

大体积混凝土温度裂缝形成机理与防控技术

侯军

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21101

[摘要] 大体积混凝土温度裂缝是由水化热释控失衡、温-力场耦合、内外约束叠加共同造成的,直接影响结构的安全和耐久性。研究确定出材料、结构、施工、环境这四个主要的致裂因子,并且创建起源头低热调控、过程散热控制、全域稳温养护、智能动态预警的全周期防控体系,可以有效地减少温升、均化温度梯度、消除约束应力,遏制裂缝萌生和扩展,给工程施工提供实际操作的技术支持。

[关键词] 大体积混凝土; 温度裂缝; 水化热; 温-力耦合

中图分类号: TV331 **文献标识码:** A

Formation Mechanism and Prevention Technology of Temperature Cracks in Mass Concrete

Jun Hou

China Power Construction Group Kunming Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] Temperature cracks in large-volume concrete are caused by a combination of factors, including imbalances in hydration heat release, temperature-force field coupling, and the superposition of internal and external constraints, directly affecting the safety and durability of the structure. This study identifies four main cracking factors: materials, structure, construction, and environment. Furthermore, a full-cycle prevention and control system is established, encompassing low-heat regulation at the source, process heat dissipation control, comprehensive temperature-stable curing, and intelligent dynamic early warning. This system can effectively reduce temperature rise, homogenize temperature gradients, eliminate constraint stresses, and inhibit crack initiation and propagation, providing practical technical support for engineering construction.

[Key words] Mass concrete; temperature cracks; heat of hydration; thermo-mechanical coupling

引言

大体积混凝土水化热积聚容易造成内外温差,受约束之后产生拉应力引发温度裂缝,降低结构的整体性和服役寿命。现有的研究大多只关注单一的防控措施,对于热、力、约束三者之间的耦合机理分析不够。本文从裂缝演化机理出发,确定致裂因素,建立全过程精准控制的预防体系,解决工程温度控制防裂的主要难题。

1 温度裂缝热-力-约束耦合形成机理

大体积混凝土温度裂缝不是单个因素造成的,而是水化热释控失衡、温-力场耦合演化、内外约束叠加三者共同作用的结果,三者遵循温升畸变→应力超限→裂缝延展的递进逻辑,形成完整的裂缝演化链条。

1.1 水化热释控失衡致温升畸变

水泥水化反应是温度裂缝产生的能量来源,水泥水化放热特性同结构散热条件的不匹配,造成混凝土内部温升异常。水泥矿物组分中硅酸三钙(C_3S)、铝酸三钙(C_3A)是主要的放热矿物,它们和水反应时,单位质量水泥的总水化热可以达到300~

500J/g,水化反应初期放热速率比后期快得多,使混凝土内部温度迅速升高^[1]。

大体积混凝土的导热系数只有1.5~2.5W/(m·K),热量传递效率很低,截面厚造成内部热量不能迅速通过表层散发出去,产生中心高温区、表层低温区的非均匀温度场,内部温度可以超过70℃。水化热释控失衡造成的温升畸变,表现为温度峰值集中、温度梯度非线性分布的特点,沿截面厚度出现陡降温度曲线,为温度应力产生创造条件。

1.2 温-力场耦合诱生应力超限

温度场和应力场的动态耦合,就是把水化热温升变成结构拉应力的关键部分,二者的耦合演化遵循升温压应力、降温拉应力的应力转换规律。升温阶段,混凝土内部高温区产生膨胀变形,表层低温区变形量小,内部膨胀受表层约束产生压应力,此时混凝土弹性模量低,徐变效应可以消解部分压应力,开裂风险小。

降温阶段,水化反应趋于平缓,内部热量通过表层不断散发出去,混凝土整体进入收缩阶段,表层收缩速度比内部大,内部

核心区对表层收缩有较强的约束作用,拉应力逐渐取代压应力成为主要的应力。混凝土弹性模量随着龄期的增长而增大,浇筑7d弹性模量可达 5×10^4 MPa,后期刚度提高后,相同温差产生的拉应力比早期高2~3倍,徐变松弛效应大大降低。温度应力的计算采用热弹性理论,即,式中为龄期弹性模量,为线膨胀系数,为内外温差,为约束系数,为泊松比^[2]。当拉应力超过混凝土同期抗拉强度(早期1.5~2.0 MPa)的时候,混凝土内部就会产生微裂纹,温-力场耦合破坏了结构的应力平衡,导致裂缝萌生。

1.3 内外约束叠加促裂缝延展

约束效应是温度裂缝由微裂纹发展成宏观裂缝、由表面裂缝发展成贯穿裂缝的主要原因,外部约束和内部约束的共同作用使结构的拉应力不断增大,裂缝无法逆转地扩展。外部约束是由基岩、先浇混凝土、基础结构对新浇混凝土变形的限制所引起的,约束系数在0.4到0.8之间,基础刚度越大、接触面积越大,约束效应就越强。

内部约束为混凝土自约束效应,是由截面温度不均匀引起的,表层混凝土收缩变形受到内部膨胀变形的限制,表层产生集中拉应力,是表面裂缝产生的直接原因。结构转角、孔洞、截面突变处的应力集中程度较高,是裂缝容易产生的地方^[3]。内外约束叠加之后,微裂纹尖端应力不断累积,沿拉应力主方向慢慢扩展,表面裂缝向内侧发展,最后出现贯穿全截面的裂缝,破坏结构的整体性。

2 温度裂缝多维度致裂关键因子

温度裂缝萌生扩展受到材料、结构、施工、环境这四个因素共同影响,决定着裂缝发展到什么程度。

2.1 材料组分定水化放热特性

材料组分是水化热调控的核心,水泥品种决定放热速率,低热水泥7d水化热 ≤ 270 kJ/kg,水化放热总量更小。骨料选用热导率大、线膨胀系数小的连续级配碎石,可以减少胶凝材料用量。外加剂复配调节水化进程,水胶比控制在0.40~0.45之间,胶凝材料总量控制在280~320 kg/m³,达到结构强度和水化热释放水平的平衡。

2.2 结构形制限变形自由程度

结构形制限限制了变形自由度,截面越厚散热效果越差,内外温差就越大。狭长构件端部约束作用明显,容易产生贯穿裂缝,截面突变处应力集中现象比较严重。后浇带、诱导缝、滑动层可以释放温度收缩应力,削弱约束作用^[4]。表层用细筋密布配筋,配筋率控制在0.3%~0.5%,分散应力,限制裂缝宽度,提高结构抗裂能力。

2.3 施工工艺控散热均衡状态

施工工艺影响散热均衡性,按照大体积混凝土施工标准(GB 50496-2018)要求,混凝土入模温度不大于28℃,夏季施工温度不大于26℃。分层浇筑层厚控制在1.5~2m,延长单层混凝土散热时间,防止热量集中积聚。振捣采用梅花形布点,消除内部孔隙薄弱区。浇筑完成后24到48小时开始通水,进水温度控制在15到20℃,主动带走内部水化热。拆模要匹配温控要求,侧模24到4

8小时拆除,底模达到设计强度的75%以后再拆除,防止过早拆模造成表面裂缝。

2.4 环境波动剧温度梯度差异

环境温湿度、风速、季节变化等波动因素,直接加大混凝土温度梯度的差别,增大开裂的风险。昼夜温差大于1℃的时候,表层温度周期性波动就会形成交变应力。风速大于4m/s的时候,表层对流散热速率明显提高,内外温差迅速增大^[5]。环境相对湿度小于75%时,干燥收缩和温度收缩叠加,总收缩率大于混凝土极限拉伸应变的0.015mm/m,产生干缩-温度复合裂缝。夏季高温会使混凝土内部温度升高,冬季低温会使内外温差增大,并且使早期强度增长缓慢,地下工程施工通风、降水等作业也会引起局部湿度的突然变化,从而加大裂缝的风险。

3 全周期精准防控技术体系构建

根据热-力-约束耦合机理和多维致裂因子来建立源头低热调控、过程散热控制、全域稳温养护、智能动态预警四位一体的全周期精准防控体系,依靠《大体积混凝土施工标准》(GB 50496-2018)落地实操工艺,用量化指标和标准化工序实现从“被动治裂”到“主动防裂”的技术升级。

3.1 源头低热调控: 材性优化降热控温

源头低热调控以胶凝材料、骨料、外加剂的标准化选择为手段,从水化热释放源头减少温升峰值,均化初始温度场分布。水泥优先采用符合GB/T200-2025中低热硅酸盐水泥的低热水泥,42.5级低热水泥7d水化热 ≤ 250 kJ/kg,控制单位体积水泥用量 ≤ 200 kg/m³,从放热源头降低热量积聚幅度。矿物掺合料采用粉煤灰和矿渣粉双掺体系,粉煤灰掺量占胶凝材料总量的30%~50%,矿渣粉掺量为25%~40%,依靠火山灰效应稀释水泥活性组分,推迟水化放热峰值出现的时间^[6]。

骨料选用符合《普通混凝土用砂石质量标准》(JGJ52),粗骨料为5~40mm连续级配碎石,含泥量 $\leq 1\%$,细骨料为细度模数2.6~3.0的中粗砂,含泥量 $\leq 3\%$,大粒径骨料能减少胶凝材料用量,提高结构热传导效率。外加剂为聚羧酸高效减水剂、缓凝剂、膨胀剂三者组成的复配体系,减水剂掺量1.0%~1.2%,水胶比控制在0.40~0.45。缓凝剂掺量为0.02%~0.05%,延长混凝土初凝时间。膨胀剂掺量6%~8%,补偿硬化期收缩变形。

对骨料堆场设置遮阳棚、喷淋冷水降温,使骨料堆放温度不大于15℃。拌和水用冰水混合液,温度不超过10℃。水泥、掺合料储存于阴凉密闭库房,避免暴晒升温。按照GB50496-2018的要求,把混凝土入模温度控制在28℃以内,夏季高温施工 ≤ 26 ℃,从拌合环节切断外部热量输入,减小水化热温升基数。

3.2 过程散热情况: 工法革新匀温减应

过程散热控制主要依靠浇筑、分仓、冷却、减约束工法来完成,改善热量传导路径,消除约束应力,均匀截面温度分布。浇筑采用分层分块、斜面推进的方式,单次浇筑层厚1.5~2m,层间间隔时间不大于混凝土初凝时间,防止冷缝出现,扩大自然散热面积。厚大构件用跳仓法施工,单仓平面尺寸不大于40m×40m,相邻仓间隔浇筑时间不小于7d,按照《超长混凝土结构

无缝施工标准》(JGJ/T492-2023)释放早期收缩应力,代替部分后浇带。

后浇带和诱导缝按标准位置布置,后浇带设在低应力区,宽度0.8~1m,间距20~30m,两侧混凝土龄期 ≥ 42 d后,用补偿收缩混凝土浇筑。诱导缝深度是截面厚度的1/5到1/4,使裂缝有方向性。基础面设置滑动层,用沥青砂浆配合0.3mm聚乙烯薄膜双层铺设,使界面摩擦系数降低到0.3以下,减弱基岩、垫层对新浇混凝土的外部约束。

预埋冷却水管建立内部强制散热系统,采用DN25~50镀锌钢管或PE管,水平间距1.5~2m、竖向间距1.5m,底层加密到1.0m,形成均匀的换热网络。混凝土浇筑完成24~48h后开始通水,进水温度控制在15~20℃,进出水温差不大于3℃,严格控制降温速率 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{d}$,连续冷却15~30d,使混凝土内部最高温度保持在70℃以下,防止内部过热引起应力超限。

3.3 全域稳温养护: 覆护工艺稳温防缩

全域稳温养护以保温保湿覆护、梯度拆模过渡为手段,控制温度梯度,补偿收缩变形,防止表层温度突然变化。混凝土浇筑完成12h后开始养护,采用塑料薄膜和保温材料双层覆护工艺,塑料薄膜紧密贴在混凝土表面密封保湿,外层铺50~100mm厚岩棉被或珍珠岩保温板,搭接宽度不小于200mm,边角处加厚覆盖,形成密闭温湿度防护体系。

养护过程中执行GB50496-2018温控限值,控制混凝土内外温差 $\leq 25^\circ\text{C}$,表面与环境温差 $\leq 20^\circ\text{C}$,高温时段每2h喷淋补水一次,每日洒水4~6次,普通结构养护周期 ≥ 14 d,厚大构件、应力集中部位延长至21d,保证表面持续湿润,防止干燥收缩和温度收缩叠加开裂^[7]。

拆模实行梯度过渡养护,侧模拆除之后立刻恢复保温覆护,实时观测内部与环境温差,当温差不大于5℃,降温速率不大于2℃/d时,分层逐层去除保温层,严禁一次全部拆除,防止表层因为环境温度突变引发热冲击裂缝。养护全过程根据温度监测数据来确定覆护厚度和洒水频率,使温度场保持均匀稳定。

3.4 智能动态预警: 监测调控阻裂止扩

智能动态预警依靠多传感器协同监测、阈值联动预警、闭环调控这些特点,可以及时地对裂缝风险进行发现并加以主动的处理。在混凝土截面厚度方向上布置上、中、下三层PT100铂电阻温度传感器,水平间距不大于6m,实时采集芯部、表层、环境温度,数据采集频率为1次/h,建立三维温度场实时监测网络。

设定规范的预警阈值,当混凝土内部最高温度大于等于70℃、内外温差大于等于25℃、降温速率大于等于2℃/d的时候,系统会发出声光报警并推送调控指令。配套安装振弦式应变计来监测结构应力,用裂缝宽度仪实时观测裂缝开展宽度,用分布式光纤传感器完成裂缝空间定位,所有的监测数据无线传输到云平台,自动生成温度-时间、应力-时间演化曲线,完成风险的定量分析。

预警触发之后进入闭环调控,内部超温时增大冷却水流速、减小进水温度。内外温差超限时加厚保温层。微裂纹萌生时用环氧树脂低压灌注封闭,限制裂缝扩展。采取监测、分析、预警、调控全流程自动化控制手段,提早察觉温度裂缝,立即开展处置工作,阻止断裂缝的蔓延路径,保障结构的完整性以及耐久性。

4 结论

大体积混凝土温度裂缝是由热、力、约束三者共同作用产生的,材料、结构、施工、环境因素一起影响裂缝的发展。全周期精准防控体系可以实现水化热削减、温度场均化、约束应力消解,把核心温控指标控制在安全范围内,从源头上防止裂缝的发生。该体系可以适应各种工程场合,可以明显改善结构的耐久性以及施工质量。

参考文献

- [1] 尤月华,李雷,刘宝金,等.大体积混凝土养护温度与裂缝控制研究[J].科技资讯,2026,24(06):133-136.
- [2] 卫雪剑.大体积混凝土施工期温度裂缝智能控制研究[J].陶瓷,2026,(02):183-185.
- [3] 杨婕.桥梁承台大体积混凝土施工技术与温度裂缝控制研究[J].工程技术研究,2026,11(01):54-56.
- [4] 邱沈和.大体积混凝土温度裂缝形成机理及防治措施[J].上海建材,2025,(05):125-128+132.
- [5] 张恒隆.大体积混凝土温度裂缝机理与防治措施[J].四川水泥,2026,(01):140-142.
- [6] 腾翔.建筑工程大体积混凝土裂缝与温度控制技术[J].四川水泥,2026,(03):110-111+114.
- [7] 杜佳芮,张晓艺,王建佑,等.地铁大体积混凝土温度裂缝控制技术[J].中国水泥,2026,(01):118-120.

作者简介:

侯军(1984--),男,汉族,河南林州人,本科,中级职称,职务:项目经理,研究方向:建筑材料,混凝土工程,裂缝防控技术。