

不同粉煤灰掺量的混凝土抗冻融性能研究

王苏然, 杜曦, 陈有亮, 郜珊珊, 梁晨, 叶锬锬

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 通过液压伺服试验系统,研究不同粉煤灰掺量下混凝土的抗冻融性能.对不同粉煤灰掺量的混凝土试块分别进行冻融循环试验,在不同循环次数下对试块进行单轴压缩强度测试及质量变化测定,并研究了混凝土的冻融损伤演化方程.结果表明,在混凝土中掺入一定量的粉煤灰能够改善其抗冻、抗裂性能,并且掺有粉煤灰的混凝土的后期强度大于普通混凝土后期强度.同时分析了混凝土的冻融损伤本构关系,为今后研究粉煤灰混凝土的冻融寿命提供了试验基础和理论依据.试验所得结论对于低温环境下混凝土在实际工程中的应用具有参考价值.

关键词: 混凝土; 冻融; 粉煤灰; 力学性能; 循环试验

中图分类号: TU 528.1 **文献标志码:** A

Anti-frost Property of Concrete with Different Dosage of Fly Ash

WANG Suran, DU Xi, CHEN Youliang, GAO Shanshan, LIANG Chen, YE Peipei

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, 200093 Shanghai, China)

Abstract: A hydraulic servo testing system was adopted to study the anti-frost property of concrete with four different kinds of dosage of fly ash. Freezing-thawing cycles were conducted on the concrete with different dosage of fly ash, after that uniaxial compressive tests were performed and the change of the concrete mass was measured. The freezing-thawing damage evolution equation of concrete was analyzed. The results show that the anti-frost property and anti-cracking ability of concrete can be improved when a certain amount of fly ash is added. Moreover by defining a damage variable, the damage degree of concrete with different volume of polypropylene fibers at different temperature was analyzed quantitatively. The freezing-thawing damage constitutive relation of concrete obtained in the paper provides some experimental and theoretical bases for the future study on freezing life of fly ash concrete. In addition, the late strength of concrete with fly ash is stronger than that of the ordinary concrete, which has a certain reference value for the concrete application at low temperature in actual projects.

Key words: concrete; freezing-thawing; fly ash; mechanical property; cyclic tests

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(14ZR1428200); 上海市研究生创新基金资助项目(JWCXSL1302)

第一作者: 王苏然(1990-), 男, 博士研究生. 研究方向: 岩土和混凝土材料力学性能研究. E-mail: wsr132551678@163.com

通信作者: 陈有亮(1966-), 男, 教授. 研究方向: 岩土和混凝土材料力学性能研究. E-mail: chenyouliang2001@yahoo.com.cn

粉煤灰是火力发电厂的煤粉在锅炉中燃烧后排出的灰色粉状废弃物,是一种具有潜在活性的人工火山灰质材料,是我国燃煤电厂排放量最大的固体工业废弃物之一.随着我国工业的不断发展,粉煤灰的排放量大幅度增长,对环境造成严重污染.对粉煤灰若不加以合理利用,不仅污染环境,而且占用大量农田.粉煤灰已在我国建材行业中得到广泛应用,粉煤灰取代混凝土中的水泥能够生产绿色高强高性能混凝土,能够降低混凝土水化热,改善混凝土和易性^[1],并且改善了混凝土的耐久性能^[2].我国北方大部分地区冬季气温低,其环境容易造成建筑结构中的混凝土开裂劣化.国内外大量学者已对普通混凝土及纤维混凝土的力学性质做了大量研究^[3],而缺少对粉煤灰混凝土高低温交替环境下力学性质的研究,因此对粉煤灰混凝土冻融循环后力学性质的研究很有必要.潘桂生等^[4]通过试验得出,在冻融循环作用下,混凝土试件的承载能力与没有经历冻融循环的混凝土相比有所下降,且下降幅度与粉煤灰掺量成反比,说明粉煤灰的掺入能够改善混凝土的冻融性能.Bouzoubaâ 等^[5]认为粉煤灰混凝土承载能力优于普通混凝土.Wang 等^[6]通过试验表明,冻融循环后,粉煤灰混凝土相对于普通混凝土的质量损失减少,且具有较高的抗氯离子渗透能力.王鹏等^[7]通过试验发现,当粉煤灰掺量达到 60% 时,混凝土的抗渗性和抗冻性能最好.

本文通过试验研究了不同掺量粉煤灰混凝土在低温冻融条件下的力学性能,并且研究了不同粉煤灰掺量和冻融循环条件对混凝土力学性质的影响.

1 试验概况

1.1 试件制作

采用强度等级为 32.5 的普通硅酸盐水泥拌合混凝土,粗骨料为碎石,细骨料为普通河沙(细度模数为 2.5),拌合过程中添加 pH 值为 7.0 左右的自来水,掺入等级为 II 级的粉煤灰.试验中使用的混凝土立方体试块尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm.采用 4 种不同粉煤灰掺量的混凝土,粉煤灰掺量分别占粉煤灰与水泥总质量的 0%,10%,15% 和 20%.混凝土试块总数为 100 块,对应各种不同粉煤灰掺量的混凝土试块数量为 20 块.其中,每种粉煤灰掺量下混凝土试块分别作不处理、冻融循环 10 次、20 次、30 次及 40 次处理,每种冻融次数下对应 5 个试块.混凝土配合比见表 1.

表 1 混凝土配合比
Tab.1 Concrete composition $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

分组	水泥	石子	砂子	水	粉煤灰	减水剂
1	403	1 273	546	175	0	3
2	362	1 273	546	175	40	3
3	342	1 273	546	175	60	3
4	322	1 273	546	175	80	3

1.2 试验设备及过程

试验采用的冻融循环设备为低温数控箱(型号:STDW-40),低温可达 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度控制精度可达到 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.将准备好的试件置于自来水中 3 d,使其吸水饱和,称得各个试块的饱和质量.将饱和试块放入冻融机进行冻融实验, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 维持 3 h, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 维持 3 h,此过程定为一个冻融循环.分别记录各组试块冻融前和冻融结束后的试块质量,用以比较质量损失.由于整个冻融试验持续时间比较长,所以试验的混凝土放置常温的时间较长,测出的混凝土抗压强度为其后期强度.单轴压缩试验采用上海理工大学土木工程实验室 SANS 微型控制电液伺服压力试验机,试验机的最大加载可达到 2 000 kN.以 0.5 MPa/s 的速率沿轴向施加荷载,直至混凝土试件被破坏,试验系统可自动采集试验数据.

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及机理分析

混凝土试件在经历冻融循环后,表面出现微裂纹,并且随着冻融循环次数的增多,微裂纹也增多,试件出现不同的质量损失,混凝土外表皮酥松,出现剥蚀现象.这是由于在冻融情况下,混凝土内部孔隙和毛细管中的水结冰,在膨胀压力的作用下,多余的水流向附近的毛细管中,在水的运动过程中产生水压力,毛细管中的液体实际上为溶盐,由于结冰过程中纯净水析出,导致毛细管中的溶液浓度增大,产生渗透压力^[8-9].因此,在混凝土冻融循环过程中,混凝土内部裂纹在水压力与渗透压的共同作用下不断发展,使得混凝土力学性质劣化.

图 1 为混凝土试块经历不同次数冻融循环后的单轴受压破坏形态.可以看出,混凝土试块在没有经历冻融循环的情况下,其受制于试验机中上下钢板的约束作用,破坏形态较完整;经历 10 次及 20 次冻融循环后,破坏时竖向裂纹贯通,破坏形态较完整;经历 30 次及 40 次冻融循环后,混凝土出现明显剥蚀,破坏形态不完整,呈现锥型.这主要是因为混凝

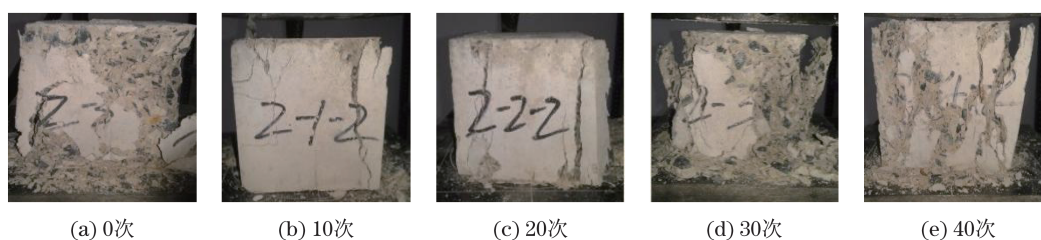


图1 不同冻融循环次数后混凝土试块的单轴受压破坏形态

Fig.1 Uniaxial compressive failure modes of concrete after different number of freezing-thawing cycles

土内部裂缝在水压力与渗透压的共同作用下,不断发展甚至贯通,内部损失随冻融次数增加而加剧,抗压强度降低,与后面一节中的结论吻合.

2.2 冻融循环次数对混凝土质量损失的影响

表2记录了混凝土试件冻融循环前后的试块质量及质量损失情况.

冻融循环后混凝土试块的质量损失率计算式为

$$\Delta W_n = \frac{G_0 - G_n}{G_n} \times 100 \quad (1)$$

式中, n 为冻融循环次数; ΔW_n 为经历 n 次冻融循环后试块的质量损失率,以3个试块的平均值计算; G_0, G_n 分别为冻融循环前和 n 次冻融循环后测得的试块质量.

表2 冻融循环前后混凝土试件质量

Tab.2 Mass of concrete specimens before and after a freezing-thawing cycle

粉煤灰 掺量/%	n /次	G_0 /g	G_n /g	$(G_0 - G_n)$ /g	ΔW_n /%
0	10	2 350	2 308	42	1.78
	20	2 364	2 310	54	2.28
	30	2 344	2 249	95	4.05
	40	2 363	2 262	101	4.27
10	10	2 362	2 329	33	1.40
	20	2 342	2 292	50	2.13
	30	2 361	2 288	73	3.09
	40	2 344	2 244	100	4.26
15	10	2 351	2 325	26	1.11
	20	2 368	2 320	48	2.03
	30	2 357	2 291	66	2.80
	40	2 357	2 261	96	4.07
20	10	2 359	2 335	24	1.02
	20	2 377	2 331	46	1.94
	30	2 365	2 294	71	3.00
	40	2 333	2 239	94	4.03

由表2可以看出,相同粉煤灰掺量下的混凝土,质量损失随着冻融循环次数的增多而增大.相同冻融循环次数后,混凝土试块的质量损失随着粉煤灰

掺量的增大而减少.这是由于冻融循环后,混凝土内部自由水结冰膨胀,骨料间黏结力下降,混凝土产生剥蚀破坏,并且温度交替变化导致出现不断变化的拉压应力,混凝土试块发生疲劳破坏,最终混凝土试块被由表及里地破坏^[10].粉煤灰细微颗粒分散到水泥浆体中,随着水化过程的进行,这些细微颗粒填充混凝土内部空隙,混凝土内部致密性得到改善,进而提高了混凝土的抗冻性能^[11].

2.3 粉煤灰混凝土冻融循环后的应力-应变曲线

图2(见下页)为不同粉煤灰掺量下的混凝土冻融循环后的单轴受压应力-应变曲线.

可以看出,混凝土变形大致经历4个阶段^[12]: a. 压密阶段:混凝土内存的微裂纹在外力作用下趋于闭合,曲线呈上凹型; b. 弹性阶段:应力与应变成比例增长; c. 弹塑性阶段:随着外力的增大,应变增长速率明显大于应力增长速率,裂缝不断发展; d. 破坏阶段:当应力达到峰值应力后,应变增长较快,混凝土迅速破坏.

另外,从图2可以看出,粉煤灰混凝土的后期强度大于相同条件下的普通混凝土,并且随着粉煤灰掺量的增大而增大;相同粉煤灰掺量下的混凝土,其强度随着冻融循环次数的增长而降低;随着粉煤灰掺量的增大,混凝土冻融后应力-应变曲线趋于平缓.粉煤灰颗粒直径细小,当混凝土中掺入粉煤灰时,其颗粒容易进入混凝土内部孔隙,提高混凝土的密实度.同时由于混凝土的自身形态效应,用粉煤灰代替混凝土中的水泥能够减少单位用水量,进而减少混凝土在硬化后以及冻融循环后内部孔隙水膨胀所产生的裂纹.此外,由于活性细掺合料的加入,生成了较多的C—S—H凝胶^[13],水泥与粉煤灰的二次水化过程需破坏粉煤灰中微珠表面的玻璃质表层以及水泥水化产生的C—S—H和Ca(OH)₂表面形成的包裹层,发挥其胶凝作用,此发展过程较缓慢,粉煤灰活性随着期龄的增长而提高,进而胶凝作用和活性效应越来越明显,提高混凝土的密实性,因此能够有效改善混凝土的抗冻性、抗渗性以及耐

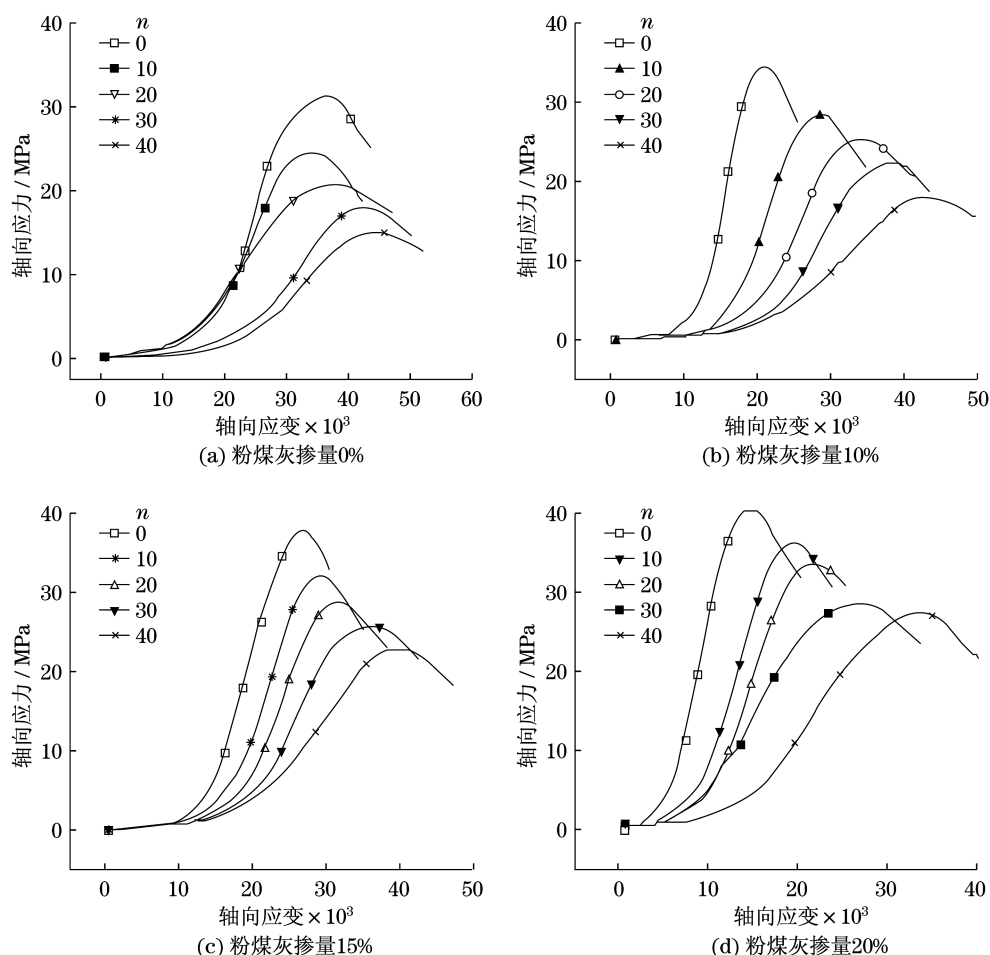


图 2 不同粉煤灰掺量下的混凝土冻融循环后应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of concrete with different fly ash ratios after different number of freezing-thawing cycles

久性^[6].

2.4 粉煤灰掺量及冻融次数对混凝土峰值应力的影响

图 3 给出了混凝土的峰值应力与粉煤灰掺量及冻融循环次数的关系,并对其进行线性拟合.可以看出,对于普通混凝土,其峰值应力由冻融前的 31.3 MPa 下降到冻融循环 40 次之后的 15 MPa,强度降低 52.1%;粉煤灰掺量为 10% 时,峰值应力由 34.5 MPa 下降到 18.1 MPa,强度降低 47.5%;粉煤灰掺量为 15% 时,峰值应力由冻融前的 37.8 MPa 下降到 22.9 MPa,强度降低 39.4%;粉煤灰掺量为 20% 时,峰值应力由 40.3 MPa 下降到 27.4 MPa,强度降低 32%.冻融循环作用下,混凝土内部由水泥石和骨料、水泥石黏结面产生的微裂纹逐渐发展,导致混凝土试件劣化^[14].

介于粉煤灰自身的化学成分,产生的活性效应使混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量减少,减弱混凝土内部孔隙的劣化程度,同时二次水化消耗了混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶,改善了混凝土内部孔隙结构,由此提

高了混凝土的密实性^[15].所以相比于素混凝土,冻融循环对其影响较小.

2.5 粉煤灰掺量及冻融循环次数对混凝土弹性模量的影响

对混凝土达到峰值应力前的弹性阶段进行拟合,可以计算得到混凝土的切线弹性模量.该弹性模量平均值随粉煤灰掺量及冻融循环次数的变化规律如图 4 所示.可以看出,对于普通混凝土,弹性模量在冻融循环前后降低了 71.2%;粉煤灰掺量为 10%,15%,20% 时,对应的弹性模量在冻融循环前后分别降低了 67.5%,55%,49.7%.相比于普通混凝土,冻融循环后粉煤灰混凝土弹性模量变化相对较小.相同环境条件下,混凝土弹性模量随着粉煤灰掺量的增大而提高,粉煤灰掺量为 20% 的混凝土弹性模量几乎为普通混凝土弹性模量的 2 倍.这是因为粉煤灰颗粒粒径较小,可以填充水泥颗粒中的空隙,乃至水泥颗粒的空隙之间,水分不易通过微小孔隙深入,提高混凝土致密性,形成了牢固的骨架.4 种混凝土的弹性模量都随冻融循环次数的增加而

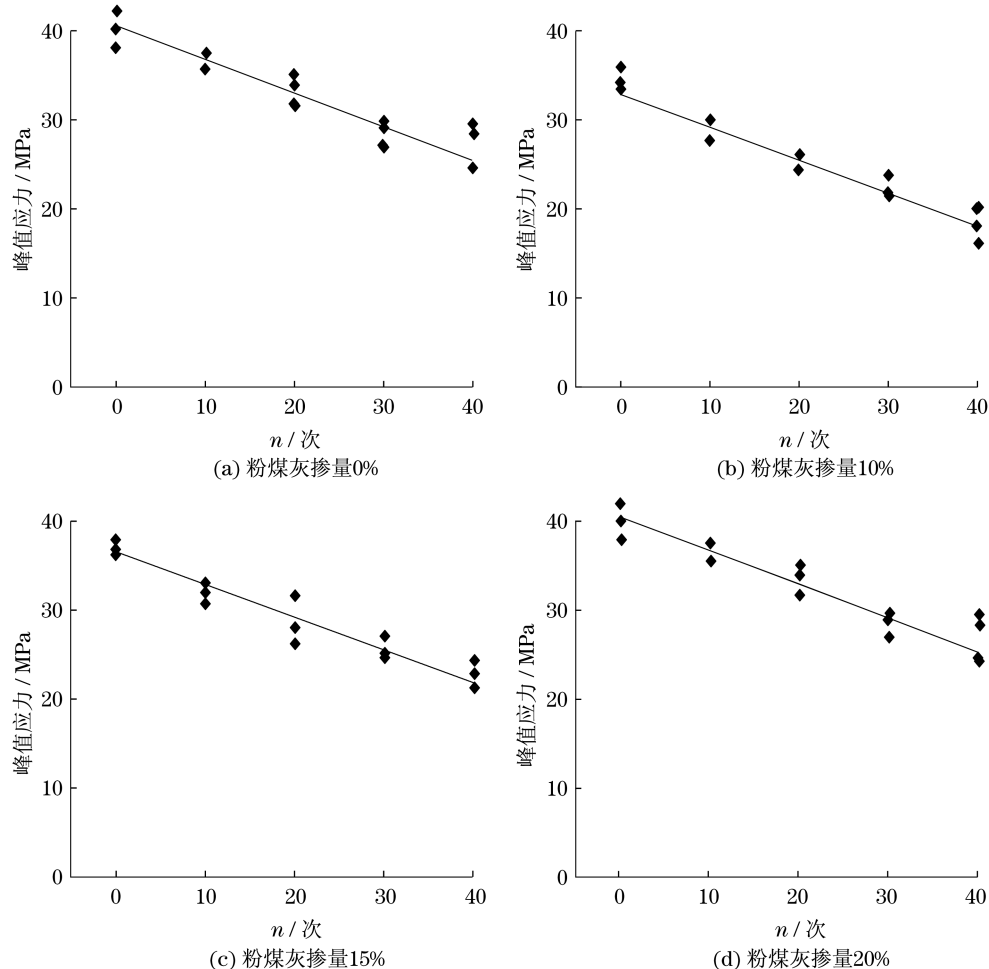


图3 不同粉煤灰掺量下的混凝土峰值应力与冻融循环次数的关系

Fig.3 Relation between the number of freezing-thawing cycles and the peak stress in concrete with different fly ash ratios

减小.说明冻融环境对它们都产生了影响,混凝土内部出现了冻融裂缝.另一方面,粉煤灰掺量越高,混凝土弹性模量的下降速率越慢.此现象是由于粉煤灰提高了混凝土的致密性,外部水分不易进入混凝土内部,内部裂缝的水压减小,对混凝土的损失相应减弱.

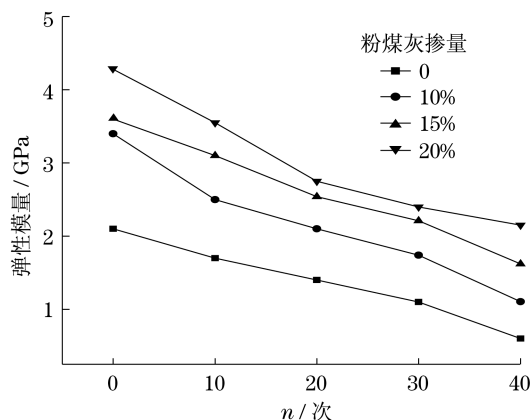


图4 混凝土弹性模量与冻融循环次数的关系曲线

Fig.4 Relation between the elastic modulus of concrete and the number of freezing-thawing cycles

3 冻融循环后混凝土损伤本构模型

3.1 混凝土损伤演化方程

掺粉煤灰的混凝土冻融循环后,单轴受压损伤与冻融循环次数和粉煤灰掺量都有关.下面分别研究冻融循环次数及粉煤灰掺量对混凝土损伤的影响.

1963年,Rabotnov引入了损伤变量 D ,现将不进行冻融循环普通混凝土对照组视为无损材料,即 $D=0$.由混凝土损伤理论及连续介质损伤力学原理,可知

$$\sigma = E \epsilon (1 - D) \quad (2)$$

根据陈有亮等^[16]的推导

$$\sigma = E' \epsilon \quad (3)$$

联立式(2)和式(3),得到由弹性模量所表示的损伤变量为

$$D = 1 - \frac{E'}{E} \quad (4)$$

式中, E, E' 分别为混凝土冻融循环损伤前、后的弹性模量; σ 为有效应力; ϵ 为应变. 本节通过研究不同冻融循环次数后混凝土弹性模量的变化规律, 得到冻融损伤的演化方程, 即用弹性模量作为损伤因子来研究混凝土冻融损伤规律.

图 5 是冻融损伤 D (y 项) 与冻融循环次数 n (x 项) 的拟合曲线, 得

$$y = E - 0.5x^3 - 0.0006x^2 + 0.0247x - 0.0007 \quad (5)$$

其中, 相关系数 $R^2 = 0.9999$. 由此可以得出实验曲线与拟合曲线具有很好的相似性, 因此可得到混凝土冻融损伤演化方程的一般形式为

$$D(n) = k(a_1 n^3 + a_2 n^2 + a_3 n + a_4) \quad (6)$$

式中, $D(n)$ 为混凝土的冻融损伤值; k 为粉煤灰掺量对冻融损伤的修正系数; $a_1 = 1 \times 10^{-5}$, $a_2 = -0.0006$, $a_3 = 0.0247$, $a_4 = -0.0007$.

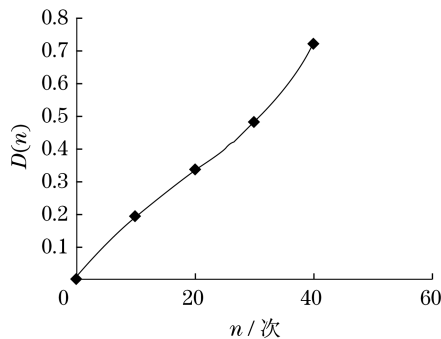


图 5 冻融损伤随冻融循环次数的拟合曲线图

Fig.5 Relation between the freezing-thawing damage and the number of freezing-thawing cycle

对不同粉煤灰掺量的冻融损伤进行归一化处理, 并选择普通混凝土试件作为标准试件, 令 $k = (D - D_{\min}) / (D_{\max} - D_{\min})$, 通过回归计算可得到粉煤灰掺量与粉煤灰掺量修正系数 k 的关系, 见图 6.

$$k = 0.0005x^2 - 0.0576x + 0.9902 \quad (7)$$

式中, x 为粉煤灰掺量百分比; 相关系数 $R^2 = 0.98$.

由此, 综合考虑粉煤灰掺量与冻融循环次数, 得到粉煤灰混凝土冻融损伤演化方程为

$$D(n, x) = (a_1 n^3 + a_2 n^2 + a_3 n + a_4) \cdot (a_5 x^2 + a_6 x + a_7) \quad (8)$$

3.2 冻融循环后粉煤灰混凝土轴压本构方程的建立

根据混凝土的应力-应变曲线关系, 选择 Weibull 分布的密度函数考虑^[17]

$$D = 1 - e^{-\left(\frac{\epsilon}{a}\right)^m} \quad (9)$$

式中, a, m 分别为试件尺度参数和形状参数.

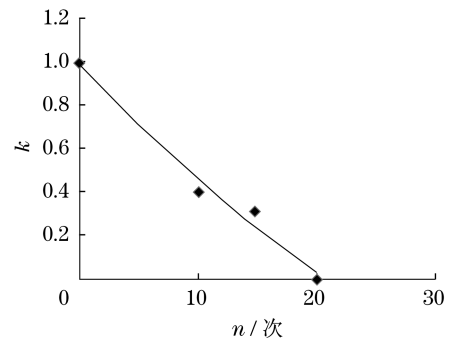


图 6 粉煤灰掺量修正系数与粉煤灰掺量的关系图

Fig.6 Relation between the correction factor and the fly ash ratio

将式(9)带入式(2)得到

$$\sigma = E' \epsilon e^{-\left(\frac{\epsilon}{a}\right)^m} \quad (10)$$

根据应力-应变曲线特征, 可以确定以下边界条件

$$\sigma = 0, \epsilon = 0 \quad (11)$$

$$\epsilon = 0, \frac{d\sigma}{d\epsilon} = E' \quad (12)$$

$$\sigma = \sigma_{pk}, \epsilon = \epsilon_{pk} \quad (13)$$

$$\sigma = \sigma_{pk}, \frac{d\sigma}{d\epsilon} = 0 \quad (14)$$

式中, $\sigma_{pk}, \epsilon_{pk}$ 分别为峰值应力与峰值应变.

对式(10)应变求导可得

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = E' \left[1 - m \left(\frac{\epsilon}{a} \right)^m \right] e^{-\left(\frac{\epsilon}{a}\right)^m} \quad (15)$$

再根据以上 4 个边界条件可得

$$D = 1 - e^{-\frac{1}{m} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{pk}} \right)^m} \quad (16)$$

这便为混凝土单轴受压损伤变量.

将式(16)带入式(2)可得

$$\sigma = E' \epsilon e^{-\frac{1}{m} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{pk}} \right)^m} \quad (17)$$

混凝土损伤包括冻融损伤与单轴受压损伤, 故

$$\sigma = E' \epsilon (1 - D) =$$

$$E(1 - D(n)) \epsilon (1 - D) = E \epsilon e^{-\frac{1}{m} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{pk}} \right)^m}$$

$$[1 - (a_1 n^3 + a_2 n^2 + a_3 n + a_4) \cdot$$

$$(a_5 x^2 + a_6 x + a_7)] \quad (18)$$

可以由试验结果得出随着冻融循环次数的增加, 混凝土的损伤增加, 且随着粉煤灰掺量的增加, 能够在一定程度上减少损伤的结论, 但还不能利用损伤演化方程估计混凝土的强度.

4 结 论

通过对 4 种不同粉煤灰掺量的混凝土在不同次数冻融循环前后的单轴压缩试验研究, 依据试验数

据,得到以下结论:

a. 在混凝土中掺入粉煤灰能够改善其抗冻、抗裂性能,且粉煤灰混凝土的后期强度大于普通混凝土。

b. 混凝土抗压强度随着冻融循环次数的增多而下降,且混凝土质量损失随冻融循环次数的增多而增大。粉煤灰掺量越大,混凝土冻融后质量损失越小。

c. 当粉煤灰掺量不超过20%时,冻融循环后粉煤灰混凝土强度高于普通混凝土,且由于剥蚀造成的质量损失小于普通混凝土,混凝土弹性模量随着粉煤灰掺量的增多而增大。

d. 混凝土弹性模量随着冻融循环次数的增多而下降,但是随着粉煤灰掺量的增大,弹性模量下降速率变慢。

e. 研究了混凝土的冻融损伤演化方程和冻融损伤本构关系,为今后研究粉煤灰混凝土的冻融寿命提供了试验基础和理论依据。

参考文献:

- [1] 朱登军,郭万彩. 大掺量粉煤灰混凝土的应用探讨[J]. 冶金信息导刊,2002(4):25-27.
- [2] 刘洋. 混凝土结构裂缝成因及预防探讨[J]. 黑龙江科技信息,2008(9):224.
- [3] 杨峰亮,郑七振. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 上海理工大学学报,2006,28(4):351-354.
- [4] 潘桂生,张国平. 不同掺量粉煤灰混凝土的应力冻融研究[J]. 科技信息,2011(27):303-304.
- [5] Bouzoubaâ N, Zhang M H, Malhotra V M. Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(10): 1393-1402.
- [6] Wang S Z, Llamazos E, Baxter L, et al. Durability of biomass fly ash concrete: freezing and thawing and rapid chloride permeability tests [J]. Fuel, 2008, 87(3):359-364.
- [7] 王鹏,杜应吉. 大掺量粉煤灰混凝土抗渗抗冻耐久性研究[J]. 混凝土,2011(12):76-78.
- [8] Janotka I, Nürnbergerová T. Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume [J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(17/18):2019-2032.
- [9] 施士升. 冻融循环对混凝土力学性能的影响[J]. 土木工程学报,1997,30(4):35-42.
- [10] 陈有亮,吴丹丹,代明星,等. 高温作用下不同水灰比混凝土的抗冻融性能研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(5):81-84.
- [11] 游有鲲,缪昌文,慕儒. 粉煤灰高性能混凝土抗冻性研究[J]. 混凝土与水泥制品,2000(5):14-15.
- [12] 李国柱,干伟忠. 粉煤灰高性能混凝土的配制及机理研究[J]. 新型建筑材料,2002(8):36-38.
- [13] 陈有亮,刘明亮,蒋立浩,等. 含宏观裂纹混凝土冻融的力学性能试验研究[J]. 土木工程学报,2011,44(增刊):230-233.
- [14] 袁晓露,李北星,崔巩,等. 粉煤灰混凝土的抗冻性能及机理分析[J]. 混凝土,2008(12):43-44,62.
- [15] 崔自治,王咏梅. 粉煤灰与粉煤灰混凝土性能[J]. 宁夏工程技术,2005,4(1):90-92.
- [16] 陈有亮,代明星,刘明亮,等. 含初始损伤岩石的冻融损伤试验研究[J]. 力学季刊,2013,34(1):74-80.
- [17] 王春来,徐必根,李庶林,等. 单轴受压状态下钢纤维混凝土损伤本构模型研究[J]. 岩土力学,2006,27(1):151-154.

(编辑:董 伟)