

大体积混凝土施工水化热分析与控制

胡健中¹,李阳²,张申昕²

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 武汉理工大学 交通学院)

摘要:为了解大体积混凝土施工时水化热的产生机理,并结合工期需要提出相应的控制措施。该文结合数值分析和现场实测,开展了悬索桥锚碇大体积混凝土施工水化热控制技术研究。结果表明:① 大体积混凝土浇筑时表层存在较明显的温度梯度,施工时必须做好表层覆盖;② 混凝土浇筑层厚是控制大体积混凝土内部温度峰值的关键因素;③ 后浇混凝土层对先浇混凝土层存在“加热”作用,可通过层厚、通水时间等参数调节缩短大体积混凝土养护龄期。

关键词: 锚碇; 大体积混凝土; 水化热; 层厚; 养护龄期

1 前言

随着近几十年来中国桥梁事业的迅速发展,对于桥梁的跨越能力要求越来越高,大体积混凝土的填芯、桥台、桥墩、零号块、锚碇等构件越来越多地出现在桥梁建设中,大体积混凝土浇筑过程中的水化热分析与控制也显得越来越重要。大体积混凝土结构的内外温差会在新浇筑混凝土内产生温度应力,又由于新浇筑混凝土初始强度还未完全形成,如果没有很好地控制此温度应力大小,必然会导致大体积混凝土结构开裂。目前,开展大体积混凝土水化热控制的研究成果已有许多,刘宁等应用随机有限元法计算随机温度引起的混凝土徐变应力;刘继等开展了连续刚构桥承台混凝土水化热有限元分析;袁军锋等开展了高强混凝土施工水化热控制研究;孙金、盛焰正等开展了对钢混组合梁及单箱多式箱梁结构的混凝土温度场分析;朱伯芳提出了混凝土绝热温升计算模型。上述理论研究对大体积混凝土水化热控制起到了非常重要的作用。但随着近年来数字智能监控技术的发展进步,对混凝土温度场精细计算和冷却通水精确控制的要求日益突出,特别是在项目工期要求紧,必须缩短混凝土养护龄期时,如何在混凝土浇筑层厚不变的情况下,合理实施水化热控制措施,成为大体积混凝土水化热控制的新

挑战。

该文以实际工程为背景,利用热流耦合的方法模拟混凝土与冷却水管之间的对流换热,开展大体积混凝土水化热研究。采用数值方法结合浇筑方案模拟冷却水管通水冷却作用下的大体积混凝土温度场,将实测点温控数据与模拟计算值进行对比分析,得到锚碇大体积混凝土水化热温度随时间变化的规律,据此提出大体积混凝土温度控制的优化措施方案。

2 有限元模拟

2.1 工程基本概况

湖北襄阳庞公大桥采用分离式重力式锚碇,基础为地连墙结构,墙厚 1.0 m,单个锚碇外径为 35 m,竖向分 6 层,内衬厚度沿竖向由 0.8~3.0 m 分段变厚。由下往上 5 层每层高 3 m,最上面两层每层高 2 m,如图 1 所示。

采用 C30 混凝土,3、7、28 d 的劈裂抗拉强度分别为 1.6、2.1 和 3.0 MPa。热膨胀系数为 $0.8 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,导热系数为 $8.94 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$,比热为 $0.92 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$,基础弹模为 $3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$,最终弹模为 $3.5 \times 10^4 \text{ MPa}$,绝热升温 40°C 。上表面散热系数为 $720 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$,侧面散热系数为 $960 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$;混凝土应力计算时考虑徐变效应,

收稿日期:2020-05-27(修改稿)

基金项目:国家重点研发专项项目(编号:2017YFC0806000);江西省创新驱动“5511”项目(编号:20165ABC28001);江西省交通科技项目(编号:2017C0005)

作者简介:胡健中,男,高级工程师。E-mail:45466627@qq.com

并考虑膨胀剂膨胀补偿混凝土收缩的影响;环境温度为 $(11\pm 4)^\circ\text{C}$,风速按 $\geq 8\text{ m/s}$ 考虑(参考当地气候资料)。

冷却水管的平面布置如图 2 所示,分为单数层与双数层,单数层与双数层的冷却水管在水流方向上互相垂直,每层冷却水管的水平间距除了边缘处的冷却水管间距为 1.5 m 外,其余各处冷却水管间距均为 1 m。在竖直方向上,填芯的冷却水管共有 12 层,每层间的间距均为 1 m。

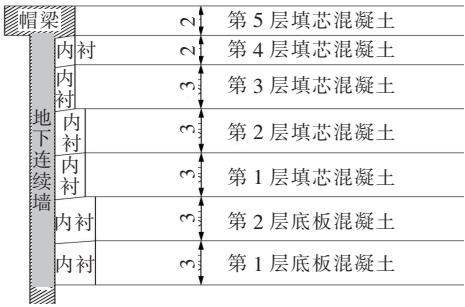


图 1 锚碇混凝土浇筑分层(单位:m)

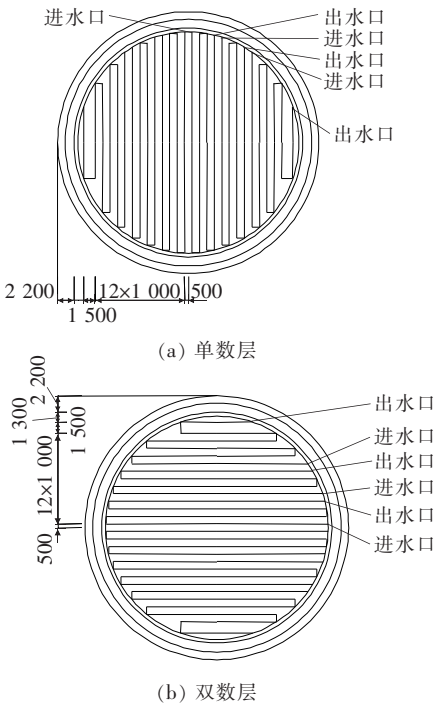


图 2 冷却水管布置图(单位:mm)

为简化建模,仅建填芯混凝土 1/4 对称模型进行瞬态热分析求解温度场。分析时,混凝土和冷却水管分别选择 Solid70、Fluid116 单元,对流边界条件、热流密度、热辐射均按 Solid70 单元面荷载考虑,混凝土的水化热升温速率则按单元体荷载考虑,没有施加对流边界的单元为绝热单元。网格划分时根据冷却管位置

进行细分。

2.2 浇筑温度估算

根据施工计划,锚碇填芯混凝土浇筑时间为 11、12 月,依据当地气象资料平均气温分别为 13°C 、 7°C ,以此确定水温,骨料温度相应取为 15°C 、 9°C ,水泥和掺合料的反应温度分别为 50°C 、 35°C ,根据 JTS 202-1-2010《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范》,混凝土出机口温度估算为 18.4°C (11 月)和 13.2°C (12 月)。根据 JTG/T F50-2011《公路桥涵施工技术规范》“混凝土的入模温度一般不宜超过 28°C 并不应大于 30°C ”的要求。控制填芯混凝土浇筑温度 $\leq 20^\circ\text{C}$,有限元仿真计算时填芯混凝土浇筑温度取 20°C 。取锚碇第 1 层填芯混凝土浇筑结果进行分析。

2.3 填芯混凝土厚度为 3 m 时水化热分析

2.3.1 温度变化

锚碇浇筑时的温度监控测点布置如图 3 所示,分为里层测点与表层测点,在每层的水平方向设置具有代表性的测点以反映横向的温度梯度。

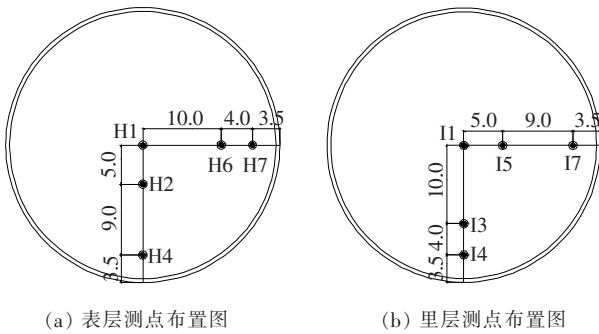


图 3 锚碇测点布置示意图(单位:m)

经过整理监测数据,取具有代表性的第 1 层填芯混凝土的浇筑结果进行分析。图 4 为两组竖向测点(I1、H1 与 I7、H7)的温度变化时程曲线。

由图 4 可知:混凝土升温速率明显快于降温速率。在混凝土浇筑完成后 30 h 左右表层温度达到峰值,约为 55°C ,里层最高温度为 59.7°C ,且升温过程明显滞后于表层温度,中心位置在混凝土浇筑完成后 70 h 左右温度开始下降,且中心温度相对于边缘温度升温时间更长,这是因为边缘测点除了混凝土表面与空气对流、以及冷却管散热外,边缘混凝土与地连墙接触还可释放热量。里表温差随着混凝土浇筑完成时间逐渐增加然后保持稳定,这是由于冷却管的散热作用相对恒定,而初期混凝土表层散热较快,故里表温差逐渐增大。

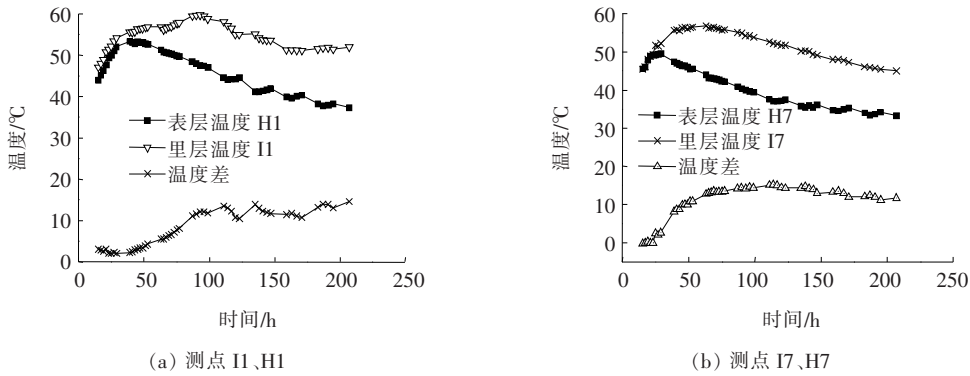


图 4 温度变化曲线

图 5 为具有代表性的两组实测温度变化曲线。

由图 5 可知:里层温度无明显变化梯度,升温阶段水平横向表层测点温度总体由中心向边缘逐渐降低,存在一定温度梯度。在降温阶段表层测点温度出现锯齿状波动。这是由于白天受到太阳直射所致。混凝土表面温度对外部环境温度变化敏感,为保证工程质量,需及时对新浇筑混凝土表面做蓄水养护或覆盖处理,尽可能减小环境温度的影响。

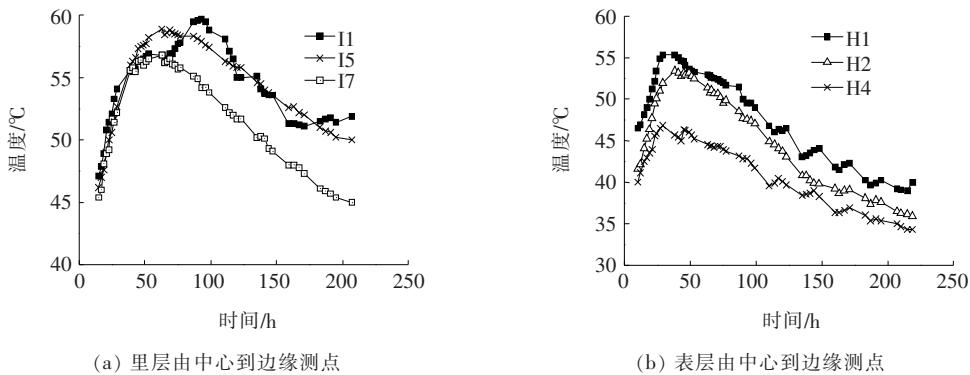


图 5 表层水平温度变化图

2.3.2 混凝土应力

若冷却和养护措施不到位,新浇筑混凝土水化热会在大体积混凝土内部大量聚集,导致明显内外温差,所产生的温度拉应力往往超过混凝土的极限抗拉强度,形成内部(微)裂缝和表面裂缝。但由于日照、昼夜温差、雨雪等外界环境变化复杂,有限元很难准确模拟,大体积混凝土的温度应力可采用实测温度进行计算。依据 JTS 202-1-2010《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程》中混凝土的温度应力计算公式如下。

(1) 表层拉应力:

$$\sigma_s(t) = \frac{\alpha}{2} \times E(t) \times \Delta T_{nb} \times K_p$$

式中: α 为混凝土线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$); $E(t) = E_0(1 - e^{-0.09t})$ 为龄期 t 时混凝土的弹性模量, E_0 为 28 d 混凝土弹性模量; ΔT_{nb} 为 t 时刻的混凝土里表温

差; K_p 为混凝土徐变引起的应力松弛系数,通过试验确定,无试验资料时,可取 0.5。

(2) 里层最大拉应力:

$$\sigma_{c\max} = \frac{\alpha}{1 - \mu} \times E'_0 \times K_p \times R \times (T_{\max} - T_w)$$

式中: μ 为混凝土的泊松比,此处取 1/6; E'_0 为混凝土内部达到(准)稳定温度龄期时的弹性模量 (MPa); R 为混凝土的基础约束系数; T_{\max} 为混凝土内部最高温度; T_w 为混凝土浇筑体(准)稳定温度 ($^\circ\text{C}$)。

依据上述公式和实测数据得到混凝土应力随时间的变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可知:养护期间襄阳庞公大桥锚碇混凝土外表面和混凝土内部产生的拉应力并不大,表面应力随着时间的增加逐渐增加,但是最大拉应力不超过 1 MPa,无开裂风险。内部拉应力在 5、6 d 时开始减小,此时混凝土内部温度趋于稳定,温度应力逐渐减小。

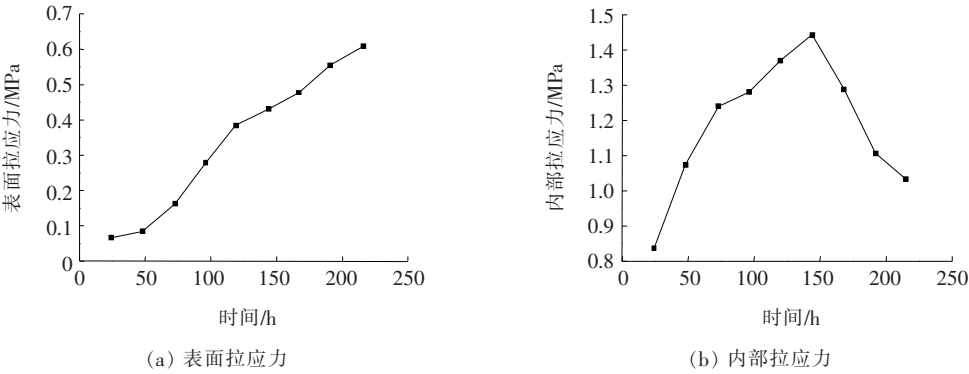


图6 混凝土拉应力

3 缩短养护时间的水化热分析

大体积混凝土养护时间一般不少于7 d,混凝土浇筑体积较大情况下养护时间应该为10 d或更久。在襄阳庞公大桥锚碇浇筑过程中根据实际分析结果和工

期调整需求,在浇筑完前3层后,后续各层混凝土浇筑龄期调整为5 d。

3.1 第3层填芯混凝土温度变化

第3层填芯混凝土主要位置温度时程曲线见图7、8。

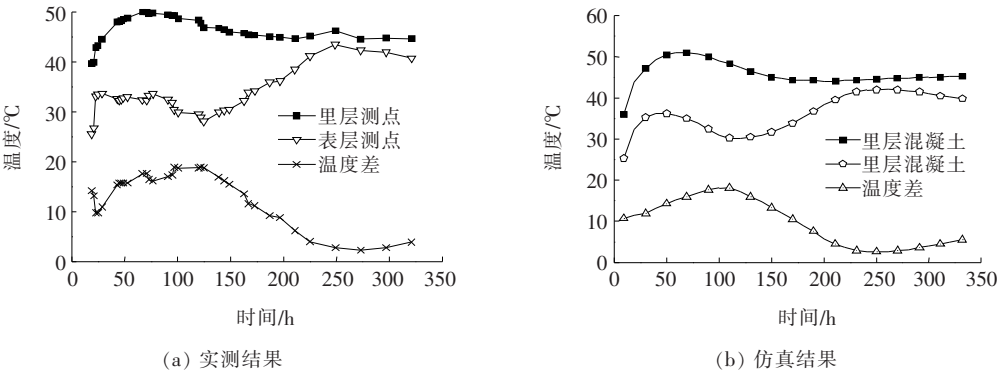


图7 中心测点温度时程变化(第3层)

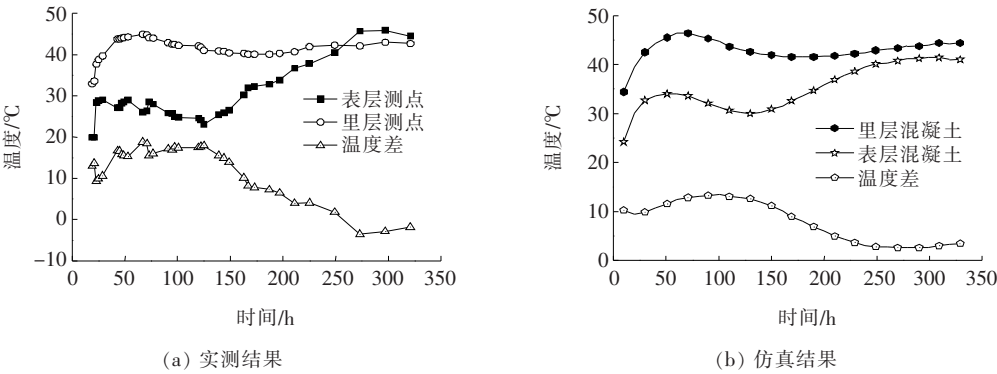


图8 边缘测点温度时程变化(第3层)

由图7、8可以看出:无论中心位置还是边缘位置,里层混凝土实测和仿真的温度变化趋势一致。但在浇筑初期,表层测点的实测温度与仿真结果存在明显差异,这主要是由于表层测点实测值对外界环境变化敏感,而有限元分析时将表层对流边界条件设置为固定

值,无法准确模拟表层对流边界变化所致。第3层填芯混凝土表层温度在第6 d开始明显上升,这是由于第4层填芯混凝土浇筑后产生的水化热传到第3层填芯所致。但第3层填芯里层对第4层填芯的“加热”作用不敏感,仅有轻微的升温现象。这是由于第4层填

芯浇筑后,里层冷却水管停止通水,而自身的水化反应已完成,故温度变化相对恒定。

3.2 第 4 层填芯混凝土的温度变化

为防止第 5 层填芯混凝土浇筑后对第 4 层填芯也

出现上述“加热”作用,实际施工时在改变浇筑层厚的同时,延长了第 4 层填芯中冷却水的流动时间。第 4 层填芯混凝土厚度为 2 m。第 5 层填芯混凝土浇筑后第 4 层填芯的温度变化见图 9、10。

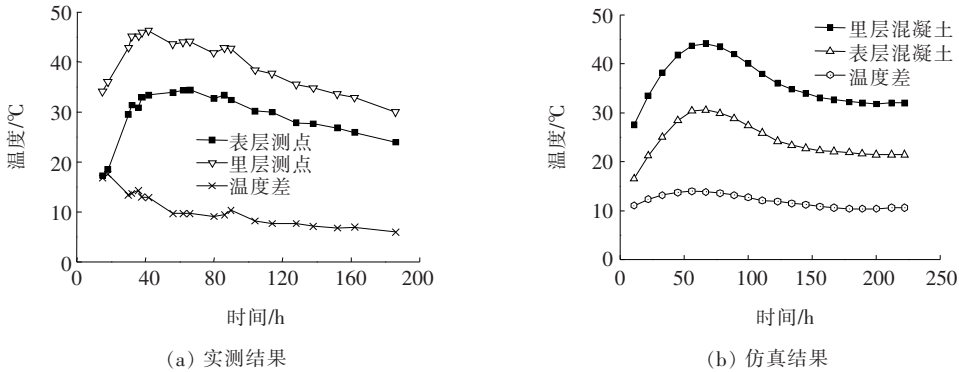


图 9 中心测点温度时程变化(第 4 层)

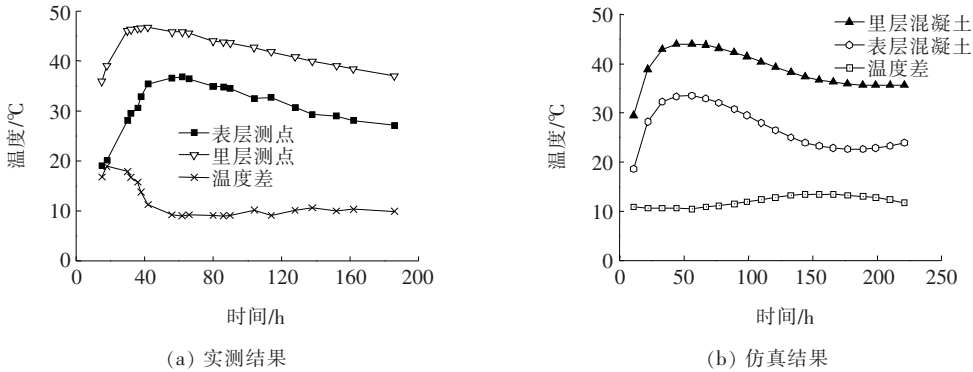


图 10 边缘测点温度变化(第 4 层)

由图 9、10 可知:由于第 4 层填芯混凝土仅 2 m 厚,里层测点温度峰值为 46 °C,比第 3 层填芯里层测点温度峰值下降 4 °C,说明混凝土层浇筑厚度是控制大体积混凝土浇筑水化热的关键因素,合理的浇筑层厚能有效控制混凝土里表温差。

另外,从实际监测结果看,虽然缩短了养护时间,但没有出现第 3 层填芯的“加热”升温现象。

图 11 为第 4 层填芯的内部应力变化曲线。由图 11 可以看出:第 4 层填芯内部混凝土拉应力明显小于第 3 层填芯内部拉应力值[图 6(b)],无开裂风险。说明缩短养护时间后的温控效果良好。

4 结论

针对襄阳庞公大桥锚碇的实际施工要求开展大体积混凝土浇筑水化热分析,得到如下结论:

(1) 大体积混凝土浇筑时表层存在由中心向边缘

较明显的温度梯度,施工时应做好表层覆盖等养护措施。

(2) 混凝土浇筑层厚是控制大体积混凝土内部温度峰值的关键因素,实际施工时应合理分层。

(3) 混凝土养护龄期可缩短到 5 d 左右,但必须满足层厚、通水时间等工艺要求,防止出现后浇混凝土层对先浇混凝土层的“加热”现象。

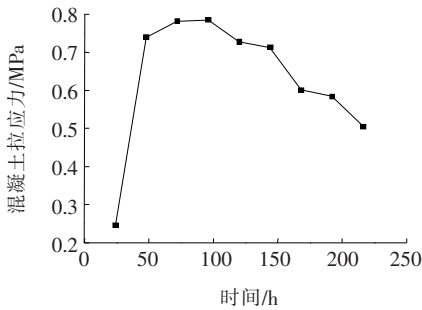


图 11 第 4 层填芯内部混凝土应力变化曲线

异形钢单缝式和模数式伸缩缝损伤等级 划分及养护对策

刘朵¹,黄青松²,江流声³,张建东^{1,3}

(1. 苏交科集团股份有限公司,江苏 南京 211112;2. 江苏宿淮盐高速公路管理有限公司;3. 南京工业大学)

摘要:通过调研某省高速公路桥梁伸缩缝的使用情况,针对量大面广的异形钢单缝式伸缩缝和模数式伸缩缝,分析了其常见的损伤类别及其产生的原因;并考虑高速公路的养护环境特点,从一线养护人员的可操作性和便捷性出发,对混凝土破损、橡胶条损坏、缝隙宽度异常、支撑系统损伤、位移控制系统失效和中梁型钢变形或断裂等典型病害,对其损伤程度进行了等级划分,规定了相应的量化评价指标,并提出了对应的养护措施和维修方法。

关键词:伸缩缝;病害;损伤等级;量化指标;养护对策

伸缩缝在桥梁结构中直接承受车轮荷载的反复冲击作用,长期暴露在空气中,使用环境比较恶劣,是桥梁结构最易遭到破坏而又最难修补的部位,不仅给车辆的行驶安全带来了一定的隐患,同时还会影响到桥梁本身的结构安全性和使用寿命。目前中国尚没有专门针对公路桥梁伸缩缝养护的行业规范或技术标准,仅在JTG H11—2004《公路桥涵养护规范》中对伸缩缝的病害进行了定性描述。因此,对桥梁伸缩缝损伤程度的判断受个人主观因素的影响较为严重。而科学合理的、具有可操作性的养护对策应基于对结构损伤的正确评估,并结合现场的养护条件而确定。

该文通过调研某省高速公路桥梁伸缩缝的使用情况,针对异形钢单缝式伸缩缝和模数式伸缩缝,分析其常见的损伤类别及产生的原因,并考虑高速公路的养护环境特点,从一线养护人员的角度出发对伸缩缝的

损伤等级进行划分,提出相应的养护对策,为高速公路桥梁伸缩缝更加科学、高效的养护工作奠定基础。

1 常见损伤类别及成因分析

调研了某省高速公路桥梁管理系统中的23 430条伸缩缝,其中异形钢单缝式伸缩缝和模数式伸缩缝(图1、2)占比超过了80%(表1),是目前最常使用的伸缩缝类型。

在调研的23 430条伸缩缝中,出现损伤的伸缩缝共计13 118条,损伤率达到了56%。以伸缩缝构件系统为单位将高速公路伸缩缝损伤分为混凝土破损、橡胶条破损和型钢变形或断裂3种,当然也存在部分数据未标明或记录不清的病害,统一归为不明病害类型,具体统计数据如表2所示。

参考文献:

- [1] GB 5049G—2009 大体积混凝土施工规范[S].
- [2] 刘宁,刘光庭.大体积混凝土结构随机温度徐变应力计算方法研究[J].力学学报,1997(2).
- [3] 刘继,周勇军,杨勃,等.连续刚构桥承台水化热有限元分析与控制[J].中外公路,2017(4).
- [4] 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(5).
- [5] 孙金,冯小青,唐焱,等.高温沥青摊铺时钢—混叠合梁桥温度场有限元分析[J].中外公路,2018(3).

- [6] 盛焰正,刘国坤,赵海军.单箱多室混凝土箱梁结构的温度场预测[J].中外公路,2018(4).
- [7] 朱伯芳.混凝土绝热温升的新计算模型与反分析[J].水利发电,2003(4).
- [8] 龚剑,李宏伟.大体积混凝土施工中的裂缝控制[J].施工技术,2012(6).
- [9] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [10] GB 50496—2009 大体积混凝土施工规范[S].
- [11] JTS 202—1—2010 水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规程[S].