第47卷第6期 大连理工大学学报 Vol. 47, No. 6
2007年11月 Journal of Dalian University of Technology Nov. 2007

文章编号：1000-8608(2007)06-0862-05

不同水灰比混凝土冻融循环后双轴压试验研究

商怀帅[1,2]， 宋玉普*[1]

（1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室，辽宁 大连 116024；
2. 山东省建筑科学研究院，山东 济南 250031）

摘要：对水灰比为0.45、0.55的普通混凝土试块分别进行0、25、50、75和0、25、50次冻融循环作用后双轴压荷载试验，测得了试块的双轴压强度. 通过对试验结果进行分析，讨论了水灰比、冻融循环次数及中间应力对双轴压强度的影响，发现双轴压强度高于单轴压强度，且随冻融循环次数的增加而降低；在分析试验资料的基础上，建立了冻融循环作用后普通混凝土在主应力空间的破坏准则，可为复杂应力状态下可能经受冻融循环作用的普通混凝土结构的设计、维修提供参考.

关键词：混凝土；冻融循环；双轴压；应力比；强度准则
中图分类号：TU528 **文献标识码**：A

耐久性[1]是指构筑物长期满足设计安全和使用要求的性能，或者说是一个构件或整个结构在某一特定环境和时间段内能够长久地保持其性能的性质. 混凝土的强度及耐久性在其他条件不变的情况下与其工作环境有关，而抗冻性又是混凝土耐久性的最重要指标. 在我国北方桥涵工程、混凝土路面工程、桥梁和城市立交桥工程以及北方地区，尤其是东北严寒地区的工业与民用建筑过程中，由于环境气候的影响，或多或少存在混凝土的冻融破坏. 且这些结构一般处于复杂应力状态下，因此，研究冻融循环后普通混凝土在多轴应力下的强度特性显得尤为重要.

目前，国内外对常态普通混凝土在多轴应力下的强度和变形性能已经开展了大量的研究，提出了许多强度准则和本构关系的数学模型[2~7]，这在我国的规范中有了相应的体现，并对混凝土的多轴强度和本构关系进行了说明.

现有的关于冻融循环后混凝土性能的试验研究，主要集中于普通混凝土，并且大多是以质量损失与相对动弹性模量为标准，针对混凝土抗冻安全等级而展开的[8~11]，对冻融循环作用后混凝土的力学性能尤其是多轴力学性能研究得较少. 本文针对我国北方寒冷地区的公路、桥涵、港口码头等设计中遇到的多轴应力作用下普通混凝土的强度问题开展试验研究，按照现行的《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GBJ 82—85)[12]抗冻性能试验中的“快冻法”，对不同冻融循环次数作用下的普通混凝土试件进行双轴压荷载作用下的试验研究，测试两个加载方向的强度；并结合文献[13、14]中水灰比为0.50的试验结果，分析水灰比对混凝土抗冻性能的影响，建立冻融循环作用后普通混凝土的破坏准则，为处于寒冷地区的桥涵、混凝土路面、港口码头和城市立交桥等建筑物的工程设计及非线性有限元分析提供参考.

1 试验设计

1.1 原材料与混凝土配合比

本试验配制了水灰比 $w/c = 0.55, 0.45$ 的普通混凝土，水泥采用普通硅酸盐水泥（325#、425#）；细骨料为中砂，细度模数大于2.6，同时含泥量不大于2%；粗骨料为粒径为5～20 mm石灰石碎石，并用气压式含气量测定仪对搅拌后混凝土的含气量进行了测定. 表1为不同水灰比混凝土每立方米的配合比及性能指标.

收稿日期：2006-04-16； 修回日期：2007-10-09.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50479059).
作者简介：商怀帅(1980-)，男，博士，E-mail：shanghuaishuai@sohu.com；宋玉普*(1944-)，男，教授，博士生导师.
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　每立方米混凝土的配合比及性能指标

Tab. 1　The mix proportion of concrete in per cubic meter concrete and characteristics of concrete

w/c	m/kg				f_c/MPa	含气量 /%
	水泥	砂子	石子	水		
0.55	360(325#)	611	1 241	198	19.66	1.9
0.45	427(425#)	499	1 284	192	38.90	0.9

1.2　试件及快速冻融试验方法

试件制作时，先将石子、砂子和水泥放在一起，用机器搅拌 2 min，随后缓缓加入水，且在 1 min 左右加完，然后再搅拌 2～3 min，最后将拌合料置入钢模中，在 1 m × 1 m 的振动台（振动频率为 2 860 次 /min，振幅 0.3 ～ 0.6 mm）上振捣成型；24 h 后拆模. 随后在标准条件下养护 23 d，再将试件放在温度为 15 ～ 20 ℃ 的水中浸泡 4 d，随后进行冻融循环试验.

本文的快速冻融循环试验是在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的混凝土快速冻融试验机（TDR1）上进行的，试验按照 GBJ 82—85 中的“快冻法”，每个冻融循环在 2.5 ～ 3.0 h 内完成，每块试块从 6 ℃ 降至 − 15 ℃ 所用时间不少于冻结时间的 1/2，同时每块试块从 − 15 ℃ 升至 6 ℃ 所用的时间不少于整个融化时间的 1/2，试件中心温度分别控制在（− 17 ± 2）℃ 和（8 ± 2）℃ 之间，而且试件的内外温差不超过 28 ℃，冻和融之间的转换时间不超过 10 min.

本文按照现行规范 GBJ 82—85 制作了尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的试件用于测定动弹性模量、质量损失；而对于力学性能、变形性能的测试，由于现行规范未给出试件的制作方法，本文考虑到冻融循环试验过程中的不均匀性以及本试验为普通混凝土在恶劣环境条件下力学性能研究项目的一部分，并且考虑到整个项目系统性试验的工作量很大，为便于进行对比分析，大多采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的试件测定力学性能.

1.3　试验设备及试验过程

本文的力学性能试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室自行研制的大型静、动三轴电液伺服试验机[7] 上进行；该试验装置由加载装置、应变控制装置、应变量测装置和数据采集处理装置组成.

本文中，压应力为正、拉应力为负，压应变为正、拉应变为负；且 3 个主应力 $\sigma_1 \leqslant \sigma_2 \leqslant \sigma_3$；试验中严格按照应力比进行加载，双轴压加载应力比安排如下：$\alpha = \sigma_2 : \sigma_3 = 0.25$、0.50、0.75 和 1.00.

由于冻融循环作用，试件表面有所凹凸，在进行力学性能试验前，要对试件表面进行机械磨面；由于采用受压面积为 100 mm × 100 mm 的小试件，试验时两端的摩擦对混凝土抗压强度的影响相对较大，采用 3 层塑料薄膜中间涂少许甘油这种减摩方式应用于试件受压面. 将试件轴心物理对中后，以设定的应力比（$\alpha = \sigma_2 : \sigma_3$）进行两个方向的比例加载，试验加载速度控制在 0.2 ～ 0.5 MPa/s.

表 2 为以本文水灰比配制的混凝土经过不同冻融循环次数后，动弹性模量、质量损失以及单轴抗压强度的试验结果. 随后分别对经过 0、25、50、75 和 0、25、50 次冻融循环作用的水灰比为 0.45、0.55 的混凝土试块进行双轴压试验研究，每种冻融循环次数及应力比下，至少试验 3 个试件，当发现试验结果离散性较大时，增加试件数目，以求数据的完整准确.

表 2　不同水灰比混凝土冻融试验结果

Tab. 2　Result of concrete with different w/c after freeze-thaw cycles

N	w/c							
	0.55				0.45			
	相对动弹模	质量损失 /%	抗压强度 /MPa	抗压强度损失率 /%	相对动弹模	质量损失 /%	抗压强度 /MPa	抗压强度损失率 /%
0	100	0	19.66	0	100	0	38.90	0
25	74.1	0.789	15.15	22.94	92.3	− 0.201	34.40	11.57
50	46.8	1.775 1	9.95	49.39	78.4	− 0.201 6	29.43	24.34
75	—	—	—	—	62.0	0.400 8	25.67	34.01

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 试验结果及分析

按照前述试验方法，将不同冻融循环次数和不同加载比例下的混凝土双轴压强度列于表3.

表3 不同次数冻融循环后的混凝土双轴压强度

Tab. 3 The biaxial compressive strength of concrete after different cycles of freeze-thaw MPa

w/c	N	α				
		0	0.25	0.50	0.75	1.00
0.55	0	19.66	21.96	23.00	22.03	20.90
	25	15.15	17.82	19.53	18.51	16.61
	50	9.95	13.55	15.41	15.01	13.01
0.50[14]	0	34.20	43.01	45.49	42.50	40.70
	25	30.01	40.20	41.56	40.21	38.65
	50	24.10	32.26	36.84	35.29	33.15
	75	21.67	31.33	35.28	34.96	31.85
0.45	0	38.90	47.60	49.06	46.77	41.80
	25	34.40	44.60	47.65	43.93	40.20
	50	29.43	37.48	40.73	36.98	32.40
	75	25.67	31.17	34.28	31.63	27.50

2.1 应力比对抗压强度的影响

从表3中可见，对应于某一冻融循环次数N，侧向压应力的存在提高了混凝土的极限抗压强度，其提高程度随应力比的不同而有一定的差异. 表4给出了不同冻融循环次数后，混凝土双轴压强度较单轴抗压强度提高的百分比，由表4可见在侧应力系数为0.50时提高程度最大，而后随应力比的增加其提高程度反而有所降低.

图1为水灰比为0.45的混凝土试件经不同冻融循环次数后，应力比对主压向抗压强度的影响规律. 此外，由文献[14]中得出：随着冻融循环次数的增加，应力比对抗压强度的提高作用逐渐加大. 这与本文水灰比为0.55的混凝土试件的试验结果是一致的，如在应力比$\alpha=0.50$的双轴压作用下，冻融循环前，水灰比为0.55及0.50的混凝土的双轴压强度较单轴压强度分别提高17.0%、33.0%；而50次冻融循环后，分别提高54.9%、52.9%. 而对于本文水灰比为0.45的混凝土试件，在$\alpha=0.50$作用下，经历0、50次冻融循环作用后，极限抗压强度相对于单轴抗压强度分别提高26.1%、38.4%.

表4 双轴压强度相对单轴抗压强度提高的百分比

Tab. 4 Increasing percentage of biaxial compressive strength compared with uniaxial compressive strength %

$\alpha(=\sigma_2/\sigma_3)$	w/c						
	0.55			0.45			
	0	25	50	0	25	50	75
0.25	11.7	17.6	36.2	22.4	29.7	27.4	21.4
0.50	17.0	28.9	54.9	26.1	38.5	38.4	33.5
0.75	12.1	22.2	50.9	20.2	27.7	25.7	23.2
1.00	6.3	9.6	30.8	7.5	16.9	10.1	7.1

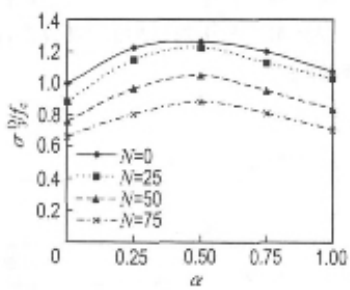

图1 应力比α对峰值应力σ_3^D的影响

Fig. 1 Influence of stress ratios α on peak stress σ_3^D

2.2 冻融循环次数对抗压强度的影响

表5给出了不同应力比加载条件下，不同水灰比混凝土的双轴压强度σ_3^D随冻融循环次数增加而降低的百分比. 由表5可见：在α相同的情况下，随着冻融循环次数的增加，不同水灰比混凝土在双轴压状态下的极限抗压强度逐渐降低；显然，冻融循环次数越多，双轴压强度的降低幅度越大，并且随冻融循环次数的增加，不同水灰比混凝土在单轴压荷载作用下的极限强度的降低程度均高于双轴压极限强度. 图2给出了冻融循环次数对不同双轴压应力比下的极限抗压强度的影响规律. 从图2中也可以看出，在应力比$\alpha=0.50$时，极限抗压强度提高值最大.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　双轴压强度随冻融循环次数的增加而降低的百分比

Tab. 5　Strength loss with freeze-thaw cycles under biaxial compression　%

N	w/c									
	0.55					0.45				
	0	0.25	0.50	0.75	1.00	0	0.25	0.50	0.75	1.00
25	22.9	18.9	15.1	16.0	20.5	11.6	6.3	2.9	6.1	3.8
50	49.4	38.3	33.0	31.9	37.8	24.3	21.3	17.0	20.9	22.5
75	—	—	—	—	—	34.0	34.5	30.1	32.4	34.2

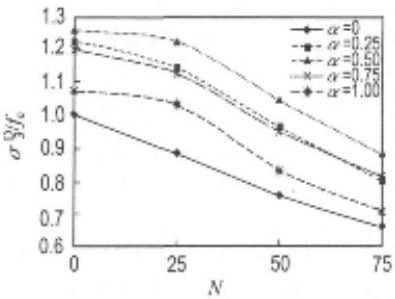

图 2　冻融循环次数 N 对峰值应力 σ_3^{D} 影响

Fig. 2　Influence of cycles of freeze-thaw N on peak stress σ_3^{D}

3　破坏准则

参照文献[7]中介绍的 Darwin 和 Pecknold 模式，采用下式来描述双轴压强度与应力比的关系：

$$\begin{cases}\dfrac{\sigma_3^{\mathrm{D}}}{f_c}=\dfrac{a+b\times\alpha}{(1+\alpha)^2};\ 0\leqslant N\leqslant 75\\ \alpha=\sigma_2/\sigma_3;\ -\infty<\alpha\leqslant 0\end{cases}\tag{1}$$

式中：σ_3^{D} 为双轴压荷载作用下的极限抗压强度；f_c 为常态混凝土加减摩措施后测得的单轴压强度平均值；$\alpha=\sigma_2/\sigma_3$ 为应力比；a、b 为回归系数. 根据表 2 中的试验数据，经统计回归得 a、b 及相关系数 r 值，见表 6.

图 3 为水灰比 $w/c=0.45$ 的普通混凝土在主应力空间的双轴压强度包络图，由图可见，冻融循环作用后混凝土在双向压荷载作用下的强度包络线与常态混凝土相似，在应力比相同的情况下，其双轴压强度随冻融循环次数的增加而降低；在相同冻融循环次数时，其双轴压强度高于单轴压极限强度，提高程度取决于应力比值.

表 6　回归系数 a、b 及相关系数 r 值

Tab. 6　Regressive coefficients a, b and correlative coefficient r

N	w/c								
	0.55			0.50			0.45		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r
0	0.974 1	3.276 4	1	1.032 5	3.744 5	1	1.072 7	3.346 6	0.994 6
25	0.800 0	2.673 9	0.993 7	0.903 9	3.620 0	1	0.971 7	3.266 3	0.993 6
50	0.557 7	2.217 2	0.986 0	0.721 7	3.212 5	1	0.861 0	2.622 4	0.982 9
75	—	—	—	0.671 9	0.995 8	0.995 8	0.727 7	2.229 6	0.984 1

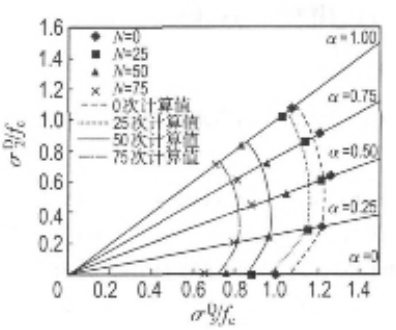

图 3　主应力空间的双轴压强度包络图($w/c=0.45$)

Fig. 3　Failure envelopes of concrete under biaxial compression in principal stress space ($w/c=0.45$)

表 7 为利用本文模型(1)计算得到的水灰比为 0.55 的混凝土试件经历不同冻融循环次数后，在不同应力比作用下的主压向强度的绝对误差，由表可以看出本文模型能满足工程需要.

表 7　破坏准则的计算结果与试验结果的比较

Tab. 7　Comparison between the value computed by strength criteria and experimental results　MPa

w/c	N	α				
		0	0.25	0.50	0.75	1.00
0.55	0	0.51	−0.60	0.17	0	0.01
	25	−0.58	−0.66	0.86	0.50	−0.46
	50	−1.01	−0.44	0.85	0.75	−0.63
0.45[14]	0	−2.83	0.06	1.58	1.26	−1.18
	25	−3.40	0.08	2.62	0.47	−1.01
	50	−4.06	−0.28	3.18	1.06	−1.48
	75	2.64	−0.82	2.43	1.15	−1.26

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 结 论

(1) 冻融循环作用后,水灰比为 0.55、0.50、0.45 的混凝土单轴抗压强度及双轴抗压强度明显降低,在 50 次冻融循环后,单轴抗压强度分别降低为初始值的 50.6%、70.5%、75.7%;而在应力比为 0.5 的双轴压荷载作用下,其双轴压强度分别降低为初始值的 67%、81%、83%.

(2) 在应力比相同时,混凝土的双轴压强度随冻融循环次数的增加而降低;在经历相同冻融循环次数后,混凝土的双轴压强度较单轴压极限强度提高,提高程度取决于应力比 α,在 $\alpha = 0.50$ 时,极限抗压强度提高值最大,并且,随着冻融循环次数的增加,应力比对抗压强度的提高作用有逐渐增加的趋势.

(3) 建立了普通混凝土冻融循环作用后在双轴压应力状态下的破坏准则,该破坏准则形式简单,可以为处于寒冷地区的水工、港工、海工等建筑物的工程设计及有限元分析提供参考.

参考文献:

[1] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社,2002

[2] KUPFER H, HILSDORF H K, RUSCH H. Behavior of concrete under biaxial stresses [J]. **J of ACI**, 1969, **66**(8): 656-666

[3] TRAINA L A, MANSOUR S A. Biaxial strength and deformational behavior of plain and steel fiber concrete [J]. **ACI Mater J**, 1991, **88**(4): 354-362

[4] CHEN W F. **Plasticity in Reinforced Concrete** [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1982

[5] 钱在兹,钱 春. 混凝土复杂受力状态下的统一强度准则[J]. 土木工程学报,1996,**29**(2):46-55

[6] 俞茂宏. 强度理论新体系[M]. 西安:西安交通大学出版社,1992

[7] 宋玉普. 多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M]. 北京:中国水利电力出版社,2002

[8] 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

[9] 程红强. 冻融对混凝土强度的影响[J]. 河南科学,2003,**21**(2):214-216

[10] SOROUSHIAN P, MOHAMAD N, OKWUEGBU A. Freeze-thaw durability of lightweight carbon fiber reinforced cement composites [J]. **ACI Mater J**, 1992, **85**(5): 491-494

[11] ALEXANDER M G, MAGEE B J. Durability performance of concrete containing condensed silica fume [J]. **Cem and Concr Res**, 1999, **29**: 917-922

[12] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. GBJ 82—85 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997

[13] 宋玉普,于长江,覃丽坤,等. 冻融环境下混凝土双向受压强度与变形特性试验研究[J]. 大连理工大学学报,2004,**44**(4):545-549
(SONG Yu-pu, YU Chang-jiang, QIN Li-kun, *et al*. Experimental study of strength and deformation of concrete under biaxial compression in freezing-thawing circumstance [J]. **J Dalian Univ Technol**, 2004, **44**(4):545-549)

[14] 宋玉普,覃丽坤,张 众,等. 冻融循环后混凝土双轴压的试验研究[J]. 水利学报,2004(1):95-99

Experimental investigation on different w/c concrete under biaxial compression after freeze-thaw cycles

SHANG Huai-shuai[1,2], SONG Yu-pu[*1]

(1. State Key Lab. of Struct. Anal. for Ind. Equip., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;
2. Shandong Prov. Acad. of Building Res., Jinan 250031, China)

Abstract: The experimental study of plain concrete specimens of water cement ratio 0.45, 0.55 under biaxial compression after 0, 25, 50, 75 and 0, 25, 50 cycles of freeze-thaw respectively was completed. The biaxial compressive strength behavior of concrete after different cycles of freeze-thaw was tested. The influences of w/c, freeze-thaw cycles and the stress ratio on the biaxial compressive strength were analyzed. It is tested that the biaxial compressive strength is larger than the uniaxial compressive strength and decreases as freeze-thaw cycles increase. Based on the test data, the failure criterion expression in terms of principal stress after different cycles of freeze-thaw is proposed, which is essential to economical and reliable design of plain concrete structure suffering from freeze-thaw cycles under complex stress condition.

Key words: concrete; freeze-thaw cycle; biaxial compression; stress ratio; strength criteria

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net