峰的时间约 30 h。随后,由于水泥水化速度减慢,发热量减少,同时混凝土对外散热,其温度逐渐下降。腹板表面中心与波纹管位置处的表面温度基本相当,波纹管周围并未下降更快。从云图(图 7)也可以看出混凝土表面温度基本均匀。

设置了 120 h 拆除模板,拆模前混凝土内部的温度已经降至 17°C 左右。拆除模板后,混凝土直接暴露于 5°C 左右的空气中,加上墩顶风速较大,混凝土表面迅速降温,随后温度保持与环境相同,不再过大起伏。

图 8、9 为典型位置混凝土应力与强度对比曲线,混凝土浇筑后,水化放热形成的升温导致混凝土热胀,在约束的作用下形成一部分压应力,由于波纹管位置混凝土的截面积减小,容易发生应力集中,其压应力最

大值达 1.5 MPa,而同时腹板中部表面压应力为 0.5 MPa。随着温度达到峰值并开始降温,混凝土内部的应力逐渐由压应力转向拉应力,并且同样由于应力集中的原因,波纹管位置混凝土中的应力大于腹板混凝土表面拉应力。在拆模前,波纹管外侧混凝土表面拉应力达到 2 MPa,同时间腹板混凝土表面拉应力约为 1 MPa。拆去模板后,随着混凝土表面温度急剧下降,拉应力快速发展,波纹管外侧混凝土表面拉应力迅速发展,很快达到混凝土抗拉强度,约为 3.4 MPa,此时波纹管位置处立即会出现裂缝;同时腹板混凝土表面拉应力最大值为 1.7 MPa,不足以引起裂缝。因此,裂缝首先会在波纹管的位置出现,且一旦出现,整个混凝土表面的应力被释放,不会再形成裂缝。

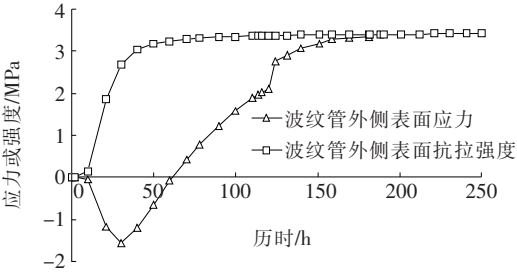


图 8 波纹管外侧混凝土表面(a 点)拉应力与抗拉强度

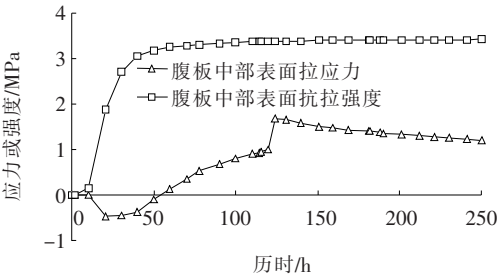


图 9 腹板中部混凝土表面(b 点)拉应力与抗拉强度

从应力分析的结果还可以看出:波纹管位置处裂缝出现的时间约在 190 h,即 7~8 d,与实际裂缝出现的时间基本吻合。上述分析说明:① 现场混凝土出现裂缝的主要原因是环境温度太低,混凝土浇筑后快速升温然后快速降温,导致拉应力超过抗拉强度,从而开裂;② 裂缝出现在波纹管位置,主要是因为波纹管位置处混凝土截面减小,导致应力集中,拉应力发展的速度高于腹板面其他位置,所以先开裂;③ 腹板中心和表面的最大温差为 12℃,底板表面和中心最大温差为 30℃,但未见底板开裂,因此内外降温速度不同形成的温差不是该案例开裂的主要原因。

(2) 工况 2

浇筑混凝土后 120 h 拆除模板,假设箱梁内部采

用蒸气养护,保持环境温度 15℃ 养护 5 d,5 d 后拆模的同时撤去蒸气养护,环境温度在 5 h 内降至 5℃ 实际环境;箱梁两端采取遮盖措施,风速降为 0。

温度计算结果见图 10、11。图 11 为典型位置温度发展曲线,可以看出腹板中心最高温度达到 72℃,比不采用蒸气养护高了约 10℃,达到温峰的时间也在 30 h 左右。从云图(图 11)也可以看出混凝土内部温度也较蒸气养护前要高。120 h 拆模前混凝土内部的温度降至 35℃ 左右。拆除模板后,混凝土直接暴露于 5℃ 左右的空气中,但由于不吹风,混凝土表面降温速度较慢。图 12、13 为典型位置混凝土应力与强度对比曲线,由于混凝土温度较未采用蒸气养护时要高,形成的压应力也增加。

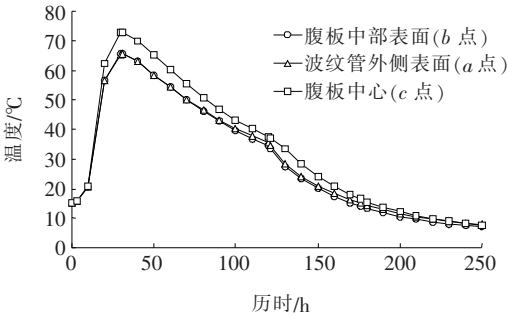


图 10 典型位置混凝土温度发展曲线

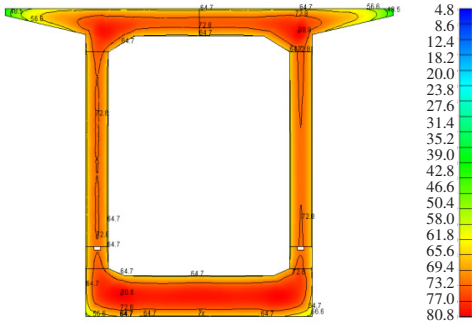


图 11 历时 30 h 混凝土温度分布云图(单位:℃)

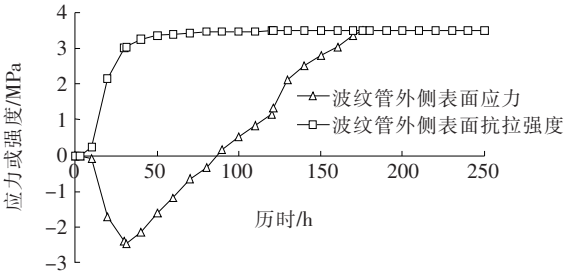


图 12 波纹管外侧混凝土表面(a 点)拉应力与抗拉强度

在拆模之前,波纹管外侧混凝土表面的拉应力达到 1.2 MPa 左右,同时间腹板混凝土表面的拉应力为

0.85 MPa 左右。拆去模板后,随着混凝土表面温度下降,拉应力快速发展,由于降温幅度比较大,波纹管外侧混凝土表面拉应力发展幅度仍较大,在 176 h 超过同时间的抗拉强度 3.5 MPa,此时波纹管位置处即会出现裂缝;同时间腹板混凝土表面的拉应力最大值为 2.4 MPa,不足以引起裂缝。因此,裂缝仍然会在波纹管的位置出现,即采用蒸气养护 5 d,并不能预防开裂,反而会因为提高了拆模时混凝土的温度,会增大开裂趋势。

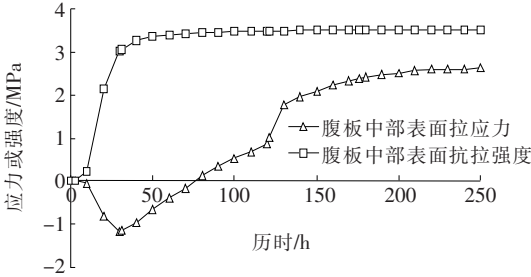


图 13 腹板中部混凝土表面(b 点)拉应力与抗拉强度

(3) 工况 3

浇筑混凝土后 120 h 拆除模板,考虑到混凝土在浇筑后 3 d 内基本不出现拉应力或者拉应力很小,因此假设拆模之前不采用蒸气养护,而在拆模时开始蒸气养护,养护温度 15℃,这样防止混凝土在拆模后暴露于冷空气中,养护 3 d 后撤去养护,环境温度在 5 h 内降至 5℃实际环境;从混凝土浇筑后开始,箱梁两端采取遮盖措施,风速降为 0。

温度计算结果见图 14、15。图 14 为典型位置温度发展曲线,腹板中心最高温度达到 68.4℃,由于风速降为 0,散热减慢,最高温度比不采用蒸气养护时高 7℃左右,达到温峰的时间也是 30 h。

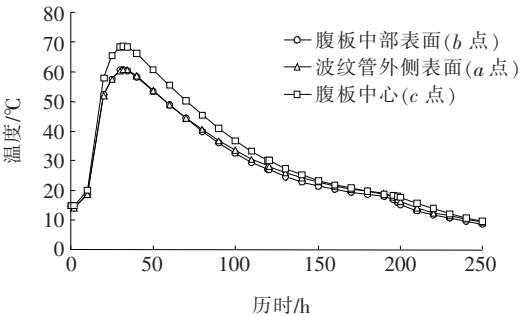


图 14 典型位置混凝土温度发展曲线

120 h 拆模前混凝土内部的温度降至 28℃。拆除模板后,采用蒸气养护的方式,使混凝土没有直接暴露于 5℃的空气中,混凝土表面降温速度变慢,降温历程拉长。尽管拆去模板后,波纹管外侧混凝土表面拉

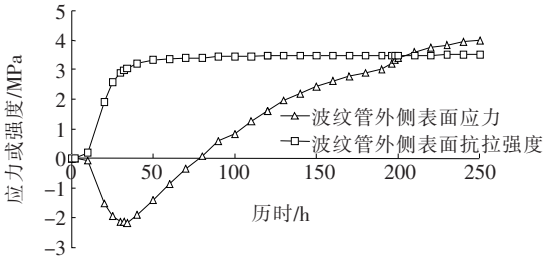


图 15 波纹管外侧混凝土表面(a 点)拉应力与抗拉强度

应力并未快速发展,但在 197 h 撤去蒸气养护后,拉应力还是会继续发展并在 205 h 时超过抗拉强度 3.5 MPa,此时波纹管位置处即会出现裂缝。因此,裂缝仍然会在波纹管的位置出现,即拆模后蒸气养护 3 d,可以延缓开裂时间,但并不能彻底预防开裂。

通过上述几种工况对比可以发现,如果早期采取蒸气养护、遮盖挡风等措施,会使散热速度减慢,混凝土最高温度会升高,对防裂其实不利。为了降低混凝土最高温度,采取早期散热、后期保温的措施,可能会对防裂有帮助。

(4) 工况 4

混凝土浇筑后,箱梁两端不采取遮盖措施,风速为 5 m/s。浇筑混凝土后 120 h 拆除模板,在拆模时开始蒸气养护,养护温度 15℃,同时采取遮盖措施,使风速降为 0 养护 3 d 后撤去养护,环境温度在 5 h 内降至 5℃。

温度计算结果见图 16、17。图 16 为典型位置温度发展曲线,腹板中心最高温度达到 61.4℃,达到温峰的时间也是 30 h,表面最高温度为 50℃。

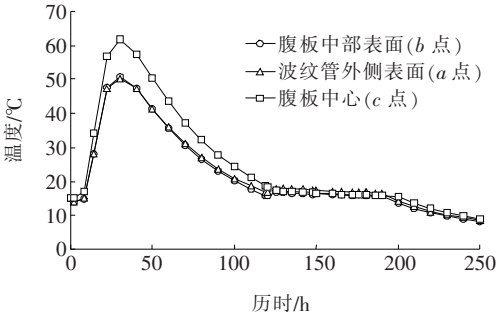


图 16 典型位置混凝土温度发展曲线

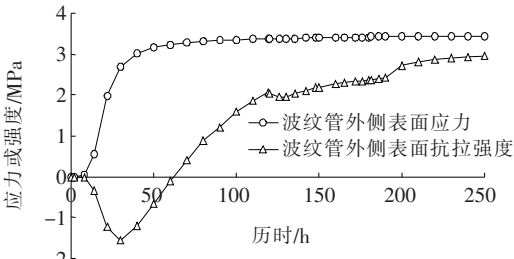


图 17 波纹管外侧混凝土表面(a 点)拉应力与抗拉强度

120 h 拆模前混凝土内部的温度降至 16.8 ℃。拆除模板后,采用 15 ℃蒸气养护方式,混凝土表面降温速度缓慢,降温历程出现平台期。尽管拆去模板后,波纹管外侧混凝土表面拉应力尚有少许发展,但拉应力始终未超过抗拉强度,此时波纹管位置处不会再出

现裂缝,说明防裂措施有效。考虑到整个腹板面上波纹管所处位置表面的应力集中,拉应力最大,因此可以认为腹板表面不会开裂。

(5) 小结

4 种工况下,仿真计算结果汇总见表 4。

表 4 仿真计算结果对比

工况	入模温度/℃	温峰/℃	温峰出现时间/h	腹板中心表面最大温差/℃	拆模时温度/℃	环境温度/℃	开裂应力/MPa	开裂时间/h
1	15	61.6	30	12.0	17.0	5	3.4	190
2	15	72.0	30	8.2	35.0	5	3.5	176
3	15	68.4	30	8.0	28.0	5	3.5	205
4	15	61.4	30	11.4	16.8	5	—	不裂

综上分析,初步判断混凝土开裂的主因是环境温度低,拆模后混凝土温度快速降温至环境温度,导致混凝土内部形成较大的拉应力;沿波纹管位置开裂的原因是该处混凝土截面减小,容易发生应力集中;防裂措施主要是在拆模前尽量保持通风,加快散热,降低混凝土最高温度;拆模后采用遮盖和蒸气养护,避免混凝土直接暴露于冷空气中,延长混凝土降温时间。

4.3 现场采集结果

箱梁现浇现场为了避免开裂,采用了上述工况 4 所述的养护方式,箱梁是中空的,蒸气养护时在箱梁端部用帆布覆盖,然后将蒸气养护设备放入箱室中部,通过加热水释放蒸气实现蒸气养护。实际观测腹板未出现裂缝。现场浇筑时混凝土的入模温度为 16.5 ℃,在 a、b、c 点(图 5)分别预埋了温度传感器,实测各点温度历程。实测结果与三维仿真计算结果对比见图 18。

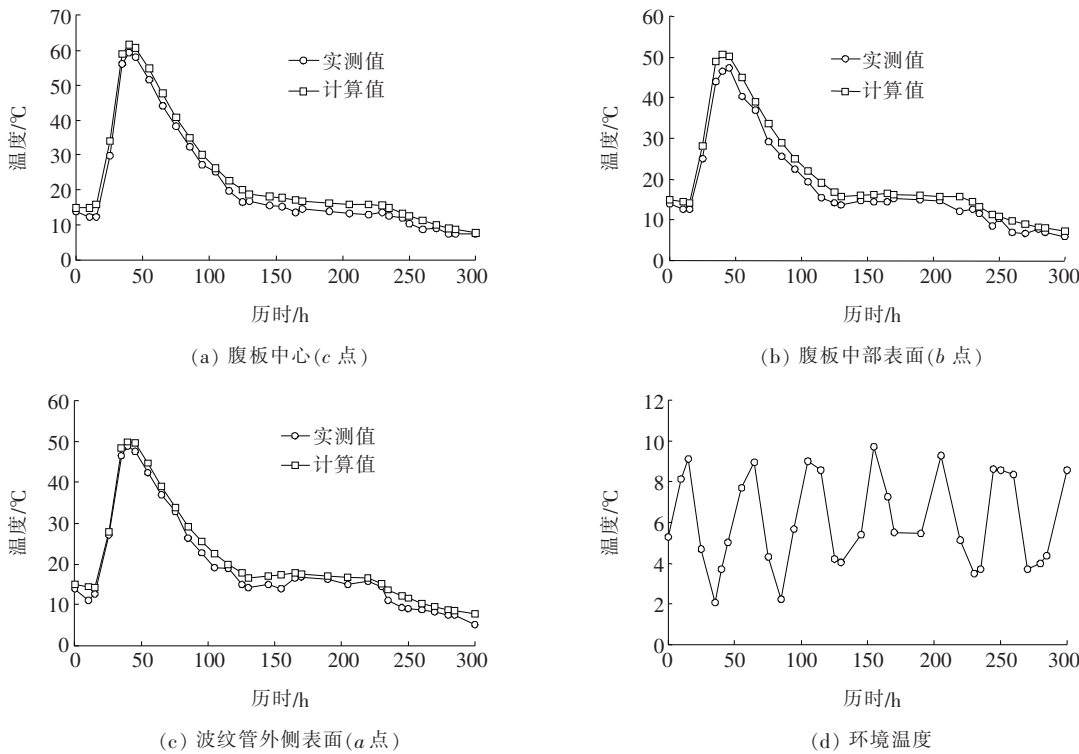
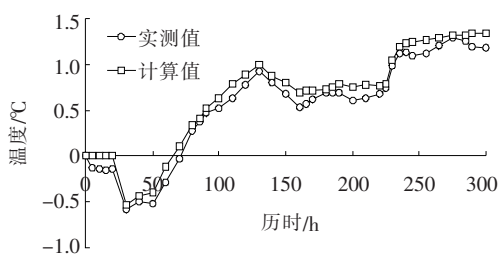


图 18 现场实测温度历程与计算结果比较

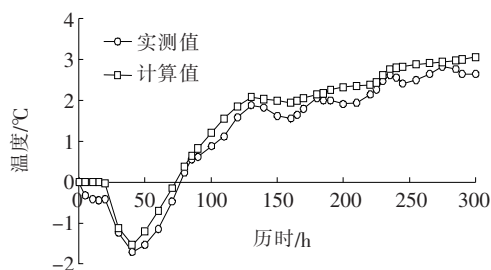
实测温度发展趋势与三维仿真计算结果比较接近,说明仿真计算结果可信。由于环境温度存在一定波动,实测温度曲线有一定起伏,整体上温峰出现的时间与计算结果基本吻合,温峰值也基本接近。降温阶段的发展趋势相似,但实测温度降低速度要快于计算结果,可能与现场环境温度、风速等因素有关。

由于现场条件有限,仅实测了 b 、 a 两点的应力发

展,结果见图19。实测应力结果较计算结果略小,并且表面容易受温度的影响而波动。但是,整体趋势与计算结果一致,腹板中部表面 b 点应力较小,最大值约1.3 MPa,波纹管表面 a 点应力较大,最大值已经达到2.3 MPa,比腹板中部表面的应力要大,但是经过改进养护后,波纹管表面拉应力未超过混凝土抗拉强度,表面未出现裂缝,说明养护措施有效。



(a) 腹板中部表面(b 点)



(b) 波纹管外侧表面(a 点)

图19 现场实测应力历程与计算结果比较

5 结论

实测混凝土的力学性能、热学性能、变形性能,采用三维仿真分析方法分析了箱梁混凝土腹板斜裂缝形成原因,并计算分析了防裂措施的有效性,通过上述分析,得到以下主要结论:

(1) 混凝土开裂的主因是由于环境温度低,拆模后混凝土温度快速降至环境温度,导致内部形成较大的拉应力,拉应力超过抗拉强度时发生开裂;三维仿真分析得到的开裂时间为190 h,与实际开裂时间7~8 d基本吻合。裂缝沿波纹管位置开裂的原因是由于该处混凝土截面减小,容易发生应力集中。

(2) 采用两端遮盖、内部15 °C蒸气养护至5 d拆模,并不能预防裂缝发生,反而有可能加剧开裂趋势;采用两端遮盖防风,至5 d拆模时施以15 °C蒸气养护3 d,可以延缓开裂时间,但仍存在开裂风险。混凝土浇筑后保持通风,防止早期温升过高,在5 d拆模后两端遮盖并施加15 °C蒸气养护3 d,可以有效防止开裂。

(3) 防裂措施主要是在拆模前尽量保持通风,加快散热,降低混凝土最高温度;拆模后采用遮盖和蒸气养护,避免混凝土直接暴露于冷空气中,延长混凝土降温时间。

参考文献:

- [1] 苏克敏,李雪梅,陈大风. 大跨径连续刚构桥腹板裂缝成因分析及处治措施探讨[J]. 林业建设,2019(2):59—63.
- [2] 陈之涛. 混凝土连续箱梁裂缝成因及治理研究[J]. 湖南交通科技,2019,45(1):141—143,161.
- [3] 中交第一公路工程局有限公司. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T F50—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [4] 何文正. 混凝土现浇箱梁施工过程中温度场分析[C]. 全国第二届品质工程论坛暨惠清高速公路绿色科技示范工程现场观摩会论文集(续),2019.
- [5] 张春霞,王领,刘兆磊. 大体积箱梁混凝土结构施工期温控防裂仿真分析[J]. 公路工程,2014,39(5): 91—95, 113.
- [6] 袁军峰,张建东,刘朵,等. 大跨连续箱梁桥0#块高强混凝土水化热及温控措施分析[J]. 中外公路,2019,39(5): 97—101.
- [7] 赵文斌,刘建勋,张戎令,等. 强风、干寒、大温差地区混凝土箱梁早期抗裂性分析[J]. 硅酸盐通报,2016,35(10): 3 253—3 257,3 273.
- [8] 康健. 大温差干寒条件下公路预制混凝土箱梁养护防裂技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.
- [9] P·库马尔·梅塔,保罗·J·M·蒙蒂罗. 混凝土微观结构、性能和材料[M]. 4版. 欧阳东,译. 北京:中国建筑工业出版社,2016.