

文章编号:1671-6833(2004)04-0012-04

# 冻融循环作用下混凝土的剪切强度试验研究

李平先<sup>1,2</sup>, 张雷顺<sup>1</sup>

(1. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 2. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:** 采用 Z 形试件剪切试验方法, 对混凝土试件在冻融循环作用下的剪切强度进行了试验研究, 并对混凝土冻融损伤的机理进行了初步分析. 结果表明, 在冻融循环作用下, 混凝土的相对剪切强度随冻融循环次数的增加而降低, 原因在于冻融循环引起水泥石本身和水泥石与骨料之间产生损伤, 降低了混凝土的强度.

**关键词:** 冻融循环; 混凝土; 剪切强度; 损伤

**中图分类号:** TU 528      **文献标识码:** A

## 0 引言

冻融破坏是混凝土结构在运行过程中产生的主要病害之一. 1985 年原水电部混凝土耐久性调查组对全国大中型水工混凝土建筑物的病害处理调查表明<sup>[1]</sup>: 水工混凝土的冻融破坏在东北、华北和西北地区的工程中占 100%, 有些工程已经达到了相当严重的程度. 在港口工程、铁路、桥涵、混凝土路面工程、城市立交桥工程以及北方严寒地区的工业与民用建筑等混凝土结构中, 都存在着不同程度的冻融破坏, 为此, 国家每年投入大量的资金进行维修和加固. 因此, 开展混凝土冻融损伤机理研究和力学性能研究十分必要.

目前, 国内外对混凝土在冻融循环作用下的抗压强度、抗拉强度、质量损失率以及相对动弹性模量等进行了较多的试验研究<sup>[2,3]</sup>, 但对混凝土的抗剪强度研究很少<sup>[4]</sup>. 作者采用 Z 形试件剪切试验方法对混凝土在冻融循环作用下的剪切强度进行了探索性研究, 以期对混凝土在冻融循环作用下的破坏机理和力学性能变化有一个系统了解.

## 1 试验概况

### 1.1 冻融试验

冻融试验按《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2001)<sup>[3]</sup>的方法进行, 即混凝土试件中心的温度为 $(-18 \pm 2)^\circ\text{C} \sim (5 \pm 2)^\circ\text{C}$ ; 冷冻液的温度 $-25 \sim -15^\circ\text{C}$ , 由棱柱体试件中心的温度探头和冷冻液中的温度探头通过控制柜控制温度的变化; 一个冻融循环时间为 3.0 h 左右. 试件在冻融试验过程中始终处于水饱和状态; 冻融试验采用质量损失率和相对动弹性模量的下降进行衡量. 试验在国产 TDR 型混凝土自动快速冻融试验设备上, 试件尺寸为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  和  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ , 前者用于测试相对动弹性模量和质量损失, 后者用于测试混凝土的强度.

### 1.2 混凝土的材料及配合比

混凝土均采用 32.5 普通硅酸盐水泥、中粗河砂(细度模数 2.93)、碎石( $5 \sim 20\text{ mm}$ ) 配制而成. 强度设计等级为 C25, 配合比见表 1.

表 1 混凝土配合比  
Tab. 1 Mx proportion of concrete

强度等级	坍落度/cm	水灰比	砂率 $S_p/\%$	混凝土材料用量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )			
				水泥	砂	石子	水
C25	3~5	0.54	36	361	664	1 180	195

收稿日期:2004-06-05; 修订日期:2004-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59778045); 郑州大学青年骨干教师资助计划项目

作者简介: 李平先(1962-), 男, 河南省巩义市人, 郑州大学副教授, 大连理工大学博士研究生, 主要从事混凝土结构基本理论及加固技术研究.

1.3 试件设计与试验

为使试件受力与实际情况相符,并使试件的制作方便、加载简单,采用了如图1所示的Z形试件,处在两缺口之间的混凝土在两端均匀压力作用下处于剪切状态。

1.3.1 试件尺寸

Z形试件的尺寸如图1所示。其中中间虚线部分为100 mm×100 mm×100 mm的经过冻融的混凝土立方体试件。

1.3.2 剪切试件成型

按图1所示Z形试件的形状和大小制作了Z形钢质试模。将100 mm×100 mm×100 mm的混凝土立方体试块和100 mm×100 mm×400 mm的混凝土棱柱体试件放入水中浸泡4 d以上,取出后擦去棱柱体试件表面的明水,称其初始质量,并量测初始横向自振频率;将上述试件装入试件盒中,注入自来水,使试件淹没于水中。然后放入冻融试验机中试验,达到规定冻融循环次数后,取出并再次量测棱柱体试件的质量和横向自振频率,并计算质量损失率和相对动弹性模量的下降;将冻融后的混凝土立方体试件放入Z形钢质试模中,

浇筑混凝土使其成为Z形剪切试件,经48 h后拆模,洒水养护28 d。

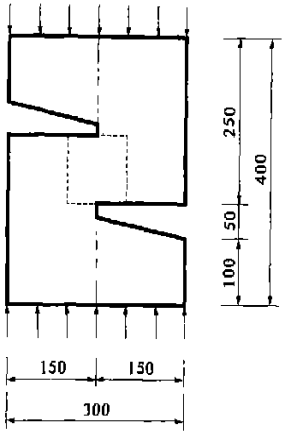


图1 剪切试件

Fig. 1 Shear specimen

1.3.3 试验结果

用100 mm×100 mm×100 mm立方体试件直接测试抗压强度和劈裂抗拉强度;用Z形试件测试剪切强度。全部试件的强度试验均在WE-300型万能试验机上进行,试验结果见表2。

表2 冻融循环作用下混凝土的性能

Tab. 2 Properties of concrete exposed to freezing and thawing

冻融循环次数 $n$	相对动弹性模量/ $\%$	质量损失率/ $\%$	$f_{cu}/f_{cu}^n$	$f_{ts}/f_{ts}^n$	剪切强度 $\tau$ /MPa	$\frac{\tau}{f_{ts}}$	$\frac{\tau}{f_{cu}}/\%$
0	100	0	43.71/—	3.84/—	6.36	1.656	14.55
25	88.4	-1.793	42.13/35.17	3.99/2.93	5.69	1.426	13.51
50	83.3	0.333	41.63/33.67	3.58/2.68	5.46	1.525	13.12
75	73.4	0.933	41.63/29.53	3.58/2.48	4.45	1.243	10.69
100	57.0	1.728	41.83/28.83	4.09/2.69	5.77	1.411	13.79
125	60.3	1.967	46.67/28.90	4.56/2.22	5.87	1.287	12.58

说明 $f_{cu}$ 、 $f_{ts}$ 分别为混凝土未经受冻融的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度; $f_{cu}^n$ 、 $f_{ts}^n$ 、 $\tau$ 为经受 $n$ 次冻融的混凝土立方体抗压强度、抗拉强度和剪切强度,其值均为100 mm×100 mm×100 mm试件直接测试结果。

混凝土的剪切强度按下式计算:

$$\tau = \frac{P}{A} \tag{1}$$

式中: $\tau$ 为混凝土的剪切强度; $P$ 为破坏荷载; $A$ 为剪切面面积。

从试验结果可以看出,在冻融循环作用下,混凝土的粘结剪切强度明显低于混凝土未经受冻融时的相应剪切强度。

2.3 新老混凝土冻融损伤机理

在拌和混凝土时,为了保证混凝土拌和物的和易性,往往加入的拌和水大于水泥水化所需要的水量,在混凝土硬化过程中,这部分多余的水滞留于混凝土中形成连通的毛细孔;另外,还有一部

2 试验结果与分析

2.1 破坏现象

破坏均发生在剪切面,而且破坏前没有任何预兆,属于脆性破坏。

2.2 剪切强度计算

混凝土的抗冻性不仅与混凝土的强度有关,而且主要取决于混凝土内部毛细孔的结构和性质。从表2可以看出,由于混凝土强度的差异,使得冻融后的相对动弹性模量和强度的下降存在较大差异,总体上来说,混凝土的抗压强度和抗拉强度随冻融循环次数的增加而下降。

分水泥水化后形成的凝胶孔、振捣不密实的气孔和引气孔等,这些气孔中往往多混有空气.通常在非饱水状态下,当毛细孔中的水结冰膨胀时,含有气体的孔能起到缓冲作用;但混凝土在饱水状态下,毛细孔中的水结冰体积膨胀,当膨胀体积大于所容许的空间时,空隙中多余的水被膨胀压力排出,形成冰胀压;又由于凝胶孔中过冷状态水分的蒸汽压高于同温度下冰的蒸汽压而向毛细孔中冰的界面处渗透,因而导致毛细孔中的冰体积进一步膨胀,形成渗透压;当毛细孔壁在冰胀压和渗透压共同作用下产生的拉应力超过水泥石的抗拉强度或骨料—水泥石接触面的粘结强度时,就会出现微裂缝,从而降低了混凝土的力学性能.

微观分析表明<sup>[4~9]</sup>,冻融循环将导致混凝土水化产物的结构由密实状态到疏松状态的转变,并随冻融循环次数的增加,在水泥石和骨料—水泥石接触面伴有微裂缝的产生和微裂缝的发展;并最终导致骨料与水泥石逐渐分离,形成豆腐渣状的破坏.

### 2.4 试验结果分析

#### 2.4.1 相对动弹性模量与质量损失率的变化

从试验结果来看,在冻融循环作用下,当混凝土强度一定时,其相对动弹性模量随冻融循环次数的增加而下降;而质量损失率在冻融循环次数较少时,随冻融循环次数的增加而增加,在某一冻融循环次数以后,随冻融循环次数的增加而下降.从冻融损伤机理来看,一方面冻融损伤会造成混凝土表面水泥石脱落,引起混凝土质量损失;另一方面,冻融循环引起混凝土水泥石与骨料之间出现微裂缝,使混凝土的吸水率增加,从而引起质量增加,这两方面的作用相互抵消.试验结果表明,在循环次数  $n < 25$  时,质量损失率出现负增长;当  $n > 25$  时,质量损失率随冻融循环次数的增加而增加.

#### 2.4.2 剪切强度的变化

受冻融损伤混凝土的剪切强度不但与混凝土的强度有关,而且与混凝土的损伤程度、穿越剪切面粗骨料的多寡以及分布状态等有关.

图 2 为混凝土的相对剪切强度随冻融循环次数的变化图,从中可以看出,在冻融循环作用下,混凝土的相对剪切强度随冻融循环次数的增加而降低,其原因在于冻融循环造成水泥石本身和水

泥石与骨料之间产生裂缝,降低了混凝土强度的缘故.

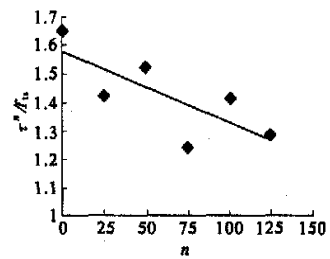


图 2 混凝土相对剪切强度与冻融次数  $n$  的关系

Fig. 2 Relationship between relative shear strength of concrete and freezing cycles

### 3 结束语

混凝土是以水泥为胶凝材料并拌和一定比例的砂石骨料和水,经过搅拌、浇筑、振捣、养护后,形成硬化的人工合成材料,其力学性能受各种组成材料化学成分、性能的影响,同时受制作工艺条件、环境和时间等因素的影响,变化幅度较大.在冻融循环作用下,混凝土骨料与水泥石由于热工性能差异,造成水泥石本身以及骨料与水泥浆体结合面产生损伤,并随冻融循环次数的增加而积累,逐渐产生微裂缝,以及微裂缝的发展,导致混凝土性能的劣化不断加剧.从试验结果来看,混凝土在冻融循环作用下的相对剪切强度随冻融循环次数的增加而下降,下降程度取决于混凝土本身的性能和受冻融损伤的程度,定量分析有待于大量试验研究.

### 参考文献:

- [1] 水电部混凝土耐久性调查组.全国水工混凝土建筑物耐久性病害处理调查报告[R].北京:中华人民共和国水电部,1987.
- [2] POWERS T C. Freezing effect in Concrete[J]. Durability of Concrete, 1975, (2): 47~10.
- [3] 蔡昊,覃维祖,刘西拉.冻融循环作用下混凝土力学性能的损失[J].工程力学,1996,(增刊):29~33.
- [4] 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.
- [5] DL/T 5150—2001,水工混凝土试验规程[S].
- [6] 李金玉,曹建国,徐文雨,等.混凝土冻融破坏机理的研究[J].水利学报,1999,(1):41~49.

Experimental Research on Shear Strength of Concrete  
Subjected to Freezing and Thawing

LI Ping-xian<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei-shun<sup>1</sup>

( 1.College of Environmental & Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002,China; 2.School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024,China)

**Abstract :** With Z-shape direct shear specimen, the shear strength of concrete subjected to freezing and thawing is discussed. And the mechanics of freezing and thawing deterioration is also analyzed. The results indicate that the relative shear strength decreases with the numbers of freezing cycles. The main reason is that cement paste itself and the interface between aggregate and cement paste deteriorate, which leads to the decrease of the concrete strength.

**Key words :** freezing and thawing; concrete; shear strength; deterioration

( 上接第 11 页)

Research on Viscoelastic Parameters of Bituminous  
Mixtures and Their Applications

ZHENG Jian-long, LU Song-tao, TIAN Xiao-ge

(College of Highway Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

**Abstract :** Bituminous mixture is a sort of viscoelastic material. It is important to ascertain the viscoelastic parameters in the constitutive relation and fatigue equation. In this paper, the theory of viscoelastic mechanics is employed for the analysis of how to test viscoelastic parameters of bituminous mixture with the test of stress relaxation. The mathematical model is given, which is calculated through using Origin software. It was reported that using accumulative dissipated energy can analyze the fatigue damage of bituminous mixture. There is an exclusive relation between accumulative dissipated energy and fatigue life, but other factors such as test methods, loading frequency, loading modes and temperature have nothing to do with it. Finally, the method to calculate the accumulative dissipated energy is illuminated concisely.

**Key words :** stress relaxation test; bituminous mixture; viscoelasticity; General Maxwell model; accumulative dissipated energy