第 28 卷 第 4 期
2011 年 12 月

建筑科学与工程学报
Journal of Architecture and Civil Engineering

Vol. 28 No. 4
Dec. 2011

文章编号:1673-2049(2011)04-0001-08

冻融和腐蚀因素作用下混凝土的损伤劣化参数分析

余红发[1],孙 伟[2],麻海燕[1],张云升[2],王甲春[1,3],陈树东[1,4]

(1. 南京航空航天大学 土木工程系,江苏 南京 210016;2. 东南大学 材料科学与工程学院,江苏 南京 210096;
3. 厦门理工学院 建筑工程系,福建 厦门 361024;4. 浙江建设职业技术学院 建筑工程系,浙江 杭州 311231)

摘要:通过混凝土在冻融和腐蚀等单一和多重因素作用下大量、系统的耐久性试验,得到混凝土损伤初速度(IDV)和损伤加速度(DA)等损伤劣化参数的基本数据库;采用 SPSS10.0 软件对该数据库数据进行回归和相关分析。结果表明:混凝土的 IDV 和 DA 取决于结构所处的环境、气候和受力状态,并与其原材料、配合比和养护条件密切相关;无论在单一因素还是在双重因素作用下,降低水胶比和加强潮湿养护均能够减小混凝土的 IDV 和 DA;采用钢纤维增强技术可以降低混凝土的单因素 IDV 和 DA,掺加矿物掺合料以及采用高强高模聚乙烯纤维增强技术能够降低混凝土的双因素 IDV 和 DA;IDV 和 DA 越大,混凝土的冻融寿命就越短。

关键词:混凝土;单一因素;双重因素;损伤初速度;二次损伤初速度;损伤加速度;冻融寿命

中图分类号:TU528 **文献标志码**:A

Analysis of Damage Degradation Parameters of Concrete Subjected to Freezing-thawing Cycles and Chemical Attack

YU Hong-fa[1], SUN Wei[2], MA Hai-yan[1], ZHANG Yun-sheng[2],
WANG Jia-chun[1,3], CHEN Shu-dong[1,4]

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. Department of Civil Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, Fujian, China; 4. Department of Civil Engineering, Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, Zhejiang, China)

Abstract: Initial damage velocity (IDV) and damage acceleration (DA) of concrete subjected to single or combined factors, such as freezing-thawing and chemical attacks, were obtained through a mass of durability experiments, and the database was also established. Regression and correlative analysis of the database were carried out by using SPSS10.0 software. Results show that IDV and DA of concrete are determined by the environment, climate and load state and at the same time are closely influenced by the raw materials, mixture ratio and curing condition. Lower water cement ratio and higher relative humidity can reduce IDA and DA of concrete subjected to either signal or double factors. For concrete subjected to single factor, IDV and DA can be decreased by adding steel fibers, while for concrete subjected to double factors, IDV and DA can be decreased by adding higher elasticity module polyethylene fibers or mineral admixture. It is

收稿日期:2011-09-05
基金项目:国家重点基础研究发展计划("九七三"计划)项目(2009CB623203);国家自然科学基金项目(51178221);中央高校基本科研业务费专项资金项目(NS2010015)
作者简介:余红发(1964-),男,湖北武穴人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:yuhongfa@nuaa.edu.cn。

evident that the larger the IDV and DA are, the shorter the freezing-thawing life is.

Key words: concrete; single factor; double factor; initial damage velocity; second initial damage velocity; damage acceleration; freezing-thawing life

0 引 言

借助损伤力学原理,根据混凝土在冻融和腐蚀条件的典型损伤失效规律,建立了混凝土在单段和双段损伤模式时的损伤演化方程[1]。该损伤演化方程含有损伤初速度(IDV)、二次损伤初速度(SDV)、损伤加速度(DA)3 个重要的损伤劣化参数。在应用损伤演化方程预测混凝土的使用寿命之前,必须系统地测定不同混凝土在冻融和腐蚀等单一、双重和多重破坏因素作用下的损伤劣化参数,进一步研究:①耐久性破坏因素与混凝土损伤劣化参数之间的关系;②不同混凝土的损伤劣化参数规律;③混凝土损伤劣化参数与其原材料、配合比和养护条件等因素之间的关系;④损伤劣化参数对混凝土的快速试验寿命的影响规律等。

本文中笔者根据文献[1]中的大量损伤曲线,首先通过 SPSS10.0 软件[2]的回归拟合得到不同耐久性试验条件下混凝土的损伤劣化参数和快速试验寿命的基本数据库,然后,以单一冻融因素和冻融加内蒙古盐湖卤水腐蚀双重因素作用下的数据库为基础,重点探讨与混凝土使用寿命预测有关的损伤劣化参数问题。为了描述方便,作如下规定:混凝土在单一冻融因素作用下的 IDV,SDV,DA 和抗冻融循环次数分别称为单因素 IDV、单因素 SDV、单因素 DA 和单因素冻融寿命;相应地,在冻融加内蒙古盐湖卤水腐蚀双重因素作用下就分别称为双因素 IDV、双因素 SDV、双因素 DA 和双因素冻融寿命;在多重因素作用下,以此类推。

1 混凝土损伤数据库

在文献[1]的耐久性试验中,测定了在相对湿度 30%～95%环境中养护的普通混凝土(OPC),HSC 系列高强混凝土(HSC),HPC1 系列和 HPC2 系列高性能混凝土(HPC),在单一冻融因素、内蒙古盐湖卤水的单一腐蚀因素、冻融加内蒙古盐湖卤水腐蚀双重因素和碳化加冻融加内蒙古盐湖卤水腐蚀多重因素作用下的 228 条损伤曲线,按照损伤演化方程,并通过参数拟合,获得了 228 组成对的 IDV,SDV,DA 和损伤变速点等参数。损伤劣化参数的拟合精度比较高,其相关系数在 0.9～1.0 之间。不同混凝土在单一冻融因素和冻融加内蒙古盐湖卤水腐蚀双重因素的损伤数据库参见文献[3],其中的快速试验寿命数据,是对应于相对动弹性模量 $E_r=60\%$时混凝土的冻融循环次数或腐蚀时间,按照条形插值法求得。

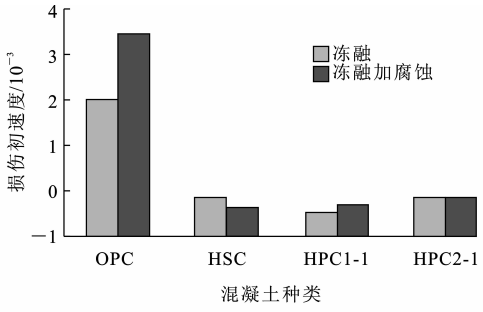
2 混凝土的 IDV 和 DA 及其规律性

2.1 不同混凝土的 IDV 和 DA

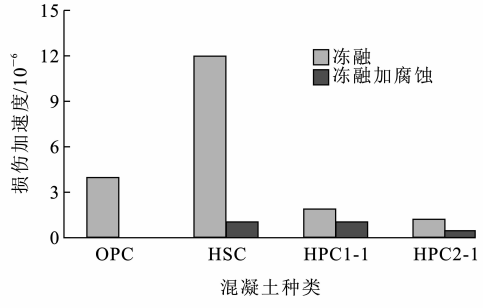
图 1 为不同混凝土在单一冻融因素和冻融加腐蚀双重因素作用下的 IDV 和 DA,其中,HSC-1 是不含矿物掺合料的基准 HSC,HPC1-1 是同时掺加 10%硅灰(SF)和 20%粉煤灰(FA)的双掺 HPC,HPC2-1 是同时掺加 10%硅灰(SF)、20%粉煤灰(FA)和 20%磨细矿渣(SG)的三掺 HPC(文中所有掺合料的掺量均为质量分数)。结果表明,混凝土的损伤劣化参数不仅与冻融等气候条件有关,而且不同混凝土之间的差别也很明显。同混凝土的强度和耐久性一样,在一定条件下的损伤劣化参数也是混凝土的一种新的性能指标。由图 1(a)可见,OPC 具有很高的单因素和双因素 IDV,其中后者比前者提高了 48%,而 HSC 与 HPC 的单因素和双因素 IDV 均为负值,说明 HSC-HPC 在冻融开始时存在强化效应。由图 1(b)可见,不同混凝土的单因素 DA 规律是从大到小依次为 HSC,OPC,双掺 HPC,三掺 HPC,可见,尽管 HSC 的单因素 IDV 为负值,但是损伤一经形成,其单因素 DA 比 OPC 要高 2 倍。掺加矿物掺合料以后,混凝土的单因素 DA 显著降低,双掺 HPC 和三掺 HPC 分别比 HSC 降低了 85%和 90%,而且也明显低于 OPC,仅有 OPC 的 45%和 30%。在冻融加腐蚀双重因素作用下,由于卤水的冰点降低效应,混凝土的双因素 DA 与单一冻融因素相比,都有不同程度的下降,OPC 的双因素 DA 为 0,HSC、双掺 HPC 和三掺 HPC 分别降低了 92%,44%,67%。

2.2 环境介质和应力状态对混凝土 IDV 的影响

图 2 为冻融介质种类和弯曲荷载对 OPC 匀速损伤时 IDV 的影响。环境介质包括水和新疆、青海、内蒙古与西藏盐湖卤水。结果表明,混凝土损伤劣化参数与耐久性破坏的环境介质种类及应力状态有关。OPC在不同环境介质中的IDV大小顺序是



(a) IDV



(b) DA

图 1　不同混凝土在单一冻融因素和冻融加腐蚀双重因素作用下的损伤劣化参数

Fig. 1　Damage Degradation Parameters of Different Types of Concrete Subjected to Single and Combined Action of Freezing-thawing Cycles and Chemical Attack

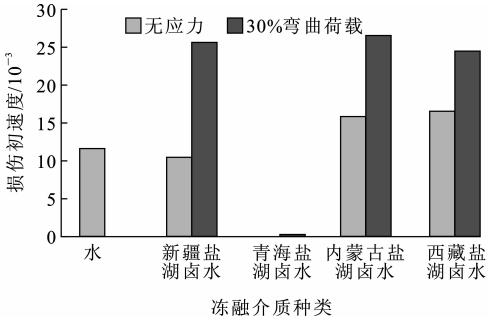


图 2　冻融介质种类和弯曲荷载对 OPC 匀速损伤时 IDV 的影响

Fig. 2　Effects of Freezing-thawing Medium and Flexural Load on IDV of OPC

西藏盐湖卤水、内蒙古盐湖卤水、水、新疆盐湖卤水、青海盐湖卤水。当施加 30%弯曲荷载时，OPC 在新疆、青海、内蒙古和西藏盐湖卤水中进行弯曲荷载加冻融加腐蚀多重因素作用时的多因素 IDV 分别比双因素 IDV 增大了 66%，137%，66%，49%。

2.3　养护环境的相对湿度对混凝土 IDV 和 DA 的影响

表 1 为养护环境的相对湿度对混凝土 IDV 和 DA 的影响，表 1 中的数值均为量纲一的量。结果表明，养护环境越干燥，OPC 的 IDV 和 DA 越大，当相对湿度由 95%降低到 30%时，其单因素 IDV 和 DA 分别增大了 4.47 倍和 112 倍，双因素 IDV 增大了 3.77 倍。HSC-HPC 由于结构致密，干燥养护对其 IDV 的影响并不明显，仅 HSC 和双掺 HPC 的双因素 IDV 由负值转成正值以外(不足相对湿度 95%养护 OPC 的 1/41)，其余情形仍然维持负值。相对于 IDV，HSC-HPC 的 DA 对养护环境相对湿度的依赖性要明显得多，当相对湿度由 95%降低到 30%时，除 HSC 的单因素 DA 降低了 83%以外，其他情形均表现出不同程度的提高，如：双掺 HPC 和三掺 HPC 的单因素 DA 分别提高了 2.33 倍和 5.67 倍，HSC、双掺 HPC 和三掺 HPC 的双因素 DA 则分别提高了 6 倍、8 倍和 3.5 倍。

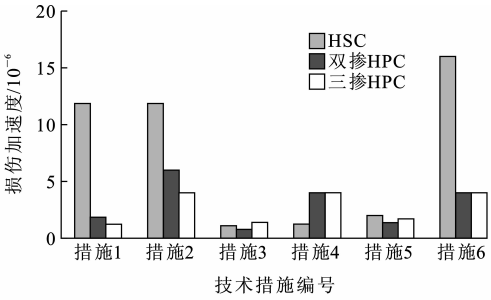
表 1　养护环境的相对湿度对混凝土 IDV 和 DA 的影响

Tab. 1　Effects of Curing Enviroment Relative Humidities on IDV and DA of Concrete

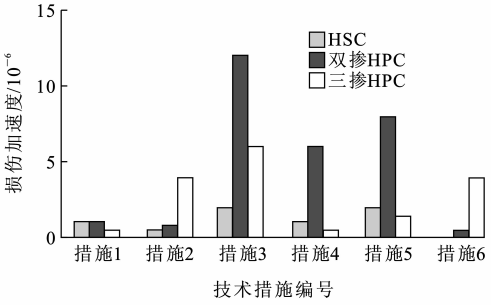
环境作用条件	相对湿度/%	损伤初速度/10^{-3}				损伤加速度/10^{-6}			
		OPC	HSC	双掺 HPC	三掺 HPC	OPC	HSC	双掺 HPC	三掺 HPC
冻融	95	2.337	−0.126	−0.518	−0.272	4	12	1.8	1.2
	30	12.785	−0.262	−0.268	−1.069	452	2	6.0	8.0
冻融加腐蚀	95	3.461	−0.316	−0.375	−0.285	0	1	1.0	0.4
	30	16.522	0.084	0.097	−1.012	0	6	8.0	1.4

2.4　不同技术措施对 HSC-HPC 的 DA 影响

鉴于 HSC-HPC 的 IDV 是负值，在冻融或腐蚀等破坏因素的长期作用下，损伤一旦形成，其 DA 越大，混凝土结构的破坏过程就越快，因而 DA 的重要性就更显著了。图 3 为采用不同技术措施对 HSC-HPC 的 DA 影响，其中，技术措施包括：措施 1，基准；措施 2，单掺 10%铝酸盐混凝土膨胀剂(AEA)；措施 3，单掺 2%钢纤维(SFR)；措施 4，单掺0.1%高强高模聚乙烯纤维(PFR)；措施 5，复合掺加(10% AEA 加 2%SFR)；措施 6，复合掺加(10%AEA 加 0.1%PFR)。结果表明，采用不同技术措施时 HSC 的单因素 DA 大小依次为 AEA 加 PFR，基准(AEA)，AEA 加 SFR，PFR，SFR，双掺 HPC 的单因素 DA 大小依次为 AEA，PFR(AEA 加 PFR)，基准，AEA 加 SFR，SFR，三掺 HPC 的单因素 DA 大小依次为 AEA(PFR，AEA 加 PFR)，AEA 加 SFR，SFR，基准，可见掺加钢纤维对于降低 HSC-HPC 的



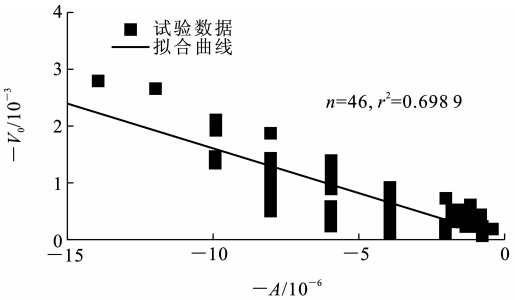
(a) 单一冻融因素



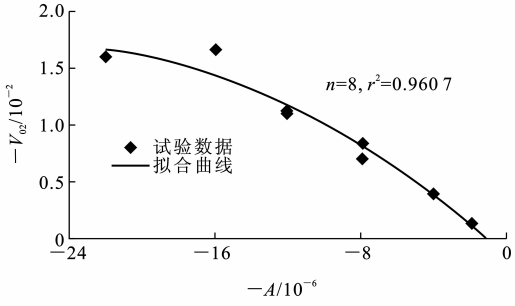
(b) 冻融加腐蚀双重因素

图 3 不同技术措施对 HSC-HPC 的 DA 影响

Fig. 3 Effects of Different Preparations on DA of HSC-HPC



(a) 单段损伤模式



(b) 双段损伤模式

图 4 单一冻融因素作用下 HSC-HPC 的 V_0,V_{02} 与 A 之间的关系

Fig. 4 Relations Between V_0,V_{02} and A of HSC-HPC Subjected to Single Factor Action of Freezing-thawing Cycles

单因素 DA 十分有利,AEA 单掺时效果并不好,它只有与钢纤维复合使用时才能有效降低单因素 DA。HSC 采取不同的技术措施以后,其双因素 DA 从大到小依次为 SFR(AEA 加 SFR),基准,PFR,AEA,AEA 加 PFR;双掺 HPC 双因素 DA 从大到小依次为 SFR,AEA 加 SFR,PFR,基准,AEA,AEA 加 PFR;三掺 HPC 则是 SFR(AEA,AEA 加 PFR),AEA 加 SFR,基准,PFR,因此,掺加高强高模聚乙烯纤维能够降低 HSC-HPC 的双因素 DA,尤其是与 AEA 复合时的效果更好。

2.5 IDV 与 DA 之间的关系

2.5.1 单一冻融因素作用

图 4 为在单一冻融因素作用下 HSC-HPC 的 IDV(V_0),SDV(V_{02})与 DA(A)之间的关系。经过 SPSS10.0 软件的回归分析,单段损伤模式时混凝土的 V_0 与 A 之间具有线性关系,双段损伤模式时 V_{02} 与 A 之间存在二次多项式关系

$$V_0=-155.69A-0.47 \quad n=46,\ r=0.778\ 5 \tag{1}$$

$$V_{02}=2\ 872.99A^2-1\ 464.7A+17.52 \quad n=8,\ r=0.980\ 2 \tag{2}$$

式中:n 为样本的数量;r 为相关系数;V_0 为单段损伤模式条件下的 IDV 值;V_{02} 为双段损伤模式条件下的 SDV 值;A 为 DA 值。

在回归分析中,一般认为相关系数 r 超过 0.90 以上才有意义,其实这是一种误解,回归公式中的 r 能否达到 0.90 并不重要,关键问题是其 r 值必须大于一定显著性水平条件下的临界相关系数 r_α[4],后者与试验样本的数量 n 直接相关,n 越小则达到同样显著性的临界相关系数 r_α 就要求越高。因而,在显著性水平 $\alpha=0.001$ 情况下,$n=8$ 时临界相关系数 $r_{0.001}=0.924\ 9$ 和 $n=46$ 时 $r_{0.001}=0.489\ 8$的统计意义是一样的。由于式(1),(2)都符合 $r>r_{0.001}$ 的关系,说明它们都是高度显著的。

2.5.2 冻融加腐蚀双重因素作用

图 5 为在冻融加腐蚀双重因素作用下 HSC-HPC 的 V_0,V_{02} 与 A 之间的关系。结果表明:V_0,V_{02} 与 A 之间均存在非常显著的线性关系,其关系式为

$$V_0=-709.7A+1.35 \quad n=40,\ r=0.893\ 3 \tag{3}$$

$$V_{02}=-896.526A+2.73 \quad n=17,\ r=0.987\ 7 \tag{4}$$

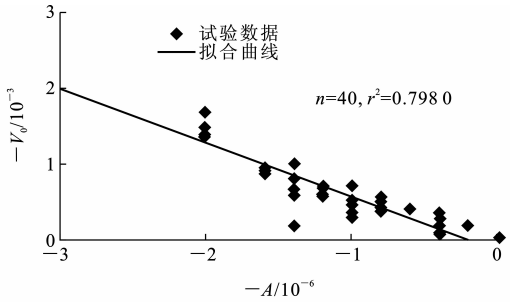
式(3),(4)中的临界相关系数 $r_{0.001}$ 分别为 0.501 3,0.724 6。

3 损伤劣化参数与原材料、配合比和养护条件之间的关系

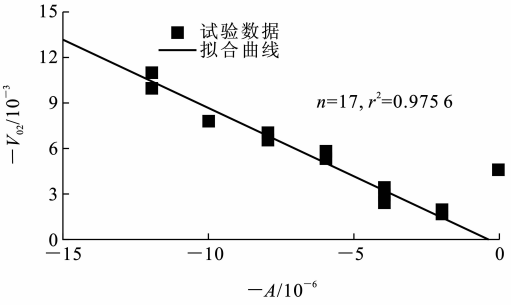
3.1 单一冻融因素作用

3.1.1 单段损伤模式

(1)混凝土的 IDV,DA 与水胶比的关系。经过对单段损伤模式的 49 组 OPC,HSC,HPC1 和



(a) 单段损伤模式



(b) 双段损伤模式

图 5　冻融加腐蚀双重因素作用下 HSC-HPC 的 V_0，V_{02} 与 A 之间的关系

Fig. 5　Relations Between V_0, V_{02} and A of HSC-HPC Subjected to Double Factor Action of Freezing-thawing Cycles and Chemical Attack

HPC2 系列混凝土的相关分析，发现在单一冻融因素作用下，混凝土的 V_0 和 A 与水胶比 m_w/m_b 之间具有高度显著的相关关系

$$V_0=0.018\,82m_w/m_b-0.006\,09 \quad n=49, r=0.661\,1 \tag{5}$$

$$A=0.000\,777\,3m_w/m_b-0.000\,210\,9 \quad n=49, r=0.743\,6 \tag{6}$$

式中：m_w，m_b 分别为混凝土的用水量和胶凝材料用量；临界相关系数 $r_{0.001}=0.456\,2$。

由此可见，采用高效减水剂降低 HSC-HPC 的水胶比，其单因素 IDV 和 DA 降低，必将延长混凝土的冻融寿命。进一步的分析发现，混凝土的冻融损伤劣化参数不仅与水胶比有关，而且与铝酸盐混凝土膨胀剂、钢纤维、高强高模聚乙烯纤维和养护环境相对湿度等因素有关，以下分别进行探讨。

(2)HSC 的 DA 与原材料、配合比和养护条件之间的关系。在单一冻融因素作用下，HSC 的 A 与 AEA 掺量、钢纤维掺量和高强高模聚乙烯纤维掺量与养护环境相对湿度之间具有显著的线性关系

$$A=0.023\,98+0.009\,456R_H+0.088\,36m_{aea}/m_b-0.104\,8m_{sfr}/m_b-11m_{pfr}/m_b \quad n=10, r=0.935 \tag{7}$$

式中：m_{aea}，m_{sfr}，m_{pfr} 分别为混凝土的 AEA 用量、钢纤维用量和高强高模聚乙烯纤维用量；R_H 为相对湿度。

由此可见，掺加 AEA 将提高 HSC 的单因素 DA，掺加钢纤维和高强高模聚乙烯纤维对于降低单因素 DA 非常有效。

(3)双掺 HPC 的 DA 与原材料、配合比和养护条件之间的关系。在单一冻融因素作用下，双掺 HPC 的 A 与养护环境相对湿度和钢纤维掺量之间存在显著的线性关系

$$A=0.000\,961\,5-0.000\,594R_H-0.000\,942\,3m_{sfr}/m_b \quad n=18, r=0.835 \tag{8}$$

式(8)中的临界相关系数 $r_{0.001}=0.708\,2$。由式(8)可以看出，加强潮湿养护、掺加钢纤维将使双掺 HPC 的单因素 DA 减小，从而有利于延长其冻融寿命。

(4)三掺 HPC 的 IDV 和 DA 与养护环境相对湿度之间的关系。三掺 HPC 在单一冻融条件下，V_0 和 A 都与养护环境相对湿度之间具有显著的线性关系

$$V_0=19.51R_H-24.44 \quad n=18, r=0.727\,2 \tag{9}$$

$$A=0.135\,2-0.109\,7R_H \quad n=18, r=0.822 \tag{10}$$

式(9)，(10)中的临界相关系数 $r_{0.001}=0.708\,2$。可见，养护环境越干燥，三掺 HPC 的单因素 IDV 越负，单因素 DA 越大。

3.1.2　双段损伤模式

对于双段损伤模式，HSC 在单一冻融因素作用下的 V_{02}，A 均与钢纤维掺量有非常显著的线性关系

$$V_{02}=0.032\,48m_{sfr}/m_b-0.013\,63 \quad n=8, r=0.919\,2 \tag{11}$$

$$A=0.000\,015\,5-0.000\,038\,46m_{sfr}/m_b \quad n=8, r=0.908\,3 \tag{12}$$

式(11)，(12)中的临界相关系数 $r_{0.001}=0.834\,3$，$r>r_{0.001}$。可见，掺加钢纤维以后，虽然 HSC 的单因素 SDV 增大，但是单因素 DA 减小了。

3.2　冻融加腐蚀双重因素作用

3.2.1　IDV 与原材料和配合比之间的关系

在单段损伤模式时，OPC，HSC，双掺 HPC 和三掺 HPC 在冻融加腐蚀双重因素作用下的损伤劣化参数与原材料、配合比和养护条件之间的相关分析结果如表 2 所示。由表 2 可知，混凝土的 V_0 与其水胶比具有非常显著的正相关关系，与硅灰和粉煤灰的掺量之间存在显著的负相关关系，这说明当采用低水胶比、掺加硅灰和粉煤灰时，混凝土的双因素 IDV 将减小，可见，HPC 用于恶劣的盐湖环境具有明显的技术优势。经过回归分析，混凝土的双因素

表 2 单段损伤模式时混凝土在冻融加腐蚀双重因素作用下损伤劣化参数的相关分析结果

Tab. 2 Correlative Analysis Results of Damage Degradation Parameters for Concrete Subjected to Double Factor Action of Freezing-thawing Cycles and Chemical Attack by Single Sectional Damage Mode

损伤劣化参数	分析指标	相对湿度	硅灰	粉煤灰	磨细矿渣	铝酸盐混凝土膨胀剂	钢纤维	高强高模聚乙烯纤维	水胶比
IDV	Pearson 相关系数	0.058	0.353*	0.353*	0.248	0.197	0.203	0.145	−0.834**
	显著性水平	0.721	0.026	0.026	0.123	0.222	0.208	0.370	0.000
	n	40	40	40	40	40	40	40	40
DA	Pearson 相关系数	0.382*	−0.369*	−0.369*	−0.401*	−0.059	−0.515**	0.300	0.444**
	显著性水平	0.015	0.019	0.019	0.010	0.719	0.001	0.060	0.004
	n	40	40	40	40	40	40	40	40

注：* 对应于 5% 显著性水平；** 对应于 1% 显著性水平。

IDV 与水胶比和硅灰掺量 m_{sf}/m_b 之间的关系式为

$$V_0=276.7m_w/m_b-144.9m_{sf}/m_b-73.3 \quad n=40, r=0.863 \tag{13}$$

式(13)中的临界相关系数 $r_{0.001}=0.501\ 3$，这说明式(13)非常显著。

3.2.2 DA 与原材料、配合比和养护环境相对湿度之间的关系

表 2 的分析结果还表明，OPC，HSC，双掺 HPC 和三掺 HPC 在冻融加腐蚀双重因素作用下的 A 与钢纤维掺量和水胶比之间的相关关系非常显著，与养护环境相对湿度、磨细矿渣掺量和高强高模聚乙烯纤维掺量之间也有显著的相关关系，其关系式为

$$A=0.000\ 216\ 4+0.000\ 124\ 8m_{sfr}/m_b+0.000\ 208\ 9m_{sg}/m_b-0.000\ 286\ 6m_w/m_b-0.000\ 068\ 9R_H-0.019\ 82m_{pfr}/m_b \tag{14}$$

式中：m_{sg} 为混凝土的磨细矿渣掺量；$n=40$，$r=0.798$，存在 $r\gg r_{0.001}$，说明式(14)非常显著。

由此可见；当混凝土中掺加钢纤维和磨细矿渣以后，其双因素 DA 将增加；当降低水胶比、掺加高强高模聚乙烯纤维、加强潮湿养护，其双因素 DA 将减小。

4 快速冻融寿命与损伤劣化参数的相关性

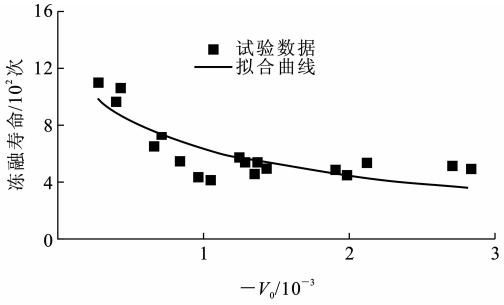
混凝土在冻融和腐蚀条件下的快速试验寿命与其损伤失效过程息息相关[5-6]，在其损伤演化方程中，令 $E_r=60\%$，即可计算混凝土的快速试验寿命，这是混凝土寿命与损伤劣化参数之间的直接理论关系。通过分析大量的试验数据，发现混凝土的快速冻融寿命与损伤劣化参数之间的相关性是非常明显的，这里重点研究混凝土在单一冻融因素作用下 HSC-HPC 的试验结果。

4.1 单段损伤模式

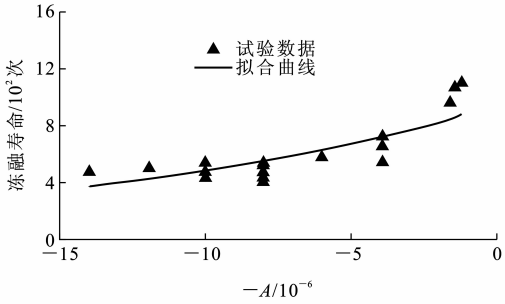
在单段损伤模式时三掺 HPC 的单因素冻融寿命与 IDV 和 DA 之间的关系见图 6。可见，三掺 HPC 的 IDV 越负、DA 越大，其单因素冻融寿命也越短。回归分析表明，在单段损伤模式条件下，三掺 HPC 的冻融寿命 N_w 与 V_0 之间具有高度显著的对数函数关系，N_w 与 A 之间的指数函数关系也极其显著

$$N_w=-270.51\ln(-V_0)+1\ 258.24 \quad n=18, r=0.830\ 5 \tag{15}$$

$$N_w=937.37e^{-6.637\ 6A} \quad n=18, r=0.820\ 9 \tag{16}$$



(a) 单因素冻融寿命与V_0的关系



(b) 单因素冻融寿命与A的关系

图 6 在单段损伤模式条件下三掺 HPC 的单因素冻融寿命与 V_0 和 A 的关系

Fig. 6 Relations Between Single Factor Freezing-thawing Life of HPC and Its V_0 and A by Single Sectional Damage Mode

4.2 双段损伤模式

当 HSC 的单一冻融损伤规律表现为双段损伤

模式时，其单因素冻融寿命与损伤劣化参数之间的关系如图 7 所示。结果表明，HSC 的 IDV 越大、SDV 越负、DA 越大时，其单因素冻融寿命越短。经过回归分析，在双段损伤模式条件下 HSC 的 N_w 与 V_{01} 和 V_{02} 之间具有一定的线性关系，而 N_w 与 A 之间则具有比较显著的线性关系。

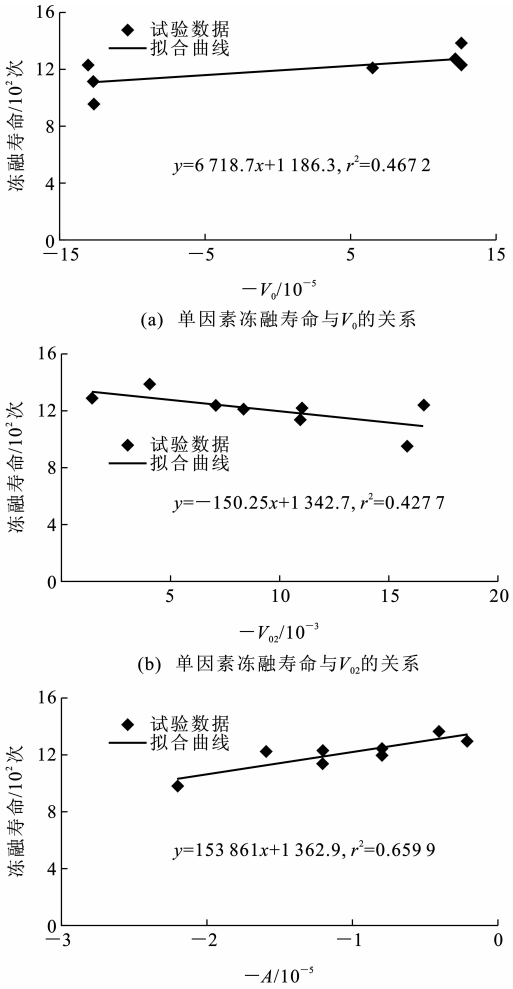


图 7　在双段损伤模式条件下 HSC 的单因素冻融寿命与 V_0，V_{02} 和 A 之间的关系

Fig. 7　Relations Between Single Factor Freezing-thawing Life of HSC and Its V_0, V_{02} and A by Double Sectional Damage Mode

5　结　语

(1)通过大量系统的耐久性试验，获得了不同混凝土在单一冻融因素、单一腐蚀因素和冻融加腐蚀双重因素等作用下损伤演化方程的基本参数数据库，该数据库包括 228 组成对的 IDV，SDV，DA 和损伤变速点等参数。

(2)混凝土的 IDV 与 DA 取决于结构所处的环境、气候和受力状态。OPC 具有很高的单因素和双因素 IDV，养护环境越干燥，其数值越大。OPC 在不同环境介质条件下冻融的 IDV 从大到小依次为西藏盐湖卤水、内蒙古盐湖卤水、水、新疆盐湖卤水、青海盐湖卤水。当施加 30%弯曲荷载时，OPC 在不同盐湖卤水中冻融的多因素 IDV 将提高 49%～137%。HSC 与 HPC 在不同环境介质条件下的单因素和双因素 IDV 均为负值，因其结构致密，干燥养护对 IDV 的影响并不明显，说明在冻融开始时 HSC-HPC 存在强化效应。

(3)不同混凝土的单因素 DA 从大到小依次为 HSC，OPC，双掺 HPC，三掺 HPC，掺加矿物掺合料可以显著降低 HSC-HPC 的单因素 DA。因内蒙古盐湖卤水的冰点降低效应，所有混凝土的双因素 DA 都有不同程度的下降。当混凝土在干燥环境中养护时，除 HSC 的单因素 DA 减小以外，HSC 的双因素 DA、双掺 HPC 和三掺 HPC 的单因素和双因素 DA 均有不同程度的增大，OPC 增加得更加明显。

(4)采用不同的技术措施制备 HSC-HPC 时，对其 DA 具有明显的影响。掺加钢纤维对于降低 HSC-HPC 的单因素 DA 十分有利，AEA 单掺时效果并不好，它只有与钢纤维复合使用时才能有效降低其单因素 DA。掺加高强高模聚乙烯纤维能够显著降低 HSC-HPC 的双因素 DA，尤其是与 AEA 复合时的效果更好。

(5)混凝土的 IDV，SDV 与 DA 等参数并非孤立，而是有紧密的内在联系。在单段损伤模式时，HSC-HPC 的单因素 IDV 与 DA 之间以及双因素 IDV 与 DA 之间都存在高度显著的线性关系。在双段损伤模式时，HSC-HPC 的单因素 SDV 与 DA 之间具有高度显著的二次多项式关系，双因素 SDV 与 DA 之间则存在非常显著的线性关系。

(6)混凝土的 IDV，SDV 与 DA 与其原材料、配合比和养护条件密切相关，建立了它们之间的回归公式，确定了影响混凝土损伤失效过程的因素数值规律。回归分析表明，采用高效减水剂降低水胶比、加强潮湿养护，均能降低混凝土在单一和双重因素作用下的 IDV 和 DA。采用钢纤维增强技术有利于降低混凝土的单因素损伤劣化参数；掺加矿物掺合料、采用高强高模聚乙烯纤维增强技术，则有利于降低混凝土的双因素损伤劣化参数。在预测冻融或腐蚀条件下混凝土结构的使用寿命时，这些公式可以用于计算混凝土的损伤劣化参数。

(7)混凝土的快速试验寿命与其损伤失效过程

息息相关。在单一冻融因素作用下，HSC-HPC 在单段损伤模式时，IDV 越负、DA 越大时，其单因素冻融寿命越短；HSC 在双段损伤模式时，IDV 越大、SDV 越负、DA 越大时，其单因素冻融寿命越短。

参考文献：

References：

[1] 余红发，孙　伟，张云升，等. 在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法Ⅰ——损伤演化方程与损伤失效模式[J]. 硅酸盐学报，2008，36(增 1)：128-135.
YU Hong-fa, SUN Wei, ZHANG Yun-sheng, et al. Service Life Prediction Method of Concrete Subjected to Freezing-thawing Cycles and/or Chemical Attack Ⅰ—Damage Development Equation and Degradation Mode[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(S1): 128-135.

[2] 黄　海，罗友丰，陈志英，等. SPSS10.0 for Windows 统计分析[M]. 北京：人民邮电出版社，2001.
HUANG Hai, LUO You-feng, CHEN Zhi-ying, et al. Statistical Analysis of SPSS10.0 for Windows [M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2001.

[3] 余红发. 盐湖地区高性能混凝土的耐久性、机理与使用寿命预测方法[D]. 南京：东南大学，2004.
YU Hong-fa. Study on High Performance Concrete in Salt Lake: Durability, Mechanism and Service Life Prediction[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.

[4] 王永逵，陆吉祥. 材料试验和质量分析的数学方法[M]. 北京：中国铁道出版社，1990：162-168.
WANG Yong-kui, LU Ji-xiang. Mathematical Method of Materials Test and Quality Analysis[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1990: 162-168.

[5] 张云清，余红发，王甲春. 盐冻条件下混凝土结构表面的损伤规律研究[J]. 中国公路学报，2009，22(4)：57-63.
ZHANG Yun-qing, YU Hong-fa, WANG Jia-chun. Study of Surface Damage Rule of Concrete Structure Exposed to Salt Freezing Condition[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 57-63.

[6] 张云清，余红发，孙　伟，等. 硫酸镁溶液对应力作用下混凝土抗冻性的影响[J]. 交通运输工程学报，2010，10(6)：15-19.
ZHANG Yun-qing, YU Hong-fa, SUN Wei, et al. Effect of Magnesium Sulfate Solution on Frost Resistance of Concrete Under Stress Condition[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6): 15-19.

《工业建筑》2012 年征订通知

《工业建筑》由中国钢铁工业协会主管，中冶建筑研究总院有限公司主办，1964 年创刊；重点报道建筑设计、建筑结构、地基和基础、建筑材料、施工技术等方面的应用研究成果及开发技术，突出工业建筑、钢结构、鉴定加固技术等特点；优先报道国家或者省部科学基金资助项目和重大工程建设项目；内容丰富翔实，理论结合实际；适合土木工程界广大科研、设计、教学、施工等专业技术人员及高校师生阅读。

《工业建筑》为大 16 开本，128 页，每月 20 日出版，国内外公开发行，每期定价 15 元，全年共 180 元。全国各地邮局均可订阅，邮发代号：2-825，也可直接汇款到本编辑部订阅。

《工业建筑》兼营广告，每年 8 月开始征订下一年广告，收费合理，具有一定规模，是展示企业形象的理想舞台。广告许可证：京海工商广字 8231。

地　址：北京市海淀区西土城路 33 号　　**邮　编：**100088

E-mail：gyjz@chinajournal.net.cn　　**网　址：**www.ic-mag.com

电　话：(010)82227008/7239(传真)，(010)82227237/8043/8927(编辑)，(010)82227236(发行)，(010)82227882/7238/7239(广告)