

高温作用下不同水灰比混凝土的抗冻融性能研究

陈有亮, 吴丹丹, 代明星, 索晓航, 王 朋
(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘 要: 采用快速冻融法,对经受不同高温、不同水灰比的混凝土进行了 40 次抗冻融循环。通过抗压强度试验测得混凝土的峰值应力、应变和弹性模量。探讨了不同高温作用和不同配合比对混凝土抗冻融性能的影响。研究分析表明:随高温作用温度的升高和水灰比的增大,混凝土的峰值应力逐步降低,弹性模量逐步减小。根据试验结果得出了混凝土冻融后弹性模量与高温作用温度的关系式。计算结论可为经受高温作用的混凝土抗冻融设计提供理论依据。

关键词: 水灰比; 混凝土; 高温作用; 冻融循环; 力学性能

中图分类号: TU528 文献标识码: A 文章编号: 1672- 643X(2012)05- 0081- 04

Research on mechanical properties of anti-freezing and thawing of concrete with different water-cement ratio under the effect of high temperature

CHEN Youliang, WU Dandan, DAI Mingxing, SUO Xiaohang, WANG Peng
(Environment and Building Department, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: By adoptting the quick freezing and thawing method, a series of experimental studies of concrete of different mix ratios subjected to different high temperatures through 40 freezing and thawing cycles have been conducted. Through compressive strength tests, concrete peak stress, strain and elastic modulus were measured. The paper discussed the influence of different high temperature and mixture ratio on the concrete freezing and thawing properties. The analysis showed that with the increment of temperature and water - cement ratio, the peak stress and elastic modulus of the concrete decreased gradually. According to the experimental result, the formula for elastic modulus after freezing and thawing and high temperature were developed. This study may provide a theoretical basis for the design of freeze-thaw resistance of concrete with-standed high temperature.

Key words: water cement ratio; concrete; high temperature effect; freezing and thawing cycle; mechanical property

实际工程中,钢筋混凝土结构的高温工作状态有两类:(1)经常性处于正常使用条件高温下—如冶金和化工车间受高温辐射的结构(200℃~300℃)、核电站的压力容器和安全壳(60℃~120℃),烟囱内衬(500℃~600℃)和外壳(100℃~300℃)等。(2)事故性的,遭受高温冲击—如建筑物遭受火灾,核电站事故,建筑物或工事受武器轰击等。结构表面温度可在一小时内上升到900℃或更高^[1]。

对于处于我国东北、西北和华北地区的上述钢筋混凝土结构,冬季时,冻融破坏是一个不可忽视的重要问题。为确保在严寒地区,结构在设计高温下正常使用、在事故高温下具有必要的安全储备,必须对混凝土材料在高温下经受冻融循环后的强度和变形规律进行系统的试验研究。关于混凝土冻融方面的研究,国内外已经取得不少成果^[2~4]。而关于经

受高温作用后的混凝土冻融性能的研究还很少。

1 试验概况

1.1 试件制作

本试验制作了尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm普通混凝土立方体试件,水泥采用强度等级42.5的普通硅酸盐水泥,细骨料为普通河砂,颗粒级配属于级配Ⅱ区,粗骨料为碎石,最大粒径20 mm,水为自来水,pH值在7.0左右(由pH试纸测定),混凝土配合比见表1。

表1 混凝土配合比				kg/m ³
水灰比	水泥	水	砂子	石子
0.35	477	167	722	1084
0.45	400	180	748	1122
0.55	345	190	765	1149

试件脱模后,在湿度 95%,温度 20℃ 的恒温养护箱内养护 28 d,使其强度达到最大强度的 98%。

1.2 高温、冻融设备及过程

本试验采用的高温设备为上海特成机械设备有限公司制造的型号为 SX2-10-12 的箱形电阻炉,膛净空为 400 mm×250 mm×160 mm,额定功率为 10 kW,最高温度为 1200℃。冻融设备低温数控制箱为浙江土仪器制造有限公司生产的,型号 STDW-40,低温可达 -40℃,测温精度为 0.1℃。

本试验按其配合比分为三组,每组有 12 件试块。先将试块置于自来水中 3 d,使其吸水饱和,称得各个试块的饱和质量。分别进行高温到 200℃,300℃ 和 400℃。再进行冻融,次数各为 40 次。即将准备好的饱和试块放入冻融机进行冻融实验,试块在 -20℃ 温度下冷冻 6 h 后,浸入水中 6 h,定为一个冻融循环。分别记录各组试块冻融前和冻融结束之后的试块质量,以比较质量损失。

1.3 试验设备

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,试验机的最大荷载为 2 000 kN。试验采用应力控制方式,将经历冻融后的试样放在试验机上,以每秒 0.5 MPa/s 的速率沿轴向施加荷载,直至试样破坏,试验数据由试验系统自动采集。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及机理分析

混凝土试件在经受不同高温作用后,表面颜色略有不同。300 高温作用后,混凝土试块表面颜色如同常温;400 高温作用后,混凝土试块表面颜色淡红;500 高温作用后,混凝土试块表面颜色灰白。这是由于在 300~400℃ 时,水泥中的水化硅酸钙和水化铝酸钙开始脱水,超过 400℃,混凝土中的水泥石与骨料界面因变形差异而开裂,混凝土表面出现细网状裂缝^[5],此时混凝土略呈白色。说明经受温度越高,混凝土损伤越厉害。混凝土试件在经历冻融循环后,试件表面逐渐出现微裂纹(图 1),将试件置于水中这种裂纹愈加明显,并且随着冻融次数的增大,试件原本光滑的水泥浆表层变得粗糙,细骨料外露,进而表皮酥松,发生剥落状况。在冻融 40 次后,部分混凝土试块出现不同的质量损失。表 3 列出了混凝土试块高温冻融前和高温冻融后的试块质量及质量损失。

表 2 冻融前和冻融后混凝土的质量				℃, g, %	
水灰比	冻融前 高温度数	高温冻融 前质量	高温冻融 后质量	质量 损失	质量损失 百分比
0.35	300	856.6	843.3	13.3	1.55
	400	846.7	832.1	14.6	1.72
	500	859.2	842.6	16.6	1.93
0.45	300	834.2	819.4	14.8	1.77
	400	832.2	816.9	15.3	1.84
	500	835.7	819.0	16.7	2.00
0.55	300	846.8	831.5	15.3	1.81
	400	839.7	821.2	18.5	2.20
	500	841.2	822.3	18.9	2.25

由表 2 可以看出在水灰比相同的条件下,随着高温作用温度的升高,混凝土的质量损失增大;在相同高温条件下,水灰比越大则混凝土的质量损失越大。在冻融过程中,混凝土毛细孔中的水在负温下由水转变成冰,体积膨胀,但由于受到毛细孔壁约束,因而在孔周围的微观结构中产生拉应力。当混凝土受冻时,这种压力会损坏混凝土的内部微观结构,当经过多次反复的冻融循环以后,损坏逐步积累不断扩大,最终发展成互相连通的裂缝,使混凝土产生由表及里的剥蚀破坏^[6]。

2.2 应力-应变曲线与高温作用温度及水灰比的关系

图 2~图 5 分别为水灰比为 0.35、0.45、0.55 的混凝土经过不同高温作用后再冻融 40 次后混凝土的应力-应变曲线,从图中可以看出,经历不同高温作用的冻融后混凝土的应力-应变曲线大致经历 4 个阶段:

- (1) 压密阶段:混凝土内的微裂隙在外力作用下发生闭合,曲线呈上凹型。
- (2) 弹性变形阶段:应力、应变近似按比例增长,试件处于弹性变形状态。
- (3) 弹塑性阶段:随着荷载继续增长,应变增长速度较应力增长速度要快,此时试件内部有劈裂声,表明试件进入弹塑性阶段。
- (4) 破坏阶段:当应力接近并达到峰值应力后,试件表面出现平行于受力方向短而细的裂缝,并逐渐形成贯通整个截面的斜主裂缝或纵向主裂缝。此后应力开始下降,应变继续增长,直至试件最终破坏。

此外,还可以看出:相同的配合比,经过不同高温作用后的混凝土应力-应变关系曲线形状相似,但是随着高温作用温度的升高,混凝土冻融后强度

逐步降低,弹性阶段斜率逐步降低,弹性模量降低;没有经过高温作用与冻融的混凝土试块,随着水灰比的增大,混凝土的峰值应力减小,峰值应变增大,弹性模量降低;经过高温作用的混凝土在冻融循环

后,随着水灰比的增大,应力应变曲线逐渐趋于平缓,应力逐步降低,应变逐步变大,第二阶段的切线的斜率变化的更为显著。

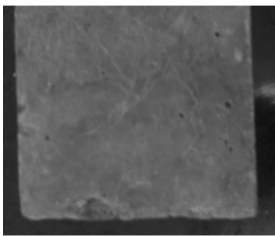


图1 混凝土表面微观裂纹

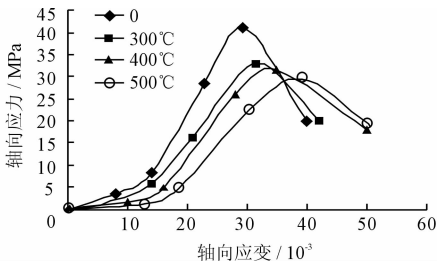


图2 0.35 水灰比混凝土冻融后的应力 - 应变曲线

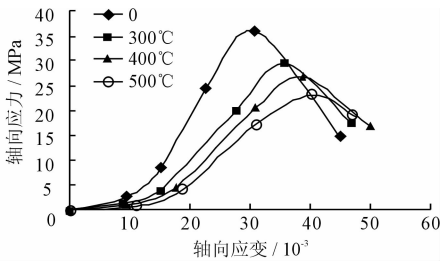


图3 0.45 水灰比混凝土冻融后的应力 - 应变曲线

2.3 抗压强度与高温作用温度及水灰比的关系

将高温作用后再进行冻融循环的混凝土的峰值应力与高温温度关系以点的形式表示在图中(图5-7),并对其进行线性拟合,由拟合线的斜率可以看出:随着高温温度的升高,混凝土构件受到的冻融循环的影响增大,0.35 水灰比组混凝土的平均抗压强度由未经过高温与冻融作用前的 41 MPa 降低到高温到 400℃再冻融 40 次之后的 31.1 MPa,强度降低了 24.1%;0.45 水灰比组混凝土的平均抗压强度由未经过高温与冻融作用前的 37.3MPa 降低到高温到 400℃再冻融 40 次之后的 33.06 MPa,强度降

低了 38.1%;0.55 水灰比组混凝土的平均抗压强度由未经过高温与冻融作用前的 32.8 MPa 降低到高温到 400℃再冻融 40 次之后的 14.3 MPa,降低了 56.4%。随着水灰比的增大,混凝土的抗压强度不但逐步下降,而且下降幅度越大,说明随水灰比的增大,混凝土的劣化速度加快。水灰比越大,混凝土中可冻水的含量就越多,混凝土的结冰速度就越快;气泡结构越差,平均气泡间距越大;混凝土强度越低,抵抗冻融的能力越差。由此可以推断:水灰比增大在冻融时将加速微观裂纹的形成,加速混凝土构件的破坏,使混凝土的耐久性降低。

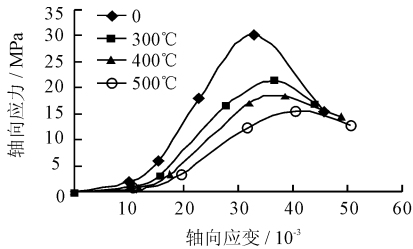


图4 0.55 水灰比混凝土冻融后的应力 - 应变曲线

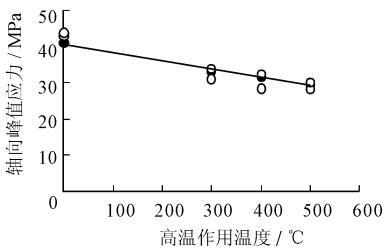


图5 0.35 水灰比混凝土峰值应力与高温作用温度关系图

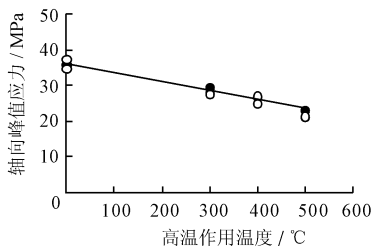


图6 0.45 水灰比混凝土峰值应力与高温作用温度关系图

2.4 弹性模量与高温作用温度及水灰比的关系

对混凝土应力 - 应变曲线上达到峰值应力前的近似直线段进行拟合,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温度的变化规律如图8所示。从图中可以看出:相同高温作用温度的混凝土,弹性模量 E 随着水灰比的增大而呈现递减的趋势;相同水灰比的混凝土,弹性模量 E 随高温作用温度的升高而递减;0.35 水灰比组的混凝土弹性模量从经过 200℃ 高温作用再冻融 40 次后的 1.57 GPa 降到经过 300℃ 高温作用再冻融 40 次后 1.41 GPa,降低了 10.11%,从经过 300℃ 高温作用

再冻融 40 次后的 1.41 GPa 降到经过 400℃ 高温作用再冻融 40 次后 1.21 GPa,降低了 13.87%;0.45 水灰比组的混凝土弹性模量从经过 200℃ 高温作用再冻融 40 次后的 1.22 GPa 降到经过 300℃ 高温作用再冻融 40 次后 1.04 GPa,降低了 14.96%,从经过 300℃ 高温作用再冻融 40 次后的 1.04 GPa 降到经过 400℃ 高温作用再冻融 40 次后 0.87 GPa,降低了 16.12%;0.55 水灰比组的混凝土弹性模量从经过 200℃ 高温作用再冻融 40 次后的 0.87 GPa 降到经过 300℃ 高温作用再冻融 40 次后 0.72 GPa,降低了 17.25%,从经过 300℃ 高温作用再冻融 40 次后

的, 0.72 GPa 降到经过 400℃ 高温作用再冻融 40 次后 0.57 GPa, 降低了 20.33%。水灰比相同, 高温作用温度越高, 冻融后的混凝土弹性模量损失的越快。

初始弹性模量值是根据混凝土试块的 40% 抗压峰值应力对应的应变计算出的割线模量^[7]。用未经冻融的混凝土初始弹性模量 E_0 除以冻融后各弹性模量, 得到各种不同高温作用冻融后弹性模量的比值图。图 9 给出了该比值 E_0^D / E_0 随高温作用的变化规律。用最小二乘法回归试验数据, 得到不同水灰比混凝土初始弹性模量与高温作用温度的关系公式。

0.35 水灰比混凝土初始弹性模量、峰值形模量与高温作用温度的关系表达式为:

$$\frac{E_0^D}{E_0} = 1 - 0.0008X \quad (1)$$

0.45 水灰比混凝土初始弹性模量、峰值形模量与高温作用温度的关系表达式为:

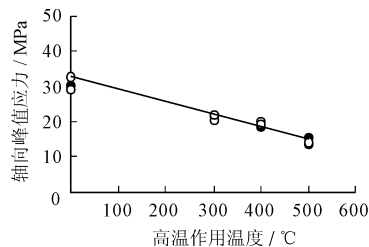


图 7 0.55 水灰比混凝土峰值应力与高温作用温度关系图

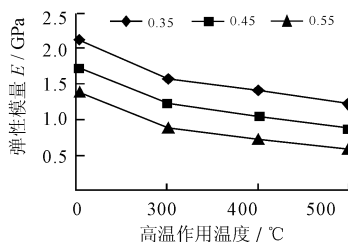


图 8 不同水灰比混凝土弹性模量与高温作用温度关系图

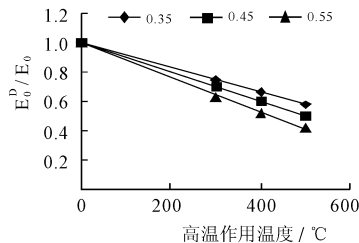


图 9 不同水灰比混凝土弹性模量与高温作用温度关系图

3 结 语

(1) 经受相同高温作用温度的混凝土, 随水灰比的增大, 混凝土冻融循环后的抗压强度与峰值应力逐步降低, 弹性模量逐步减少。

(2) 相同水灰比的混凝土, 随经受高温作用温度的升高, 混凝土冻融循环后的抗压强度与峰值应力逐步降低, 弹性模量逐步减少。

(3) 经受相同高温作用温度的混凝土, 随水灰比的增大, 混凝土冻融循环后的弹性模量损失率更加明显, 混凝土劣化速度越快。

参考文献:

[1] 李卫, 过镇海. 高温下混凝土的强度和变形性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 1993, 14(1): 8-16.

$$\frac{E_0^D}{E_0} = 1 - 0.0010X \quad (2)$$

0.55 水灰比混凝土初始弹性模量、峰值形模量与高温作用温度的关系表达式为:

$$\frac{E_0^D}{E_0} = 1 - 0.0012X \quad (3)$$

随水灰比的增大, $\frac{E_0^D}{E_0}$ 呈线性下降趋势, 即混凝土

弹性模量损失越明显, 劣化速度越快。这是因为随着水灰比增加, 混凝土中水泥石渗透系数将增大, 密实度降低, 当试件在水中遭受冻融循环时, 影响了混凝土中内部孔隙可能为水的饱和程度, 水泥石渗透系数越大, 混凝土内部孔隙可能为水的饱和程度越高, 混凝土试件受到冻结时, 其膨胀压力越大, 试件受损更严重。此时继续进行冻融循环, 将大大影响结构的耐久性。

[2] Traina L A, Mansour S A. Biaxial strength and deformational behavior of plain and steel fiber concrete[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(4): 354-362.

[3] 唐光普, 刘西拉, 施士升. 冻融条件下混凝土破坏面演化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2572-2578.

[4] 蔡昊, 覃维祖. 冻融循环作用下混凝土力学性能的损失[J]. 工程力学, 1996(增): 29-32.

[5] 陈丽红, 孟宏睿, 林友军. 高温作用后混凝土性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2006(9): 12-14.

[6] 王丽玫, 梁隽. 抗冻融耐久性混凝土的配合比研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(2): 233-236.

[7] 商怀帅, 宋玉普, 覃丽坤. 普通混凝土冻融循环后性能的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2005, 4(2): 9-11.