

掺钢和玄武岩纤维混凝土的冻融循环试验研究

杨 益, 宁翠萍, 程瑞芳, 李萍萍

(杨凌职业技术学院 建筑工程分院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 钢纤维和玄武岩纤维能够有效提高混凝土耐久性, 利用冻融循环试验, 对掺钢和玄武岩纤维的混凝土抗冻性能及其冻融损伤计算模式进行研究。试验结果表明: 混凝土抗冻性受到纤维种类和纤维体积掺量影响明显, 当掺加体积率 1.5% 钢纤维和 0.05% 玄武岩纤维时混凝土抗冻性能最优, 可达到 F250 等级水平。并对混凝土的冻融损伤机理和纤维的增强作用进行深入分析, 确定了基于相对动弹性模量的冻融损伤计算模式和基于冻融累积损伤的冻融损伤计算模式。经过试验数据的对比分析, 得出基于相对动弹性模量的冻融损伤计算模式精度更高, 拟合而成的一元二次函数衰减模式比指数函数衰减模式具有更高的精度, 相关系数均达到 0.99 以上, 更适合用来预测纤维混凝土的冻融耐久性。

关键词: 钢纤维; 玄武岩纤维; 混凝土; 冻融循环试验; 损伤计算模式; 相对动弹性模量; 冻融累积损伤

中图分类号: TU528.572; TU502

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0182-05

Experimental study on freeze-thaw cycling of concrete mixed with steel and basalt fiber

YANG Yi, NING Cuiping, CHENG Ruifang, LI Pingping

(Department of Architectural Engineering, Yangling Vocational and Technical College, Yangling 712100, China)

Abstract: Steel fiber and basalt fiber can effectively improve the durability of concrete. Using the freeze-thaw cycle test, the steel and basalt fiber reinforced concrete frost resistance and freeze-thaw damage calculation model were studied. The results show that the frost resistance of concrete is obviously affected by the fiber type and fiber volume. When the volume fraction is 1.5% steel fiber and 0.05% basalt fiber, the frost resistance of concrete is the best, which can reach the level of F250. The freezing and thawing damage mechanism and the enhancement of fiber were analyzed, which determined the freeze-thaw damage calculation model based on relative elastic modulus and freeze-thaw cumulative damage. Based on the comparative analysis of the experimental data, it is concluded that the freeze-thaw damage calculation model based on the relative dynamic elastic modulus is more accurate. The decay mode of the quadratic function is better than that of the exponential function decay mode. The correlation coefficient of the quadratic function decay mode reached 0.99 or higher, which is more suitable for predicting the freeze-thaw durability of fiber concrete.

Key words: steel fiber; basalt fiber; concrete; freeze-thaw cycle test; damage calculation model; relative dynamic elastic modulus; freeze-thaw cumulative damage

我国北方大部分地区地处气候寒冷的严寒地区, 据调查, 这里建设的水工混凝土建筑物由于受到严寒气候的影响, 均发生不同程度的冻融破坏现象, 对建筑物的安全可靠运行产生了严重影响。因此, 有必要深入开展混凝土的抗冻耐久性研究, 长期以来, 关于普通混凝土抗冻性能的研究较多, 并取得了

一些成果^[1-5]。然而, 较少研究涉及到外掺纤维的混凝土抗冻性能。程红强等^[6]研究了聚丙烯纤维对混凝土抗冻性能的影响及强度损伤模型; 刘大鹏等^[7]研究了聚丙烯纤维和钢纤维混杂下的混凝土抗冻性, 并且构建了一元二次函数型的分段式数学模型来预测纤维混凝土寿命; 刘卫东等^[8]对冻融试

收稿日期: 2017-03-21; 修回日期: 2017-04-12

基金项目: 杨凌职业技术学院自然科学研究基金项目 (A2015014)

作者简介: 杨 益 (1984-), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 讲师, 主要从事新型建筑材料与建筑施工管理方面的教学与研究工作。

验混凝土试件进行了共振法和超声波法检测,测出超声波波速和动弹性模量的参数变化规律,进而依据损伤力学原理建立了纤维混凝土在冻融损伤条件下的本构模型。

本课题组基于前人研究成果,利用快速冻融循环试验的方法,设计了 5 组掺钢和玄武岩纤维的混凝土试件,目的是研究钢纤维与玄武岩纤维对混凝土抗冻性能的影响规律,得出两种纤维的最优掺和比例。并建立以相对动弹性模量和冻融损伤累积为损伤变量的纤维混凝土冻融损伤计算模式,验证其精度和可靠性,对纤维混凝土的冻融耐久性预测提供参考。

1 冻融循环试验

1.1 原材料的选用

天然细骨料选用Ⅱ区渭河河砂,细度模数为 2.9,表观密度为 2 630 kg/m³,堆积密度为 1 500 kg/m³;天然粗骨料选用碎石,最大粒径 40 mm,表观密度为 2 710 kg/m³,堆积密度为 1 590 kg/m³;水泥选用陕西耀县生产的 P·O42.5 级秦岭牌普通硅酸盐水泥,细度为 3.2%;拌合水为洁净的自来水;外加剂选用 HY-YQ 引气减水剂,为陕西浩宇外加剂公司生产;钢纤维选用剪切哑铃型钢纤维,为浙江博恩金属制品有限公司生产,其技术性能指标见表 1 所示,钢纤维能够有效地阻碍混凝土内部微裂缝的扩展,显著改善混凝土的力学性能及耐久性;玄武岩纤维选用短切玄武岩纤维,为四川拓鑫玄武岩实业有限公司生产,玄武岩纤维是一种新型无机环保绿色高性能纤维材料,它是由二氧化硅、氧化铝、氧化镁等氧化物组成的玄武岩石料在高温熔融后,通过漏板快速拉制而成,玄武岩连续纤维具有高强度、电绝缘、耐腐蚀、耐高温等多种优良性能,其技术性能指标见表 2 所示。

表 1 剪切哑铃型钢纤维的性能指标

长度/ mm	长径比	等效直径/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)	抗拉强度/ MPa
32	40	0.8	7.8	≥600

表 2 短切玄武岩纤维的性能指标

长度/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)	延伸率/ %	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa
20	2.60	3.1	≥9.3	≥2 000

1.2 试验配合比的确定

依据《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55-2011^[9]进行配合比设计,再通过实验室混凝土拌合物的试配与调整,最后确定混凝土试验配合比为:水泥 351 kg,砂 678 kg,砂率 0.35,水灰比 0.46。基于本课题组前期所做的纤维混凝土材性试验,可知当钢纤维体积掺率为 1.2% 或 1.5% 时,混凝土基本力学性能较好,但是掺钢和玄武岩纤维下的混凝土抗冻性能尚不清楚。所以,这里通过调整两种纤维体积掺率做 5 组混凝土试件,研究纤维混凝土的抗冻性能,见表 3 所示。

表 3 各组试件纤维体积掺量和添加剂掺量

组件编号	纤维体积掺率/%		HY-YQ 引气减水剂/ (kg·m ⁻³)
	钢纤维	玄武岩纤维	
A	0.9	0.15	1.75
B	1.2	0.15	1.75
C	1.5	0.05	1.75
D	1.5	0.10	1.75
E	1.5	0.15	1.75

1.3 试验方法与仪器

本次试验采用快速冻融法进行,按照 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[10]的有关试验具体要求,先将 100 mm×100 mm×400 mm 尺寸的棱柱体标准试件放在(20±3)℃的水中浸泡 4 d,保证试验过程中试件始终处于饱水状态,每循环 25 次,停机测试 1 次试件的自振频率和质量,通过计算求出相对动弹性模量指标和质量损失率指标。试验仪器使用 TDR-16 混凝土快速冻融试验机和 DT-8W 型动弹仪。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

冻融作用初期,混凝土外观损伤无明显变化。当达到 100 次冻融循环后,A、B 组混凝土试块表面钢纤维与水泥浆失去黏结,出现严重剥落现象;C 组混凝土试块表面的纤维仍然能够拉结水泥浆,形态完好;D、E 组混凝土试块表面清晰可见少量纤维外露,并且黏附水泥浆体,剥落现象较轻。当达到 200 次冻融循环后,C 组混凝土试块也同样出现了钢纤维外露情况,外表面浆体出现了严重的剥落现象。可见混凝土表面浆皮剥落随着冻融循环次数的增多而越发严重。由试验可知,玄武岩纤维能够较好地

限制混凝土表面浆体剥落,因为玄武岩纤维体积小,比表面积大,与水泥浆体黏结性强,而钢纤维对约束混凝土表面浆体剥落几乎不起作用。

2.2 试验结果

当测试所得的试验数据:质量损失率超过 5% 或相对动弹性模量小于 60% 时,可停机终止冻融循环试验。掺钢和玄武岩纤维的混凝土冻融循环试验结果见下表 4。

2.3 质量损失率与相对动弹性模量

根据试验数据,绘制冻融循环次数与质量损失率

的关系图,见图 1 所示,冻融循环次数与相对动弹性模量关系图,见图 2 所示。分析图 1、2 可知:掺钢和玄武岩纤维混凝土随着冻融循环次数的增多质量损失率增大,但增幅都较小,均不超过 2%;随着冻融循环次数的增多相对动弹性模量明显降低,冻融循环次数在 50 次前速率降低较慢,之后速率降低明显加快。综合比较:A 组纤维混凝土的动弹性模量损失速率较快,C 组较慢,表明 C 组抗冻性能最好。所以得到,当掺加体积率 1.5% 钢纤维和 0.05% 玄武岩纤维时混凝土抗冻性能最优,可达到 F250 等级水平。

表 4 冻融循环试验结果

冻融循环次数	A		B		C		D		E	
	相对动弹性模量/%	质量损失率/%	相对动弹性模量/%	质量损失率/%	相对动弹性模量/%	质量损失率/%	相对动弹性模量/%	质量损失率/%	相对动弹性模量/%	质量损失率/%
0	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00
25	97.72	0.00	98.36	0.10	98.51	0.00	98.26	0.00	98.32	0.00
50	92.77	0.15	95.47	0.00	96.01	0.09	95.94	0.00	96.21	0.11
75	89.66	0.23	91.25	0.32	96.01	0.00	95.37	0.12	95.87	0.19
100	78.25	0.48	89.37	0.45	95.23	0.08	90.10	0.23	92.15	0.27
125	69.54	0.68	78.59	0.64	90.64	0.16	85.28	0.38	84.14	0.41
150	62.18	0.91	69.87	0.79	84.66	0.29	79.29	0.63	79.38	0.58
175	55.31	1.24	61.20	0.97	79.38	0.37	74.33	0.95	73.15	0.93
200			53.85	1.41	75.47	0.58	70.73	1.33	67.49	1.41
225					70.63	0.86	66.12	1.76	61.77	1.87
250					65.11	1.25	58.36	1.95	52.41	2.03
275					61.59	1.63				
300					54.61	1.94				

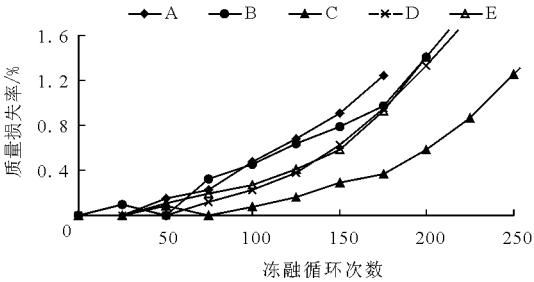


图 1 冻融循环次数与质量损失率关系

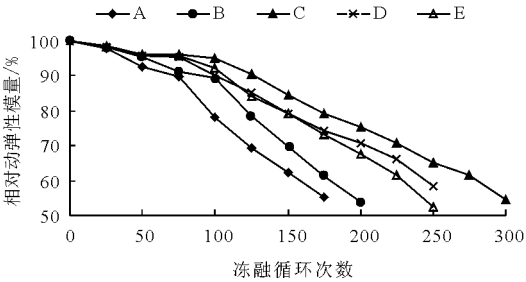


图 2 冻融循环次数与相对动弹性模量关系

3 冻融破坏机理分析

国内外关于混凝土冻融破坏机理研究较多,具有代表性的有:Powers 提出的静水压理论、Helmuth 提出的渗透压假说、Collins^[11] 提出的离析成层理论、Fagerlund 提出的冻融临界饱水值法理论等。这

些理论的共同点就是一致认为:混凝土的外部宏观性能的劣化都是由于内部损伤累积到一定程度所引起。所以在研究时将混凝土强度降低、动弹性模量降低视为宏观变量,将混凝土内部微孔隙受到冻融影响产生的损伤累积视为微观变量,由于不同纤维掺量差异,导致其内部累积损伤不同,也就导致了混

凝土抗冻性能的差别。

根据 Powers 和 Helmuth 提出的静水压理论及渗透压假说,由于外界环境中的游离水分逐渐渗透到混凝土内部的微小毛细孔隙当中,伴随着环境温度的高低变化,混凝土内部的孔隙水慢慢结晶-融化,导致在混凝土内部产生一定的膨胀作用力和渗透压力,并且伴随冻融循环次数的增多,这些膨胀作用力和渗透压力对此反复出现,最终引起混凝土内部孔隙结构逐渐消解破坏,冻融损伤累积到一定程度时就会在混凝土表面出现浆体剥落现象。这时掺入一定量的纤维就能够较好地解决冻融破坏问题,混杂纤维具有体积小强度高的优点,乱向分布于混凝土内部空间,能够约束混凝土内部孔隙扩大及抑制表面裂缝扩展。同时,各个纤维相互交联形成整体式网状空间体系,能够有效地加固混凝土块体,防止混凝土裂缝的出现,也就减少了水分入侵的可能性,提高了抗冻性。另外钢纤维与玄武岩纤维表面摩擦系数大,与水泥基体黏结致密,在混凝土内部水分结冰时纤维能够抵消一部分冰冻膨胀力。纤维的掺入还能够提高混凝土内部含气量,减弱毛细孔隙的渗透压力,对纤维混凝土抗冻性能的提高都起到有利作用。

4 冻融损伤计算模式

通过试验观察,混凝土的冻融损伤累积现象可描述为:初期阶段试件表面完好无损伤,随着冻融次数增加损伤渐渐累积,形成细小微裂缝,接下来混凝土表面出现宏观裂缝,随着裂缝延长扩展,最后试件发生断裂破坏。考虑到质量损失率指标在冻融前后变化较小,同时试件吸水后质量增加,所以导致误差较大。应该采用相对动弹性模量指标评价混凝土抗冻性能,更为科学合理。

4.1 基于相对动弹性模量的冻融损伤计算模式

国内学者刘崇熙等^[12]的研究表明:混凝土的冻

融损失量可以用动弹性模量的比值表示,建立混杂纤维混凝土的指数函数衰减计算模式如公式(1);根据刘大鹏等^[7]的研究,考虑到掺纤维的不同比例,建立混杂纤维混凝土的一元二次函数衰减计算模式如公(2):

$$Y = E_N/E_0 = ae^{bN}$$
 (1)

$$Y = aN^2 + bN + c$$
 (2)

式中: E_0 为初始动弹性模量, N/mm^2 ; E_N 为经过 N 次冻融循环后混凝土的动弹性模量, N/mm^2 ; N 为冻融循环次数; a 、 b 、 c 分别为拟合系数。

对表 4 中的数据按照公式(1)、公式(2)分别进行拟合,可以得到基于相对动弹性模量的指数函数衰减模式拟合系数,结果见表 5、图 3 所示,基于相对动弹性模量的一元二次函数衰减模式拟合系数,结果见表 6、图 4 所示。

表 5 基于相对动弹性模量的指数函数衰减模式拟合系数

组件编号	拟合系数 a	拟合系数 b	相关系数
A	114.03	-0.004	0.9763
B	115.92	-0.004	0.9343
C	112.25	-0.002	0.9453
D	109.96	-0.002	0.9618
E	114.34	-0.003	0.9361

表 6 基于相对动弹性模量的一元二次函数衰减模式拟合系数

组件编号	拟合系数 a	拟合系数 b	拟合系数 c	相关系数
A	-0.0004	-0.2204	105.23	0.9900
B	-0.0010	-0.0492	100.61	0.9901
C	-0.0003	-0.0543	101.05	0.9904
D	-0.0003	-0.0907	101.70	0.9922
E	-0.0006	-0.0530	100.94	0.9929

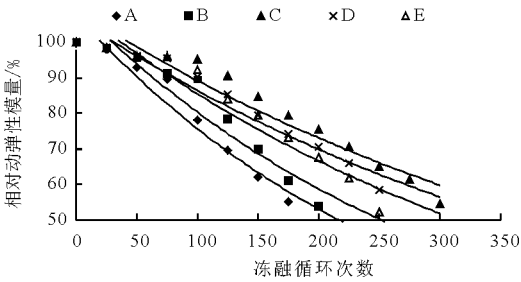


图 3 基于相对动弹性模量指数函数衰减模式形态

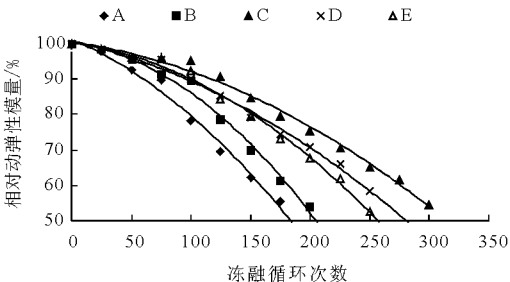


图 4 基于相对动弹性模量一元二次函数衰减模式形态

由表 5、6 中相关系数可知:指数函数衰减模式的相关系数差异略大,最高值为 0.9763,而一元二次函数衰减模式的相关系数较为稳定,均在 0.99 以上,因此一元二次函数衰减模式具有更高的精度,用来描述纤维混凝土的冻融损伤过程更具有可靠性。

4.2 基于冻融循环累积损伤的冻融损伤计算模式

根据损伤力学原理,混凝土的冻融循环累积损伤 D 表达式^[13] 为:

$$D = 1 - E_N/E_0 \tag{3}$$

式中: D 为冻融循环累积损伤(无量纲); E_0 为初始动弹性模量, N/mm^2 ; E_N 为经过 N 次冻融循环后混凝土的动弹性模量, N/mm^2 。

在公式(3)中代入表 4 中的试验数据,可以求出纤维混凝土的冻融循环累积损伤值,再按照公式(1)、(2)进行拟合处理,可以得到基于冻融循环累积损伤的指数函数衰减模式拟合系数、形态分别见表 7、图 5 所示。基于冻融循环累积损伤的一元二次函数衰减模式拟合系数、形态分别见表 8、图 6 所示。

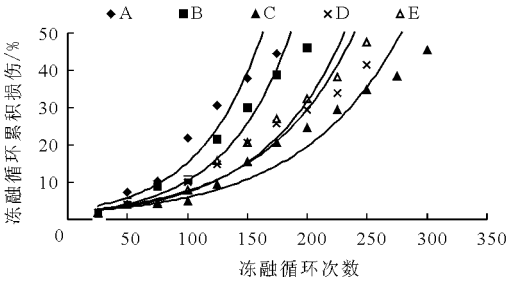


图 5 基于冻融循环累积损伤指数函数衰减模式形态

由表 7、8,图 5、6 分析可得:指数函数衰减模式相关系数普遍较低,最高仅为 0.9465,而一元二次函数衰减模式的相关系数较为稳定,均在 0.99 以上,因此一元二次函数衰减模式具有更高的精度,用来描述纤维混凝土的冻融损伤过程更具有可靠性。

对于掺钢和玄武岩纤维的混凝土来说,以上两种计算模式均具有较高的精度,其中基于相对动弹性模量的冻融损伤计算模式比基于冻融循环累积损伤的冻融损伤计算模式精度更高,一元二次函数衰减模式比指数函数衰减模式精度更高,均达到 0.99 以上,更适合用来进行纤维混凝土的冻融耐久性预测。

5 结 论

本文针对掺钢和玄武岩纤维混凝土的冻融循环试验,进行了试验现象观察和试验数据的采集与分析,可得如下结论:

(1)混凝土抗冻性受到纤维种类和纤维体积掺

表 7 基于冻融循环累积损伤的指数函数衰减模式拟合系数

组件编号	拟合系数 a	拟合系数 b	相关系数
A	1.6350	0.0215	0.8621
B	1.6475	0.0183	0.9440
C	1.7954	0.0119	0.9381
D	1.9656	0.0135	0.9305
E	1.6850	0.0147	0.9465

表 8 基于冻融循环累积损伤的一元二次函数衰减模式拟合系数

组件编号	拟合系数 a	拟合系数 b	拟合系数 c	相关系数
A	-0.0004	-0.2204	-5.2300	0.9900
B	-0.0010	-0.0492	-0.6096	0.9901
C	-0.0003	-0.0543	-1.0543	0.9904
D	-0.0003	-0.0907	-1.7035	0.9922
E	-0.0006	-0.0530	-0.9367	0.9929

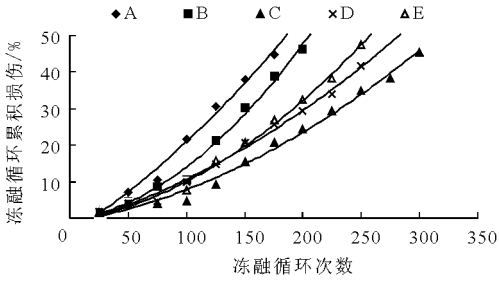


图 6 基于冻融循环累积损伤一元二次函数衰减模式形态

量影响明显,当掺加体积率 1.5% 钢纤维和 0.05% 玄武岩纤维时混凝土抗冻性能最优,可达到 F250 等级水平。

(2)玄武岩纤维能够较好地约束混凝土表面浆体,防止剥落破坏,而钢纤维几乎不起作用。随着冻融循环次数的增大,混凝土表面浆皮剥落现象逐渐严重,最后导致破坏。

(3)总结纤维混凝土的冻融损伤机理,并通过损伤力学理论分析得到:混凝土内部冻融损伤累积程度的不同直接导致混凝土抗冻性能差异。

(4)分别建立了以相对动弹性模量和冻融损伤累积为变量的掺钢和玄武岩纤维混凝土冻融损伤计算模式,并通过试验数据验证其精度。发现动弹性模量计算模式比冻融累积损伤计算模式精度更高。

(5)建立的一元二次函数衰减模式精度高于指数函数衰减模式,更适合用来预测纤维混凝土的冻融耐久性。
(下转第 192 页)

K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^{un} 随相对切口深度 a_0/h 也无明显变化,在 $0.45 \sim 0.55$ 。当 a_0/h 不大于 0.6 情况下,混凝土初始裂缝长度 a_0 对其起裂韧度和失稳韧度并无直接影响。说明双 K 断裂参数是描述材料本身固有断裂特性的材料表征,与切口深度无关。

(3) 断裂过程中扩展裂缝并不一定由初始裂缝发展而来。混凝土在失稳破坏前存在着明显的亚临界扩展阶段,该阶段裂纹绕开骨料平稳发展。进入失稳阶段后,裂纹扩展加剧。整个断裂过程中,裂纹的扩展路径呈现出不规则的曲折型。

参考文献:

- [1] 张廷毅,高丹盈,郑光和,等. 三点弯曲下混凝土断裂韧度及影响因素[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 601 - 607.
- [2] 朱榆. 混凝土断裂及阻裂理论的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.
- [3] 邵若莉. 混凝土断裂能和双 K 断裂参数的试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- [4] 钟小青. 基于双 K 断裂理论的混凝土性能试验研究与分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
- [5] 徐世烺,赵艳华. 混凝土裂缝扩展的断裂过程准则与解析[J]. 工程力学, 2008, 25(S2): 20 - 33.
- [6] 范向前,胡少伟,陆俊,等. 不同类型混凝土断裂特性研究[J]. 混凝土, 2012(3): 46 - 51.

- [7] Xu Shiliang, Zhao Yanhua, Wu Zhimin. Study on the average fracture energy for crack propagation in concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2006, 18(6): 817 - 824.
- [8] 胡少伟,陆俊,范向前. 混凝土损伤断裂性能试验研究进展[J]. 水利学报, 2014, 45(S1): 10 - 18.
- [9] 黄焕谦,吕黄,胡若邻. 混凝土双 K 断裂韧度的尺寸效应[J]. 混凝土, 2010(2): 7 - 9 + 13.
- [10] 荣华. 混凝土裂缝扩展过程中断裂过程区的特性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [11] 徐世烺,周厚贵,高洪波,等. 各种级配大坝混凝土双 K 断裂参数试验研究——兼对《水工混凝土断裂试验规程》制定的建议[J]. 土木工程学报, 2006, 39(11): 50 - 62.
- [12] 胡少伟,安康. 不同尺寸混凝土三点弯曲梁试件断裂过程试验研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 120 - 125.
- [13] 李晓东,董伟,吴智敏,等. 小尺寸混凝土试件双 K 断裂参数试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 166 - 171.
- [14] 胡若邻,黄培彦,周绪平. 砼断裂韧度尺寸效应的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 47 - 51.
- [15] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [16] 安康,胡少伟. 双裂缝混凝土试件断裂过程试验研究[J]. 低温建筑艺术, 2014, 36(2): 5 - 8.

(上接第 186 页)

参考文献:

- [1] 商怀帅,欧进萍,宋玉普. 混凝土结构冻融损伤理论及冻融可靠度分析[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 70 - 74.
- [2] 王立久,汪振双,崔正龙. 基于冻融损伤抛物线模型的再生混凝土寿命预测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(1): 27 - 33.
- [3] 刘西拉,唐光普. 现场环境下混凝土冻融耐久性预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2412 - 2419.
- [4] 余红发,孙伟,麻海燕,等. 冻融和腐蚀因素作用下混凝土的损伤劣化参数分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 1 - 8.
- [5] 冀晓东,宋玉普,刘建. 混凝土冻融损伤本构模型研究[J]. 计算力学学报, 2011, 28(3): 461 - 467.
- [6] 程红强,高丹盈. 聚丙烯纤维混凝土冻融损伤试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(S2): 197 - 200.
- [7] 刘大鹏,霍俊芳. 纤维轻骨料混凝土冻融损伤模型研究

- [J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(3): 568 - 571.
- [8] 刘卫东,苏文梯,王依民. 冻融循环作用下纤维混凝土的损伤模型研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 124 - 128.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ55 - 2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50082 - 2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [11] Collins A R. Influence of minimum temperature on the scaling resistance of concrete[J]. Stockholm: Swedish National Testing and Research Institute, 1994.
- [12] 刘崇熙,汪在芹. 坝工混凝土耐久寿命的衰变规律[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(2): 18 - 21.
- [13] 关宇刚,孙伟,缪昌文. 基于可靠度与损伤理论的混凝土寿命预测模型 I: 模型阐述和建立[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(6): 530 - 534.