

温湿耦合大体积混凝土早龄期损伤试验研究

顾秋林¹, 王颖轶², 王荣勇¹, 谢广州²

[1. 上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海市 200065; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海市 200030]

摘要: 针对大体积混凝土温湿耦合损伤特性及其风险评价问题, 依托上海某超大型污水处理厂工程, 根据现场试验数据, 研究了大体积混凝土结构内部温湿度空间分布及其时变规律; 结合文献调查, 探讨了多场耦合条件下混凝土在养护过程中水化度、抗拉强度、弹性模量等计算方法的工程适用性以及参数的合理取值, 并对养护期混凝土结构损伤风险进行了定量评价。研究结果对大体积混凝土结构工程的抗裂防渗状态和质量评价具有借鉴意义。

关键词: 温湿耦合; 大体积混凝土; 现场试验; 计算方法实用化; 结构损伤风险

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)01-0236-08

Experimental Study on Early-age Damage of Mass Concrete Coupled with Temperature and Humidity

GU Qiulin¹, WANG Yingyi², WANG Rongyong¹, XIE Guangzhou²

[1. Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200065, China; 2. School of Shipbuilding, Oceanography and Architectural Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China]

Abstract: Aiming at the problems of temperature and humidity coupling damage characteristics and risk assessment of mass concrete, relying on a ultra-large wastewater treatment plant project in Shanghai, and based on the field test data, the spatial distribution and time-varying rules of temperature and humidity in mass concrete structures are studied. Combined with the literature search, the engineering applicability of calculating methods such as hydration degree, tensile strength and elastic modulus of concrete during curing under the multi-field coupling conditions and the reasonable values of parameters are discussed, and the damage risk of concrete structures during curing is quantitatively evaluated. The research results have the reference significance for the evaluation of the state and quality of crack and seepage resistance of mass concrete structure engineering.

Keywords: temperature-humidity coupling; mass concrete; field test; practical application of calculation method; structural damage risk

0 引言

大体积混凝土结构抗裂防渗是工程质量管控的核心和难题。长期以来, 人们结合工程建设需求, 从化学、热力学等方面进行了大量理论、试验、数值模拟等研究工作^[1-3], 以期建立混凝土内部损伤、质量状态的科学评价方法和符合工程实际的指标体系。

理论研究结果显示, 早龄期水化反应会引起混凝土内部温度和湿度的急剧变化, 使水泥与配料胶

凝、固化, 在形成承载能力的同时产生内部自约束应力, 几乎所有热力学参数的变化都与混凝土水化度高度关联。当其内部应力超过抗拉强度时, 混凝土结构将产生损伤和裂缝的萌生演化^[4-6]。另外, 早龄期混凝土的变形由温度应变、干缩应变、化学收缩应变、徐变等组成, 这些因子相互耦合并与水化反应状态密切相关, 非常复杂且直接影响着混凝土结构内部的裂缝萌生和演化。遗憾的是迄今的理论研究成果与实际应用还存在着很大差距。

在研究水泥水化反应机理的基础上, 人们通过模拟试验建立了水化度的计算方法, 并结合水化放热温升模型和水化耗水模型建立了养护过程中的混凝土弹性模量、抗拉强度计算方法^[7-8]。在此基础上, 通过早龄期混凝土本构关系研究, 建立了自约束条件下混凝土内部应力计算方法^[9-10], 从而为早龄期混

收稿日期: 2024-02-28

作者简介: 顾秋林(1991—), 男, 学士, 工程师, 从事交通土建工程施工与管理工作。

通信作者: 王颖轶(1979—), 女, 博士, 副研究员, 从事土木工程教学与科研工作。电子信箱: wangyingyi@sjtu.edu.cn

凝土损伤风险评价提供了实用技术路径。但由于水化反应涉及水泥材料的化学特性并与混凝土热学边界条件密切相关,试验模拟条件与实际工程往往存在较大差异,导致相关试验公式不得不采用经验常数和修正系数来表达,且这些经验常数的取值对计算结果的影响显著,因而难以直接推广应用。而且,在建立早龄期混凝土本构模型时,除了计算复杂的等效应变外,还需要确定混凝土结构的相对约束刚度等众多对计算结果产生显著影响的经验常数。总之,由于相关计算公式中存在敏感且难以精确获得的参数和经验常数,给工程实用计算带来了巨大挑战。

本文依托实际工程现场试验,在研究大体积混凝土结构内部温湿度空间分布及其时变特性的基础上,探讨了混凝土养护过程中的水化度、抗拉强度、弹性模量等计算方法,以及参数敏感性及其合理取值;通过早龄期混凝土本构关系,建立起符合工程特点的混凝土损伤风险计算方法,并依据现场试验数据,综合评价试验区域大体积混凝土的损伤风险和质量状态。

1 试验方案概要

1.1 依托工程概况

研究以上海松申水环境净化三期改扩建土建工程为依托。该工程位于同心路以南、北泖泾以东地带内,工程建设内容分为污水厂和厂外泵站管道两部分。其中污水厂部分包括对一、二期进行提标改造和三期扩建。一、二期现状处理规模为14万m³/d,进行提标改造后,需减量2万m³/d;三期扩建8万m³/d污水处理设施。改扩建后全厂实际新增处理污水能力6万m³/d,处理总规模为20万m³/d。全厂出水标准按不低于一级A标准执行。

依托工程区位图见图1。

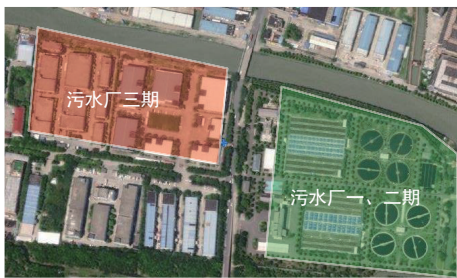
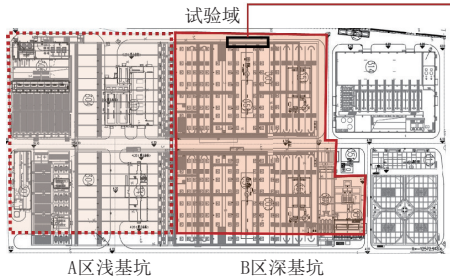


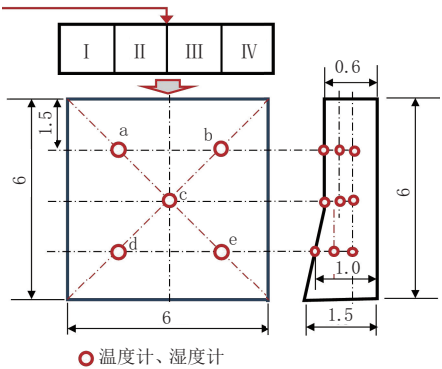
图1 依托工程区位图

新建三期污水厂主要由一体化箱体基坑和地面建构筑物组成。一体化箱体基坑分为A、B两个区域

(见图2)。其中,A区为浅基坑,平面尺寸102.23 m×143 m,深3.1~8.0 m;B区为深基坑,平面尺寸115 m×131 m,深11.3~14.0 m。



(a)一体化箱体基坑及试验区域



(b)测点布置

图2 试验区域及测点布置示意图(单位:m)

1.2 现场试验方案

1.2.1 试验区域选择

在图2所示B区深基坑工程区域西侧水池轴对称位置,选取24 m墙体结构作为现场试验区域。为研究混凝土结构早龄期内部和界面温湿度变化、裂缝形成风险与施工因素的相关性,沿墙体长度方向设置I、II、III、IV共4个区间,分别模拟恒定喷淋、定时喷淋、自然养护、潮湿遮盖这4种典型养护条件,对比研究温湿耦合条件下大体积混凝土内部及其界面的损伤特性。

1.2.2 试验监测系统

为获得早龄期混凝土结构内部及其界面温湿度变化数据,考虑混凝土施工工艺过程,温湿度传感器及其对应数据采集系统分2阶段安装。

第一阶段:墙体钢筋捆扎完成后,预埋安装结构内部监测传感器,并在浇筑混凝土前及时建立数据采集远程传输系统,形成等待监测状态,以便收集混凝土浇筑全过程的结构内部温度和湿度变化数据。结构内部温湿度监测系统构建见图3。

第二阶段:墙体混凝土结构带模养护至4 d龄期后脱模,记录混凝土脱模时间,并及时在结构表面安

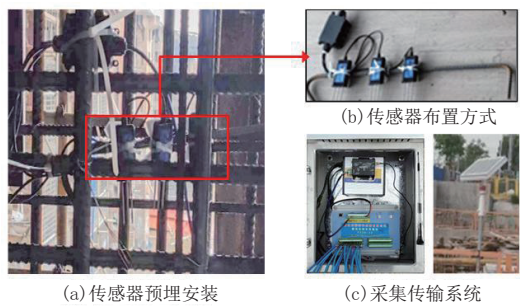


图3 结构内部温湿度监测系统构建

装温湿度传感器,同时建立模拟养护系统,接入预留的数据采集传输系统。

试验采用温湿度一体传感器,传感器技术指标见表1。

表1 传感器技术指标

技术指标	湿度计	温度计
测量范围	0% ~ 100%	-30 ~ 70 ℃
测量精度	0% ~ 50%(m³/m³)范围内为±2%(m³/m³)	±0.2 ℃ 工作范围: -30 ~ 70 ℃
输出信号	A:电压信号0~10 V;B:4~20 mA(电流环);C:RS485(标准Modbus-RTU协议01)	
设备默认地址	供电电压:5~24 VDC(当输出信号为0~2 V,RS485时); 12~24 VDC(当输出信号为0~5 V,0~10 V,4~20 mA时)	

现场试验区域钢筋捆扎完成后,按设定的测点位置和安装方式,安装温湿度一体传感器,每个测点处的3个温湿度传感器串联到1根485信号线上;然后每个测点作为整体通过信号线并联安装到采集仪上。采用这种安装方式可以节约采集仪上的信号通道,从而可以采集到更多不同测点的数据。传感器安装完成后进行完好性检验、记录读数数据,并通过485信号线及时接入数据自动采集远程传输系统,同时设置数据信号自动采集时间间隔(每隔30 min等时距采集数据),进行数据信号采集试验,经现场数据库缓存后实时传输至终端。

监测系统确认完好后,系统进入连续实时监测状态。第一阶段预埋安装的监测系统保持检测状态,同时启动第二阶段安装的结构表面温湿度监测。连续监测至混凝土养护龄期50 d。

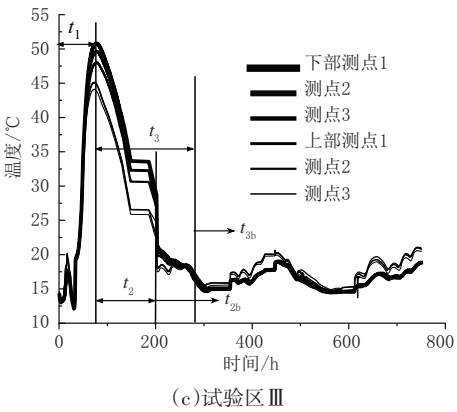
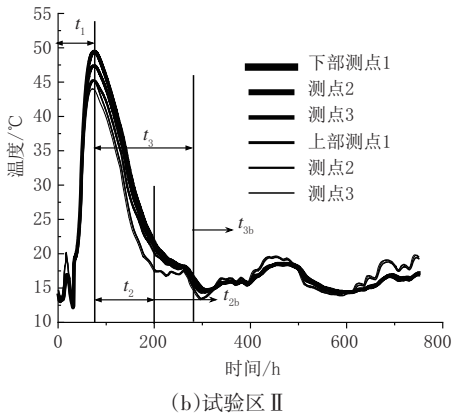
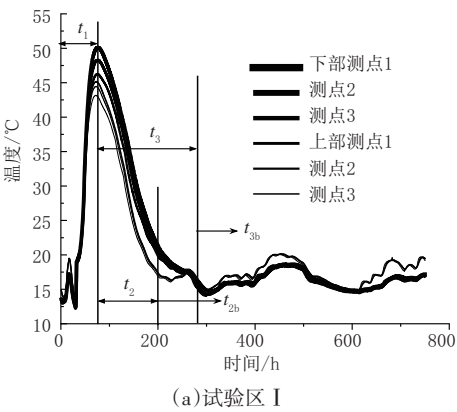
2 数据分析

经过对80个温度计、80个湿度计历时50 d(其

中,结构脱模前养护龄期4 d)的连续监测,每隔30 min读数1次,取得有效数据约210 000组,为混凝土温湿耦合损伤分析提供了原始数据。

2.1 混凝土内部温度分布及其时变特性

根据图2所示的测点布置,各测区上部混凝土结构厚度为600 mm,测点a、b、c位置上结构厚度相同(最短散热边界条件相同);下部混凝土结构厚度1 000 mm,测点d、e位置上结构厚度相同。考虑散热边界条件以及养护条件的差异性,为便于比较分析,将各测点监测数据按养护区域分别统计并作测点监测温度随时间变化曲线图,见图4(其中 t_{2b} 、 t_{3b} 分别表示上、下部结构温度趋于平衡的时间)。



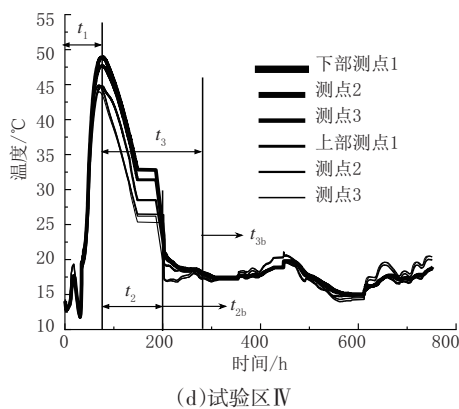


图 4 各试验区测点温度随时间的变化曲线

图 4(a)~(d) 分别对应恒定喷淋、定时喷淋、自然养护、潮湿遮盖 4 种模拟养护条件下混凝土养护龄期在 32 d 内的监测点温度分布。图中较粗的实线为墙体下部(厚度 1 000 mm)测点数据;较细的实线为墙体上部(厚度 600 mm)测点数据;测点编号 1、2、3 分别表示从结构中心向外边界的点位。

由图 4 可知:(1)混凝土浇筑后,由于水化反应,其内部温度急剧升高, $t=75\text{ h}$ 时,所有测点温度均达到峰值,换言之,混凝土内部任意空间位置温升延续时间只与原材料水化反应时间有关,而与结构几何尺度和边界条件无关;(2)混凝土温度达到峰值后,很快进入降温阶段,结构上部测点温降延续至 200 h,而结构下部测点温降时间延续到 265 h,比上部温降时间增加了 32.5%,说明结构几何尺度对混凝土内部散热影响显著,尺度越大,散热条件越差,温降延续时间越长;(3)结构内部不同空间位置上,混凝土温度峰值存在明显差异,距散热边界越远,温度峰值越大,反映了边界对水化过程的散热作用;(4)比较结构上下部测点数据可见,上部测点的平均温度峰值约为 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,而下部测点的温度达到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,两者相差 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明水化反应引起的发热量在结构内部具有累积效应。

各试验区域中,混凝土养护时间约等于 100 h 脱模。结构脱模之前,混凝土处于两侧模板的隔热保护状态下养护,不同深度位置温度监测值无显著差异,仅在峰值点位置有微小区别。尤其值得注意的是,混凝土脱模时其内部温降还远未结束,此后 6 d 混凝土内部处于连续降温过程,直至养护龄期达 10 d 后,混凝土内部温度才趋于平衡状态。但从脱模后各测点温度的时间分布状态看,不同养护条件对结构内部温度的影响甚微。

2.2 结构内部湿度分布及其时变特性

考虑结构厚度不同,将不同试验区湿度监测数据按上下部测点与边界的距离分类,再根据各试验区测点湿度数据平均值作湿度随时间的变化曲线。各试验区测点湿度随时间变化曲线见图 5。

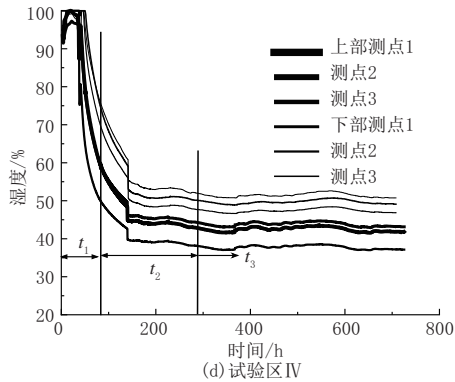
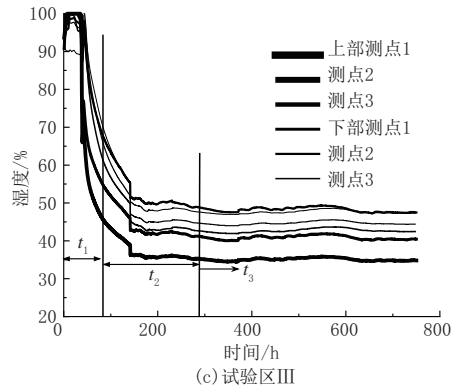
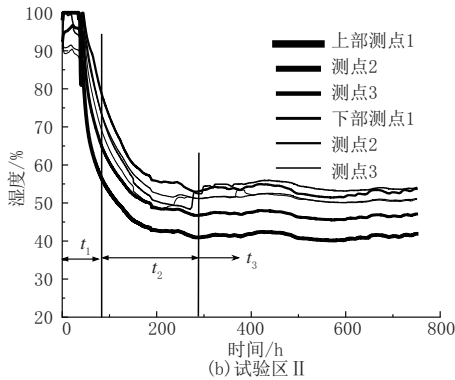
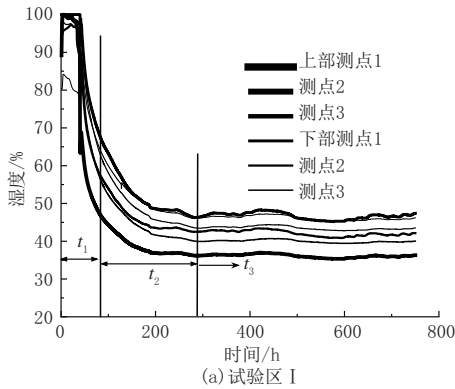


图 5 各试验区测点湿度随时间的变化曲线

图5(a)~(d)分别对应恒定喷淋、定时喷淋、自然养护、潮湿遮盖4种模拟养护条件下试验区测点湿度监测数据随养护时间的变化。图中较细的实线为结构下部(厚度1 000 mm)测点湿度变化;较粗的实线为结构上部(厚度600 mm)测点湿度变化;测点编号1、2、3分别表示从结构中心向外边界的点位。

由图5可知:(1)各试验区测点湿度随时间的变化呈负指数单调衰减的函数关系;(2)按湿度随时间变化曲线的特征,可划分为 t_1 、 t_2 、 t_3 这3个反应时段。其中 t_1 为湿度急剧降低时段,延续时间约75 h(对应于混凝土温升阶段),反映出水化急剧温升造成混凝土内部水分急剧消耗; t_2 为湿度缓慢降低时段,对应于混凝土降温阶段,说明混凝土降温阶段水化作用仍在吸收水份,使湿度继续降低; t_3 为结构内部湿度平衡稳定阶段。

比较4种模拟养护条件下的试验结果,在混凝土脱模前($t=165$ h),结构在模板的围护条件下(各试验区条件相同),各试验区试验结果无明显差异。脱模后,不同养护条件下试验数据存在显著差异,试验区Ⅲ(自然养护)的湿度约为37%,低于其他3种养护条件8%,降低比率为21.6%。可以推断,不同的养护条件将显著影响混凝土内部湿度,从而影响结构干燥收缩应变、混凝土内部裂缝的萌生及其损伤状态。

3 温湿耦合早龄期混凝土损伤风险分析

在混凝土水化过程中,其内部温度和湿度变化十分复杂,且两者相互耦合、相互影响。对早龄期混凝土而言,其内部应变、应力、强度等力学性能演化与水化反应引起的温湿度变化密切相关。研究表明,大体积混凝土结构内部温度和湿度的空间分布及其时间变化特性主要取决于水化度。但水化度除了与混凝土原材料密切相关外,还受到热学边界、混凝土配比影响,同时与温湿度存在相互耦合作用。

3.1 混凝土在水化过程中的性能演化

3.1.1 水化度

迄今,人们通过温湿耦合影响下的温度控制方程和湿度控制方程,建立起水化放热速率和湿度影响下的混凝土扩散计算方法。但这些方法受边界条件、混凝土原材料、配合比等众多因素影响,其实际应用受到很大限制。以往的研究给出了混凝土水化

度 α 计算式^[11]:

$$\alpha = \alpha_u \exp \left[- \left(\frac{A}{t_e} \right)^B \right] \quad (1)$$

式中: α_u 为最终水化度, $\alpha_u = \frac{1.031m_w/m_c}{0.194 + m_w/m_c}$, m_w/m_c 为混凝土水胶比; A 、 B 为经验常数; t_e 为混凝土的等效龄期。

t_e 表达式为:

$$t_e = T_1 + \frac{f_1 - f_2}{f_1 - f_c} (T_2 - T_1) \quad (2)$$

式中: T_1 为混凝土浇筑时间; T_2 为混凝土检测时间; f_1 为检测时混凝土的强度; f_2 为设计强度; f_c 为混凝土实际龄期时的强度。

式(1)中的最终水化度和等效龄期可以通过试验确定,但对经验常数 A 和 B ,则因为无法直接测定水化度而难以获得。

根据经验取 $A=30$,考察 $t_e=5$ h时 B 的有效取值范围为 $[0, 0.374 5]$,对应的水泥凝结时的水化度 α_0 取值范围为 $[0.1, 0.238]$ 。根据式(1)作 B 在有效取值范围内水化度随时间变化曲线,见图6。

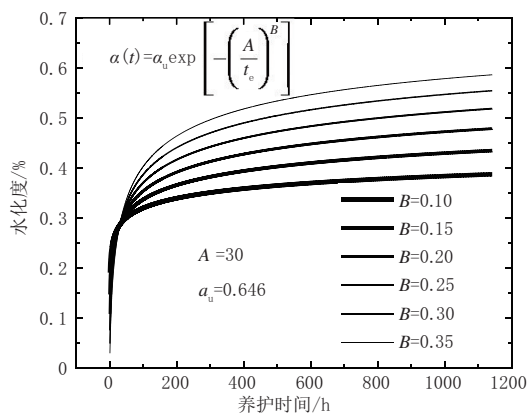


图6 水化度时变规律与经验常数 B 的相关性

由图6可见,随着经验常数 B 的增大,水化度-时间曲线上升。考虑曲线为单调增加指数函数型,当 B 取值0.35时,曲线随时间增大趋近于最终水化度。因此,本文计算中取 $B=0.35$ 。

3.1.2 抗拉强度时变特性

早龄期混凝土抗拉强度 $f(a)$ 为:

$$f(\alpha) = \xi \cdot f_{28} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_u - \alpha_0} \right)^\tau \quad (3)$$

式中: ξ 为经验常数,一般取 $\xi=1.1$; f_{28} 为28 d龄期的混凝土抗拉强度,MPa; α_0 为水泥凝结时的水化度; τ 为经验常数。

式(3)中存在经验常数 ξ 和 τ ,并且自变量 α 与式(1)中的经验常数 B 相关,前述计算水化度时选取的

$B=0.35$ 及其与其他常数的相关性合理与否需要进行检验。取式(3)中其他常数为定值(见图7),作早龄期混凝土抗拉强度时变关系及其对常数 B 的敏感性曲线,见图7。

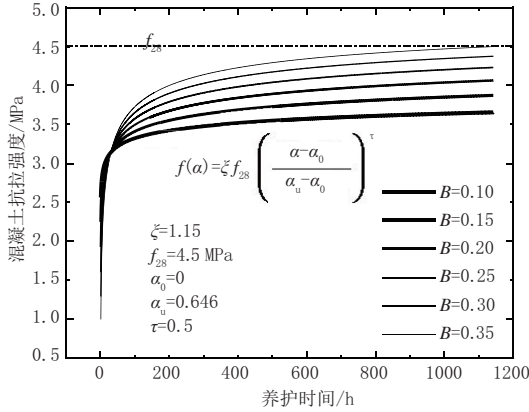


图7 早龄期混凝土抗拉强度时变特性及其对 B 的敏感性

由图7可见,当早龄期混凝土抗拉强度-时间相关关系不变以及其他经验常数确定时,随着常数 B 的增大,混凝土抗拉强度逐步增大。当 $B=0.35$ 时,混凝土抗拉强度最终逼近 f_{28} 。因此,取 $B=0.35$ 可以保证在抗拉强度函数类型不变的前提下,获得与混凝土最终抗拉强度值吻合的计算结果。

3.1.3 弹性模量及其时变特性

根据以往的研究资料^[12],早龄期混凝土弹性模量 E 是水化度的指数函数,其表达式为:

$$E(\alpha) = 1.05E_{28} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_u - \alpha_0} \right)^b \quad (4)$$

式中: E_{28} 为混凝土 28 d 龄期的弹性模量, MPa; b 为经验常数,通常可取 $b=0.99$ 。

式(4)中的自变量 α 与式(1)中的常数 B 相关,前述计算水化度时选取的 $B=0.35$ 是否合理需要进行检验。当取定其他经验常数后,早龄期混凝土弹性模量时变特性及其对 B 的敏感性见图8。

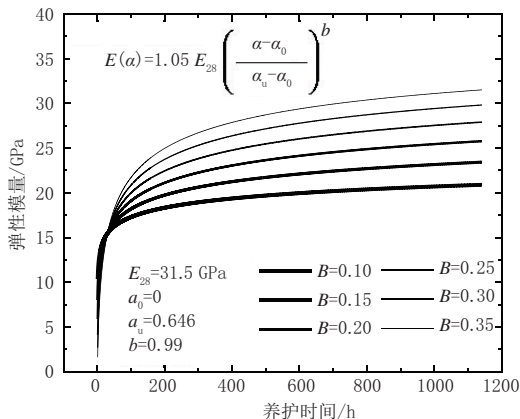


图8 早龄期混凝土弹性模量时变特性及其对 B 的敏感性

由图8可见,当早龄期混凝土弹性模量-时间相关关系不变、其他经验常数确定时,随着 B 的增大,混凝土弹性模量逐步增大。当 $B=0.35$ 时,混凝土弹性模量最终逼近 E_{28} 。因此,取 $B=0.35$ 可以保证在弹性模量函数类型不变的前提下,获得与 E_{28} 吻合的计算结果。

3.2 早龄期混凝土内部损伤风险评价

3.2.1 热应力及其参数敏感性

早龄期混凝土应变由弹性应变、热应变、化学应变、干缩变形和徐变组成。考虑叠加作用,则温湿耦合应变 ε 为:

$$\varepsilon(T, H, t) = \varepsilon_e + \varepsilon_T + \varepsilon_{ch} + \varepsilon_H + \varepsilon_c \quad (5)$$

式中: ε_e 为弹性应变; ε_T 为温度应变; ε_{ch} 为化学缩减; ε_H 为干燥收缩; ε_c 为徐变。

考虑温湿耦合湿度效应计算模型,则水化耗水和蒸发收缩变形一体化计算方法为:

$$\varepsilon_{sh}(T, H) = \eta \left[1 - \sqrt[3]{1 - (V_{cs} - V_0)} \right] - \frac{S_w \rho_w RT (1 - 2\mu)}{M_v} \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \right) \ln(RH) \quad (6)$$

式中: η 为化学缩减修正系数; M_v 为水蒸汽的摩尔质量; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; K_s 为不含孔介质体积弹性模量, MPa; K 为含孔介质体积弹性模量, $K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}$, MPa; μ 为混凝土泊松比; V_{cs} 为化学缩减导致的体积应变变量, $V_{cs} = k \left(0.2 + 0.7 \frac{m_s}{m_c} \right) (1 - p) \alpha$, 其中

$k = \frac{1}{1 + 1.4(m_s/m_c)}$, m_s/m_c 为硅灰与水泥的质量比, p 是与水胶比、硅灰比和密度相关的系数,由试验获得; V_0 为初凝时由化学缩减引起的体积应变。

式(6)中的 S_w 为:

$$S_w = 1 - \exp \left[m e^{n\alpha} \frac{2\gamma M_v}{\rho_w RT \ln RH} \right] \quad (7)$$

式中: m 、 n 为材料参数,由试验确定; γ 为液体表面张力, N/mm。

取中间变量,令 $\lambda_1 = \frac{E_R}{E_c} + \frac{E_s A_s}{E_c A_c}$, $\lambda_2 = \frac{E_s A_s}{E_c A_c}$, 则早龄期混凝土应力 σ_c 为:

$$\sigma_c(T, H) = E_c \frac{\lambda_1 (\varepsilon_{sh} - \alpha_c \Delta T) + \lambda_2 \alpha_s \Delta T}{\lambda_1 + 1} \quad (8)$$

式中: ε_{sh} 为混凝土自由收缩应变; E_c 和 E_s 分别为混凝土和钢筋的弹性模量, MPa; A_c 和 A_s 分别为混凝土和钢筋的计算截面积; E_R 为混凝土约束模量, $E_R = R_c E_c /$

$(1-R_c)$,其中 R_c 为相邻结构约束度, $R_c=0$ 为自由变形状态, $R_c=1$ 表示完全约束状态; α_c 为混凝土线胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; α_s 为钢筋线胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

上述各式中,包含一系列的经验常数和难以确定的材料参数。参考以往文献资料的热应力计算参数(见表2),模拟计算不同约束条件下,早龄期混凝土自约束热应力及其时变特性,见图9。

表2 热应力计算参数取值表

参数	符号	取值
化学缩减修正系数		0.047 5
水蒸气摩尔质量	M_v	0.018 02
水密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	ρ_w	1 000
不含孔介质体积弹性模量/GPa	K_s	40
成熟混凝土弹性模量/GPa	E	3.15
混凝土弹性模量	E_c	$E(\alpha)$
钢筋弹性模量/GPa	E_s	200
配筋率/%	A_s/A_c	0.5
混凝土线胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	α_c	1.0×10^{-5}
钢筋线胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	α_s	1.2×10^{-5}

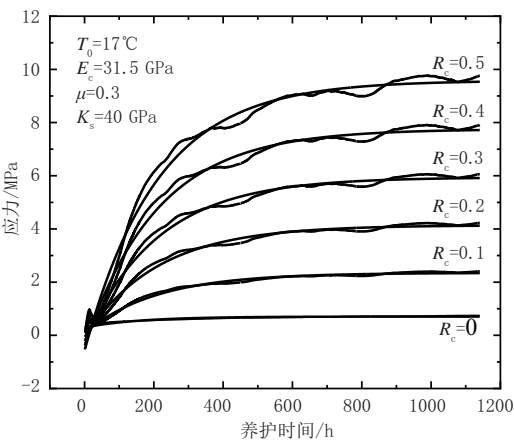


图9 混凝土自约束热应力及其时变特性

由图9可知:当混凝土物理参数确定后,其温湿耦合应力总体呈指数型时变规律,表征混凝土自约束特性的参数 R_c 取值对应力计算结果起着决定性的作用。因此, R_c 的合理取值关系到计算结果的正确与否。根据前述算式 $E_R = R_c E_c / (1 - R_c)$,则:

$$E_R = \frac{R_c E_c}{1 - R_c} = \begin{cases} 0 & R_c = 0 \\ E_c & R_c = 0.5 \\ \infty & R_c = 1.0 \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可见, $R_c=(0,0.5,1.0)$ 分别表征混凝土自约束条件为自由状态、弹性约束和刚性约束(完全约束)状态。考虑早龄期混凝土刚度变化及其他正交方向变形的影响,混凝土的自约束状态一般介于自由状态与弹性约束状态之间。参考同类混凝土应力相关研究结果,同时考虑混凝土徐变对其内部应力的减缓作用,本研究取 $R_c=0.2$ 。

3.2.2 损伤风险评价

定义应力与抗拉强度的比值 $\eta(t) = \sigma(t)/f(\alpha,t)$ 为混凝土损伤风险系数。采用上述比选确定的合理计算参数和经验常数,根据试验监测获得的混凝土内部温度、湿度数据,计算试验区混凝土结构的损伤风险系数,进而评价温湿耦合混凝土内部物理损伤的风险状态。考虑到试验区内结构厚度不同、水化温升状态差异,安全起见,取结构下部测点对应的最大温度、湿度实测值来计算各试验区混凝土损伤风险系数。

配筋率 $A_s/A_c=0.5\%$ 的早龄期混凝土损伤风险系数随时间变化曲线见图10。由图10可见:(1)温湿耦合作用下(忽略外荷载),混凝土养护过程处于拉应力的作用下,且拉应力随时间呈指数函数型增加趋势,养护时间 $t=265\text{ h}$ (约11 d)前,拉应力保持快速增加趋势,随后进入缓慢增加时段, $t=670\text{ h}$ (28 d)后逐步趋于稳定;(2)混凝土抗拉强度同样以指数函数型变化,养护时间 $t=75\text{ h}$ (约3 d龄期)时,抗拉强度急剧升高,随后进入强度缓慢增大状态直至265 h, $t=670\text{ h}$ 后趋于稳定;(3)混凝土损伤风险系数随着时间增加而增大,并于 $t=670\text{ h}$ 后趋于稳定,养护时间 $t<75\text{ h}$ 时,由于混凝土抗拉强度增加速度远大于应力增大速度,结构损伤风险系数较低,当 $75\leq t\leq 265\text{ h}$ 时,应力增大速度高于强度升高速度,损伤风险相应增大。

从全部试验区计算结果可以看出,混凝土损伤风险系数均小于1.0,最大值约为0.9,在28 d养护龄期内,混凝土内部损伤风险系数小于0.8。同时,试验区内其他监测点的温度值小于图10计算所取的温度值,按常识其温湿耦合应力和损伤风险系数相对较小。综合上述分析,试验区混凝土结构内部损伤的风险较小。

4 结 语

- (1)混凝土浇筑后温度急剧升高,并在75 h达到峰值,其温升延续时间与结构几何尺度、空间位置无关;温升达到峰值后,混凝土进入降温时段,降温延续时间受混凝土结构尺度和热学边界条件的显著影响,尺度越大、距离越远,则温降时段越长。
- (2)湿度随混凝土水化温升过程呈负指数形态衰减,与温度存在强耦合关联关系,温升速度快则混凝土湿度降速相应加快,随温度稳定而同步趋于稳定。
- (3)混凝土养护期的抗拉强度、热应力随温湿度

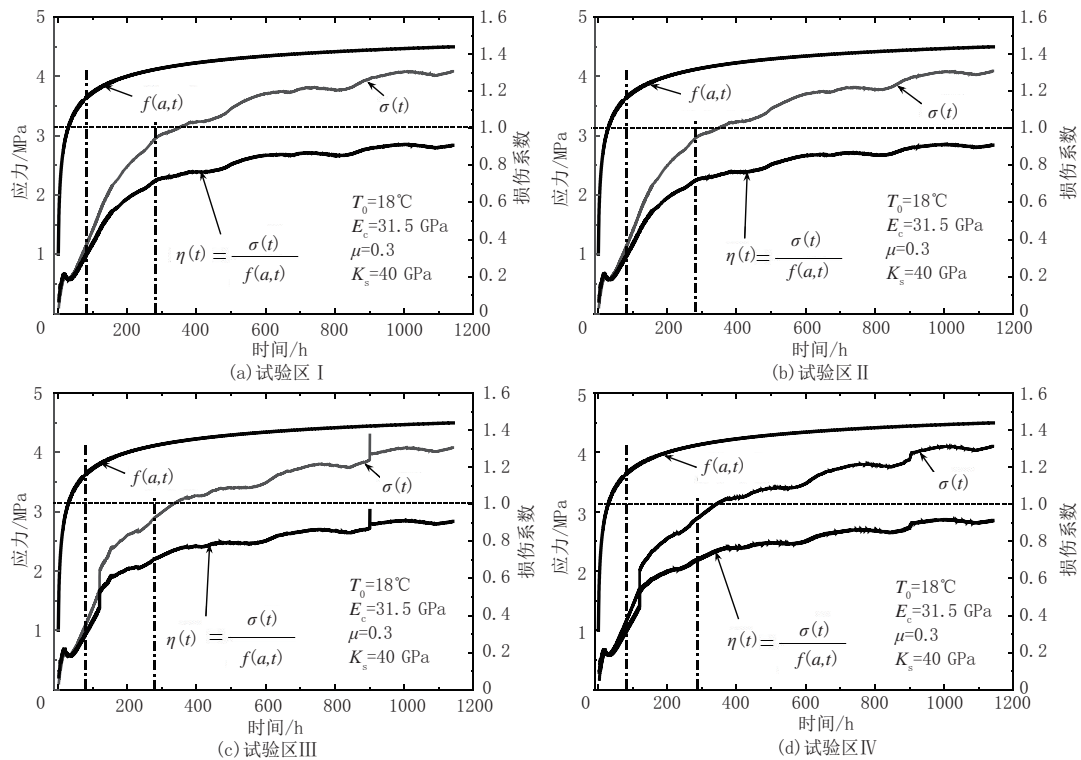


图 10 配筋率 $A_s/A_c=0.5\%$ 的早龄期混凝土损伤风险系数随时间变化曲线

呈指数函数型变化,并于 28 d 龄期后趋于稳定,从而使混凝土内部损伤风险系数呈现指数型变化;计算结果显示,试验区混凝土损伤风险系数小于 0.9,说明结构热学损伤风险较小。

参考文献:

[1] 蒋睿.早期养护方式对超高性能混凝土性能的影响[J].硅酸盐学报,2020,48(10):1659-1668.
[2] 赵立晓,王鹏刚,王兰芹.混凝土内部温湿度响应参数分析:水分扩散系数与导热系数[J].材料导报,2021,35(12):12075-12080.
[3] 杨玉朋,卢晓春,陈博夫.混凝土等湿热传导过程中内部温湿度演化规律[J].水电能源科学,2020,38(10):107-110.
[4] 贺冯友,陈朝晖,夏成俊.温湿度耦合效应下早龄期混凝土的相对湿度场[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(1):108-115.
[5] 杜明月,田野,金南国.基于水泥水化的早龄期混凝土温湿耦合[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(8):1410-1416.
[6] 尤伟杰,王有志,张雪,等.高强混凝土温湿耦合应力计算与开裂

风险分析[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):170-175.
[7] 柯杨,胡海涛,李佳.早龄期混凝土在不同温、湿度下的抗裂性能研究[J].武汉理工大学学报,2020,42(4):80-86.
[8] 徐嘉祥,武科,杨涛.车站底板大体积混凝土浇筑的温度效应[J].江苏大学学报(自然科学版),2023,44(1):117-124.
[9] LONG Guangcheng, WANG Meng, XIE Youjun, et al. Experimental investigation on dynamic mechanical characteristics and microstructure of steam-cured concrete[J]. Science China (Technological Sciences), 2014, 57(10): 1902-1908.
[10] ZHANG G H, LI Z L, ZHANG L F. Experimental research on drying control condition with minimal effect on concrete strength [J]. Construction and Building Materials, 2017, 135(15): 194-202.
[11] PANE W H. Concrete hydration and mechanical properties under nonisothermal conditions[J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(6): 534-542.
[12] De SCHUTTER G. Applicability of degree of hydration concept and maturity method for thermo-visco-elastic behaviour of early age concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26(5): 437-443.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadfloodbridge@163.com

