

文章编号:0559-9350(2009)12-1495-05

钢筋与混凝土黏结性能冻融破坏的力学分析

冀晓东¹, 宋玉普²

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100085; 2. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:静水压假说认为,混凝土遭受冻融作用发生破坏是由于混凝土内部孔结构遭受静水压力的反复作用造成的。建立了在钢筋混凝土构件遭受冻融破坏循环作用时,钢筋与混凝土的界面上产生的静水压力计算模型,并计算得到了静水压力的最大值。力学模型计算表明,冻融循环作用产生的静水压力破坏了钢筋与混凝土的胶结性能;冻融作用后光圆钢筋与混凝土的拔出试验结果证实,冻融循环作用严重削弱了钢筋与混凝土的胶结强度,验证了静水压力对钢筋与混凝土界面胶结性能的破坏作用。

关键词:光圆钢筋;混凝土;黏结性能;冻融循环;静水压力

中图分类号:TU375

文献标识码:A

1 研究背景

从细观结构的角度讲,混凝土本身是不密实、不连续的,在混凝土胶体内、水泥凝胶与骨料之间的界面上分布着大量的小孔隙。这些孔隙包括:(1)水泥水化收缩形成的凝胶孔,凝胶孔的体积占到凝胶总体积的 28%,孔径 15~100 μm ,尺寸很小,其中的水分子在-78 $^{\circ}\text{C}$ 以上都不结冰;(2)未被水化水泥固体组分所填充的空间形成的毛细孔,其占到混凝土体积的 15%左右,孔径一般在 0.01~10 μm ,体积含量是各类孔最高的,在负温下孔内水可冻结,是导致混凝土冻害的主要内在因素;(3)非毛细孔,包括气孔、内泌水孔隙、微裂和内部缺陷等,体积很小,不超过混凝土体积的 5%,孔径在 25~500 μm ,气孔一般为封闭的球状,不易充满水,遭受冻融时起到缓冲卸压的作用,对抗冻有利。

在潮湿的环境中,这些毛细孔孔隙会充满溶液。冻融作用中混凝土内部孔溶液冻结引起的内应力直接作用于混凝土孔结构,导致混凝土内部产生不可逆的微裂纹损伤,冻融循环作用下,内应力反复作用于混凝土,混凝土内的微裂纹损伤不断扩展、累积,是混凝土冻融破坏的主要原因^[1-2],在钢筋与混凝土的界面上孔结构的内应力的作用也是钢筋与混凝土黏结发生破坏的直接原因之一。

混凝土内部孔结构的复杂性决定了混凝土冻融破坏机理的复杂性。解释混凝土冻融破坏的学说主要有静水压力和渗透压力两种,综合这两种学说即可较为成功地解释了混凝土的破坏机理。对于静水压力和渗透压力何为混凝土冻融破坏的主要因素,很多学者有不同见解,静水压力提出者 Powers 本人后来偏向渗透压力学说^[3],而 Fagerlund^[4]、Pigeon^[5]等人的研究结果却从不同侧面支持了静水压力学说。我国学者唐明述^[6]对渗透压力学说提出了质疑,李天媛则从理论计算和试验现象说明静水压力是混凝土冻融破坏的主要因素^[7]。笔者认为混凝土孔溶液冻结产生的内应力以静水压力为主,静水压力是导致混凝土冻融破坏的主要原因,故以静水压力学说作为理论依据,在此基础上研究由孔溶液结冰产生的内应力对钢筋与混凝土界面胶着力的破坏作用。

收稿日期:2008-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50679007)

作者简介:冀晓东(1978—),男,河南人,讲师,博士,主要从事钢筋混凝土耐久性能研究。E-mail:jixiaodong2008@yahoo.com.cn

2 模型建立

如前所述,混凝土内部、钢筋与混凝土的界面层分布着大量的对混凝土有害的毛细孔,钢筋与混凝土界面层的毛细孔对钢筋与混凝土的胶着力是有害的,重点研究这部分毛细孔内产生的内应力。本文对光圆钢筋与混凝土的界面进行简化,如图1所示,假定与钢筋接触的界面层混凝土的基本单元由毛细孔和孔周围厚度为平均气孔间隔系数 \bar{L} 的水泥浆体组成,冰冻发生时,浆体中的未冻孔溶液就近向气孔迁移,缓解由冰冻产生的静水压力。

本文的力学模型取为:一个直径为 R 的半圆混凝土孔洞与钢筋组成毛细孔,而在沿钢筋左右方向 $L=\bar{L}$ 范围中的混凝土与钢筋是完全胶结的(没有毛细孔和非毛细孔)。混凝土在融化过程中产生的静水压力不会致使混凝土内部破坏,假定混凝土处于自然饱水状态及冻结过程中,并假定混凝土骨料是抗冻的。

如图1所示,在混凝土受冻时,混凝土内部温度降低,毛细孔隙内水温度也随之降低凝结。水凝结成冰体积膨胀,产生水压力。根据 Powers 的静水压力理论^[2],应用达西定律计算因未冻孔溶液迁移而产生的静水压,可表示为

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\eta}{k} \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

式中: p 为静水压力(N/m^2); v 为孔溶液流速(m^3/m^2); k 为孔溶液在水泥浆体中的渗透系数; x 为孔溶液沿渗透方向的坐标; η 为孔溶液的动力黏滞系数。

孔溶液通过半径为 x 的半个单位球面的流量 $d\vartheta dt$ 为半个单位球面内溶液由于结冰造成的体积增量

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0.03}{2} \frac{dw_f}{dt} \left[\frac{(\bar{L}+r)^3}{x^2} - x \right] = \frac{0.03}{2} \frac{dw_f}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \left[\frac{(\bar{L}+r)^3}{x^2} - x \right] \quad (2)$$

式中: $\frac{dv}{dt}$ 为单位时间内的结冰量($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); $\frac{dw_f}{d\theta}$ 为结冰速度,即温度每降低 1°C 冻结水的增量($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$); $\frac{d\theta}{dt}$ 为降温速度($^\circ\text{C}/\text{s}$); r 为毛细孔半径(μm); θ 为温度($^\circ\text{C}$)。

将式(2)代入式(1),积分可得距毛细孔中心 x 的静水压力计算式:

$$\begin{aligned} p &= 0.015 \frac{\eta}{k} \frac{dw_f}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \int_r^x \left[\frac{(\bar{L}+r)^3}{x^2} - x \right] dx \\ &= 0.015 \frac{\eta}{k} \frac{dw_f}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \left[\frac{(\bar{L}+r)^3}{r} + \frac{r^2}{2} - \frac{(\bar{L}+r)^3}{x} - \frac{x^2}{2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

当 $x=\bar{L}+r$ 时,即在距离毛细孔最远处,静水压力达到最大值;当 $x=r$ 时,即在气孔边缘,静水压力为0。

以文献[9]试验所用混凝土,分别计算或者查出式(3)对应的各种混凝土的系数。其配合比见表1^[9]。

表1 文献[9]试验用混凝土配合比

水胶比	水泥/kg	粉煤灰/kg	砂子/kg	石子/kg
0.5	238	102	688.94	1085.5

(1)水泥浆体内的平均气孔半径 r 和平均气孔间隔系数 \bar{L} : $r=133\mu\text{m}$, $\bar{L}=761\mu\text{m}$ 。

(2)孔溶液的动力黏滞系数用水的动力黏滞系数近似代替,水的动力黏滞系数 η 随着温度的降低而增大,在 $0\sim-15^\circ\text{C}$ 下的值如表2所示^[2],其中部分数据为内插或外推得出。

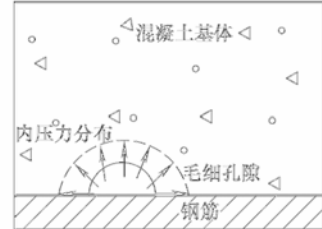


图1 钢筋与混凝土界面上的静水压力力学模型

表2 负温下水的动力黏滞系数

θ / °C	0	-5	-10	-15	-17
$\eta \times 10^{-5}$ / (Pa·s)	1.798	2.147	2.614	3.200	3.521

(3)混凝土水泥浆体的渗透系数与混凝土的水灰比或毛细孔隙率密切相关, Powers 曾给出水泥渗透系数与水泥石毛细孔隙率的经验公式^[10]:

$$k = 3550 \varepsilon^{3.6} \times 10^{-21} \quad \varepsilon \in [0.1, 0.35] \quad (4)$$

式中: k 为水泥石的渗透系数; ε 为水泥石的毛细孔隙率。

本文采用式(4)计算混凝土内水泥浆体的渗透系数。水泥浆体的孔隙率为水泥浆中的毛细孔体积与水泥浆体体积之比。文献[9]试验用混凝土浆体占混凝土体积的 23.78%, 用烘干法测得毛细孔溶液占混凝土体积的 6.252%, 则浆体的毛细孔隙率 ε 为

$$\varepsilon = \frac{0.06252}{0.23780} \times 100\% = 26.29\% \quad (5)$$

则由式(4)得到孔溶液未结冰时水泥浆体的渗透系数

$$k = 3550 \times 0.2629^{3.6} \times 10^{-21} = 28.938 \times 10^{-21} \text{ (m}^2 \text{ s)} \quad (6)$$

文献[2]的研究显示, 混凝土在-5°C时内部孔溶液有 13.33%, 且混凝土的渗透系数随着温度降低而缓慢降低。则混凝土的渗透系数在-5°C时为原混凝土的 86.67%, 渗透系数为

$$k = 0.8667^{3.6} \times 28.938 \times 10^{-21} = 17.29 \times 10^{-21} \text{ (m}^2 \text{ s)} \quad (7)$$

(4)按照 Powers 的静水压理论, 结冰速率越高, 由结冰引起的混凝土内部的静水压力就越大。文献[2]的研究表明, 0~-5°C之间混凝土的结冰速率最快, 因此研究混凝土内部最大静水压力, 只需研究这个区间即可。

如前所述, 混凝土内部温度从 0°C 降到 -5°C 的过程中, 有 13.33% 的内部孔溶液结冰, 孔溶液在浆体中的体积比为 23.78%, 所以单位浆体体积中孔溶液的结冰速率为

$$\frac{dw_f}{d\theta} = \frac{0.1333 \times 0.2378}{5} = 6.34 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} \quad (8)$$

(5)根据文献[2], 可以近似得出本文混凝土 0~-5°C 温度区间的降温速率为:

$$\frac{d\theta}{dt} = 4.79 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C s} \quad (9)$$

通过计算和近似推算得到以上参数后, 即可计算混凝土在冻结过程中所遭受的静水压力的大小。0~-5°C之间混凝土遭受的静水压力最大, 根据式(5)可得出: $p = 0.015 \frac{2.147}{17.29 \times 10^{-21}} \times 1.97 \times 10^{-3} \times 4.79 \times 10^{-3} \left[\frac{(761 + 133)^3 \times 10^{18}}{133 \times 10^{-6}} + \frac{(133 \times 10^{-6})^2}{2} - 1 - \frac{(761 + 133)^2}{2} \right] = 0.217 \text{ MPa}$, 则钢筋与混凝土黏结试件遭受冻融作用时钢筋与混凝土界面上所遭受的最大的静水压力为: $p_{\max} = 0.217 \text{ MPa}$ 。

3 冻融循环作用对钢筋混凝土胶着力的破坏分析

当钢板与混凝土黏结在一起共同工作时, 钢板与混凝土界面的胶着力可分为正向胶着力 τ' 和切向胶着力 τ , 如图 2 所示^[11]。在荷载 P' 的作用下, 在钢板与混凝土界面之间产生正向胶着力, 而在荷载 P 的作用下, 在钢板和混凝土界面之间产生切向胶着力。且

$$\tau' = \frac{P'}{A}; \tau = \frac{P}{A} \quad (10)$$

式中: A 为钢板与混凝土之间的胶着面积。

钢筋混凝土在遭受冻融循环作用时, 冻结过程中产生的静水压力在钢

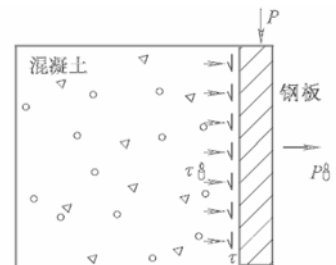


图2 钢与混凝土的正向胶着力与切向胶着力^[11]

筋与混凝土界面上产生垂直于界面的压力,则抵抗这个压力的是钢筋与混凝土界面之间的正向胶着力。文献[11]给出了钢筋与混凝土的胶结剪切强度,无锈状态的胶结剪切强度为 0.435MPa 。前人的研究认为^[11-12],钢筋与混凝土的胶结剪切强度要远大于正拉胶结强度,取为胶结剪切强度的 50% ,则其推算的正拉胶结强度为 0.2175MPa ,与计算得到的静水压力接近,应该说钢筋与混凝土的正拉胶结强度要小于 0.2175MPa ,冻融循环的作用将严重破坏钢筋与混凝土界面的正向胶着力。因此,钢筋与混凝土黏结试件在遭受冻融循环作用后,钢筋与混凝土的胶着作用将遭到严重破坏。

4 冻融循环作用对钢筋混凝土胶着力破坏的试验验证

文献[9]的试验也证明了冻融循环作用对钢筋与混凝土胶着作用严重的破坏作用。文献[9]采用表1的混凝土,试验研究了冻融循环作用0、15、30和50次后与 $\phi 20$ 的光圆钢筋的黏结性能,得到的试验结果如图3。

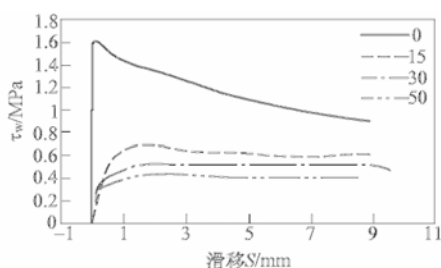


图3 光圆钢筋 $\tau-S$ 曲线

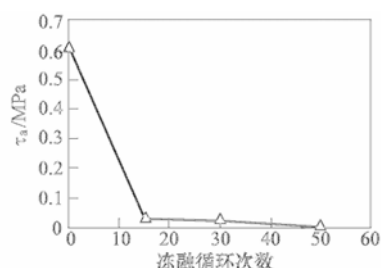


图4 光圆钢筋冻融后的脱胶强度

在光圆钢筋开始发生滑移时的黏结应力即为光圆钢筋与混凝土胶着力(物理黏附力)的最大值(脱胶强度)。从图3中可以得到,光圆钢筋在遭受0、15、30和50次冻融循环作用后的脱胶强度如图4所示。

在拔出试验研究光圆钢筋与混凝土的黏结性能时,光圆钢筋开始发生相对滑动前,光圆钢筋与混凝土的黏结作用主要为钢筋与混凝土的胶着作用^[13]。从图3、图4可以看出,光圆钢筋在没有遭受冻融循环作用时,在钢筋发生相对滑动前, $\tau-S$ 曲线有个很长的直线段,黏结应力值较大,也即脱胶强度较大;在遭受冻融循环作用后,脱胶强度遭到了严重削弱,损失了近 95% 。因此,冻融循环作用严重破坏了光圆钢筋与混凝土的胶着作用,可以从该试验得到印证。

5 结语

本文建立了冻融循环作用条件下,钢筋与混凝土界面静水压力模型,通过理论推导计算得到了钢筋混凝土受冻时,在钢筋与混凝土界面产生的静水压力的最大值。通过分析可知,钢筋混凝土在受冻时在其界面上产生的静水压力最大值几乎超过了钢筋与混凝土的正向胶结作用。因此,钢筋混凝土受到冻融循环作用后,其界面上的胶着力将遭到严重破坏;冻融后光圆钢筋与混凝土的黏结性能试验也表明,冻融循环作用大大削弱了钢筋与混凝土的胶结强度。

参 考 文 献:

- [1] 宋玉普,冀晓东.混凝土冻融损伤可靠度分析及剩余寿命预测[J].水利学报,2006,37(3):259—263.
- [2] 蔡昊.混凝土抗冻耐久性预测模型[D].北京:清华大学,1998.
- [3] Powers T C, Helmuth R A. Theory of volume change in hardened portland cement paste during freezing[J]. Highway Research Board,1953,32:285—297.
- [4] Fagerlund G. The significance of critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials[C]? Durability of

- Concrete. Detroit; American concrete institute, 1975; 13—65.
- [5] Pigeon M, Lachance M. Critical air void spacing factors for concretes submitted to slow freeze-thaw cycle[J]. ACI Journal, 1981, 78(4): 282—291.
- [6] 唐明述. 混凝土的抗冻性[R]. 南京: 南京化工学院硅酸盐研究室, 1984.
- [7] 李天媛. 试论混凝土冻害机理[J]. 混凝土与水泥制品, 1989(5): 8—11.
- [8] Powers T C. The air requirement of frost-resistance concrete. Proceedings[J]. Highway Research Board, 1949, 29: 184—202.
- [9] 冀晓东, 宋玉普. 冻融循环作用后钢筋与混凝土粘结性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(2): 240—245.
- [10] Powers T C. Structure and physical properties of hardened portland cement paste[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1958, 41(6): 1—6.
- [11] 徐有邻. 变形钢筋—混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京, 清华大学, 1990.
- [12] Park R, Paulay T. Reinforced Concrete Structures[M]. Canada, John Wiley & Sons, Inc., 1975; 392—425.
- [13] 吕西林, 金国芳, 等. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996; 21—26.

Mechanic analysis on the failure of bond behavior between concrete and steel bar when suffered from frost injury

JI Xiao-dong¹, SONG Yu-pu²

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the theory of static hydraulic pressure, the major reason of concrete frost injury is that the fatigue action of hydraulic pressure on the capillary structure. A model is established to calculate hydraulic pressure on the contact surface between concrete and steel bar. The maximum hydraulic pressure is obtained through the model. The computed results show that the bond action between concrete and steel bar are weakened seriously by freezing and thawing; and the bond behavior experimented results of plain bar show the bond strength decreased after freeze-thaw injury.

Key words: Plain steel bar; concrete; bond behavior; freezing and thawing; hydraulic pressure

(责任编辑: 王冰伟)