

冻融循环后的型钢混凝土黏结滑移性能研究

姚志成, 李俊华*, 张幸锵, 王 峥

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 冻融后型钢与混凝土间的黏结滑移对型钢混凝土结构在冻融环境下的受力性能具有重要影响, 为了研究冻融循环后型钢混凝土的黏结强度与滑移特性, 对9个常温及冻融后的型钢混凝土短柱试件进行推出试验. 结果表明: 冻融循环作用后, 型钢混凝土各特征黏结承载力与特征黏结强度下降, 而保护层厚度增加, 使试件端部与柱身裂缝减少, 试件的承载力提高. 同时冻融前后的型钢混凝土荷载—滑移曲线与黏结—滑移曲线具有大致相同的形状, 并在总结规律的基础上构建了冻融型钢混凝土的黏结—滑移本构模型. 结合本次试验数据与以往常温及冻融后的型钢混凝土有关试验数据, 回归得到冻融型钢混凝土的各黏结强度特征值与相应滑移计算方法, 计算结果与试验数据符合性较好.

关键词: 型钢混凝土; 冻融循环; 推出试验; 黏结—滑移本构模型

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 01-0049-08

型钢混凝土结构以其性能的优越性在工程建设中日益得到广泛应用. 作为一种混凝土组合结构, 型钢与混凝土间的黏结作用是两种不同材料能够发挥各自优势, 共同承载受力的基本前提^[1]. 良好的黏结性能将保证型钢混凝土构件在承载时, 不因型钢与混凝土间的相对滑移而影响其受力性能. 然而在我国广大三北(东北、华北、西北)地区及常年冻土地区, 由于所处地区环境温度较低, 混凝土构造物表面与其孔隙中的水分会冻结, 而当温度升高时水分又将融化; 随着温度不断循环变化, 冻结与融化也将循环产生, 这就对混凝土结构产生冻融循环作用^[2]. 冻融循环作用使结构在正常使用过程中产生冻融损伤, 甚至造成冻融破坏, 这是混凝土结构主要破坏形式之一^[3]. 冻融循环作用在造成混凝土力学性能损伤的同时, 也将造成型钢混凝土黏结强度降低, 使型钢混凝土结构黏结性能产生不可逆退化, 影响结构的长期安全使用.

目前有关冻融循环作用后钢筋混凝土黏结滑移性能的研究已获较多成果, 取得较大进展^[4-9].

研究结果表明, 冻融循环会造成钢筋与混凝土黏结强度的下降, 影响钢筋混凝土的黏结滑移性能. 其中 Hanjari 等^[6]通过试验研究发现, 当冻融作用对混凝土抗压强度减低 25%与 50%时, 钢筋与混凝土的黏结强度分别下降 14%与 50%, 还同时引起钢筋混凝土受力性能的下降. Xu等^[7]考虑混凝土强度等级与冻融循环次数, 对冻融后的变形钢筋混凝土进行单调和反向循环加载试验, 结果表明冻融后钢筋混凝土初始黏结刚度降低, 并随冻融循环次数增加, 降低速率增加. 但关于冻融循环后型钢混凝土黏结滑移性能的研究还处于起步阶段. 虽然目前相关研究较少, 但可以预见冻融循环作用后的型钢混凝土黏结滑移性能的有关研究成果会有广泛应用前景.

本文对冻融后的型钢混凝土短柱进行推出试验, 研究冻融后型钢混凝土的黏结滑移性能, 并建立相应黏结强度与滑移量计算公式. 这对完善现有型钢混凝土黏结滑移性能的研究及提高寒冷地区型钢混凝土构件的耐久性都具有重要意义.

收稿日期: 2022-05-04.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51978344).

第一作者: 姚志成(1995-), 男, 江西鹰潭人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 组合结构. E-mail: 897106037@qq.com

*通信作者: 李俊华(1977-), 男, 湖南安仁人, 教授, 主要研究方向: 组合结构. E-mail: lijunhua@nbu.edu.cn

1 试验方案

1.1 试验参数设计

本次试验共设计 9 个型钢混凝土短柱试件，对其中 5 个试件进行冻融循环试验，待冻融循环次数达到设计值时，再对其进行推出试验，余下 4 个则进行常温下的推出试验。试验主要考虑冻融循环作用次数 N 、型钢锚固长度 l_e 、型钢的保护层厚度 C_{ss} 与体积配箍率 ρ_{sv} 对冻融后型钢混凝土黏结滑移性能的影响，试件参数设计情况详见表 1。

表 1 试件参数设计情况表

试件编号	l_e/mm	$N/\text{次}$	C_{ss}/mm	$\rho_{sv}/\%$
SRC-01	380	0	60	0.8
SRC-02	380	0	90	0.8
SRC-03	380	0	120	0.8
SRC-04	380	100	60	0.8
SRC-05	380	100	90	0.8
SRC-06	380	100	120	0.8
SRC-07	560	0	600	1.6
SRC-08	560	100	60	0.8
SRC-09	560	100	90	0.8

1.2 试件形状与材料属性

试件采用强度等级 C35 的商品混凝土进行浇筑；纵向钢筋采用直径 12 mm 的 HRB335 级螺纹钢；箍筋采用直径为 6 mm 的 HPB300 级光圆钢筋；在试件核心区布置 Q235 热轧 H 型钢，型钢规格采用 HW100×100×6×8。型钢顶面高出混凝土 100 mm，下部伸出混凝土 100 mm。试件钢筋保护层厚度为 30 mm，型钢保护层厚度根据表 1 选取。按不同型钢保护层厚度将试件截面尺寸分为 220 mm×220

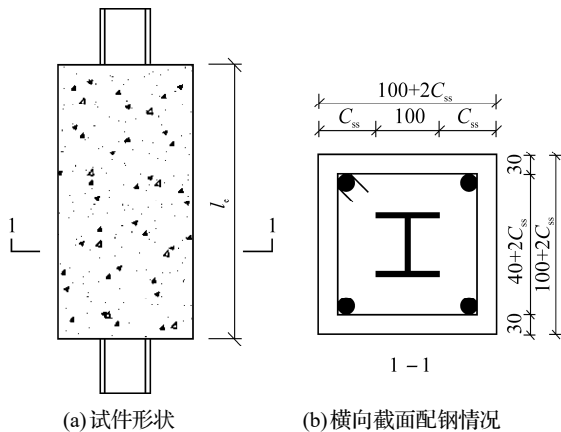


图 1 试件形状与截面配钢情况(单位: mm)

mm、280 mm×280 mm、340 mm×340 mm。试件形状和截面配钢情况如图 1 所示。

钢材的拉伸试验按照《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》(GB/T 228.1-2010)进行操作，并保证所有标准拉伸试件均为同批次生产的钢材。钢材的力学性能见表 2。

表 2 钢材力学性能

钢材种类	直径或厚度/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
型钢(翼缘)	8	309	435
型钢(腹板)	6	320	447
纵筋	12	428	547
箍筋	6	393	474

混凝土试块为边长 150 mm 立方体试块，共同浇筑。对常温及冻融后的混凝土试块进行抗压强度测定，测定根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)在电液式压力试验机上进行。通过压力测试最终测得常温及不同冻融循环次数下的混凝土试块抗压强度(表 3)。

表 3 混凝土抗压强度实测值

试块编号	$N/\text{次}$	极限荷载/ kN	立方体抗压 强度/MPa
Block-1	0	938.3	41.7
Block-2	25	795.8	38.7
Block-3	50	826.2	33.5
Block-4	100	649.6	27.8

1.3 冻融循环试验方案

冻融循环试验装置采用浙江路达机械仪器有限公司生产的 CABR-HDK9 型快速冻融装置。试验前，根据试件尺寸自行打造 2 个钢试验盒，其功能一是用以将试件与防冻液进行阻隔，二是可以让试件充分浸泡在钢试验盒内的清水之中。由于有关型钢混凝土试件的冻融试验目前并无相关规范，因此本试验参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)进行型钢混凝土的冻融操作。

1.4 试验加载与量测方案

单调推出试验在四柱压力试验机上进行，加载装置及方案如图 2 所示。加载时，仪器上端为固定传力板，下端为主动传力板。固定传力板起固定

试件作用, 对应试件自由端, 主动传力板起加载作用, 对应试件加载端, 荷载传递方向由下至上。

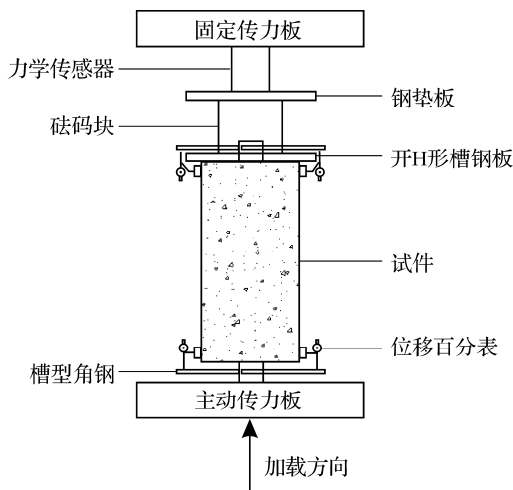
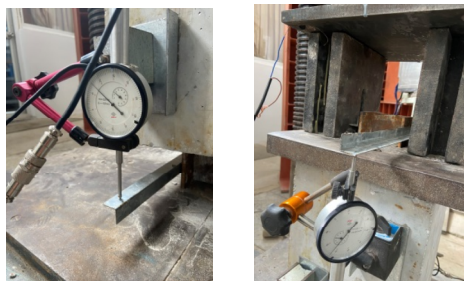


图2 试验加载装置及方案

试验荷载测量采用力学传感器, 滑移测量采用位移百分表。为测量型钢与混凝土的相对滑移, 将磁力底座吸附在试件表面粘贴的角钢上, 位移百分表的顶针指向粘贴在端部伸出型钢的角钢上, 具体测试方式如图3所示。



(a)下部滑移测量 (b)上部滑移测量

图3 相对滑移的测量

2 试验结果与分析

2.1 冻融试验现象

冻融循环结束后, 将试件从冻融盒内抬出, 观察构件表面情况(图4)。观测看到, 随着冻融循环次数的增加, 试件混凝土表面经历了表面砂浆剥落、细骨料掉落和粗骨料露出三个阶段。冻融循环作用使试件表面由平整光滑状态变为粗糙的麻面状态, 试件表层混凝土受到侵蚀, 受损现象与混凝土试块遭受冻融循环作用后的情况类似。造成这种现象的原因是混凝土是一种各向异性材料, 自然状态下表面及内部分布许多大小不同的孔隙,

在含水率达到一定程度时, 孔隙中的水因冻结体积膨胀, 对孔壁产生作用力, 当作用力达到一定程度时, 孔隙破裂, 表面砂浆及细小颗粒因此产生剥落, 并随着冻融程度的增加剥落加剧。



(a)冻融0次 (b)冻融25次 (c)冻融50次 (d)冻融100次

图4 冻融后型钢混凝土试件表面情况

2.2 推出试验破坏形态

推出试验最终都以型钢从混凝土中被推出而结束, 根据保护层厚度的不同存在两种破坏形态。当型钢保护层厚度为60 mm时, 试件端部产生劈裂裂缝, 4条从型钢翼缘端部向柱角延伸, 并最终到达柱角, 2条从型钢翼缘中部产生, 并最终到达边角; 在极限荷载的60%左右时, 试件在加载端产生一条纵向裂缝, 随着荷载的增加, 裂缝逐渐向自由端延伸, 并最终形成纵向贯穿裂缝。而当保护层厚度增加到90 mm时, 试件端部与侧面均不产生裂缝, 试件的典型推出破坏形态如图5所示。



(a)试件端部 (b)试件表面

图5 推出试件破坏形态

2.3 荷载—滑移曲线

各试件的荷载—滑移($P-S$)曲线如图6所示。从图中荷载—滑移曲线可以看出, 各试件自由端与加载端的 $P-S$ 曲线整体形状一致, 自由端整体曲线稍落后于加载端, 体现在 $P-S$ 曲线中为自由端曲线偏左。同时常温下及冻融循环作用后的型钢混凝土试件的曲线形状大致相似, 并呈现出一定规律。根据曲线整体特点总结出典型的试件荷载—

滑移曲线模型(图 7). 将 $P-S$ 曲线分为 4 段, 分别为无滑移段(OA)、荷载增加段(AB)、荷载下降段(BC)、水平残余段(CD). 其中 OA 段的 A 点对应试件的初始黏结荷载 P_a , AB 段的 B 点对应极限黏结荷载 P_u 与极限滑移量 S_u , BC 段的 C 点对应残余黏结荷载 P_r 与残余滑移量 S_r .

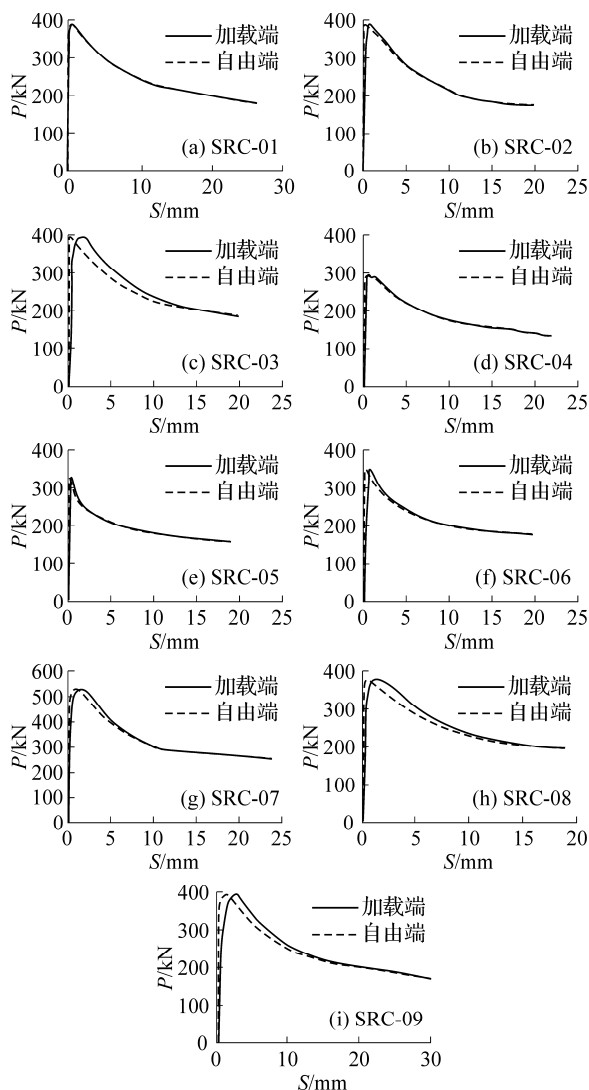


图 6 各试件的 $P-S$ 曲线

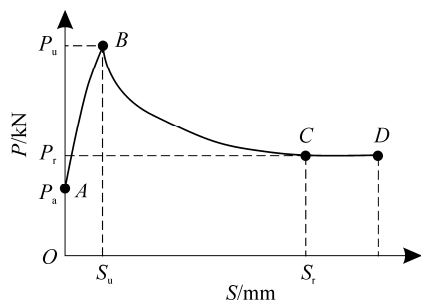


图 7 典型的 $P-S$ 模型

2.4 设计参数分析

根据试验数据找出各试件的承载力与滑移特征值, 具体数据见表 4.

表 4 试件承载力与滑移特征值

试件编号	P_a /kN	P_u /kN	S_u /mm	P_r /kN	S_r /mm
SRC-01	131.9	389.8	0.566	157.7	17.530
SRC-02	145.1	391.3	0.990	173.2	11.210
SRC-03	159.3	396.4	1.666	185.4	10.508
SRC-04	63.7	300.1	0.386	135.0	12.380
SRC-05	75.2	311.5	0.538	150.6	9.273
SRC-06	84.6	328.6	0.692	164.4	9.920
SRC-07	272.1	531.7	1.580	253.8	10.186
SRC-08	160.8	379.6	1.442	155.4	13.786
SRC-09	177.1	394.3	1.197	168.7	16.051

2.4.1 冻融循环作用

由图 8 可见, 冻融循环作用会造成型钢混凝土试件包括初始黏结承载力、极限承载力与残余承载力在内的特征承载力与特征滑移值的下降, 其中, 极限承载力下降程度最大, 冻融 100 次后试件的极限承载力下降了 23.06%.

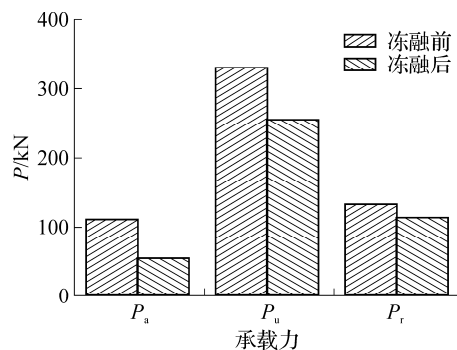


图 8 冻融前后各承载力特征值

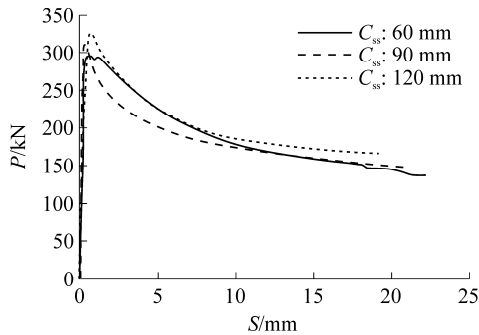
2.4.2 保护层厚度

冻融后不同保护层厚度试件的 $P-S$ 曲线如图 9 所示. 从图中可见, 型钢保护层厚度的增加在一定程度上抵消了冻融循环作用产生的不利影响, 即随着保护层厚度的增加, 试件各承载力特征值有所增大. 为便于分析, 定义 λ_u^D 为极限承载力损失, 计算公式如下:

$$\lambda_u^D = (P_u^0 - P_u^D) / P_u^0, \quad (1)$$

式中: P_u^D 为冻融循环作用后的承载力; P_u^0 为常温下的极限承载力.

根据式(1)得出冻融后不同保护层厚度的极限

图9 冻融作用后不同保护层厚度的 $P-S$ 曲线

承载力损失情况(图 10). 由图可见, 冻融后保护层厚度的增加能够降低极限承载力的损失. 这是由于冻融作用首先作用在试件混凝土表面, 并随着冻融循环作用的持续, 而不断向试件内部发展, 因此, 增加保护层厚度能够增加冻融循环作用的传递路径, 使相同冻融循环次数的混凝土试件的极限承载力损失减小.

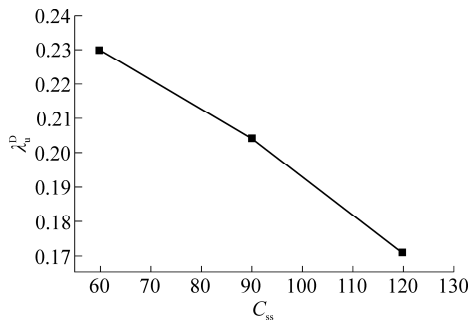
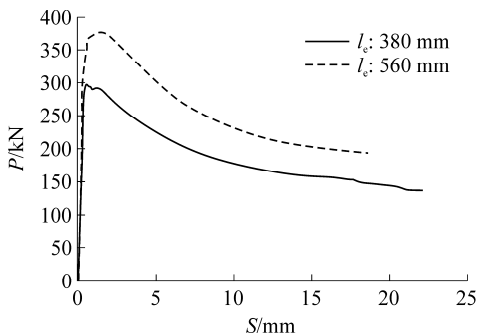


图10 冻融后不同保护层厚度的承载力损失情况

2.4.3 型钢锚固长度

图 11 反映了冻融循环后锚固长度对试件承载力与相对滑移的影响, 可以看到锚固长度的增加使试件特征承载力上升, 降低了冻融循环的不利作用. 当锚固长度从 380 mm 增加至 560 mm 时, 冻融循环作用后的试件极限承载力从 300 kN 增加至 379 kN, 但锚固长度的增加对于残余承载力提升程

图11 冻融后不同锚固长度的 $P-S$ 曲线

度不高.

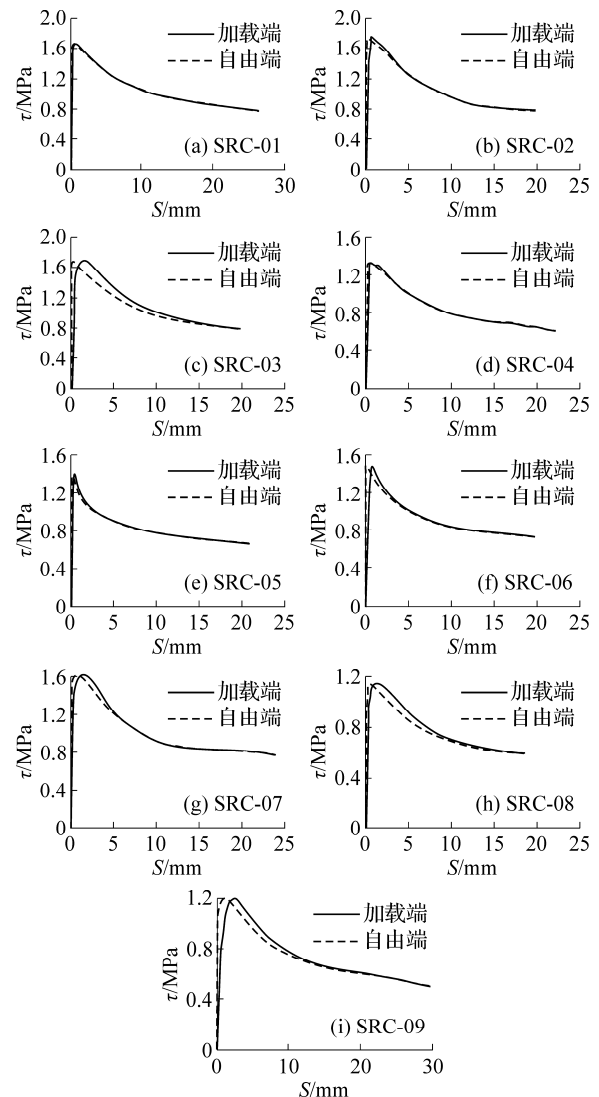
3 黏结—滑移本构关系

3.1 冻融后 SRC 黏结—滑移曲线

将所测量的荷载试验值 P 通过下式转化成型钢与混凝土界面上的平均黏结应力:

$$\tau = P / (l_e C), \quad (2)$$

式中: τ 为平均黏结应力; C 为型钢截面周长. 由式 (2) 计算得到各试件的平均黏结应力与端部滑移曲线(即黏结—滑移曲线($\tau-S$ 曲线))如图 12 所示.

图12 试件的 $\tau-S$ 曲线

分析图 12 中的黏结—滑移曲线以及其各黏结及滑移特征值, 可以看出: (1) 相比常温情况, 冻融后的试件在超过极限黏结强度后, 随着滑移的增加, 黏结强度下降的趋势更加缓和; (2) 随着保护层

厚度的增加,试件的黏结强度提升;(3)随着锚固长度的增加,试件的黏结强度下降。

3.2 黏结-滑移本构模型

由平均黏结应力式可知,黏结-滑移与荷载-滑移具有相似趋势,也可分为4段,分别为无滑移段、黏结应力随滑移上升段和随滑移下降段、黏结应力不变滑移持续增加段。通过对型钢混凝土 τ - S 曲线的特征分析,确定初始黏结强度 τ_a 、极限黏结强度 τ_u 、残余黏结强度 τ_r 及其对应的特征滑移值 S_u 、 S_r ,通过上述5个特征值,确定冻融后型钢混凝土的黏结-滑移(τ - S)本构关系模型(图13)。

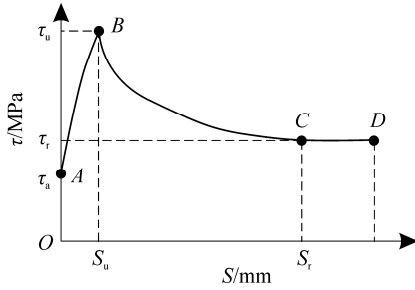


图13 冻融型钢混凝土 τ - S 本构模型

通过确定各黏结滑移特征值,得到本构模型各段关系式,并分别对每段曲线相关性进行分析。

(1) OA 段: 此时随着黏结强度增加,试件暂无滑移产生。曲线为与 Y 轴重合的直线。曲线可用下式表示:

$$S = 0, 0 \leq \tau < \tau_a. \quad (3)$$

(2) AB 段: 此时黏结强度随着滑移量的增加而增大,基本趋势近似为二次曲线的上升段。曲线可用下式表示:

$$\tau = \frac{\tau_u - \tau_a}{S_u^2} (S - S_u)^2 + \tau_u, 0 \leq S < S_u. \quad (4)$$

(3) BC 段: 滑移量持续增加,黏结强度发生退化,基本趋势为一条二次曲线下降段。曲线可用下式表示:

$$\tau = \frac{\tau_u - \tau_r}{(S_u - S_r)^2} (S - S_r)^2 + \tau_r, S_u \leq S < S_r. \quad (5)$$

(4) CD 段: 黏结强度趋于稳定,滑移持续增加,曲线近似水平直线。可用下式表示:

$$\tau = \tau_r, S_r \leq S. \quad (6)$$

3.3 本构模型的试验曲线与本构模型曲线对比

将试验特征点数值结合本构模型曲线公式绘制出黏结-滑移曲线,并将试验曲线与本构模型曲

线进行对比(图14),符合程度较好。

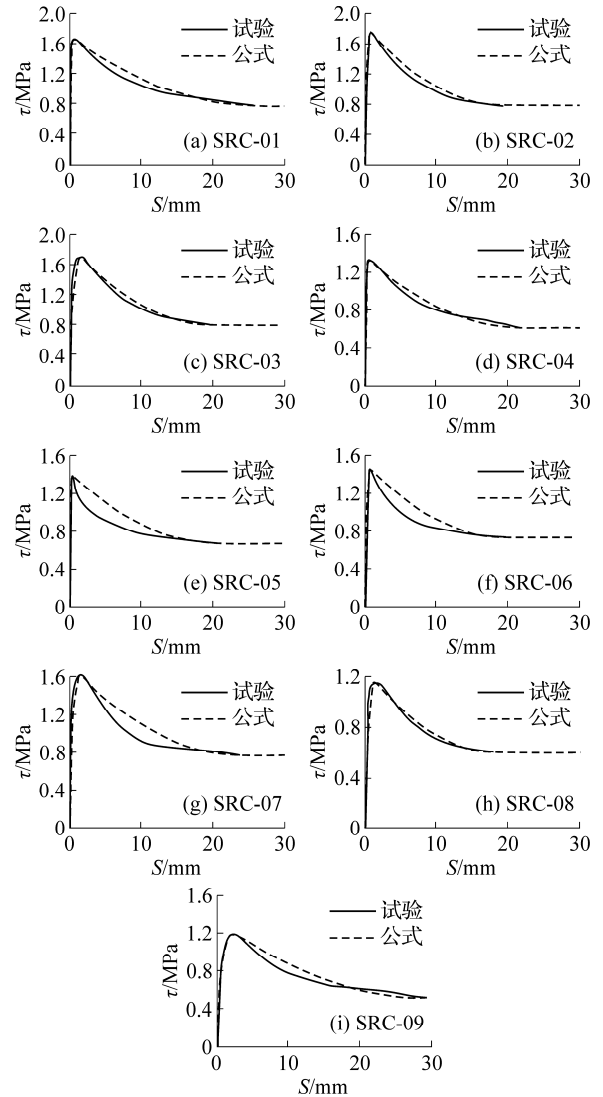


图14 试验曲线与本构模型对比

3.4 特征黏结强度计算

结合本次试验与文献[10-13]共44个常温及冻融后的型钢混凝土试件,通过对主要影响因素进行多元线性回归,得到各特征黏结强度算式如下:

(1) 冻融型钢混凝土初始黏结强度:

$$\tau_a = \left(0.28 + \frac{0.007l_c}{d} - 0.002N - \frac{0.006}{d} \right) f_t;$$

(2) 冻融型钢混凝土极限黏结强度:

$$\tau_u = \left(0.605 - \frac{0.012l_c}{d} - 0.0007N - \frac{0.005C_{ss}}{d} \right) f_t;$$

(3) 冻融型钢混凝土残余黏结强度:

$$\tau_r = \left(0.301 - 0.0004N + \frac{0.008C_{ss}}{d} - 0.041\rho_{sv} \right) f_t;$$

式中: d 为型钢界面高度, mm; f_t 为混凝土抗拉强度, MPa.

将得到的各黏结强度计算值与本次试验的数据进行对比, 初始黏结强度与极限黏结强度见表 5, 残余黏结强度见表 6. 从表 5、表 6 中可以看出, 试件公式计算结果与试验结果总体相符, 计算值与试验值之比在 0.8~1.2 左右. 个别试件(如 SRC-08)的残余黏结强度计算值偏差较大, 其原因可能为试件在残余段加载时, 仪器施力控制不当导致.

表 5 试件初始与极限黏结强度特征值

试件 编号	τ_u /MPa		计算值/ 试验值
	计算值	试验值	
SRC-01	0.720	0.564	1.277
SRC-02	0.731	0.649	1.126
SRC-03	0.752	0.683	1.101
SRC-04	0.306	0.269	1.138
SRC-05	0.311	0.341	0.912
SRC-06	0.316	0.380	0.832
SRC-07	0.970	0.830	1.169
SRC-08	0.355	0.488	0.727
SRC-09	0.349	0.541	0.645

试件 编号	τ_u /MPa		计算值/ 试验值
	计算值	试验值	
SRC-01	1.729	1.736	0.996
SRC-02	1.733	1.750	0.990
SRC-03	1.738	1.772	0.981
SRC-04	1.513	1.343	1.127
SRC-05	1.518	1.392	1.091
SRC-06	1.522	1.468	1.037
SRC-07	1.662	1.613	1.030
SRC-08	1.447	1.151	1.257
SRC-09	1.451	1.197	1.212

3.5 特征滑移量计算

常温下型钢混凝土特征滑移值大小主要与型钢锚固长度有关^[12], 而冻融循环之后, 冻融循环次数与型钢保护层厚度对极限黏结滑移存在影响, 并且冻融循环次数与试件配箍率对残余黏结滑移存在影响, 因此结合本文与文献[10-13]共 44 个型钢混凝土的推出试验数据, 对主要影响因素进行线性回归, 得到特征黏结滑移量的计算式:

(1)冻融型钢混凝土极限黏结滑移量:

$$S_u = (0.0017 + 3.79 \times 10^{-3} N +$$

表 6 试件残余黏结强度特征值

试件 编号	τ_r /MPa		计算值/ 试验值
	计算值	试验值	
SRC-01	0.839	0.706	1.188
SRC-02	0.846	0.775	1.092
SRC-03	0.853	0.830	1.028
SRC-04	0.716	0.604	1.185
SRC-05	0.723	0.674	1.073
SRC-06	0.731	0.736	0.993
SRC-07	0.738	0.768	0.961
SRC-08	0.716	0.471	1.520
SRC-09	0.723	0.510	1.418

$$2.52C_{ss} / d) \times 10^{-4} l_e.$$

(2)冻融型钢混凝土残余黏结滑移量:

$$S_r = (-1.14 + 0.044N + 34.7\rho_{sv}) \times 10^{-3} l_e.$$

黏结滑移量计算值与试验值的对比见表 7. 由表可见, 各试件计算结果与试验结果总体相符, 计算值与试验值之比在 0.8~1.2 左右.

表 7 试件黏结滑移特征值

试件 编号	S_u /mm		计算值/ 试验值	S_r /mm		计算值/ 试验值
	计算值	试验值		计算值	试验值	
SRC-01	0.575	0.566	1.016	14.11	17.53	0.805
SRC-02	0.862	0.990	0.871	10.11	11.21	0.902
SRC-03	1.349	1.666	0.810	10.11	10.50	0.963
SRC-04	0.419	0.386	1.085	11.78	12.38	0.952
SRC-05	0.606	0.538	1.126	11.78	9.27	1.271
SRC-06	0.793	0.692	1.146	11.78	9.92	1.188
SRC-07	1.447	1.580	0.916	12.45	10.18	1.223
SRC-08	1.259	1.442	0.873	17.37	13.78	1.261
SRC-09	1.083	1.197	0.905	17.37	16.05	1.082

4 结论

(1)冻融循环作用造成混凝土抗压强度下降, 同时混凝土试块与型钢混凝土试件表面也因冻融循环作用造成损伤, 在表面产生微裂缝.

(2)冻融前后型钢混凝土试件的荷载—滑移曲线大致相似, 且具有一定规律. 可以根据荷载与滑移关系分为四段: 无滑移段、荷载随滑移上升段、荷载下降滑移增加段、荷载稳定滑移持续增加段.

(3)冻融循环作用会造成型钢混凝土各特征承载力的下降, 而增加型钢保护层厚度与锚固长度,

可以提高试件各承载力特征值,在一定程度上抵消冻融循环的不利作用。

(4)根据试验所得黏结—滑移曲线构建了冻融型钢混凝土的黏结—滑移本构模型,并结合以往常温及冻融后型钢混凝土推出试验的相关数据建立了冻融型钢混凝土的各特征黏结强度与特征黏结滑移量计算公式。

参考文献:

- [1] 郑山锁,李磊,王斌,等. 型钢与混凝土界面剪力传递能力[J]. 工程力学, 2009, 26(3):148-154.
- [2] 武海荣,金伟良,张锋剑,等. 关注环境作用的混凝土冻融损伤特性研究进展[J]. 土木工程学报, 2018, 51(8): 37-46.
- [3] 常虹,宿晓萍,沙勇. 冻融循环作用下混凝土构件受压性能损伤试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(3):26-30.
- [4] 郭靳时,邵爽. 冻融下钢筋混凝土粘结性能的试验研究[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(2):51-53.
- [5] 徐善华,聂彪. 冻融损伤混凝土与光圆钢筋黏结本构关系试验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(3):434-442.
- [6] Hanjari K Z, Utgenannt P, Lundgren K. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(3):244-254.
- [7] Xu S H, Li A B, Wang H. Bond properties for deformed steel bar in frost-damaged concrete under monotonic and reversed cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148:344-358.
- [8] 冀晓东,赵宁,宋玉普. 冻融循环作用后变形钢筋与混凝土粘结性能退化研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(1):87-91.
- [9] 李磊,王卓涵,张艺欣,等. 钢筋混凝土冻融损伤黏结滑移本构模型及其在构件中的应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(9):213-222.
- [10] 郭延生. 冻融循环作用后型钢混凝土粘结滑移性能研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2018.
- [11] 李俊华,邱栋梁,俞凯,等. 高温后型钢混凝土粘结滑移性能研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2):190-200; 206.
- [12] 杨勇,郭子雄,薛建阳,等. 型钢混凝土粘结滑移性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4):1-9.
- [13] 薛建阳,杨勇,赵鸿铁. 型钢混凝土构件粘结滑移性能试验及其分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(S1):142-146.

Experimental study on bond-slip behavior between shaped steel and concrete in SRC structures after freezing and thawing

YAO Zhicheng, LI Junhua*, ZHANG Xingqiang, WANG Zheng

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The bond-slip behavior between shaped steel and concrete after freeze-thaw has an important influence on the mechanical properties of steel reinforced concrete (SRC) structures under freeze-thaw conditions. In order to study the bond strength and slip behavior of SRC members after freezing and thawing, the push-out tests for nine SRC short columns at normal room temperatures and after freeze-thaw were carried out. Test results show that characteristic bond bearing capacity and characteristic bond strength of SRC short columns both descend after freeze-thaw cycles, while the increase of the thickness of cover reduces the cracks at the end of the specimen and the column body, and improves carrying capacity of SRC short columns. At the same time, the load-slip curve and bond-slip curve of SRC short columns before and after freezing and thawing are almost the same, and the bond-slip constitutive model of freeze-thawed SRC members was constructed on the basis of summarizing the laws. From the previous test data of SRC members at normal room temperature and after freezing and thawing, the calculation methods of each characteristic bond strength value and their corresponding slip amount of freeze-thawed SRC members were obtained by regression, and the calculation results were in good agreement with the experimental data.

Key words: steel reinforced concrete (SRC); freeze-thaw cycle; push-out test; bond-slip constitutive model

(责任编辑 章践立)