

文章编号: 1000-4750(2011)Sup.II-0182-05

低温环境下混凝土性能的试验研究

王传星¹, *谢 剑^{1,2}, 李会杰¹

(1. 天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300072; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 低温下混凝土的性能是混凝土材性研究的一个薄弱环节。该文采用超低温冰箱对同一强度等级的混凝土试件进行降温, 然后在试验机上测试不同温度下混凝土的抗拉强度、抗压强度等, 详细研究了在低温环境下混凝土的强度变化情况。试验表明, 随着温度的降低, 混凝土的抗拉强度和抗压强度都有所提高, 但两者提高的程度并不呈比例。在此基础上, 与国外文献数据相对比, 采用数据拟合的方法, 得到混凝土强度随温度变化的函数关系。

关键词: 低温; 混凝土力学性能; 抗压强度; 抗拉强度; 试验

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE PROPERTIES OF CONCRETE UNDER LOW-TEMPERATURE

WANG Chuan-xing¹, *XIE Jian^{1,2}, LI Hui-jie¹

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The concrete performance in a low temperature is still a trouble spot. Freezer was used to cooling concrete blocks, and the blocks are the same strength grade. Then test the compression strength and tensile strength in the testing machine. This experiment studies the strength changes of concrete in a low temperature in detail. The test results prove that the compression strength and tensile strength of concrete are all increase with the decrease of temperature. But they are not in the same ratio. On this basis, and by compared with the data founded in the foreign literature, data fitting is used to get the function relationships between the strength and the temperature.

Key words: low temperature; mechanical properties of concrete; tensile strength; compression strength; experiment

混凝土作为一种主要的建筑材料, 广泛应用于各类民用建筑和工业建筑。我国幅员辽阔, 北部寒带省份温度低且温差大, 根据气象资料记载, 黑龙江漠河最低温度曾达到 -53.3°C , 内蒙古、吉林、新疆等省份也出现过 -30°C 甚至 -40°C 的低温。目前对于混凝土性能的研究往往都是常温下进行的, 只能反映在常温下的受力状态, 而以常温下混凝土的性

能应用于低温状态下的设计是不合理的。对于低温下混凝土的性能, 国内的研究很少, 青藏铁路修建时国内学者仅重点研究了最低温到 -60°C 时的钢材及混凝土冻融循环下的力学性能^[1-3]。因此, 系统研究低温状态下混凝土的性能, 对于低温混凝土的使用及严寒地区混凝土结构设计都有极其重要的意义。

收稿日期: 2010-10-26; 修改日期: 2010-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078260)

作者简介: 王传星(1984—), 男, 山东潍坊人, 硕士生, 主要从事低温混凝土材料性能的研究(E-mail: wchx1439@126.com);

*谢 剑(1974—), 男, 河北石家庄人, 副教授, 博士, 硕导, 主要从事混凝土基本理论的研究(E-mail: xiejian@tju.edu.cn);

李会杰(1983—), 男, 河北保定人, 硕士生, 主要从事低温混凝土材料性能的研究(E-mail: huijielee@yahoo.com.cn).

本文将全面介绍低温环境下混凝土性能的试验准备、试验过程,并对取得的一些成果进行分析,为相关的研究提供参考和数据支持。

1 试验设备和内容

1.1 试验设备

低温环境下混凝土性能研究较少的一个重要原因是低温降温设备及保温措施的实现比较困难,这是试验前期必须首先解决的问题。本试验中采用低温冰箱和超低温加载环境箱两种降温设备能够保证试件温度和加载环境温度降至从室温到 -180°C 范围内的任意温度点。同时,低温温度传感器可以准确、有效地对试验时的控制温度直接进行读数,以方便试验过程中进行温度控制。

试验设备的解决详见文献[4]。这里不再赘述。

1.2 试验内容及试件

文中混凝土低温试验有三项,即低温下混凝土立方体抗压强度、棱柱体抗压强度、劈裂抗拉强度。

由于低温环境下结构所使用的混凝土多为高强混凝土,因此拟制作混凝土试件强度等级为C50,实际测得 20°C 时150mm立方体试件抗压强度3块均值为56.5MPa。本次试验共制作试件274个,粗骨料采用碎石,细骨料为细砂。试验中每3个试件为一组,试验数据按文献[5]规定的方法取值。

2 低温下混凝土的强度结果

混凝土强度是其基本的力学性能,也是结构设计的基本依据。试验现象另文追述,本文不再赘述。

2.1 立方体试件抗压强度

试验采用边长150mm和100mm立方体试件,分别在 20°C 、 0°C 、 -20°C 、 -40°C 和 -60°C 等低温温度条件下按照标准试验方法^[5]进行抗压强度试验。

每组3个试件试验强度的差值均小于15%,基本控制在5%以内,说明试件质量良好,制作差异对强度的影响较小。各个温度点的强度如图1所示。

由图示,对于150mm立方体试件,随着温度的降低,混凝土的抗压强度不断提高。在 -20°C 时混凝土强度为常温下的1.16倍, -60°C 时混凝土强度为常温下的1.53倍。

给出低温影响下的150mm立方体抗压强度拟合公式,如下:

$$f_{cuT} = (-0.0065T + 1.1)f_{cu}, \quad -60^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

其中: f_{cuT}/MPa 为 T 温度下立方体抗压强度; $T(^{\circ}\text{C})$

为混凝土的温度; f_{cu}/MPa 为常温下立方体抗压强度。

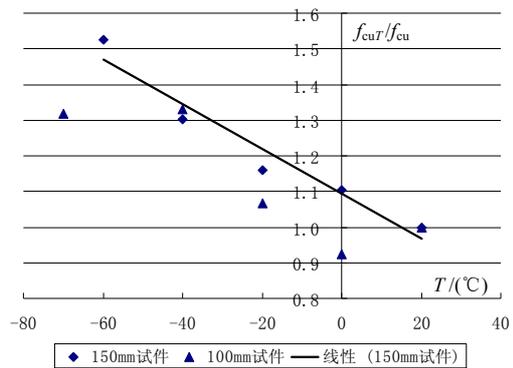


图1 150mm和100mm立方体试件低温时的抗压强度

Fig.1 Compressive strength for 150mm & 100mm cubic specimen in different low temperatures

对于100mm立方体试件, 0°C 时的强度试验值小于常温下(20°C)的强度试验值,显然该数据异常,原因可能是该试件制作时内部存在缺陷。但由图1仍可看出低温下混凝土试件的强度随温度的降低呈增大趋势,在 -20°C 时混凝土强度为常温下的1.07倍, -40°C 时混凝土强度为常温下的1.33倍。

同时,从两种试件各自在低温下强度提高的比例来看,大尺寸试件强度受低温影响则更加显著。

2.2 立方体试件尺寸效应

文献[5]中立方体抗压强度试验的试件有边长100mm、150mm、200mm三种不同尺寸,其中边长150mm试件为标准试件。规范中规定了常温下不同尺寸试件对标准试件的换算系数,分别为100mm试件0.95,200mm试件1.05。本次试验进行了边长150mm和100mm两种不同规格立方体试件在低温条件下的强度试验,并分析低温下的尺寸效应。

将两种规格试件抗压强度比值与温度的关系用图形表示,如图2所示。从图2中可以看出,边长100mm试件与边长150mm试件的立方体抗压强度换算系数与温度基本呈线性关系。在常温到 -70°C 温度区间内,不同规格试件的立方体抗压强度之间存在尺寸效应,该尺寸效应比值受温度影响显著。

从图示可以预见,当温度降至 -80°C 时混凝土抗压强度100mm立方体试件与150mm立方体试件的强度换算系数达到1,即此时试件尺寸大小对于混凝土的强度没有影响,在温度低于 -80°C 时可不考虑换算系数,但这尚需更多试验验证;另外,我们注意到,本试验在 20°C 时得到的尺寸效应比值为0.84,这与规范中的0.95^[5]有一定的出入,原因

在于本次试验的试件数量相对较少，不能提供足够的统计样本进行分析比较，这也说明仍需要大量的试验来进行补充和验证。

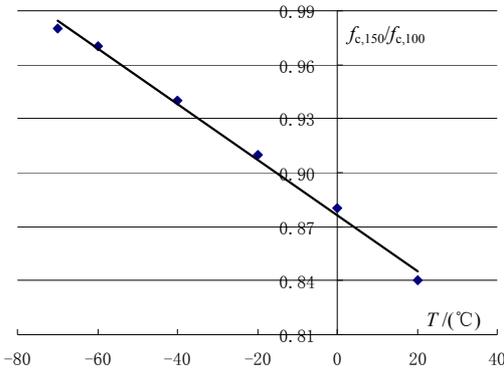


图2 尺寸效应比值与温度的关系图

Fig.2 Size effect ratio changing with temperature

2.3 棱柱体试件抗压强度

混凝土的抗压强度与混凝土试件的形状有关，采用棱柱体比立方体能更好的反映混凝土结构的实际抗压能力，用混凝土棱柱体试件测得的抗压强度为轴心抗压强度。150mm 混凝土棱柱体抗压强度与温度的关系，见图 3 所示。

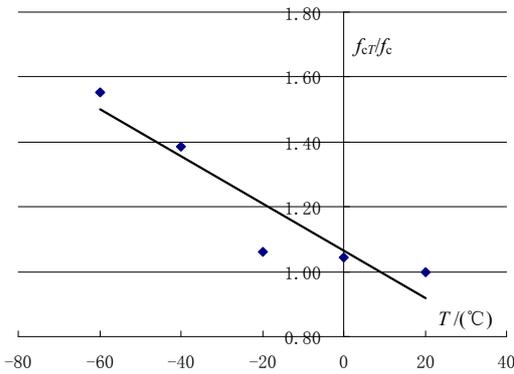


图3 低温下混凝土棱柱体抗压强度

Fig.3 Concrete prism compressive strength in different temperatures

从混凝土棱柱体抗压强度与温度的关系曲线可以看出，混凝土棱柱体抗压强度随温度的降低而逐渐增大，并且与温度近似呈线性关系。由图示，在 0℃时棱柱体抗压强度为常温下的 1.04 倍，-40℃时棱柱体抗压强度为常温下的 1.39 倍，在 -60℃时棱柱体抗压强度则为常温下的 1.55 倍。

用线性公式拟合，得到拟合公式如下：

$$f_{cr} = (-0.007T + 1.12)f_c, \quad -60^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中： f_{cr}/MPa 为 T 温度下 150mm 混凝土试件棱柱体抗压强度； $T/(\text{°C})$ 为混凝土温度； f_c/MPa 为常温时 150mm 混凝土试件棱柱体抗压强度。

将低温下棱柱体试件与立方体试件的抗压强度进行对比，如表 1 所示。

表 1 混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度数据对比表
Table 1 Data contrast table between concrete prism compressive strength and cubic compressive strength

温度(°C)	20	0	-20	-40	-60
150mm 立方体强度/MPa	56.2	62.0	65.1	73.2	85.8
150mm 棱柱体强度/MPa	46.6	48.6	49.4	64.6	72.4
比值 α	0.83	0.78	0.76	0.88	0.84

根据表 1 数据可得出，同温度下棱柱体抗压强度都小于 150mm 立方体试件抗压强度，这与常温情况是一致的，这主要是由于棱柱体试件的高度较大，试验机压板与试件之间摩擦力对试件中部的横向变形约束影响较小。此外，棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值随温度的降低略有波动，比值保持在 0.80 左右，说明低温条件下混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度仍然存在一定的规律性。

2.4 立方体试件劈裂抗拉强度

抗拉强度是混凝土的一个重要力学性质，也是混凝土结构强度设计的一个基本指标。抗拉强度一般由立方体试件的劈裂试验确定，试验结果见图 4。

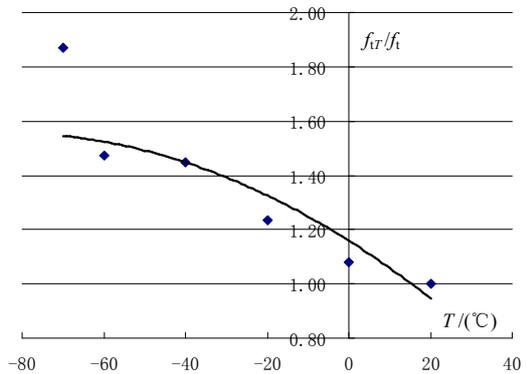


图4 混凝土劈裂抗拉强度与温度的关系

Fig.4 The relationship between concrete splitting tensile strength and temperature

通过上面的曲线可以看出，在每个温度段混凝土的劈裂抗拉强度随温度的降低而逐渐增大，这与国内外学者的研究结论^[6-10]一致。

在 0℃时劈裂抗拉强度为常温下的 1.08 倍，在 -60℃时劈裂抗拉强度则为常温下的 1.47 倍。-70℃时的试验数据明显偏离曲线，初步判断这可能是由于试验当日空气湿度等因素的影响。

参考超低温条件下(最低至-160℃)劈裂抗拉强度的试验数据，图示曲线关系表示为指数函数关系，可用该类型函数进行拟合，拟合公式如下：

$$f_{tr} = (1.45 - 1.02^{T-60})f_t, \quad -70^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C} \quad (3)$$

式中： f_{tT} /MPa 为 T 温度下混凝土立方体试件抗拉强度； T /($^{\circ}\text{C}$) 为混凝土试件试验时的温度； f_t /MPa 为常温时混凝土立方体试件抗拉强度。

从图示及公式中都可以看出，混凝土的抗拉强度随温度降低而增大，这与混凝土的抗压强度相似。但抗拉强度并非随温度的降低而线性增长，而是呈指数关系。

常温下，混凝土的抗拉强度可用抗压强度表示，低温下混凝土抗拉强度与抗压强度的关系，详见图 5。

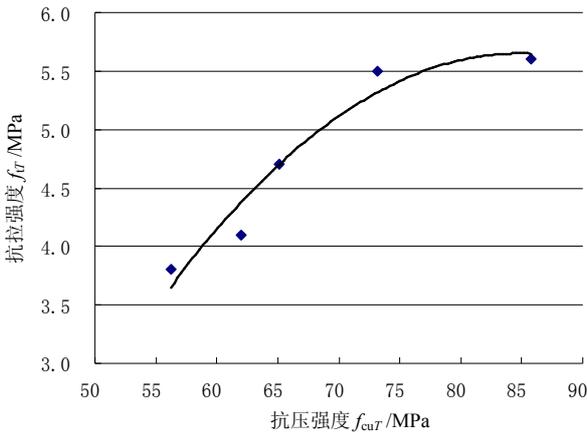


图 5 混凝土抗拉强度与抗压强度的关系

Fig.5 The relationship between concrete tensile strength and compressive strength

从图 5 中可以看出，混凝土抗拉强度与抗压强度的提高并不呈比例，可以将其拟合为以下关系：

$$f_{tT} = 5.5 - e^{3.85 - 0.06 f_{cuT}}, \quad -60^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

各字母的意义与前面各式相同。

文献[6-10]将两者的关系表述为：

$$\sigma_t = 0.38 \cdot \sigma_c^{0.75} \quad (5)$$

由于日本学者进行的劈裂试验采用试件为棱柱体(150×200)，考虑不同规格试件之间尺寸效应^[11]的换算，将本试验拟合公式与日本学者拟合公式进行对比，如表 2 所示。

表 2 本文拟合公式与日本相关学者拟合公式对比

Table 2 Data contrast table between fitting formula in this paper and the Japanese scholars fitting formula

抗压强度/MPa	56.2	62.0	65.1	73.2	85.8
σ_t /MPa	7.80	8.40	8.71	9.51	10.71
尺寸效应 k_p	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
$(k_p \times \sigma_t)$ /MPa	8.04	8.66	8.98	9.81	11.05
f_{tT} /MPa	3.89	4.36	4.55	4.92	5.23
$((k_p \times \sigma_t) - f_{tT})$ /MPa	4.16	4.30	4.43	4.89	5.82

从表 2 可以看出，日本相关学者所做试验的结论与本试验结果有较大的出入，这可能与所用混凝土

土的种类、外加剂等因素有关。同时，可以看出两者的差值之间有一定的规律，即随着温度的降低差值也在缓慢变大，但差值集中在 5MPa 左右。

因此，要使低温下混凝土的性能在我国推广，国内仍需要进行大量的试验研究以提供更多数据作为支持。

3 结论

从上面的试验结果及分析可以看出：

(1) 低温下混凝土的立方体抗压强度随着温度的降低而提高。在 $20^{\circ}\text{C} \sim -60^{\circ}\text{C}$ 的温度区间范围内，立方体抗压强度随温度变化曲线基本呈线性关系。

(2) 低温条件下不同尺寸混凝土试件立方体抗压强度之间仍然存在尺寸效应，但尺寸效应随着温度的不断降低而逐渐减弱。

(3) 混凝土棱柱体抗压强度随温度的降低而逐渐增大，在 $20^{\circ}\text{C} \sim -60^{\circ}\text{C}$ 的温度区间范围内，与温度变化基本呈线性关系。这与立方体抗压强度受温度的影响情况相类似。

(4) 低温下混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度之间依然存在一定的关系。相同低温条件下棱柱体抗压强度均小于立方体抗压强度。

(5) 混凝土的劈裂抗拉强度随着温度的降低而逐渐增大，这与国外学者的相关研究结论一致；但混凝土的抗拉强度随温度的变化曲线基本呈指数关系，这与混凝土的抗压强度不同。

(6) 低温下混凝土的抗拉强度随着抗压强度的增大而增大，但抗拉强度的提高与抗压强度的增长并不呈线性。

本试验结论与国外相关试验结果既存在相同之处，又有明显的差异，因此国内进行更多的研究非常有必要。本试验作为探索性试验，试验数据还相对较少，因此仍需大量试验进行补充和验证。

研究低温下混凝土力学性能，旨在为寒冷地区的混凝土结构设计提供更为准确的关于混凝土材料性能的数据，相关试验将继续进行。同时，随着高强混凝土的使用，越来越多的工业特种结构也使用混凝土材料，如核反应堆、油气储罐等。这些结构中的混凝土可能处于超低温状态，而超低温状态下混凝土的性能只有极少数国家做过试验，国内尚未见到相关的研究。因此，研究超低温状态下混凝土的性能是我国独立设计建造各类低温工业特种结构的基础，是完善混凝土材料性能的一部分，这

也将是后续课题要解决的问题。

参考文献:

- [1] 王元清, 武延民. 低温对结构钢材主要力学性能影响的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(1): 1-4.
Wang Yuanqing, Wu Yanmin. Experimental study on the main mechanical parameters of building steel under low temperature [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(1): 1-4. (in Chinese)
- [2] 张玉玲, 潘际炎. 低温对钢材及其构件性能影响研究综述[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 89-96.
Zhang Yuling, Pan Jiyan. Study on performance of steel and the components under low temperature [J]. China Railway Science, 2003, 24(2): 89-96. (in Chinese)
- [3] 侯文崎, 叶梅新. 青藏铁路钢-混凝土组合结构低温试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2004, 19(3): 53-57.
Hou Wenqi, Ye Meixin. Study of steel-concrete composite structures of qinghai-tibet railway under low temperature [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2004, 19(3): 53-57. (in Chinese)
- [4] 谢剑, 王传星, 李会杰. 超低温混凝土降温回温曲线的试验研究[J]. 低温建筑技术, 2009, 32(3): 1-3.
Xie Jian, Wang Chuanxing, Li Huijie. Experimental study on the curve of the temperature reduction and comeback in concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009, 32(3): 1-3. (in Chinese)
- [5] GB/T 50081-2002, 普通混凝土力学性能试验方法[S]. 2002.
GB/T 50081-2002, Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. 2002. (in Chinese)
- [6] 三浦 尚. 極低温下におけるコンクリートの特性[C]. コンクリート工学年次論文報告集, 1988, 10(1): 69-75.
Takashi Miura. Properties of concrete at extremely low temperatures [C]. Proceedings of the Japan Concrete Institute, 1988, 10(1): 69-75. (in Japanese)
- [7] 王传星, 谢剑, 杨建江. 超低温环境下混凝土的性能[J]. 低温建筑技术, 2009, 135(9): 8-10.
Wang Chuanxing, Xie Jian, Yang Jianjiang. Properties of concrete under extremely low temperature [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009, 135(9): 8-10. (in Chinese)
- [8] Krstulovic-Opara Neven. Liquefied natural gas storage: material behavior of concrete at cryogenic temperatures [J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(3): 297-306.
- [9] Takashi Miura. The properties of concrete at very low temperatures [J]. Materials and Structures, 1989, 22: 243-254.
- [10] Miura T, Lee D H. Deterioration and some properties of concrete at low temperature [C]// Canada / Japan Science and Technology Cooperative Agreement. Proceedings of Workshop on Low Temperature Effects on Concrete. Sapporo, Hokkaido, Japan, 1988: 9-24.
- [11] 周红, 车轶, 陈庚. 混凝土立方体与圆柱体劈裂抗拉强度尺寸效应研究[J]. 混凝土, 2010, 250(8): 13-15.
Zhou Hong, Che Yi, Chen Geng. Size effect on tensile splitting strength of concrete cubes and cylinders [J]. Concrete, 2010, 250(8): 13-15. (in Chinese)