

养护环境对混凝土限制收缩开裂影响研究

张雷^{1,2}, 王志华^{1,3}, 佟继有⁴, 张海丽⁴, 吴岗权⁵, 曹尊毅^{1,3}

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 河南省水电工程磨蚀测试与防护工程技术研究中心, 河南 郑州 450003; 3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 兴安盟河海供水有限公司, 内蒙古 乌兰浩特 137400; 5. 河南智河工程技术有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 在高海拔极端环境下, 混凝土浇筑和养护过程中易出现裂缝, 影响结构的工程质量和安全运行。通过圆环法混凝土限制收缩开裂试验, 研究了不同温度(-5、10、25、40 ℃)、湿度(50%、65%、80%)对混凝土早期受限收缩开裂的影响, 揭示了早期混凝土开裂的机理。结果表明: 早期混凝土的抗压强度和弹性模量随养护温度和湿度的提高而增大, 抗压强度随龄期的增长比弹性模量随龄期的增长更加明显; 养护温度的降低或养护湿度的增大会减轻混凝土的干燥收缩以及自收缩作用, 从而减小混凝土的内部应力, 提高其抗开裂能力; 提出了混凝土早期限制收缩开裂的预测模型, 可准确预测混凝土早期限制收缩开裂时间。研究成果为混凝土开裂控制技术提供了基础数据支撑。

关键词: 混凝土; 限制收缩; 养护环境; 圆环试验; 龄期

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0156-07

Influence of curing environment on restricted shrinkage cracking of concrete

ZHANG Lei^{1,2}, WANG Zhihua^{1,3}, TONG Jiyu⁴, ZHANG Haili⁴, WU Gangquan⁵, CAO Zunyi^{1,3}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Engineering Research Center of Hydropower Engineering Abrasion Testing and Protection, Zhengzhou 450003, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Xing'an League Hehai Water Supply Co., Ltd., Ulanhot 137400, China; 5. Henan Zhihe Engineering Technology Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Under the extreme environment in high altitude areas, cracks are prone to develop in the process of concrete pouring and curing, which affects the engineering quality and safe operation of the structure. In this paper, the ring method concrete restricted shrinkage cracking test is carried out, the effects of different temperatures (-5, 10, 25, 40 ℃) and humidity (50%, 65%, 80%) on the early restricted shrinkage cracking of concrete are studied to reveal the mechanism of concrete cracking at the early stage. The results show that the compressive strength and elastic modulus of early concrete increase with the increase of curing temperature and humidity, and the increase of compressive strength with curing age is more obvious than that of elastic modulus; with the decrease of curing temperature or increase of curing humidity, the drying shrinkage and self-shrinkage of concrete is reduced, which in turn would reduce the internal stress of concrete and improve its cracking resistance; the prediction model of early restricted shrinkage cracking of concrete is proposed, with which the time of restricted shrinkage cracking of early concrete can be accurately predicted. The findings can provide basic data support for the development of concrete cracking control technology.

Key words: concrete; restrained shrinkage; curing environment; ring test; curing age

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1965110, 51779101); 江苏省科研与实践创新计划项目(SJCX21_0196)

作者简介: 张雷(1982-), 男, 山东青州人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水工建筑物修复和加固技术研究。

1 研究背景

收缩开裂一直是混凝土工程面临的一大难题,裂缝的存在降低了混凝土的抗渗性能,缩短了混凝土建筑物的使用寿命^[1-2]。混凝土收缩开裂主要与原材料、养护环境以及约束有关^[3]。目前,对于混凝土抗裂性的研究主要集中在原材料方面(水灰比、添加剂、配合比等),对于养护环境和约束方面的研究较少。

我国西部高原地区恶劣的环境,如大温差、低湿度、低气压等,大幅降低了混凝土的力学性能、抗开裂性能以及抗渗性能^[4],增大了混凝土开裂的风险,导致西部地区混凝土工程的破坏程度远大于东部^[5]。有研究发现^[6],在变温环境下混凝土的抗裂性将会大大降低,且正负变温对混凝土抗裂性的影响要大于正温变温;高温和低湿也会降低混凝土的抗裂性能^[7-8]。从材料角度分析,西部地区极端环境会影响混凝土的水化反应,降低混凝土的强度^[9-10],导致混凝土抵抗外部荷载能力减弱;从结构角度分析,不合理的养护温度或养护湿度会造成混凝土出现温度应力或湿度应力,应力的不均匀分布可能会使混凝土的约束应力超过自身强度,导致混凝土结构发生破坏。

此外,混凝土在收缩变形的过程中不同程度地会受到约束,如内部骨料、相邻结构等,并不存在完全的自由收缩。有研究表明^[11],约束才是混凝土开裂的首要因素。相同收缩量下,约束程度越大,则混凝土的约束应力越大,开裂风险便越高。马丽娜^[12]通过平板法研究混凝土在不同约束度下的抗裂性,发现四侧受约束的混凝土开裂风险要大于两侧受约束的混凝土。文献[13]、[14]通过数值模拟发现混凝土所受约束越大,则混凝土越容易开裂。所以,在研究混凝土抗裂性能时,应考虑约束带来的影响,才能更加符合实际情况。

本文以两河口水电站为依托,研究不同温度、湿度与早龄期受限混凝土收缩变形之间的关系,为解决高原极端环境下的早龄期混凝土收缩开裂问题提供理论参考,为恶劣环境下混凝土的施工养护提供技术支撑,对保障混凝土工程在极端环境下的高质量施工,以及严峻环境下的安全高效运行有着重要意义。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验采用的水泥为诸城市阳春水泥有限公司生

产的普通硅酸盐 P · O 52.5 水泥,烧失量为 1.16%,其物理力学性能参数见表 1;粉煤灰为河南铂润铸造材料有限公司生产的超细特级灰,其化学成分见表 2;粗集料为粒径 5 ~ 13 mm 的碎石;细集料为厦门艾思欧标准砂有限公司生产的标准砂,细度模数为 2.43,其级配详见表 3;减水剂为江苏苏博特新材料股份有限公司生产的聚羧酸减水剂;水为自来水。

表 1 试验用水泥的力学性能

初凝时间/ min	终凝时间/ min	抗折强度/MPa		抗拉强度/MPa	
		3 d	7 d	3 d	7 d
90	180	4.0	7.0	23.0	52.5

表 2 试验用粉煤灰的化学成分

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	含水量/%	烧失量/%
45.1	24.2	0.85	6.45	2.10	0.85	2.80

表 3 试验用细集料的级配

筛孔尺寸/ mm	筛余量/ g	分计筛余 百分比/%	累计筛余 百分比/%
5.00	0	0	0
2.50	18.9	3.78	3.78
1.25	45.7	9.14	12.92
0.63	221.7	44.34	57.26
0.315	155.8	31.16	88.42
0.16	51.4	10.28	98.70
小于 0.160	6.5	1.30	100.00

2.2 配合比

试验混凝土配合比见表 4,混凝土强度为 C50。

表 4 试验混凝土配合比 kg/m³

水泥	粉煤灰	砂	石子	水	减水剂
450	70	771	983	156	10

2.3 试验方案

2.3.1 力学性能试验 混凝土的抗压强度试验根据《混凝土物理力学性能试验方法》(GB/T 50081—2019)进行。

将拌制的混凝土放在尺寸为 150 mm × 150 mm × 300 mm 的模具里,每组制作 3 个试块,在室温下成型后移至不同的养护环境,不同试块组次的养护环境设置见表 5。分别在 1、3、7、14、28 d 养护龄期进行抗压强度测定。

表 5 各组试块养护环境

试块组次	温度/℃	相对湿度/%
W1S1	-5	50
W2S1	10	50
W3S1	25	50
W4S1	40	50
W4S2	40	65
W4S3	40	80

混凝土弹性模量试验根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)进行。试验中共制作 3 个尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的试块,待混凝土成型后移至相应的养护环境。分别在 1、3、7、14、28 d 养护龄期测试计算混凝土试块的动态弹性模量。混凝土动态弹性模量 E_d 的计算公式如下:

$$E_d = 13.244 \times 10^{-4} W \cdot L^3 \cdot f^2 / a^4 \quad (1)$$

式中: E_d 为混凝土动态弹性模量, GPa; W 为试件的质量, kg; L 为试件的长度, mm; f 为测量频率, Hz; a 为试件正方形截面的边长, mm。

2.3.2 圆环限制收缩试验 混凝土限制收缩试验根据 ASTM C1581M-18 规范进行,试验装置如图 1(a)所示。内钢环的内半径 $r_{si} = 152.5$ mm, 外半径 $r_{se} = 165.0$ mm, 环厚 $h_s = 12.5$ mm; 混凝土环的内半径 $r_{ci} = 165.0$ mm, 外径 $r_{ce} = 202.5$ mm, 厚度 $h_c = 37.5$ mm; 外环由两个半钢环组成; 试件高度 $H = 150$ mm。

混凝土浇筑前在内钢环中间高度位置粘贴 4 个应变片, 应变片布置互成 90°。圆环在室温环境中成型, 脱模后, 在上、下表面各覆一层铝箔, 保证水分仅从混凝土圆环侧面散失, 混凝土圆环试件如图 1(b)所示。将圆环试件放置于养护环境中, 用应变采集设备检测钢环的应变。应变采集设备由东华测试技术股份有限公司生产, 主要由应变采集仪、信号传输线、信号处理软件组成。

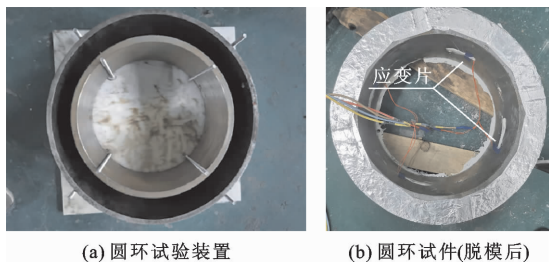


图 1 混凝土圆环限制收缩试验装置及试件

2.3.3 圆环试验原理 混凝土收缩在径向会受到钢环的限制, 在混凝土环与钢环之间产生内部压力

p , 钢环和混凝土环的相互作用如图 2 所示。

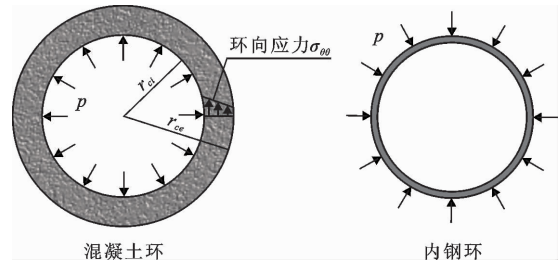


图 2 混凝土环与钢环相互作用示意图

由于混凝土与内钢环两者之间构成的力学平衡比较复杂, 为简化计算, 根据文献[15]、[16], 做如下假设: (1) 假设水分沿混凝土环侧面均匀散失, 试验过程中假设钢环与混凝土环紧密接触, 无相对移动; (2) 钢环与混凝土环为各向同质的匀质体; (3) 钢环与混凝土环变形同步发生。根据弹性力学理论, 混凝土环向应力计算公式如下:

$$\sigma_r = \frac{(r_{ce}^2/r^2 - 1)p}{r_{ce}^2/r_{ci}^2 - 1} \quad (2)$$

$$p = \frac{E_c \varepsilon_\theta}{(r_{ce}^2 + r_{ci}^2)/(r_{ce}^2 - r_{ci}^2) + \mu} \quad (3)$$

式中: σ_r 为混凝土环任意一点的环向应力, Pa; r_{ce} 、 r_{ci} 分别为混凝土环的外半径和内半径, mm; r 为混凝土环上任意一点到混凝土环圆心的距离, mm; p 为混凝土环与钢环之间的应力, Pa; E_c 为混凝土的弹性模量, GPa; ε_θ 为圆环试验实测的钢环应变; μ 泊松比。

3 结果与分析

3.1 养护环境对混凝土抗压强度和弹性模量的影响 不同养护环境的各组次混凝土试块在不同养护龄期的抗压强度实测值见表 6 和图 3。

表 6 不同养护环境的各组次混凝土试块不同龄期的抗压强度

试块组次	龄期/d				
	1	3	7	14	28
W1S1	28.7	34.5	37.2	40.7	42.3
W2S1	29.1	35.6	40.5	43.7	46.3
W3S1	29.8	38.3	44.2	48.5	51.5
W4S1	30.4	40.9	46.6	53.3	55.8
W4S2	31.8	42.4	49.1	54.3	57.1
W4S3	32.5	44.2	51.3	55.7	58.2

由表 6 和图 3 可以看出, 混凝土早龄期抗压强度的增长主要集中于前 14 d, 其 14 d 龄期的抗压强

度达到了 28 d 龄期的 94% ~95% ;混凝土抗压强度随着养护温度的升高和养护湿度的增大而提高;随着龄期的增长,不同养护温度下混凝土的抗压强度差值越来越大,但养护温度相同时湿度的提高对混凝土抗压强度的提高作用并不明显。原因是温度和湿度越高,混凝土的水化作用越强,混凝土结构更加密实,从而使混凝土的强度越来越大,但在 40 ℃ 养护温度下,混凝土的抗压强度发展几乎达到该养护龄期的最大值,所以随龄期增长,湿度对混凝土抗压强度的增长作用不如温度作用明显。

根据抗压强度实测值,对其与养护龄期(t) 的关系进行拟合,各组次拟合公式见表 7,拟合曲线见图 3。结果表明,各组次拟合系数在 0. 985 3 ~ 0. 989 9 之间,拟合效果良好。

不同养护环境的各组次混凝土试块在不同养护龄期的动态弹性模量实测值见表 8 和图 4。

由表 8 和图 4 可以看出,混凝土动态弹性模量的变化规律与抗压强度相似,随着龄期的增长而增大,且主要集中在前 14 d。其 14 d 龄期的的弹性模量达到了 28 d 龄期的 99%。随着养护温度的升高和养护湿度的增大,混凝土的弹性模量逐渐增大,但龄期超过 14 d 后的弹性模量增长较缓慢,相比于 1 d 龄期,28 d 龄期的弹性模量仅增大了 7. 9%。

根据弹性模量实测值,对其与养护龄期(t) 的关系进行拟合,各组次拟合公式见表 9,拟合曲线见图 4。结果表明,各组次拟合系数在 0. 9744 ~ 0. 993 9 之间,拟合效果良好。

表 7 混凝土试块抗压强度 - 养护龄期关系拟合公式

试块组次	拟合公式	拟合系数
W1S1	$f(t) = -15.43\exp(-t/5.26) + 42.02$	0.9785
W2S1	$f(t) = -19.73\exp(-t/5.15) + 45.78$	0.9898
W3S1	$f(t) = -24.99\exp(-t/5.02) + 50.87$	0.9893
W4S1	$f(t) = -29.36\exp(-t/5.17) + 55.46$	0.9853
W4S2	$f(t) = -29.79\exp(-t/4.56) + 56.38$	0.9894
W4S3	$f(t) = -31.53\exp(-t/3.79) + 57.24$	0.9899

表 8 不同养护环境的各组次混凝土试块
不同龄期的动态弹性模量

试块 组次	龄期/d					GPa
	1	3	7	14	28	
W1S1	34.9	35.9	36.5	36.9	37.0	
W2S1	35.7	36.9	37.6	38.2	38.5	
W3S1	36.6	37.8	38.6	39.2	39.4	
W4S1	37.3	38.5	39.3	40.1	40.3	
W4S2	38.2	39.5	40.5	41.2	41.4	
W4S3	39.0	40.7	41.8	42.3	42.7	

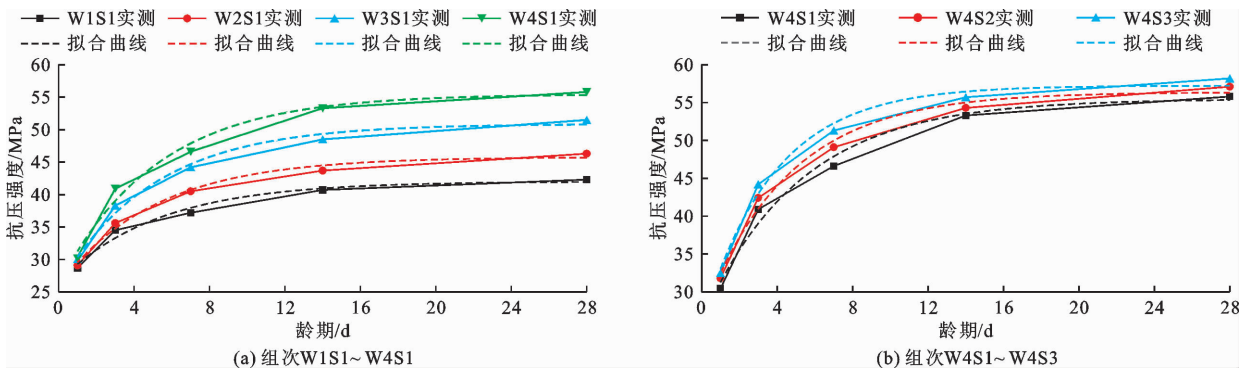


图 3 不同养护环境的各组次混凝土试块抗压强度随养护龄期的变化曲线

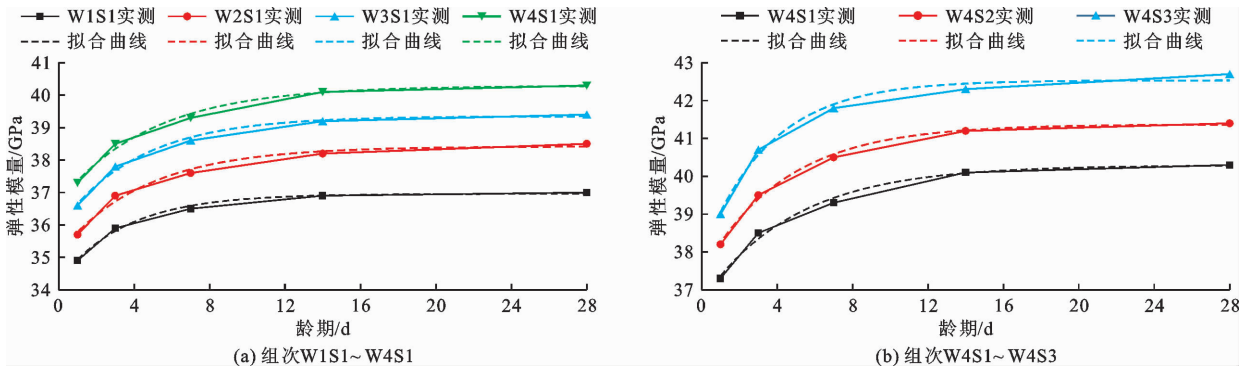


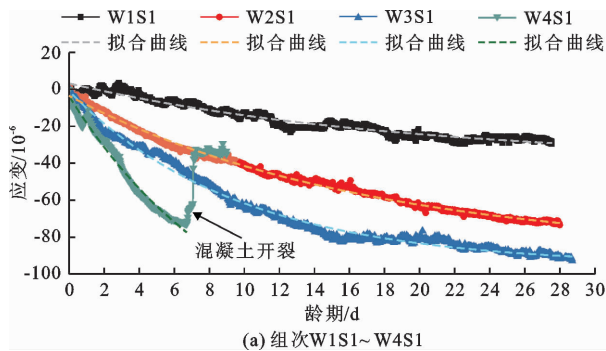
图 4 不同养护环境的各组次混凝土试块动态弹性模量随养护龄期的变化曲线

表 9 混凝土试块弹性模量 - 养护龄期关系拟合公式

试块组次	拟合公式	拟合系数
W1S1	$f(t) = -2.69\exp(-t/3.51) + 36.95$	0.9873
W2S1	$f(t) = -3.29\exp(-t/4.54) + 38.42$	0.9744
W3S1	$f(t) = -3.41\exp(-t/4.22) + 39.35$	0.9874
W4S1	$f(t) = -3.58\exp(-t/4.91) + 40.29$	0.9849
W4S2	$f(t) = -3.93\exp(-t/4.35) + 41.37$	0.9939
W4S3	$f(t) = -4.62\exp(-t/3.52) + 42.53$	0.9815

3.2 养护环境对混凝土限制收缩的影响

3.2.1 养护环境对混凝土应变的影响 不同养护环境的各组次混凝土试块实测应变随养护龄期的变



化曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出,养护温度越高,则混凝土应变速率越大(图 5(a));养护湿度越高,则混凝土应变速率越低(图 5(b))。其主要原因是温度越高,一方面增加了混凝土的水化作用,提高了其自收缩性;另一方面,温度的升高,使混凝土的干燥收缩作用增强,在自收缩和干燥收缩共同的作用下,应变速率不断提高。湿度的增大,减小了混凝土的干燥收缩作用,并且还带有一定的湿胀作用,因此应变速率减小。从组次 W1S1、W4S1、W4S2 可以看出,温度升高导致的应变增大可以通过提高湿度来降低,从而降低混凝土的开裂风险。

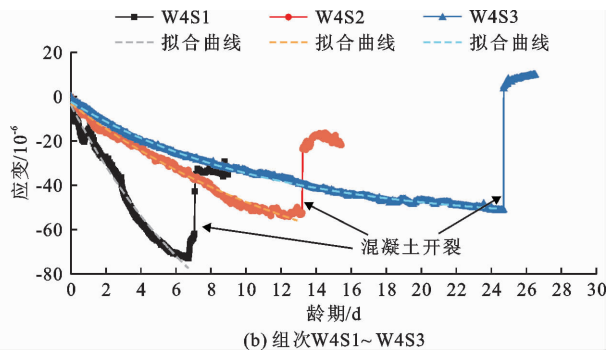


图 5 不同养护环境的各组次混凝土试块实测应变随养护龄期的变化曲线

由图 5(b)还发现,不同养护湿度的混凝土应变均发生了突变,突变大小约为 30 ~ 40 $\mu\epsilon$,同时在试验中观察到混凝土已发生开裂,这与文献[17]、[18]中结果一致。混凝土试块开裂情况如图 6 所示,用裂缝观测仪观察到裂缝宽度约为 0.06 mm。



图 6 混凝土试块表面裂缝

通过拟合发现,混凝土应变与养护龄期呈现良好的指数关系,两者的拟合关系表达式为 $\epsilon = a \cdot \exp(-t/b) + c$ 。将 a 定义为混凝土应变速率, b 为龄期影响系数, c 为 28 d 龄期的最终应变。拟合曲线见图 5,各组次拟合公式见表 10。结果表明,各组次拟合系数在 0.956 4 ~ 0.980 8 之间,拟合效果良好。

表 10 混凝土试块应变 - 养护龄期关系拟合公式

试块组次	拟合公式	拟合系数
W1S1	$\epsilon = 42.14\exp(-t/18.92) - 38.90$	0.9564
W2S1	$\epsilon = 85.20\exp(-t/16.95) - 88.71$	0.9943
W3S1	$\epsilon = 94.45\exp(-t/9.70) - 95.41$	0.9853
W4S1	$\epsilon = 145.76\exp(-t/9.55) - 149.55$	0.9811
W4S2	$\epsilon = 103.91\exp(-t/17.70) - 105.73$	0.9808
W4S3	$\epsilon = 56.55\exp(-t/10.10) - 56.10$	0.9955

3.2.2 养护环境对混凝土环向应力的影响 在混凝土开裂之前,混凝土与钢环共同作用,通过应力传递的原理,反映不同养护条件下的混凝土应力的变化情况。通过公式(2)、(3)可计算出混凝土的环向应力,其中混凝土应变取实测应变值,混凝土的泊松比取 0.2,不同养护环境的各组次混凝土试块环向应力随养护龄期的变化曲线如图 7 所示。

由图 7(a)可以看出,混凝土环向应力随着养护温度的升高而增大,主要是由于温度升高增强了混凝土的干燥收缩与自收缩性,导致其内部应力增大。养护温度从 -5 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 10 $^{\circ}\text{C}$ 和从 25 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 40 $^{\circ}\text{C}$ 时,混凝土环向应力增长速率均大于养护温度从

10℃升高至25℃的增长速,造成这种现象的主要原因是:(1)当混凝土处于-5~10℃和25~40℃时,其干燥收缩作用随养护温度的升高而升高,并且混凝土的水化作用随着温度的升高而增强,导致混凝土自收缩增加,从而使单位时间混凝土内部温度升高变得更快,自干燥作用增强;(2)当混凝土处于10~25℃时,混凝土的干燥收缩、自收缩以及水化升温带来的自干燥随温度的变化较其他两个温度区间平缓。

由图7(b)可以看出,混凝土环向应力随养护湿

度的增大而减小,主要是因为湿度的增大减弱了混凝土的干燥作用,并带来了一定的湿胀,从而降低了混凝土的收缩应变和内部应力。混凝土养护温度保持为40℃,当养护湿度为50%时,在第8d发生开裂;当养护湿度为65%时,在15d发生开裂;当养护湿度为80%时,在第25d发生开裂。这说明湿度的增大能够提高混凝土的抗开裂性能。但是早龄期受限混凝土在养护时会出现高温情况,因而不能仅通过提高湿度来彻底防止其发生开裂,还需要采取其他措施,如降低环境温度等。

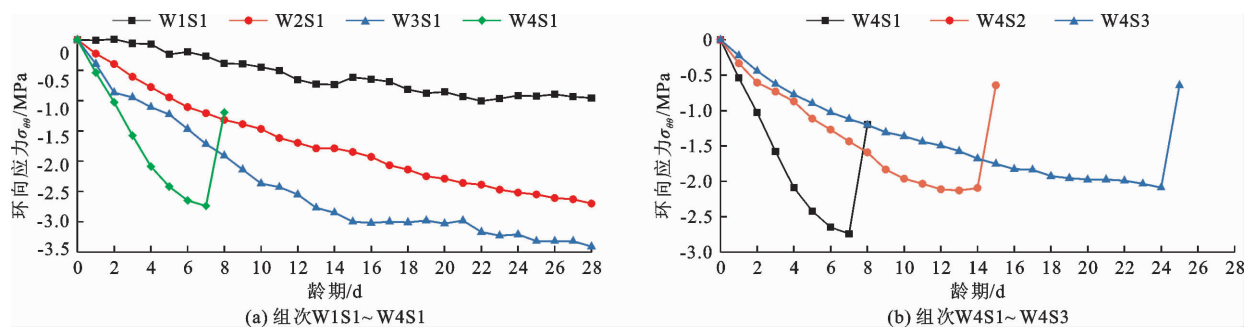


图 7 不同养护环境的各组次混凝土试块环向应力随养护龄期的变化曲线

3.2.3 限制收缩开裂模型预测 防止混凝土开裂一直是混凝土结构工程中的难点,早龄期混凝土开裂与养护环境、应变收缩速率、抗拉强度、抗压强度、弹性模量、拉伸徐变、断裂性能等息息相关,众多因素的相互交织影响给早龄期混凝土开裂的预测造成了一定的难度。虽然现有混凝土收缩开裂模型已有很多,例如:Dong等^[19]基于断裂力学,并通过引入虚拟温度场,提出了受限混凝土开裂预测模型;马丽娜^[12]基于强度理论提出了两侧与四侧约束混凝土的开裂预测模型,但是这些预测模型所涉及的徐变、断裂性能等参数不易获取。因此,有必要建立一种评估早龄期混凝土开裂的简便方法。本文通过养护温度和湿度、抗压强度、弹性模量、应变速率5个参数对早龄期受限混凝土的开裂时间进行预测。

根据养护环境对混凝土应变和应力的影响,得出开裂时间与养护湿度、抗压强度呈正比,与应变收缩速率、弹性模量以及养护温度的三次方成反比,所以早龄期混凝土开裂模型见函数式(4)、(5):

$$t = k_1 \frac{10^6 f_c \cdot RH}{f(T) \cdot E_c \cdot a} \tag{4}$$

$$f(T) = \left(\frac{T - t_1}{t_2}\right)^3 + t_3 \tag{5}$$

式中: t 为混凝土预测开裂时间,d; f_c 为混凝土28d龄期的抗压强度,MPa; T 为养护温度,℃; RH 为养

护湿度,%; E_c 为混凝土28d龄期的弹性模量,GPa; a 为混凝土应变收缩速率, $\mu\epsilon/d$; k_1 、 t_1 、 t_2 、 t_3 为相应的系数。

经过计算, $k_1 = 50$, $t_1 = 17.5$, $t_2 = 7.5$, $t_3 = 8$,将相关系数代入函数式(4)、(5),得出开裂时间的预测模型为:

$$t = 50 \times \frac{10^6 f_c \cdot RH}{\left[\left(\frac{T - 17.5}{7.5}\right)^3 + 8\right] \cdot E_c \cdot a} \tag{6}$$

不同参数值相应的预测开裂时间及实际开裂时间见表11。经过比较发现,预测开裂时间与实测开裂时间相近,预测结果良好。

表 11 不同参数值的早龄期混凝土开裂时间及实际开裂时间

养护温度/℃	养护湿度/%	28 d 抗压强度/MPa	28 d 弹性模量/MPa	应变速率/($\mu\epsilon \cdot d^{-1}$)	开裂时间/d	
					实测	预测
10	50	46.3	38500	85.20	-	50.4
25	50	51.5	39400	96.78	-	38.4
40	50	55.8	40300	145.76	7	6.8
40	65	57.1	41400	103.91	14	12.3
40	80	58.2	42700	56.55	25	27.5

注:表中“-”表示28d龄期内未开裂。

3.2.4 养护措施建议 综合养护环境对混凝土应

力、应变的影响,并结合文献[20]、[21]对早龄期混凝土的养护提出以下几点建议:

(1)应特别注意前 15 d 龄期的混凝土养护,养护温度应在 20 ~ 25 °C 之间,养护湿度应在 80% 以上,使混凝土的力学性能能够较早地得以发展,以获得较高的抗裂能力。

(2)混凝土施工养护温度尽量控制在 25 °C 左右,不宜超过 25 °C。在夏季温度较高的时段内最好不施工,否则应提高混凝土的养护湿度(如浇水养护)或者通过降温(如放冰块)来减小混凝土收缩应力;在冬季较低温度下施工时,为了获得较高的混凝土力学性能,可以加入抗冻剂降低混凝土内部自由水的冰点或者通过烧火提高环境温度。

(3)应尽可能提高混凝土的养护湿度,高湿度可以使早龄期混凝土更早地获得抗开裂能力。

4 结 论

通过圆环限制收缩试验研究了早龄期受限混凝土的力学性能以及收缩开裂与养护温度、养护湿度的关系,结果如下:

(1)早龄期混凝土的抗压强度、弹性模量随养护温湿度的增大而提高;抗压强度随龄期的增大比弹性模量随龄期的增大更加明显。

(2)养护温度的降低或者养护湿度的增大会减弱混凝土的干燥收缩以及自收缩作用,从而减小早龄期受限混凝土的收缩应变,降低混凝土的内部应力,最终降低混凝土开裂风险,提高其抗开裂能力。

(3)基于试验数据,以混凝土的力学性能、养护温度及湿度、应变速率等基本参数为变量提出了混凝土早龄期限制收缩开裂预测模型,可准确预测混凝土早龄期限制收缩的开裂时间,为混凝土开裂控制技术提供了基础数据支撑。

参考文献:

- [1] 冉智红. 建筑工程施工中混凝土裂缝的成因及治理[J]. 散装水泥, 2021(4): 67 - 68 + 74.
- [2] 张 强. 水利水电工程施工中混凝土裂缝的防治[J]. 山西水利科技, 2021(3): 38 - 40.
- [3] 涂洪华. 混凝土桥梁裂缝成因分析及应对措施[J]. 工程

技术研究, 2021, 6(8): 87 - 88.

- [4] 纳启财. 高原地区环境及养护条件对混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(1): 10 - 13.
- [5] 葛 昕. 高原气候条件对混凝土性能及开裂机制影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [6] 熊 羽. 高原低温环境下桥梁高性能混凝土的制备及性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [7] 杨益民. 养护对泡沫混凝土收缩及抗裂性能的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [8] 李茂光. 西部温湿度条件下混凝土体积变形与开裂规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [9] 陈华鑫, 王 铜, 何 锐, 等. 高原复杂气候环境对混凝土气孔结构与力学性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(2): 30 - 37.
- [10] 李福海, 文 涛, 唐慧琪, 等. 干寒大温差下早龄期混凝土收缩特性及防裂技术[J/OL]. 西南交通大学学报, 2022 [2022-05-23] (2022-03-24). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20220323.2216.018.html>.
- [11] 邱玉深. 混凝土结构的变形约束度及裂缝控制[J]. 混凝土, 2005(5): 6 - 9.
- [12] 马丽娜. 高性能混凝土约束收缩开裂性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [13] 罗 昊. 限制收缩下早龄期混凝土破坏机理试验与数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [14] 董 伟, 罗 昊, 王福祿, 等. 限制收缩椭圆环约束度理论与试验设计[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 271 - 276.
- [15] 陈若曦. 混凝土早期约束收缩开裂机理及试验研究[J]. 居舍, 2019, 38(4): 37.
- [16] GONG Zhiguo. Cracking studies of high-performance concrete[D]. West Virginia: West Virginia University, 2006.
- [17] 吴林妹. 超高性能混凝土早期收缩性能与长期稳定性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [18] 赵晓瑜. 限制收缩条件下早龄期纤维混凝土抗裂性评价方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [19] DONG Wei, ZHOU Xiangming, WU Zhimin, et al. Effects of specimen size on assessment of shrinkage cracking of concrete via elliptical rings: Thin vs. thick [J]. Computers and Structures, 2016, 174: 66 - 78.
- [20] 伍鹤皋, 马 铢, 石长征. 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道结构研究综述[J]. 水力发电学报, 2020, 39(11): 1 - 12.
- [21] 张国新, 刘有志, 王振红, 等. 基于现场温度实验的混凝土浇筑初期裂缝产生机理及防裂措施[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 213 - 217.