

-5℃环境下混凝土抗压强度变化规律及 预测模型研究

张戎令^{1,2}, 闫昊起¹, 张家玮¹, 郭海贞³, 王立博⁴

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃畅陇公路养护技术研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 4. 中铁二十一局集团第一有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要 目的 研究混凝土在-5℃环境下的强度变化规律以及不同引气剂掺量和负温环境对混凝土强度预测模型的影响。方法 在标准养护环境及-5℃环境下测试不同引气剂掺量的混凝土抗压强度, 分析负温环境和引气剂掺量对混凝土强度增长的影响。利用成熟度理论计算标准养护(20℃)环境和-5℃环境两种工况下的成熟度并建立强度预测模型。结果 在-5℃环境下, 由于负温环境造成水泥水化缓慢, 导致混凝土强度增长缓慢; 在标准养护环境和-5℃养护环境两种工况下, 混凝土抗压强度值随引气剂掺量增大而减小; 在入模温度为15℃时, A1、A2、A3、A4、A5试验组28d龄期的抗压强度与B1、B2、B3、B4、B5试验组49d龄期的抗压强度近似相等, 其偏差值在-0.77%~0.64%。结论 修正公式能精确预测-5℃环境时的混凝土强度, 计算式可预测实际负温养护下混凝土强度增长。

关键词 负温; 强度; 龄期; 成熟度; 模型

中图分类号 TU528

文献标志码 A

Change Law and Prediction Model of Concrete Compressive Strength at -5℃

ZHANG Rongling^{1,2}, YAN Haoqi¹, ZHANG Jiawei¹, GUO Haizhen³,
WANG Libo⁴

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, China, 730070; 2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road and Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, China, 730070; 3. Gansu Changlong Highway Maintenance Technology Research Institute Co. Ltd., Lanzhou, China, 730070; 4. First Co. Ltd., China Railway 21st Bureau Group, Urumqi, China, 830011)

Abstract: The strength variation of concrete at -5℃ and the influence of different air entrained

收稿日期: 2021-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52068042, 51768033); 长江学者和创新团队发展计划滚动支持项目(IRT_15R29)

作者简介: 张戎令(1984—), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁结构方面研究。

agent content and negative temperature on the strength prediction model of concrete were studied. The compressive strength of concrete with different content of air entrained agent was tested in standard curing environment and $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ environment, the influence of negative temperature environment and content of air entrained agent on concrete strength growth was analyzed as well. The maturity under standard curing and $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ curing was calculated by maturity theory, also the strength prediction model was established. At $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, cement hydration was slow due to negative temperature environment, resulting in slow growth of concrete strength. In standard curing environment and $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ curing environment, the compressive strength of concrete decreases with the increase of air entraining agent content. When the molding temperature was $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, the compressive strength of A1, A2, A3, A4 and A5 at the age of 28 d was approximately equal to that of B1, B2, B3, B4 and B5 at the age of 49d, with a deviation between -0.77% and 0.64% . The modified formula can accurately predict concrete strength under $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ environment, and the calculated formula can predict concrete strength growth under actual negative temperature curing.

Key words: negative temperature; strength; age; maturity; model

我国西北部地区冬季气温较低,部分高海拔地区可达零度以下,尤其在高原冻土地区,气候环境很恶劣。因此在高原冻土地区进行混凝土工程必须考虑负温下混凝土的耐久性问题^[1-6]。梁柯鑫等^[7]和段运等^[8]研究了 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下不同水灰比对混凝土抗氯离子渗透性和孔结构的影响。郭海贞等^[9]对负温环境和矿物掺合料耦合作用对混凝土性能的影响做了探究。杨英姿等^[10]研究了不同种类的防冻剂、矿物掺合料对正、负温下水泥净浆、砂浆及混凝土力学性能的影响。张凯等^[11]研究了在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下混凝土强度、孔隙结构及抗冻耐久性之间的关系。闻洋等^[12]研究橡胶颗粒粒径、掺量以及防冻剂对负温下橡胶混凝土性能的影响。张粉芹等^[13]通过试验研究发现引气剂较大程度上增加混凝土闭口孔隙率,对混凝土抗冻性很有利,但混凝土强度有所降低。刘军等^[14]对

低温条件下矿物掺合料对混凝土强度发展及抗冻临界强度的影响做了研究。但是,目前对于负温养护下混凝土强度规律研究仍需要完善。笔者通过试验比较不同含气量在标准养护($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境与 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下的混凝土抗压强度并建立了负温下强度预测模型,得出混凝土强度变化规律,以期指导冬季冻土地区混凝土的施工与使用。

1 试验

1.1 试验材料

采用甘肃省祁连山水泥 P. O 42.5 级普通硅酸盐水泥,技术指标如表 1 所示。细集料采用级配良好的水洗河砂,含泥量为 2.4% ,表观密度为 2645.8 kg/m^3 ,细度模数为 2.47 ,属中砂;粗骨料选用连续级配碎石,粒径 $5\sim31.5\text{ mm}$;水用自来水;引气剂采用 SJ-2 型引气剂。

表 1 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥技术指标
Table 1 Technical index of ordinary Portland cement P. O 42.5

烧失量/%	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	$w(\text{SO}_3)/\%$	$w(\text{Cl}^-)/\%$	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3.05	349	2.56	0.023	95	140	5	8.9	23.4	46.6

1.2 试验设计

试验按照不同的养护方式和引气剂掺量可分为 A1、A2、A3、A4、A5, B1、B2、B3、B4

和 B5 共 10 组。标号 A 表示标准养护 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境,标号 B 表示恒定 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境;1、2、3、4、5 分别表示引气剂掺量分别为 0.00% 、

0.05%、0.10%、0.15%、0.20%。

(1)配合比设计

恒定负温 -5℃环境和标准养护环境下混凝土配合比采用相同配合比,水胶比采用 0.38,砂率为 45%。水、水泥、碎石、沙子掺量如表 2 所示。

表 2 配合比各材料的掺量

Table 2 The amount of doping of each material				
掺量/(kg·m ⁻³)				w(减水剂)/%
水	水泥	碎石	沙子	
144	380	1059	867	2

(2)入模温度控制

称取材料:粗细骨料、水泥、水、外加剂分别装在容器中一起放入恒温养护箱内进行预温养护 24 h 控制入模温度。试验入模温度采取 15℃,入模温度控制在(15±1)℃。在浇筑试块时,将预温养护的原材料取出并快速地倒进搅拌机进行搅拌、浇筑、振捣等过程。拿取材料到试块浇筑完成的时间控制在 15 min 内。

(3)养护方式

浇筑的混凝土放在两种工况下:将室内养护 24 h 的 5 组混凝土试块 A1、A2、A3、A4、A5 脱模放入标准养护室。浇筑的另外 5 组混凝土试块 B1、B2、B3、B4、B5 入模装入塑料薄膜袋中放入 -5℃恒温大气模拟箱内养护,3 d 后脱模持续养护,并在 -5℃恒温箱内养护。

(4)试验方案

按照配合比称取定量的水泥、砂子、碎石等材料,按照要求拌和混凝土,在标准养护环境和恒定 -5℃环境下养护混凝土试件并测试在两种养护环境下各龄期混凝土试块的抗压强度。

2 混凝土成熟度

2.1 Saul 成熟度方程

英国学者 A. G. A. Saul^[15]提出基于温度

和时间的成熟度理论,在此基础上进一步发展得出成熟度计算式。

$$M = \sum_0^t (T_c - T_0) \cdot \Delta t.$$

(1)

式中: M 为龄期为 t 时的混凝土成熟度,℃·h; T_c 为时间间隔 Δt 内混凝土平均温度℃; T_0 为基准温度。

2.2 成熟度-强度模型

成熟度指标可以间接反映混凝土性能的变化,但它与混凝土强度之间并未存在着公式化的理论关系。因此,不同学者根据自己的研究分析提出了各式各样的强度-成熟度经验关系模型^[16]。ASTMC 1074^[17]推荐指数函数、双曲函数模型。

指数函数模型:

$$S = S_u e^{-[\tau/M]^a}.$$

(2)

式中: S 表示成熟度为 M 时的抗压强度,MPa; S_u 表示极限抗压强度,MPa; τ 表示时间特征常数; a 为形状系数。

双曲函数模型^[18]:

$$S = M/(mM + n).$$

(3)

式中: m 、 n 为常数。

文献[19]中用对数函数模型来表示混凝土强度和成熟度的关系:

$$S = a + b \log(M).$$

(4)

式中: a 、 b 为常数。

3 结果与分析

3.1 测试混凝土抗压强度及计算成熟度

在标准养护环境和 -5℃环境下的混凝土抗压强度变化规律如图 1 所示。由图 1(a)可知,混凝土 28 d 龄期时 A2、A3、A4、A5 的混凝土抗压强度值分别是 A1 的 90%、76.6%、63.8%、50.5%;由图 1(b)可知,混凝土 28 d 龄期时 B2、B3、B4、B5 的混凝土抗压强度值分别是 B1 的 81.59%、70.96%、60.91%、48.34%。在标准养护环境和 -5℃环境下,混凝土 28 d 龄期时掺加引气剂的情况下混凝土抗压强度值均低于不掺引气剂时的

混凝土抗压强度值。在相同龄期、标准养护和负温两种环境下,引气剂的掺量与混凝土抗压强度值成反比,且引气剂掺量越大,混

凝土强度降低程度越大。因此,在满足强度要求的前提下,需要考虑合理确定引气剂掺量。

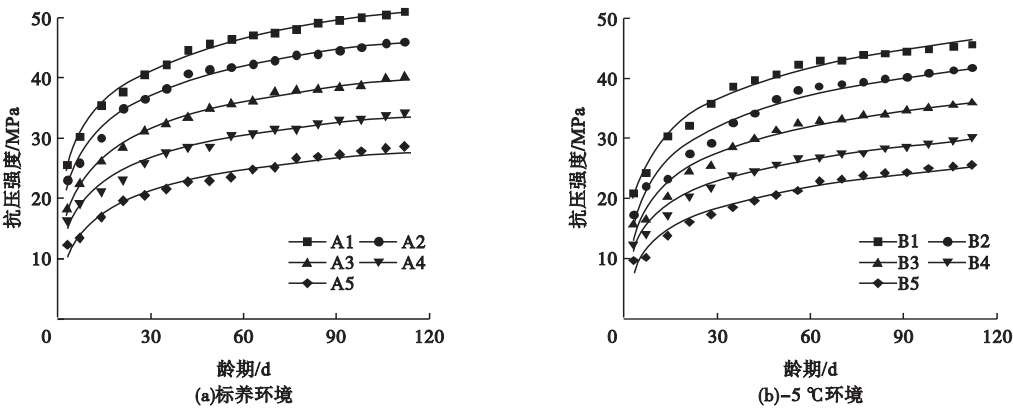


图1 不同龄期的抗压强度

Fig. 1 Compressive strength values at different ages under standard curing

图2为不同引气剂掺量的混凝土抗压强度值。

31.1 MPa,与恒定-5℃环境下49 d龄期时强度近似相等,抗压强度为31.3 MPa,偏差为0.64%;引气剂掺量为0.15%的混凝土在标准养护环境下28d的抗压强度为25.9 MPa,与恒定-5℃环境下49 d龄期时强度近似相等,抗压强度为25.7 MPa,偏差为-0.77%。引气剂掺量为0.20%的混凝土在标准养护环境下28d龄期的抗压强度为20.5 MPa,与恒定-5℃环境下49 d龄期时强度近似相等,抗压强度为20.6 MPa,偏差为0.49%。因此,不同引气剂掺量下混凝土强度规律为:在15℃入模温度条件下,试验组A1、A2、A3、A4、A5,28 d龄期的抗压强度与试验组B1、B2、B3、B4、B5,49 d龄期的抗压强度近似相等,其偏差值在-0.77%~0.64%。

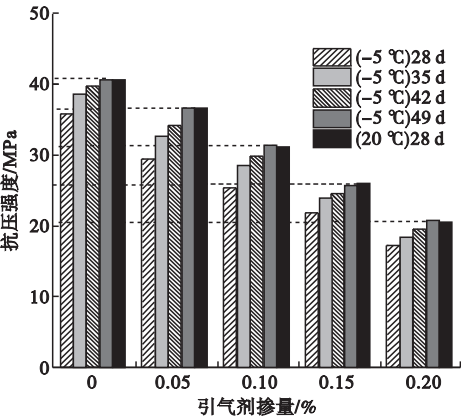


图2 不同引气剂掺量的混凝土抗压强度值

Fig. 2 The strength value of concrete with different content of air-entraining agent

由图2可知,引气剂掺量为0.00%的混凝土在标准养护环境下28d龄期的抗压强度为40.59 MPa,恒定-5℃环境下49 d龄期的抗压强度值为40.7 MPa,强度偏差仅为0.25%。引气剂掺量为0.05%的混凝土在标准养护环境下28 d龄期的抗压强度为36.54 MPa,与恒定-5℃环境下49d龄期时强度近似相等,抗压强度为36.56 MPa,偏差为0.06%。引气剂掺量为0.10%的混凝土在标准养护环境下28 d龄期的抗压强度为

根据式(1)计算两种养护环境下各龄期的成熟度(见表3)。由表3可得,在相同龄期、引气剂掺量为0时,对标准养护环境和-5℃环境两种工况的抗压强度值作比较:混凝土3 d、7 d、14 d、28 d、49 d、56 d龄期时-5℃环境下混凝土抗压强度值分别是标准养护环境下混凝土抗压强度值的81.9%、80%、86.2%、88.5%、89.2%、91.7%。由此可知,在相同龄期和相同引气剂掺量时,

-5℃环境下混凝土强度均低于标准养护环境下的强度,这说明负温环境不利于混凝土的强度增长。水泥水化使得混凝土产生强

度,而水泥水化是很复杂的物理化学过程,在-5℃环境下化学反应速率低、水泥水化程度低,导致混凝土强度增长慢。

表3 式(1)计算得各龄期的成熟度

Table 3 The maturity value of each age is calculated by using the formula(1)												
龄期/d	成熟度	抗压强度/MPa					成熟度	抗压强度/MPa				
	A/(℃·h)	A1	A2	A3	A4	A5	B/(℃·h)	B1	B2	B3	B4	B5
3	2 060	25.6	23.0	18.2	16.4	12.3	540	21.0	17.3	15.7	12.4	9.7
7	5 040	30.3	25.9	22.4	19.2	13.4	1 260	24.3	22.1	16.5	14.1	10.2
14	10 080	35.5	30.1	26.1	21.1	16.9	2 520	30.4	23.3	20.3	17.2	13.8
28	20 160	40.6	36.5	31.1	25.9	20.5	5 040	35.8	29.2	25.4	21.8	17.3
49	35 280	45.7	41.5	34.9	28.6	22.9	8 820	40.7	36.6	31.3	25.7	20.6
56	40 320	46.5	41.8	35.7	30.5	23.5	10 080	42.3	38.1	32.5	26.7	21.3

3.2 标准养护环境下模型分析

根据指数函数模型式(2)、双曲函数模型式(3)、对数函数模型式(4)对标准养护环境下的混凝土抗压强度值与对应成熟度之间的关系进行拟合(见图3)。

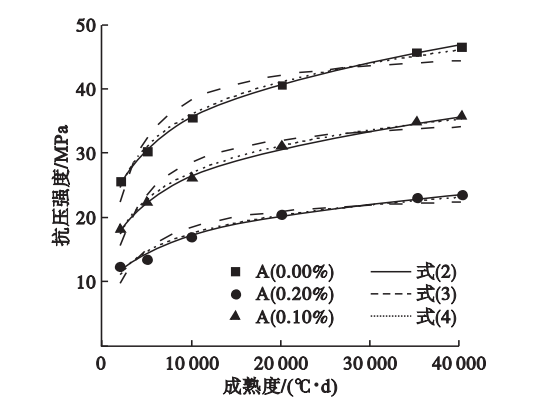


图3 标准养护环境混凝土强度-成熟度拟合

Fig.3 Fitting curve of strength-maturity of concrete in standard curing environment

利用 origin 曲线拟合工具,拟合得到标准养护条件下不同引气剂掺量的强度数据,从图3可以看到,用式(2)拟合的精度最高,在0.20%引气剂掺量、7 d龄期,拟合的最大偏差为7.82%。用式(4)拟合的精度也较高,在0.20%引气剂掺量、7 d龄期,拟合的最大偏差为9.97%。相比指数、对数函数模型的拟合结果,用双曲函数模型的式(3)拟合的结果精度最差,在0.10%引气剂掺量、14 d龄期,拟合的最大偏差为9.87%。

表4为拟合所得3种模型的参数,式(2)、式(4)拟合曲线的 R^2 值均在0.95以上,引气剂掺量分别为0.00%和0.10%时 R^2 大于0.99,这表明式(2)、式(4)对实际强度值的拟合效果很好,式(4)的拟合效果要比式(2)的拟合效果好;式(3)拟合的 R^2 值全部小于0.90,拟合效果不如式(2)、式(4)的好。

表4 标准养护条件下各模型参数

引气剂 掺量/%	指数函数模型式(2)				双曲函数模型式(3)			对数函数模型式(4)		
	S_u	$\tau/10^9$	α	R^2	m	n	R^2	a	b	R^2
0.00	512.078	3.64	0.076 6	0.997 5	0.021 3	48.038	0.886 8	-30.324 5	16.592 8	0.990 7
0.10	419.587	2.12	0.082 9	0.998 1	0.027 4	75.315	0.903 2	-28.438 8	13.850 9	0.990 7
0.20	380.160	21.8	0.077 5	0.970 3	0.041 5	125.283	0.850 5	-19.760 6	9.317 3	0.958 3

3.3 负温环境下模型分析

在标准养护环境得到两种预测效果较好的强度预测模型:指数函数模型式(2)、对数函数模型式(4)。利用两种预测效果较好模型与-5℃环境下的各龄期的成熟度来预测-5℃环境下混凝土抗压强度,并对预测强度与实测强度进行比较。图4为-5℃环境下式(2)与式(4)实测-预测混凝土强度,图中点线(±10%)、短划线(±20%)和点划线(±30%)分别表示强度偏差线,数据点越靠近图中的45°实线,表示强度预测模型的预测精度越高。

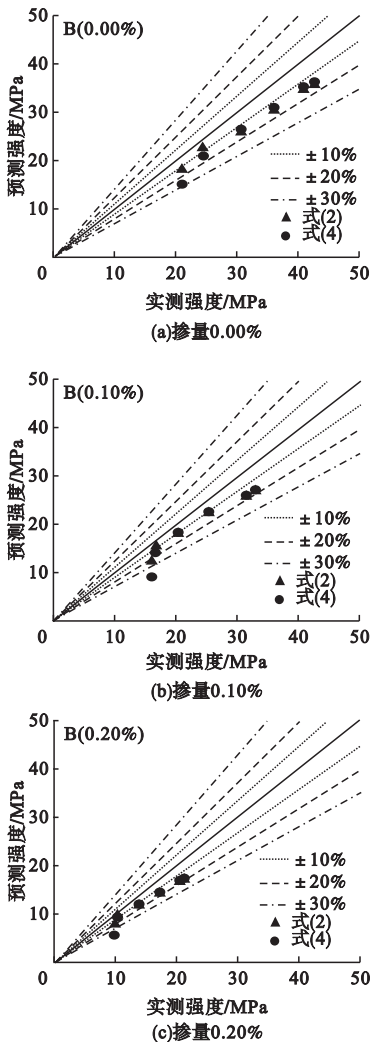


图4 -5℃式(2)与式(4)实测-预测混凝土强度
Fig. 4 Measured strength-predicted concrete strength in formula(2) and (4) at -5℃

从图4可以看出,预测抗压强度值都小于实测抗压强度。式(2)预测强度最大偏差发生在3d龄期、0.20%引气剂掺量的情况下,达到了-20.1%。7d龄期、引气剂掺量分别为0.00%、0.10%、0.20%的强度预测偏差也分别达到-8.2%、-4.7%、-2.6%。式(4)预测强度的最大偏差发生在3d龄期、0.10%引气剂掺量的条件下,达到了-30.2%;7d龄期,引气剂掺量分别为0.00%、0.10%、0.20%的强度预测偏差也分别达到-11.3%、-11.1%、-11.0%。在28d、0.20%引气剂掺量时,式(2)、式(4)预测强度达到最大偏差值,分别为-20.1%、-19.1%。

3.4 负温养护下混凝土抗压强度预测模型修正

式(2)与式(4)所预测的混凝土强度与实测强度的差值在±30%,差值范围较大,因对式(2)中的参数 S_u 极限抗压强度进行修正,修正得强度预测式为

$$S = kS_u e^{-[\tau/m]^\alpha}$$
 (5)

式中: k 为修正系数。

图5为-5℃环境下修式(5)实测-预测混凝土强度。在7d龄期、引气剂掺量分别为0.00%、0.10%、0.20%时强度预测偏差分别达到-6.38%、-9.82%、-12.6%,最大偏差发生在0.20%引气剂掺量的情况下,达到了-12.6%。在28d龄期、引气剂掺量分别为0.00%、0.10%、0.20%的强度预测偏差分别达到0.95%、-1.89%、3.82%,最大偏差也发生在0.20%引气剂掺量的情况下,达到了3.82%。强度预测效果随引气剂掺量的不同也有差异,引气剂掺量为0.00%时,预测效果最好,强度偏差在各个龄期都小于7%。引气剂掺量为0.10%时,预测效果相对于引气剂掺量为0.00%时较差,强度偏差在各个龄期都小于10%。引气剂掺量为0.20%时,预测效果最差,强度偏差在各个龄期都小于13%。在-5℃环境下,利用修正

式(5)预测混凝土强度,预测偏差范围均在±10%附近,预测结果较为精确。

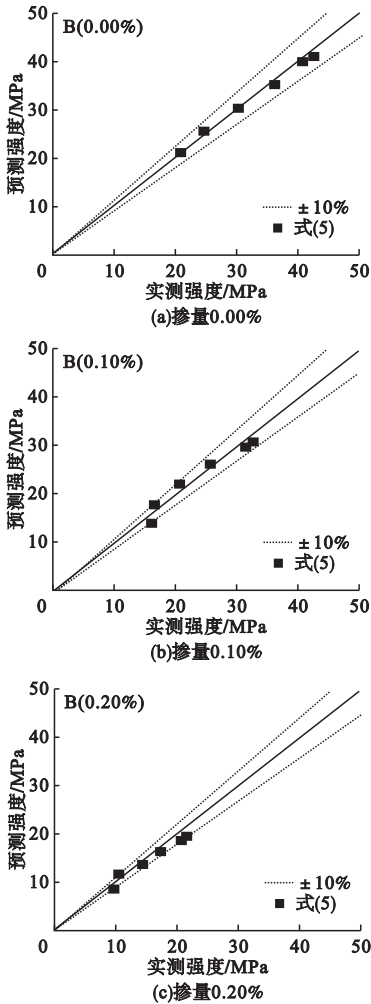


图5 -5℃修正式(5)实测-预测混凝土强度

Fig. 5 Measured strength-predicted concrete strength in modified formula(5) at -5℃

4 结 论

(1)在标准养护环境和-5℃环境下,引气剂掺量越大,混凝土抗压强度值越小。因此,满足强度要求的前提下,需结合实际工程抗冻性要求,合理确定引气剂掺量,以免对强度造成不利影响;在-5℃环境下,由于负温环境造成水泥水化缓慢,导致混凝土的强度增长缓慢。

(2)在15℃入模温度条件下,试验组A1、A2、A3、A4、A5,28 d龄期的抗压强度与

试验组B1、B2、B3、B4、B5,49 d龄期的抗压强度近似相等,其偏差值在-0.77%~0.64%。

(3)利用指数函数模型和对数函数模型可较精确地预测标准养护环境混凝土抗压强度值;利用标准养护环境得到的指数函数模型、对数函数模型预测混凝土抗压强度值发现:养护前期预测精度较高,养护后期预测精度较低。

(4)利用修正式可精确预测-5℃环境时的混凝土强度,计算式可为预测实际负温下混凝土强度。

参考文献

[1] 胡玉兵,苗广营,熊羽. 负温环境下混凝土力学性能及水化特征研究[J]. 建筑材料学报, 2017,20(6):975-980.
(HU Yubing, MIAO Guangying, XIONG Yu. Mechanical properties and hydration characteristics of concrete subject to subzero temperature condition [J]. Journal of building materials, 2017,20(6):975-980.)

[2] 王起才,陈川,张戎令,等. 考虑持续低温影响的水泥水化放热计算模型[J]. 建筑材料学报, 2015,18(2):249-254.
(WANG Qicai, CHEN Chuan, ZHANG Rongling, et al. Computing model for the hydration heat of cement paste considering the effect of sustained low temperature [J]. Journal of building materials, 2015,18(2):249-254.)

[3] 张凯,王庆石,王起才,等. 在等强度下-3℃与标准养护环境引气混凝土渗透性能与孔结构的关系[J]. 硅酸盐通报, 2015,34(12):3551-3556.
(ZHANG Kai, WANG Qingshi, WANG Qicai, et al. In the -3℃ and standard conservation of the environment, permeability and properties of pore structure in air-entraining concrete under the same strength [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2015,34(12):3551-3556.)

[4] SHU Huidong, DE Chengfeng, SHOU Hengjiang. Effect of freezing temperature on the microstructure of negative temperature concrete [J]. Advanced materials research, 2013, 663: 343-348.

[5] 倪祥根. 早期受冻对混凝土性能的影响[J]. 土木工程学报, 1959,6(1):50-62.
(NI Xianggen. Effects of early freezing on concrete properties [J]. China civil engineering journal, 1959,6(1):50-62.)

[6] 王敬宇,叶家元,程华,等. 负10℃条件下缓凝剂对快硬硫铝酸盐水泥水化及强度的影响

- [J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1285 - 1294. (WANG Jingyu, YE Jiayuan, CHENG Hua, et al. Effect of retarder on hydration and strength of rapid-hardening sulfoaluminate cement at -10°C [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2020, 48(8): 1285 - 1294.)
- [7] 梁柯鑫, 王起才, 张凯, 等. 低温(3°C)养护条件下不同水胶比对引气混凝土孔结构参数及抗渗性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(3): 749 - 754. (LIANG Kexin, WANG Qicai, ZHANG Kai, et al. Effect of different water-binder ratio on pore structure parameters and impermeability of air-entraining concrete at low temperature (3°C) [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2018, 37(3): 749 - 754.)
- [8] 段运, 王起才, 张戎令, 等. 低温(3°C)养护条件下不同水灰比混凝土细观孔结构及抗氯离子渗透性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 648 - 653. (DUAN Yun, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Research on the effect low temperature (3°C) curing condition and various water-cement ratio have on the resistance to chloride ions penetration and mesoscopic structure of concrete [J]. Journal of railway science and engineering, 2016, 13(4): 648 - 653.)
- [9] 郭海贞, 张戎令, 王起才, 等. 负温条件和矿物掺合料耦合作用对混凝土强度和抗渗性影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(10): 2475 - 2482. (GUO Haizhen, ZHANG Rongling, WANG Qicai, et al. Influence of negative temperature conditions and mineral admixture coupling on strength and impermeability of concrete [J]. Journal of railway science and engineering, 2019, 16(10): 2475 - 2482.)
- [10] 杨英姿, 巴恒静. 负温防冻剂混凝土的界面显微结构与性能[J]. 硅酸盐学报, 2007(8): 1125 - 1130. (YANG Yingzi, BA Hengjing. Interfacial microstructure and mechanical properties of concrete with antifreezing admixture at subzero temperature [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2007(8): 1125 - 1130.)
- [11] 张凯, 王起才, 王庆石, 等. 3°C 养护下引气混凝土早期强度及抗冻性能研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(2): 5 - 9. (ZHANG Kai, WANG Qicai, WANG Qingshi, et al. Research on early strength and freeze-proof resistance of air-entraining concrete under 3°C curing [J]. Industrial construction, 2015, 45(2): 5 - 9.)
- [12] 闻洋, 陈伟, 张迎春. 早期负温养护环境下橡胶混凝土强度发展及抗氯离子渗透性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(5): 1336 - 1342. (WEN Yang, CHEN Wei, ZHANG Yingchun. Study on strength development and resistance to chloride ion penetration of rubber concrete at early negative temperature [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019, 38(5): 1336 - 1342.)
- [13] 张粉芹, 王海波, 王起才. 掺合料和引气剂对混凝土结构与性能影响的研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 180 - 185. (ZHANG Fenqin, WANG Haibo, WANG Qicai. Study on effects of mineral admixture and air-entraining agent on the pore structure and performance of concrete [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2010, 29(1): 180 - 185.)
- [14] 刘军, 李振国, 田悦, 等. 低温条件下矿物掺合料对混凝土强度发展及抗冻临界强度的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006(3): 415 - 418. (LIU Jun, LI Zhenguo, TIAN Yue, et al. Study on the strength development of low-temperature [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2006(3): 415 - 418.)
- [15] SAUL A G A. Principals underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure [J]. Magazine of concrete research, 1951, 2(6): 127 - 140.)
- [16] 朱然, 徐俊, 占羿箭. 混凝土成熟度理论研究与应用现状综述[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(10): 21 - 26. (ZHU Ran, XU Jun, ZHAN Yijian, et al. Review on the research and application of concrete maturity theory [J]. China concrete and cement products, 2020(10): 21 - 26.)
- [17] ASTM. Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method: C1074 - 98 [S]. Philadelphia: Annual book of ASTM standards, 1987.
- [18] KEE C. F. Relationship between strength and maturity of concrete [J]. ACIJ., 1977, 54(12): 196 - 203.
- [19] TOPCU I B, KARAKURT C, ALTUN F. Using the maturity method in concrete producec with setting agents [J]. Journal of materials in civil engineering, 2007, 19(7): 569 - 574. (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)