

刘伟佳, 樊启祥, 李庆斌, 等. 不同温度对混凝土坯层间劈裂抗拉强度影响试验研究[J]. 水利水电技术(中英文) 2021, 52(2): 200-206.

LIU Weijia, FAN Qixiang, LI Qingbin, et al. Experimental research on the effect of different temperatures on the interlayer splitting tensile strength of concrete[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(2): 200-206.

# 不同温度对混凝土坯层间劈裂抗拉强度影响试验研究

刘伟佳<sup>1</sup>, 樊启祥<sup>2</sup>, 李庆斌<sup>1</sup>, 杨宁<sup>2</sup>, 乔雨<sup>2</sup>, 胡昱<sup>1</sup>

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国三峡建设管理有限公司, 四川成都 610017)

**摘要:** 研究不同环境温度作用下混凝土坯层间性能的变化规律, 对预测施工风险及施工过程中准确控制坯层结合质量具有重要意义。通过测定低热水泥混凝土在不同温度作用下坯层间的劈裂抗拉强度及坯层覆盖时下层混凝土的含水量和贯入阻力, 对不同温度作用下低热水泥混凝土坯层间性能劣化机理进行了分析。结果表明: 随着温度的升高, 低热水泥混凝土的贯入阻力不断增大, 表层含水量及劈裂抗拉强度逐渐降低。这主要是与温度影响着坯层间混凝土的水化速率、最终水化程度及上下层骨料间的嵌入程度有关。此外, 引入了成熟度理论, 建立了基于等效龄期的混凝土坯层间劈裂抗拉强度预测模型, 根据该模型可以准确预测混凝土坯层间劈裂抗拉强度, 并对坯层间结合质量进行实时预警和控制。

**关键词:** 低热水泥混凝土; 环境温度; 贯入阻力; 含水量; 坯层间劈裂抗拉强度; 等效龄期

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.02.022

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)02-0200-07



## Experimental research on the effect of different temperatures on the interlayer splitting tensile strength of concrete

LIU Weijia<sup>1</sup>, FAN Qixiang<sup>2</sup>, LI Qingbin<sup>1</sup>, YANG Ning<sup>2</sup>, QIAO Yu<sup>2</sup>, HU Yu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Three Gorges Projects Development Co., Ltd, Chengdu 610017, Sichuan, China)

**Abstract:** It is of great significance to study the change rule of the interlayer performance of concrete under the action of different ambient temperature for the prediction of construction risks and accurately controlling the quality of the interlayer bonding during construction. By measuring the interlayer splitting tensile strength of the low-heat cement concrete under different temperature, and the water content and penetration resistance of the lower concrete when the first concrete layer is covered, the interlayer performance deterioration mechanism of low-heat cement concrete under different environmental factors is analyzed. The results show

收稿日期: 2020-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(51979145, 51839007)

作者简介: 刘伟佳(1992—), 男, 硕士, 研究方向为水工混凝土材料性能。E-mail: 1376442160@qq.com

通信作者: 胡昱(1976—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为混凝土、岩石材料真实性能等。E-mail: yu-hu@mail.tsinghua.edu.cn

that as the increase of temperature, the penetration resistance of the low-heat cement concrete increases continuously, and the surface water content and splitting tensile strength decrease gradually. This is mainly related to the influence of temperature on the hydration rate of interlayer concrete, the final hydration degree and the embedding degree between upper and lower aggregates. In addition, the maturity theory is introduced, and a model for predicting the interlayer splitting tensile strength of concrete based on equivalent age is established. According to this model, the interlayer splitting tensile strength of concrete can be accurately predicted, and the interlayer bonding quality can be forewarned and controlled in real time.

**Keywords:** low-heat cement concrete; ambient temperature; penetration resistance; water content; interlayer splitting tensile strength; equivalent age

## 0 引言

近年来,中国在金沙江流域修建了多座 300 m 级特高混凝土拱坝,如乌东德(277 m)、白鹤滩(279 m)和溪洛渡拱坝(285.5 m)<sup>[1]</sup>。其中在建的乌东德和白鹤滩水电站地处干热河谷气候区域,坝区大风日数多,干热季多发,且全坝使用低热水泥常态混凝土。大坝混凝土作为一种大体积混凝土,其施工多采用分层浇筑方式进行。若在施工期间出现大风、干热耦合工况,混凝土浇筑过程中会出现泌水少、水分蒸发量大及初凝时间缩短等现象。受浇筑面积、施工效率、缆机运行效率及突发事件的影响,坯层覆盖时间将会有不同程度的延长。坯层长时间暴露在恶劣的施工环境中将会引发混凝土坯层间结合性态弱化的问题。坯层间的结合面作为可能出现问题的薄弱环节,会影响坝体的安全性、稳定性和耐久性<sup>[2-3]</sup>。对碾压混凝土的研究结果表明,层间间隔时间显著影响着混凝土的抗压强度<sup>[4]</sup>、坯层间抗剪强度<sup>[5-7]</sup>、坯层间抗拉强度<sup>[5]</sup>、坯层间劈裂抗拉强度<sup>[8]</sup>、坯层间相对渗透性系数<sup>[4,7-9]</sup>及层面微结构<sup>[7,9]</sup>。层间间隔时间越长,上述力学性能越低,相对渗透性系数越大,层面微结构劣化程度越高。

除坯层间间隔时间外,施工时坯层表面的温度、相对湿度及风速也是影响混凝土坯层间性能的重要因素。RIBEIRO 等<sup>[10]</sup>研究了坯层表面的相对湿度对碾压混凝土坯层间抗拉强度的影响,结果表明:当混凝土成熟度一定时,空气相对湿度越大,坯层间抗拉强度越大,但湿度的影响随着成熟度的增大而减弱。许文彬等<sup>[11]</sup>以我国乌东德大坝水电站所处的干热河谷气候为依据进行研究发现,干燥、多风环境会使下层混凝土表面蒸发失水,导致下层含水量明显减少、层面干燥,进而造成层间劈裂抗拉强度迅速下降。同时,有关研究<sup>[12]</sup>指出,所处环境不同,下层混凝土表层水分状态的变化也会有所差异,这将直接影响表层的水化程度和和易性,进而显著影响分层浇筑混

土的层间性能。然而,目前关于混凝土坯层间性能的影响研究多集中在碾压混凝土方面,对于低热水泥常态混凝土的研究较少涉及,并且关于温度对坯层间结合性能的影响并未给出定量的分析和比较,有待进一步研究。

对于混凝土强度预测的研究,目前主要采用成熟度理论。成熟度概念最早由 NURES<sup>[13]</sup>和 SAUL<sup>[14]</sup>提出,根据这一概念可以建立温度-时间历程与混凝土强度之间的关系。HANSEN 和 PEDERSEN 等人<sup>[15]</sup>从水泥水化角度出发,提出采用等效龄期来评价混凝土强度。他们认为,即使养护温度不同,只要具有相同的等效龄期,则混凝土具有相同的强度。目前,成熟度理论在预测混凝土力学性能方面有较多的应用,包括抗压强度<sup>[16-18]</sup>、劈裂抗拉强度和弹性模量<sup>[19-20]</sup>等。然而这些研究多数局限于混凝土整体性能的评价,而对于层间性能的预测研究鲜有涉及。

本文以金沙江流域乌东德大坝的工程环境(坝区年平均气温 21.7 °C,夏季最高气温可达 40 °C 以上;全年湿度小于 40%的天数约为 135 d)为参考,将温度作为主要变量,在试验室内开展了不同温度对低热水泥混凝土坯层间劈裂抗拉强度影响的试验研究。同时对坯层覆盖时下层混凝土的水分含量及贯入阻力进行观测,结合坯层间混凝土的嵌入程度,进一步揭示了在温度作用下低热水泥混凝土坯层间性能劣化的机理,并且建立了坯层覆盖时下层混凝土的等效龄期与坯层间劈裂抗拉强度的关系。

## 1 试验过程

### 1.1 试验材料及配合比

试验所采用的混凝土配比如表 1 所列,材料参数如下。

(1) 水泥:四川嘉华 P·LH 42.5 低热硅酸盐水泥,其物理特性如表 2 所列。低热水泥 3 d、7 d 和 28 d 水化热分别为 179 kJ/kg、213 kJ/kg 和 266 kJ/kg。

(2) 粉煤灰: 曲靖方园 F 类 I 级粉煤灰, 主要性能如表 3 所列。表 3 中粉煤灰细度为 8.2% 是指经过 45 μm 方孔筛的筛余量为 8.2%。

(3) 骨料: 细骨料为机制砂, 细度模数 2.59, 表观密度 2 790 kg/m<sup>3</sup>, 堆积密度 1 670 kg/m<sup>3</sup>; 粗骨料粒径范围 5~20 mm, 表观密度 2 780 kg/m<sup>3</sup>。

(4) 减水剂: JM-II 缓凝 II 型高效减水剂, 减水率为 18.9%; 引气剂: GYQ 混凝土高效引气剂, 含气量约 4.3%。外加剂由江苏苏博特新材料有限公司生产。

表 1 混凝土的配合比 kg/m<sup>3</sup>  
Table 1 Mix proportion of concrete kg/m<sup>3</sup>

水	水泥	粉煤灰	砂	小石	减水剂	引气剂
133	173	93	711	1 320	1.596	0.079 8

表 2 P·LH 42.5 水泥的物理特性  
Table 2 Properties of P·LH 42.5 cement

密度/ g·cm <sup>-3</sup>	比表面积/ m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup>	安定性 (雷氏夹法)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		
			初凝	终凝	7 d	28 d	90 d
3.23	324	合格	216	279	20.9	47.2	69.8

表 3 粉煤灰物理特性  
Table 3 Properties of fly ash

密度/ g·cm <sup>-3</sup>	细度/%	含水量/ %	SO <sub>3</sub> /%	f-CaO/ %	碱含量/ %	烧失量/ %
2.35	8.2	0.2	0.57	0.15	1.26	3.79

## 1.2 试验内容

研究主要分为 3 部分:

(1) 不同温度条件下低热水泥混凝土湿筛试件表层水分含量变化研究。将混凝土湿筛后分别放入温度为 20 ℃、30 ℃、40 ℃ 的环境箱中进行含水量变化测试。

(2) 不同温度条件下低热水泥混凝土湿筛试件贯入阻力变化研究。将混凝土湿筛后分别放入温度为 20 ℃、30 ℃、40 ℃ 的环境箱中进行贯入阻力变化测试。

(3) 不同温度条件下低热水泥混凝土立方体试件坯层间劈裂抗拉强度试验。浇筑第一层混凝土后, 将试件分别置于温度为 20 ℃、30 ℃、40 ℃, 相对湿度为 30% 的环境箱中, 坯层间间隔 6 h 后进行第二层混凝土浇筑。所有试件浇筑完成后静置一天, 等混凝土凝固后进行拆模, 拆模后的试件放入标准养护条件下进行养护, 待龄期达到 14 d、28 d 时进行坯层间劈裂抗拉强度试验。

## 1.3 样品制备

(1) 贯入阻力的测试方法依据《水工混凝土试验

规程》(DL/T 5150—2017) 中混凝土拌合物凝结时间试验相关内容进行, 采用孔径为 5 mm 的方孔筛对按表 1 制备的混凝土拌合物进行湿筛, 将砂浆分别放入 3 只砂浆筒, 振捣密实后编号, 准备测试。含水量测试试件的制备方法与此相同。

(2) 用于测定劈裂抗拉强度的混凝土立方体试件的制备依据《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150—2017)。根据表 1 的配合比配制混凝土, 在分层浇筑模具中浇筑第一层混凝土, 在特定工况(试验内容第三条所述工况)下暴露 6 h 后浇筑第二层混凝土。试验采用 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体模具, 该模具两侧挡板可拆卸, 可实现混凝土分层浇筑。

## 1.4 测试设备及方法

不同温度下砂浆表层含水量、贯入阻力测试及劈裂试件坯层表面温湿度控制均在清华大学自主研发的步入式环境控制箱中进行, 该系统可实现现场环境模拟以及环境因素变化自主控制。

(1) 表层含水量: 测试仪器为 TDR 150 便携式土壤水分速测仪, 探针长度 3.8 cm。为了和劈裂试件下层混凝土层面状态保持一致, 测试过程中试件不加盖, 不去泌水。每一时刻的测值均为 3 个不同位置测值的平均值。

(2) 贯入阻力: 测试采用 JYHC-AST 型全自动混凝土凝结时间测定仪, 测试过程中试件不加盖, 不去泌水。贯入阻力值取同一时刻三次测试的平均值。

(3) 劈裂抗拉强度: 试验依据《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150—2017) 进行。每组 3 个试件, 将试件置于压力试验机下压板的中心位置, 在上、下压板与试件之间放置垫条, 垫条放置方向与层面水平, 沿层面将试件劈开。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 表层含水量测定

图 1 显示了不同温度(20 ℃、30 ℃、40 ℃)下砂浆的表层含水量随时间的变化情况, 环境湿度 30%, 风速 0 m/s。随着温度的升高, 砂浆表层水分蒸发速率总体呈加快趋势。20 ℃ 时砂浆表层水分含量缓慢下降, 变化较为平稳; 30 ℃ 时砂浆表层水分含量下降速率加快; 40 ℃ 时砂浆表面出现泌水现象, 主要是由于高温导致砂浆内部水分快速向外迁移, 此阶段的泌水速率大于蒸发速率, 当内部水分不足以弥补表层的损失时, 表层含水量开始迅速下降<sup>[21]</sup>。坯层覆盖时, 20 ℃ 条件下坯层表层含水量较高(138 kg/m<sup>3</sup>), 30 ℃ 含水量最低(95 kg/m<sup>3</sup>), 由于前期泌水的影响,

40 °C时坯层表层含水量介于前两者之间(120 kg/m<sup>3</sup>)。

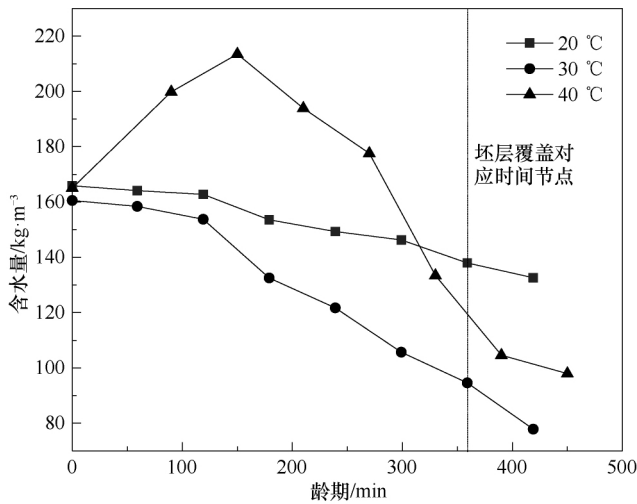


图1 不同温度条件下砂浆水分含量变化

Fig. 1 Variation of water content of mortar at different temperatures

## 2.2 贯入阻力测试

图2显示了不同温度(20 °C、30 °C、40 °C)条件下砂浆的贯入阻力随时间的变化情况,环境相对湿度为30%,风速为0 m/s。20 °C时砂浆贯入阻力增长较为缓慢;30 °C时砂浆贯入阻力在400 min之前变化趋势与20 °C时相同,400 min之后贯入阻力增长速率加快;40 °C时砂浆贯入阻力增长速率明显快于20 °C及30 °C。若以砂浆贯入阻力近似反应混凝土的贯入阻力,则坯层覆盖时,20 °C和30 °C条件下混凝土的贯入阻力相近,分别为2.8 MPa和3.7 MPa,40 °C条件下混凝土贯入阻力值为5.5 MPa。随着温度的升

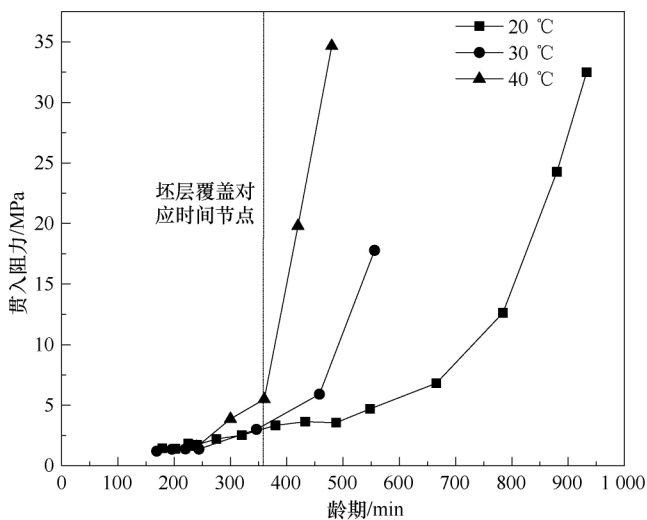


图2 不同温度条件下砂浆贯入阻力变化

Fig. 2 Variation of penetration resistance of mortar at different temperatures

高,坯层覆盖时混凝土贯入阻力值不断增大。

## 2.3 坯层间劈裂抗拉强度测试

本体及不同温度下龄期14 d和28 d时的混凝土劈裂抗拉强度如图3所示。含层面的混凝土坯层间劈裂抗拉强度均低于本体的劈裂抗拉强度,其中对于分层浇筑的混凝土,坯层间劈裂抗拉强度呈现出随着环境温度的升高而逐渐降低的趋势。以28 d龄期为例,此时本体劈裂抗拉强度为1.85 MPa,20 °C、30 °C和40 °C时坯层间劈拉强度相较于本体强度分别下降了21%、44%和56%,降至1.47 MPa、1.04 MPa和0.81 MPa。同时,比较龄期14 d和28 d时混凝土劈裂抗拉强度可以发现,本体及不同温度条件下混凝土劈裂抗拉强度均有不同程度的提高,如40 °C时混凝土坯层间劈裂抗拉强度提高幅度最大为119%,从0.37 MPa提高至0.81 MPa;30 °C时混凝土坯层间劈裂抗拉强度提高幅度最小为58%,从0.66 MPa提高至1.04 MPa。

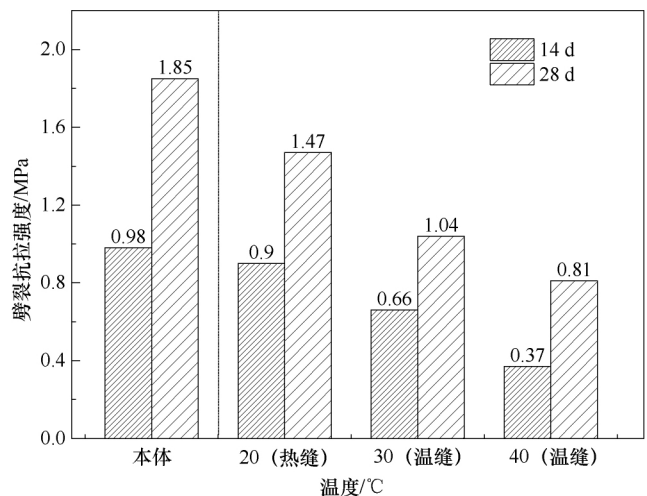


图3 不同温度条件下混凝土坯层间劈拉强度对比

Fig. 3 Comparison of interlayer splitting tensile strength of concrete at different temperatures

根据坯层覆盖时间与混凝土初终凝时间的关系可将层面状态分为热缝(初凝前)、温缝(初凝后终凝前)和冷缝(终凝后),如表4所列。层面状态与坯层间劈拉强度关系(见图3)表明:若在热缝阶段浇筑上层混凝土,则28 d龄期试件的坯层间劈拉强度可达本体强度的79%;若在下层混凝土处于温缝阶段浇筑上层混凝土,则坯层间劈拉强度只有本体强度的56%;若在下层混凝土接近冷缝时浇筑上层混凝土,坯层间劈拉强度只有本体强度的44%。随着层面状态的劣化,坯层间劈拉强度逐渐降低。由热缝时的劈拉强度与本体劈拉强度对比可以发现,仅仅将坯层间

表 4 坯层覆盖时混凝土含水量、贯入阻力与坯层间劈拉强度记录

Table 4 Record of concrete water content, penetration resistance and interlayer splitting tensile strength when the lower concrete is covered

温度 / °C	湿度 / %	间隔时间 / h	初凝时间 / h	终凝时间 / h	层面状态	坯层覆盖时含水量 / kg · m <sup>-3</sup>	坯层覆盖时贯入阻力 / MPa	龄期 / d	坯层间劈拉强度 / MPa
20	30%	6	7.0	15.8	热缝	138	2.8	14/28	0.90/1.47
30	30%	6	6.0	11.2	温缝	95	3.7	14/28	0.66/1.04
40	30%	6	4.9	7.8	温缝	120	5.5	14/28	0.37/0.81

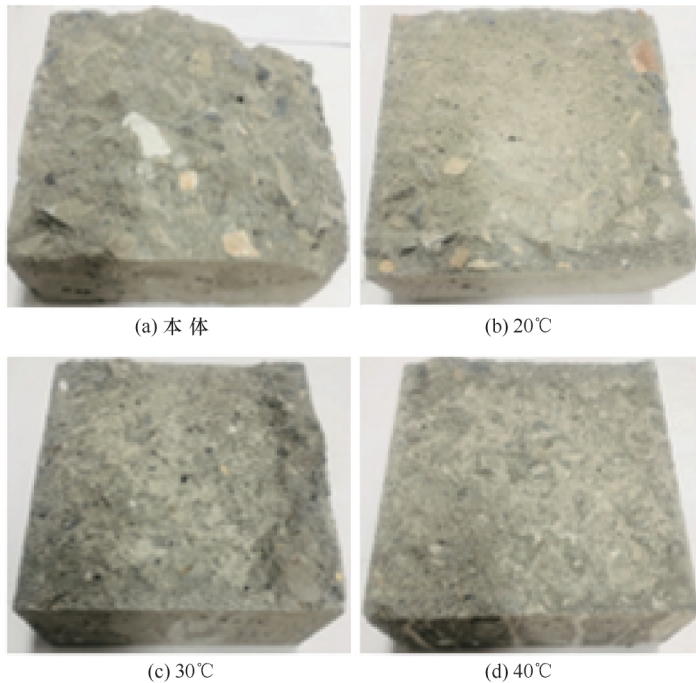


图 4 不同工况下混凝土坯层间破坏模式对比

Fig. 4 Comparison of concrete interlayer failure modes under different conditions

隔时间控制在初凝时间节点之前, 不足以使坯层间结合性能得到保证。已有的研究表明: 砂浆的细观晶体构架在初凝前就已经基本形成, 应以初凝时间的三分之一到二分之一作为坯层间间隔时间的控制指标<sup>[22]</sup>。

图 4 中, (a) 为本体的破坏面, 本体的骨料相互嵌入程度最高; (b) 为 20 °C 时的坯层间破坏面, 上下层之间骨料相互嵌合程度低于本体, 破坏面有许多碎骨料; (c) 为 30 °C 时的坯层间破坏面, 层面局部区域骨料有嵌入; (d) 为 40 °C 时的坯层间破坏面, 层面之间几乎没有骨料嵌入, 破坏面较为平整。

#### 2.4 机理分析

综合不同温度条件下坯层间劈裂抗拉强度、坯层间骨料的相互嵌入程度及坯层覆盖时下层混凝土的水分含量和贯入阻力来分析, 温度主要通过影响下层混凝土的水分含量及贯入阻力来影响坯层间劈裂抗拉强度。

环境温度从三个方面影响了坯层间劈裂抗拉强度的发展: (1) 温度升高造成水分快速蒸发, 增加了混凝土的总孔隙率, 在表层产生非常粗的孔隙结构<sup>[23]</sup>。在较低的温度下, 水化反应速率较低且溶解的离子在水化产物沉淀之前有足够的时间扩散到水泥基体中。在高温下, 水化产物生成速率大于扩散速率, 水化产物大部分集中在水泥颗粒附近, 使得表层混凝土有较高的孔隙率<sup>[24-25]</sup>。(2) 温度升高加快了早期水化速率, 表层会形成一层水化产物, 此部分水化产物会阻碍水分与水泥颗粒的接触, 坯层覆盖后抑制了水泥颗粒的进一步水化<sup>[26-27]</sup>。(3) 温度升高会使混凝土干燥失水, 胶体快速硬化形成凝聚结构(从图 2 的贯入阻力变化可以看出), 进一步降低了上下层骨料之间的相互嵌入程度(见图 4)。此外, 高温条件下(40 °C), 由于泌水速率大于蒸发速率, 坯层表面会产生一层浮浆, 此部分浮浆的水灰比较大, 坯层覆盖后会形成稀疏多孔的层间薄弱带<sup>[28]</sup>。

#### 2.5 基于等效龄期的坯层间劈拉强度预测模型

HANSEN 和 PEDERSEN 等<sup>[15]</sup>人从水泥水化角度出发, 认为混凝土成熟度与水化程度相关, 并根据 Arrhenius 方程(1)提出基于水化反应速率的成熟度方程(2)。不同温度下坯层覆盖时混凝土的等效龄期计算公式为

$$K_T = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

式中,  $K_T$  为反应速率常数;  $A$  为频率系数;  $E_a$  为表观活化能(kJ/mol), 当温度大于等于 20 °C 时,  $E_a = 33.5 \text{ kJ/mol}$ <sup>[15]</sup>;  $R$  为气体常数(8.314 J · mol<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>);  $T$  为热力学温度(K)。

$$t_e = \int_0^t \exp\left[\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2)$$

式中,  $t_e$  为等效龄期;  $T_r$  为 20 °C 时的绝对温度(293 K)。采用公式(2)可以将任意温度下混凝土坯层覆盖时间等效为参考温度(20 °C)下达到相同成熟度所需的时间。将温度 20 °C、30 °C、40 °C 及表观活

化能  $E_a$  带入式(2), 积分上限取坯层间隔时间, 可以得到坯层间隔 6 h 时的等效龄期  $t_e$  (见表 5)。

表 5 坯层覆盖时混凝土等效龄期

Table 5 Equivalent ages of concrete when the lower

layer is covered

温度/℃	湿度/%	风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	间隔 时间/h	坯层覆盖时 等效龄期/h	28 d 劈拉 强度/MPa	强度 系数
20	30	0	0	0.00	1.85(本体)	1
20	30	0	6	6.00	1.47	0.79
30	30	0	6	9.45	1.04	0.56
40	30	0	6	14.45	0.81	0.44

$$F/F_0 = A_s \quad (3)$$

式中,  $F$  为坯层间劈拉强度,  $F_0$  为本体强度, 定义坯层间强度与本体强度的比值为强度系数  $A_s$  [11]。

以 28 d 龄期混凝土劈裂抗拉强度试验数据为例, 由于本体没有层间间隔时间, 因此其等效龄期为 0, 强度系数为 1 (见表 5)。建立坯层覆盖时等效龄期与强度系数的关系曲线, 如图 5 所列。

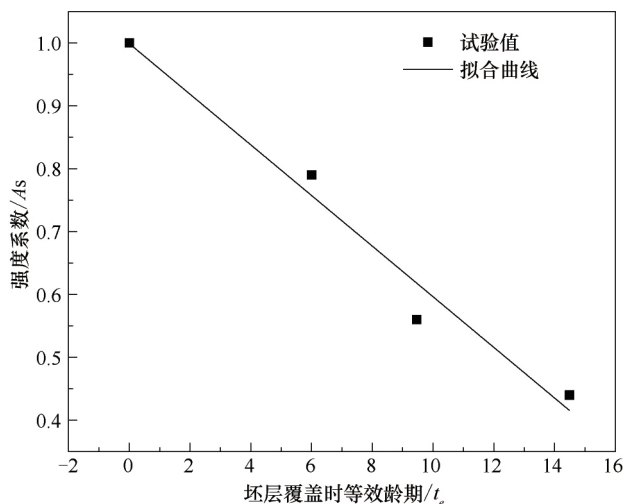


图 5 等效龄期与强度系数的关系曲线

Fig. 5 The relation curve between equivalent ages and strength coefficients

$$A_s = -0.04 \cdot t_e + 1 \quad (R^2 = 0.97) \quad (4)$$

由图 5 可以看出, 对于只有温度影响的情况, 低热水泥混凝土强度系数与坯层覆盖时的等效龄期线性负相关, 相关系数为 0.97。坯层覆盖时下层混凝土的等效龄期越大, 28 d 龄期强度系数越低, 即坯层间劈裂抗拉强度越低。

上述强度系数与等效龄期的关系可应用于施工现场混凝土坯层质量的控制。根据公式(2)及仓面温控信息可以计算坯层浇筑过程中任意时刻的等效龄期。当强度系数达到控制指标时进行预警, 提示施工及管

理人员及时进行坯层覆盖浇筑或采取其它处理措施, 这样便可以实现对所有浇筑坯层结合质量的实时控制。

### 3 结 论

(1) 环境温度越高, 坯层表面的混凝土水分蒸发速率越快, 且坯层覆盖时下层混凝土的贯入阻力值越大。

(2) 坯层表面的温度对坯层间劈裂抗拉强度有较大的影响。温度的升高加快了坯层表面水分的损失, 降低了表层混凝土的水化程度; 同时水分的快速蒸发加快了水泥浆体的固化, 使得贯入阻力不断上升, 导致坯层间骨料的相互嵌入程度降低。坯层覆盖后混凝土的嵌入程度和水化程度共同影响了坯层间力学性能的发展。

(3) 高温条件下(40℃), 由于泌水速率大于蒸发速率, 坯层表面会产生一层浮浆, 此部分浮浆的水灰比较大, 坯层覆盖后会形成稀疏多孔的层间薄弱带, 影响了坯层间劈裂抗拉强度的发展。

(4) 坯层覆盖时下层混凝土的等效龄期与强度系数线性相关, 分层浇筑混凝土下层混凝土覆盖时的等效龄期可以作为坯层间劈拉强度的预测指标。根据强度系数与等效龄期的关系可以对所有浇筑坯层结合质量进行实时预警及控制。

在未来的研究中, 应综合考虑温度、湿度及风速等因素对混凝土成熟度的影响, 建立多因素控制下的强度系数与等效龄期的关系, 对混凝土坯层间结合质量进行更精细化的控制。

### 参考文献(References):

- [1] 管俊峰, 李庆斌, 吴智敏, 等. 现场浇筑大坝混凝土断裂参数与等效成熟度关系研究[J]. 水利学报, 2015, 46(8): 73-81.  
GUAN Junfeng, LI Qingbin, WU Zhimin, et al. Relationship between fracture parameters with an equivalent maturity of site-casting dam concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(8): 73-81.
- [2] 冯新, 张宇, 范哲, 等. 考虑水平薄弱层的碾压混凝土拱坝振动台试验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(12): 1493-1501.  
FENG Xin, ZHANG Yu, FAN Zhe, et al. Experimental study on impact of horizontal weak layer on dynamic failure mechanism of Roller Compacted Concrete Arch Dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(12): 1493-1501.
- [3] 孙君森. 高碾压混凝土重力坝渗流分析和防渗结构的研究[J]. 水力发电, 2001(8): 12-16.  
SUN Junsen. Seepage analysis and seepage prevention structure research of high RCC Gravity Dam [J]. Water Power, 2001(8): 12-16.
- [4] KARIMPOUR A. Effect of time span between mixing and compacting

- on roller compacted concrete (RCC) containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) [J]. *Construction and Building Materials*, 2010 (24): 2019–2083.
- [5] AGUIAR J L, CAMELO A, RIBEIRO A. Roller compacted concrete (RCC): strength and permeability of horizontal joints [C]//International Congress Challenges of Concrete Construction-Sustainable Concrete Construction. 2002: 751–760.
- [6] LIU G H, LU W B, LOU Y D, et al. Interlayer shear strength of Roller compacted concrete (RCC) with various interlayer treatments [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166: 647–656.
- [7] 娄亚东. 碾压混凝土层面处理对层间结合性能影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
LOU Yadong. Study on the effects of layer processing on the layer adhesion properties of RCC [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [8] 钱鹏, 徐千军. 浇筑层面对砂浆力学及渗透性能的影响 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(5): 1–12.  
QIAN Peng, XU Qianjun. Influence of layer interface on mechanical and permeability properties of mortar [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(5): 1–12.
- [9] 钱鹏, 李曙光, 徐千军. 混凝土浇筑层面的渗透特性与微裂纹结构特征 [J]. *水利学报*, 2018, 49(8): 1007–1016.  
QIAN Peng, LI Shuguang, XU Qianjun. Permeability and micro-cracks of concrete layer interfaces [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(8): 1007–1016.
- [10] RIBEIRO A C B. Roller compacted concrete –Tensile strength of horizontal joints [J]. *Materials and Structures*, 2001, 34(241): 413–417.
- [11] 许文彬, 胡昱, 李庆斌. 乌东德大坝水工混凝土层间强度及层面处理改进措施 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(8): 845–850.  
XU Wenbin, HU Yu, LI Qingbin. Interlayer strength of hydraulic concrete and layer surface treatment improvement in Wudongde Dam [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2017, 57(8): 845–850.
- [12] 许文彬, 李庆斌, 胡昱. 混凝土凝结过程中水分变化规律研究 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36(7): 92–103.  
XU Wenbin, LI Qingbin, HU Yu. Water content variations in the process of concrete setting [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(7): 92–103.
- [13] NURSE R W. Steam curing of concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1949, 1(2): 79–88.
- [14] SAUL A G A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1951, 2(6): 127–140.
- [15] HANSEN P F, PEDERSEN E J. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete [J]. *Nord. Betong*, 1977: 127–140.
- [16] KIM J K, HAN S H, LEE K M. Estimation of compressive strength by a new apparent activation energy function [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(2): 217–225.
- [17] 侯东伟, 张君, 陈浩宇, 等. 干燥与潮湿环境下混凝土抗压强度和弹性模量发展分析 [J]. *水利学报*, 2012, 43(2): 76–86.  
HOU Dongwei, ZHANG Jun, CHEN Haoyu, et al. Development of strength and elastic modulus of concrete under moisture and drying curing conditions [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(2): 76–86.
- [18] YIKICI T A, CHEN H L. Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 95: 802–812.
- [19] KIM J K, HAN S H, SONG Y C. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results [J]. *Cement and Concrete research*, 2002, 32(7): 1087–1094.
- [20] KIM J K, HAN S H, PARK S K. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part II. Prediction model [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(7): 1095–1100.
- [21] 张倩倩, 魏亚. 水泥混凝土塑性阶段表面蒸发速率研究 [J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(1): 128–132.  
ZHANG Qianqian, WEI Ya. Study on evaporation rate of concrete surface during plastic stage [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(1): 128–132.
- [22] 李鹏辉, 许维, 陈凤岐, 等. 碾压混凝土层面间隔时间宏观试验研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2003, 1: 12–14.  
LI Penghui, XU Wei, CHEN Fengqi, et al. Macroscopic and mesoscopic experimental study on the time interval of roller compacted concrete layer [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2003, 1: 12–14.
- [23] AZENHA M, MAEKAWA K, ISHIDA T, et al. Drying induced moisture losses from mortar to the environment. Part I: experimental research [J]. *Materials & Structures*, 2007, 40(8): 801–811.
- [24] ALMUSALLAM A A. Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2001, 23(4–5): 353–361.
- [25] DESCHNER F, LOTHENBACH B, WINNEFELD F, et al. Effect of temperature on the hydration of Portland cement blended with siliceous fly ash [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 52: 169–181.
- [26] 吕鹏, 翟建平, 聂荣, 等. 环境扫描电镜用于硅酸盐水泥早期水化的研究 [J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(4): 530–536.  
LYU Peng, ZHAI Jianpin, NIE Rong, et al. Investigation on the early stage hydration of portland cement using environmental scanning electron microscopy [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 32(4): 530–536.
- [27] 袁盼. 温湿度变化对水泥石微结构形成过程的影响及改善机制 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.  
YUAN Pan. Influence of temperature and humidity change on microstructure formation of cement paste and its improvement mechanism [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [28] MEHTA P K, MONTEIRO P J M. 混凝土: 微观结构, 性能和材料 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
MEHTA P K, MONTEIRO P J M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.

(责任编辑 康健)