

# 冷热一荷载耦合下锂渣混凝土梁的受弯承载力

张广泰<sup>1,2</sup>, 李雪藩<sup>1,2</sup>, 鲁海波<sup>1,2</sup>, 张晓旭<sup>1,2</sup>, 赛买提·阿迪力<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆建筑结构与抗震重点实验室, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 为研究静载与冷热循环共同作用下锂渣混凝土梁的损伤机理和抗弯性能, 对 4 组不同冷热循环次数(0、100、300)和静载水平(0、0.2、0.35)组合下的锂渣混凝土梁开展了抗弯加载试验。此外, 基于轴心抗压试验得到的锂渣混凝土本构模型, 通过对梁截面的受力分析, 提出了冷热一荷载耦合下锂渣混凝土梁的受弯承载力计算公式。将公式所计算的结果同实测值对照, 发现公式的计算结果均小于实测值, 故在安全储备范围之内, 可为大温差地区锂渣混凝土矩形截面梁受弯承载力的计算提供参考依据。

**关键词:** 锂渣混凝土梁; 冷热一荷载耦合; 受弯承载力; 弹塑性损伤本构

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

## Flexural Capacity of Lithium Slag Reinforced Concrete Beams Under Coupling Between Loading and Thermal-cold Cycling

ZHANG Guangtai<sup>1,2</sup>, LI Xuefan<sup>1,2</sup>, LU Haibo<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoxu<sup>1,2</sup>, SAIMAITI·Adili<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Key Laboratory of Building Structure and Earthquake Resistance, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** In order to study the damage mechanism and flexural performance of lithium slag concrete beams under coupling between loading and thermal-cold cycling, flexural loading tests were made on 4 groups of lithium slag concrete beams, which underwent the combined effect of a series of thermal-cold cycling (0, 100, 300) and static load levels (0, 0.2, 0.35). In addition, a constitutive model of lithium slag concrete was established on the basis of the axial compression test. Through the force analysis of the beam section, the calculation formula of the flexural bearing capacity of the lithium slag concrete

beam was proposed. A comparative study was made of the calculation and experiment results, and the theoretical calculation results prove to be less than those of the experiments. From the prospect of the safety-reservation, the study provides a reference for the calculation of the flexural bearing capacity of lithium slag concrete rectangular cross-section beams in the areas of large temperature changes.

**Key words:** lithium slag concrete beams; coupling between loading and thermal-cold cycling; flexural bearing capacity; elastoplastic damage constitutive

大多数基础设施建设均采用钢筋混凝土结构, 而现役钢筋混凝土结构长期处于荷载与环境共同作用下, 其耐久性问题日益凸显<sup>[1-3]</sup>。我国西部地区的极限温差相对较大, 此类大温差环境必然会给服役中的钢筋混凝土建筑带来损伤<sup>[4-5]</sup>, 从而影响结构寿命。选用工业废锂渣粉代替混凝土中的部分水泥<sup>[6]</sup>, 不仅可以起到进一步提高混凝土后期的强度和耐久性的作用, 还可以促进节能减排, 助力我国碳中和目标早日实现。

国内外学者针对混凝土材料及其结构在单一因素和复合因素作用下的损伤行为, 已进行了广泛的研究。例如, 曹大富等<sup>[7]</sup>基于冻融循环次数等变量对混凝土受压性能影响规律的分析, 提出了考虑冻融次数的混凝土受压本构模型。Marsavina 等<sup>[8]</sup>通过试验和数值分析的手段, 研究了裂缝对砂浆试件氯离子渗透的影响。毛婷厅<sup>[9]</sup>以新疆地区的大温差环境为背景, 对冷热循环作用下 HRB500E 级钢筋与纤维混凝土的黏结性能进行了研究。WARD 等<sup>[10]</sup>利用冲击共振法, 研究了一 18℃ 到 23℃ 冷热循环下碳纤维增强聚合物拉挤板加固和非加固钢筋混凝土梁

收稿日期: 2021-08-18

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金(51968070)

第一作者: 张广泰(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为结构工程与新型建筑材料。

E-mail: zgtxh@126.com



论文  
拓展  
介绍

的结构健康状况。然而,目前对冷热—荷载耦合下混凝土结构性能的研究较少。

为使我国西部等大温差地区的混凝土结构在长期使用过程中保持安全性,亟需开展钢筋混凝土结构在冷热—荷载耦合作用下的研究。文章在团队前期研究基础上<sup>[6]</sup>,利用锂渣粉取代 20% 水泥制备锂渣混凝土梁,研究其在不同的冷热循环次数和静载水平组合下受弯性能损伤退化的规律,并基于对锂渣混凝土的轴心抗压试验,建立在冷热—荷载耦合下锂渣混凝土梁的受弯承载力计算公式。

1 试验设计

1.1 试验材料

水泥选自乌鲁木齐市红雁池水泥厂的 P. O42. 5 级水泥;细骨料选用中砂;粗骨料选用粒径为 6~25 mm 的连续级配卵石;钢筋基本力学性能指标见表 1;锂渣粉由工业废料中的锂渣经过研磨制备加工得到,化学性能指标见表 2。

表 1 钢筋物理力学性能  
Tab.1 Physical and mechanical properties of steel bars

强度等级	钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa
HRB400	12	446	633
HPB300	8	360	415
HPB300	6	330	415

表 2 锂渣的化学成分  
Tab.2 Chemical composition of lithium residue

w/%				
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
54.39	19.83	8.30	7.98	1.40

1.2 构件设计及配合比

共制作 8 根锂渣混凝土梁,2 根梁为 1 组,试验梁保持相同尺寸的横截面和配筋方式,如图 1 所示。梁的尺寸为 120 mm×200 mm×1 100 mm,其中混凝土保护层厚度为 20 mm,选用 HRB400 级钢筋作为梁的受力筋,选用 HPB300 级钢筋作为梁的架立筋和箍筋,锂渣混凝土设计基准强度选用 C40,其配合比及标准抗压强度如表 3 所示。

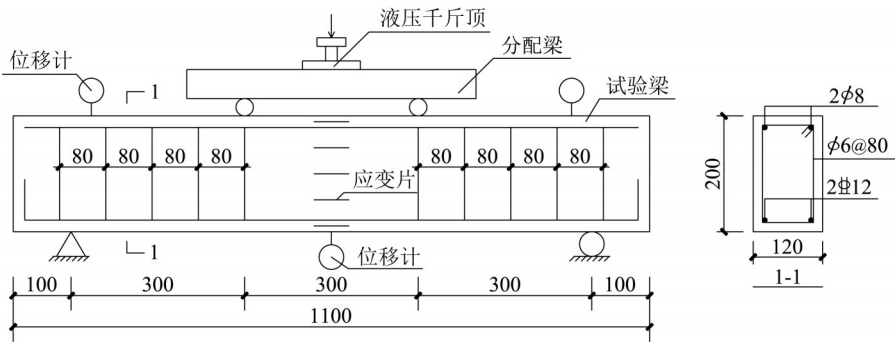


图 1 混凝土梁示意图(单位:mm)  
Fig.1 Schematic diagram of concrete beam (unit: mm)

表 3 锂渣混凝土配合比  
Tab.3 Mix proportions of concretes

最佳配合比/(kg·m <sup>-3</sup> )					28 d 抗压强度/MPa
水泥	石子	砂子	锂渣粉	水	
300	1 091	758	75	152	45.3

1.3 试验装置和加载制度

实际工程中,正常服役状态下的钢筋混凝土构件的负载不超过其极限荷载的 0.35<sup>[11]</sup>,故试验梁所耦合的静载水平分别选为 0.2 和 0.35。使用混凝土梁荷载与环境耦合试验装置<sup>[12]</sup>为标准养护 28 d 后的试验梁施加静载,工作原理如图 2 所示。装置通过拧固螺母压缩碟形弹簧的方式为梁加载,20 个正反对合堆叠的碟形弹簧片为 1 组,共 4 组,每组刚度 1 920 N·mm<sup>-1</sup>,通过

此装置对静载水平 0.2 和 0.35 的试验梁分别加载至 21.4 kN 和 37.45 kN。

冷热循环制度参考 JGJ144-2019《外墙外保温工

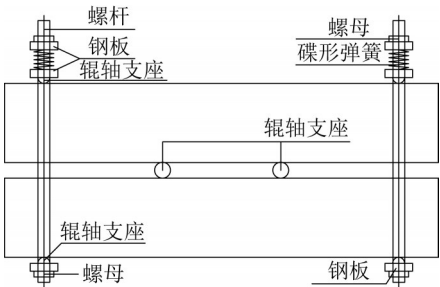


图 2 荷载耦合装置示意图  
Fig.2 Schematic diagram of load coupling device

程技术标准》<sup>[13]</sup>和新疆地区温度情况<sup>[14]</sup>。具体制度为:升温2 h,保持 $40\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温1 h;降温6 h,保持 $-18\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温4 h。由于目前还没有标准的方法来模拟冷热循环的侵蚀作用,故试验梁的冷热循环次数参考抗冻等级划分和冷热环境下锂渣混凝土轴心抗压强度的变化趋势,选择100次和300次。利用CNBR-WNH外墙外保温耐候检测设备模拟冷热环境,如图3所示。

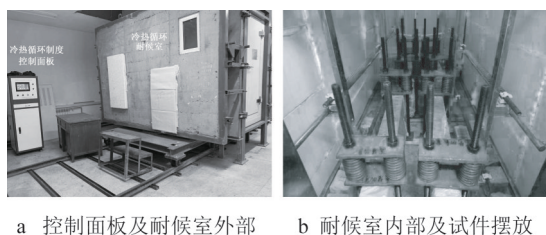


图3 冷热环境模拟设备

Fig.3 Thermal-cold environment simulator

依据GB/T 50152-2012《混凝土结构试验方法标准》<sup>[15]</sup>,本次试验加载分两个阶段:预加载阶段,从0.2 MPa共分三级加至0.6 MPa,再分三级卸载;破坏加载阶段,其实际加载制度依据试验过程中的现象确定,首先按照每级0.2 MPa加至试验梁出现首条裂缝,裂缝出现之后,按照每级0.4 MPa加至裂缝发展速度较快阶段,最终按照每级0.1 MPa加载直至试验梁破坏。梁加载制度如下图4所示。

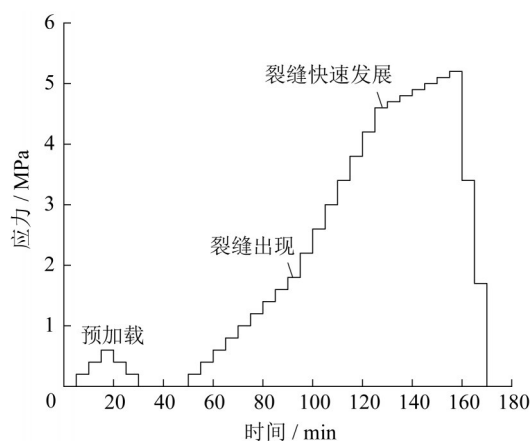


图4 受弯试验加载制度

Fig.4 Loading system for bending test

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 变形特征

以冷热循环次数为变量,试验梁的荷载—挠度曲线由图5可见:在裂缝出现之前,曲线基本相似,

无较大差别。随着循环次数的增多,到达破坏挠度时的荷载呈现先增加后降低的趋势,100次循环时极限荷载达到最大值,较未循环混凝土梁增加了17.8%。原因是锂渣在混凝土中前期水化程度并不完全,随着水化反应的进行锂渣提高了混凝土的后期强度,且此时锂渣水化的增强作用大于冷热循环的劣化作用。300次循环后的极限荷载较100次循环降低了9.5%,此时锂渣的水化反应对混凝土强度的增强作用小于冷热循环的劣化作用。

以静载水平为变量,试验梁的荷载—挠度曲线由图5所示可知:静载水平0.35时,梁的刚度最大,这是因为在相同的冷热循环次数下,随着静载水平的增大,裂缝的数量和宽度都有所增加,混凝土与水接触有效面积增大,水泥水化更加完全,结构密实度增加,截面弯曲刚度增大;随着静载水平的增大,锂渣混凝土梁破坏时的挠度下降了14.1%,位移延性系数从2.93降至2.45,极限荷载提高2.6%,说明在冷热环境和0.35水平内的静载共同作用下,锂渣混凝土梁的延性会降低,但极限荷载相差不大。

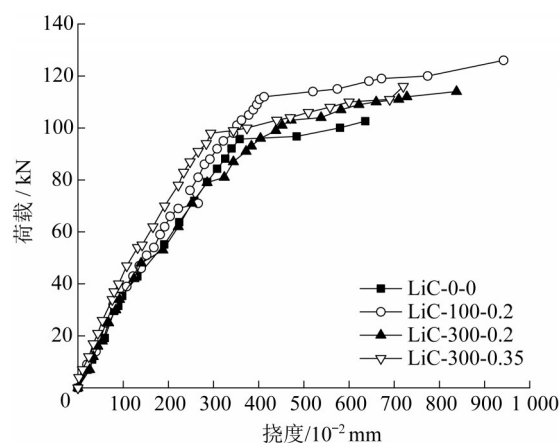


图5 试验梁的荷载—挠度曲线

Fig.5 Load-deflection curves of test beams

### 2.2 受弯承载力

试验梁的受弯承载力试验结果由表4可见:由0次循环到100次循环时,极限弯矩增加幅度为17.8%,经300次冷热循环后极限弯矩值仍高于未循环梁6.5%,说明锂渣的掺入可以显著提高混凝土梁的受弯承载力和抵抗冷热循环的能力。

锂渣中 $\text{SiO}_2$ 的含量超过50%,会与水泥水化产物中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行水化反应,生成稳定且致密的水化硅铝酸钙晶体,从而有效促进了水泥水化。随着冷热循环次数的增加,梁中发生水化反应的时长也随之增加,100次循环和300次循环作用后的梁相

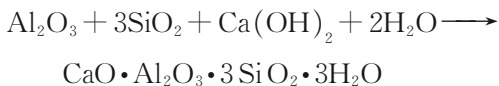
表4 受弯承载力试验结果

Tab.4 Test results of bending capacity

试件编号	极限荷载/kN	极限弯矩/(kN·m)
LiC-0-0	107	16.05
LiC-100-0.2	126	18.90
LiC-300-0.2	114	17.10
LiC-300-0.35	117	17.55

注:LiC-100-0.2为锂渣混凝土梁-100次冷热循环-0.2静载水平

较于未循环的梁,水化时间多出54.2 d和162.5 d。水泥水化在锂渣的推动下不断进行,水化硅铝酸钙不仅填补了疏松空隙,而且加强了粗细骨料的界面间黏结强度,反应式<sup>[16-17]</sup>如下:



随着静载水平由0.2增加到0.35,由表4可以发现:锂渣混凝土梁的受弯承载力仅变化2.6%,说明在本文所取静载水平范围内,锂渣混凝土梁的受弯承载力几乎不受影响。有关研究<sup>[18]</sup>表明:当混凝土的静载水平在0.3~0.5区间时,微裂缝不会大量发

展,且部分裂缝由于受压出现闭合现象导致对混凝土的力学性能无明显影响,对极限荷载的变化无实质性影响,裂缝出现闭合现象反而会导致其承受荷载的能力略有增加。

### 2.3 锂渣混凝土梁平截面假定

沿锂渣混凝土梁跨中截面不同高度处的混凝土应变如图6所示。不同冷热循环次数与静载水平耦合作用后的混凝土梁在加载过程中,其中和轴的整体变化趋势分别表现为:当荷载较小时,中和轴位置处于跨中截面中部附近,随荷载的增大,中和轴逐渐向跨中截面上部方向移动,受压区减少;加载至受力纵筋完全屈服时,中和轴继续上移直至上部受压区混凝土被压碎破坏。在不同的静载水平下,锂渣混凝土梁依旧能够满足平截面的假设,且随着静载水平从0.2上升到0.35,中性轴的位置呈下降趋势。

综合以上的分析,不同冷热循环次数及静载水平组合下锂渣混凝土梁的应变分布曲线均接近线性分布,符合平截面假定。故在西部大温差环境下服役的锂渣混凝土梁正截面的平截面假定仍然可以成立。

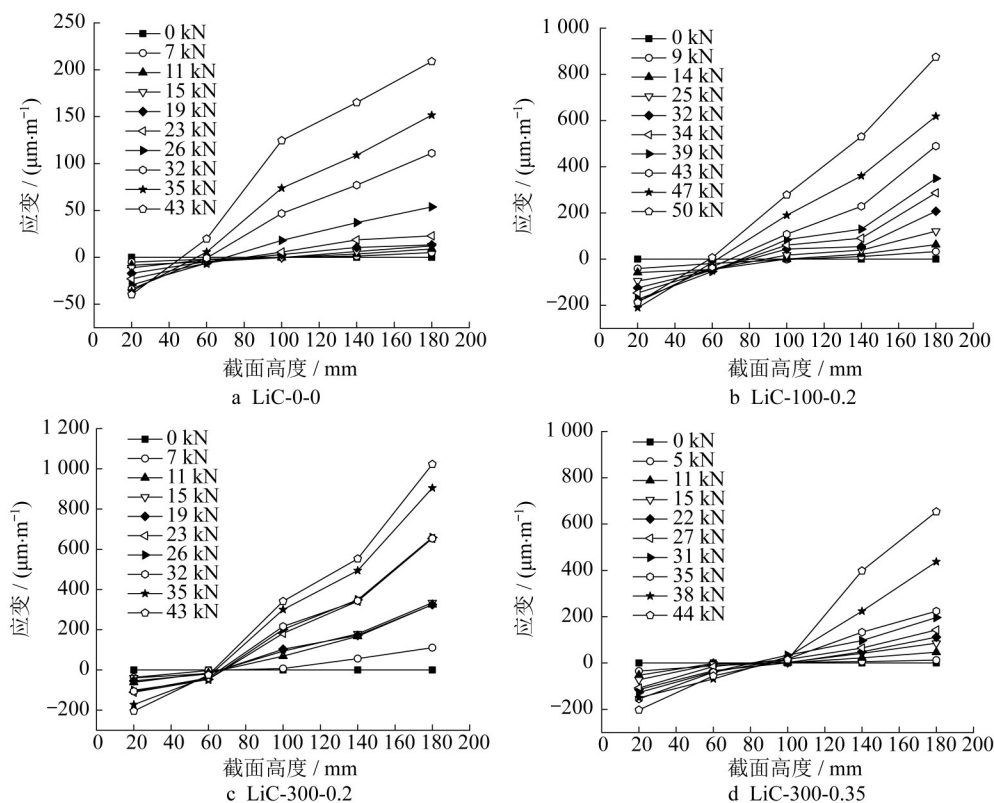


图6 梁跨中截面不同高度处的混凝土应变

Fig.6 Concrete strain at different heights of mid-span section of beam

### 3 构件受弯承载力计算方法

由以上分析结果可知,受到冷热—荷载耦合作用的锂渣混凝土梁正截面受弯承载力随静载水平变化较小。故基于冷热循环作用下锂渣混凝土的轴心受压本构模型对冷热—荷载耦合下的锂渣混凝土梁的受弯承载力进行理论推导,可预测一般静载水平下不同冷热循环次数的锂渣混凝土梁正截面受弯承载力。

#### 3.1 锂渣混凝土试块轴心受压试验

采用 WHY-3 000 型万能伺服试验机对达到不同冷热循环次数的锂渣混凝土棱柱体试块进行轴心抗压试验。在正式加载前先对其进行预加载,通过前期试块的曲线情况,不断调整加载速率,最终采用加载速率为  $0.08 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的等位移控制,达到目标位移  $12 \text{ mm}$  后判断试块破坏。

#### 3.2 峰值应力与峰值应变

经历 0 次、100 次、200 次、300 次冷热循环后的锂渣混凝土试块受压峰值应力与其对应的峰值应变如表 5 所示。

表 5 轴心受压峰值应力及峰值应变

Tab.5 Peak stress and peak strain under axial compression

冷热循环次数	峰值应力/MPa	峰值应变/ $10^{-3}$
0	33.89	1.652
100	44.67	1.515
200	39.46	1.585
300	32.56	1.665

在锂渣混凝土轴心抗压试验中,混凝土峰值应力随冷热循环次数的增大,出现先增大后减小的现象,此规律和试验梁的极限承载力规律相吻合。100 次循环时,峰值应力较 0 次循环提升了 31.81%,主要因为冷热循环次数较少,侵蚀造成的损伤尚不深入,锂渣水化产生的水化硅铝酸钙填充了微小孔隙,提高了其抗压能力;随着冷热循环次数的再次增加,水泥水化虽然趋于完全,但随着升温 and 冷却的周期性作用,混凝土内部已产生微裂缝,抗压强度不断下降,直至低于未循环试块。

利用最小二乘法回归建立锂渣混凝土试块单轴受压相对峰值应力、峰值应变分别与冷热循环次数  $N$  间的关系,如式(1)~(2):

$$\frac{\sigma_{pN}}{\sigma_{p0}} = 1.0211 + 0.0036N - 1 \times 10^{-5}N^2 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.8896$$

$$\frac{\epsilon_{pN}}{\epsilon_{p0}} = 0.9940 - 0.0009N + 3 \times 10^{-6}N^2 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.8644$$

式中: $N$ 为冷热循环次数; $\sigma_{pN}$ 、 $\sigma_{p0}$ 、 $\epsilon_{pN}$ 、 $\epsilon_{p0}$ 分别为  $N$  次冷热循环后和未经冷热循环的锂渣混凝土轴心受压峰值应力及峰值应变。

#### 3.3 锂渣混凝土单轴受压本构关系

以过镇海等通过试验研究建立的分段式混凝土应力—应变全曲线方程<sup>[19]</sup>为基础,应用 Matlab 软件编程进行非线性最小二乘法拟合。对结果回归分析,得到应力—应变曲线中的上升段参数、下降段参数分别与冷热循环次数  $N$  之间的关系如下:

$$\frac{a_N}{a_0} = 1.014 - 0.00276N \quad R^2 = 0.9854 \quad (3)$$

$$\frac{b_N}{b_0} = 1 + 0.0118N - 4 \times 10^{-5}N^2 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9421$$

式中: $a_N$ 、 $a_0$ 、 $b_N$ 、 $b_0$ 分别表示经过  $N$  次冷热循环作用后和未经冷热环境作用的锂渣混凝土轴心受压本构模型中的上升段参数和下降段参数。

利用式(1)~(4)对过镇海等提出的混凝土应力—应变曲线进行修正,可得到  $N$  次冷热循环次数下锂渣混凝土的轴心受压本构关系如下:

$$\sigma(\epsilon) = \begin{cases} \sigma_{pN} \epsilon_{pN}^{-3} [a_N \epsilon_{pN}^2 \epsilon + (3 - 2a_N) \epsilon_{pN} \epsilon^2 + (a_N - 2) \epsilon^3], & 0 \leq \epsilon / \epsilon_{pN} < 1 \\ \frac{\sigma_{pN} \epsilon_{pN} \epsilon}{b_N (\epsilon - \epsilon_{pN})^2 + \epsilon_{pN} \epsilon}, & 1 \leq \epsilon / \epsilon_{pN} \end{cases} \quad (5)$$

#### 3.4 锂渣混凝土梁承载力计算公式

本次试验的钢筋混凝土梁截面如图 7a,底部配有面积为  $A_s$  的 HRB400 钢筋,该梁为适筋破坏。受压区混凝土达到极限应变  $\epsilon_{cu}$  时,正截面的混凝土应变简图与截面受力状态如图 7b 与 7c 所示。

设  $x_c$  为混凝土受压区高度,  $\epsilon$  为受压区任意高度  $y$  处的应变,  $y_c$  为受压区合力点至中和轴之间的距离。参考关垌等<sup>[20]</sup>以矩形截面钢筋混凝土适筋梁为研究对象,推导得出的钢筋混凝土梁受弯承载力计算公式(6)。其中混凝土的材料性能体现在  $x_c$  和  $y_c$  计算公式的弹塑性损伤本构  $\sigma(\epsilon)$  之中,故将式(5)代入式(6),即可得到正常服役状态下的锂渣混凝土梁在  $N$  次冷热循环下的受弯承载力。

$$M_u = f_y A_s (h_0 - x_c + y_c) \quad (6)$$

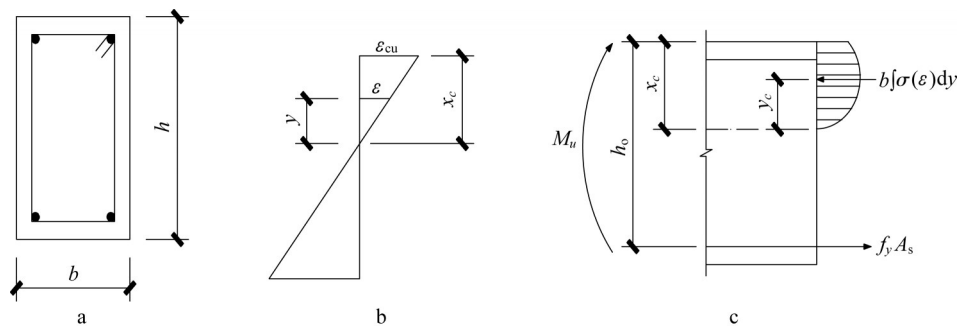


图7 钢筋混凝土梁正截面受弯计算简图

Fig.7 Bending calculation diagram of normal section of reinforced concrete beam

式中:

$$x_c = \frac{f_y A_s \epsilon_{cu}}{b \int_0^{\epsilon_{cu}} \sigma(\epsilon) d\epsilon}, y_c = \frac{f_y A_s}{b \int_0^{\epsilon_{cu}} \sigma(\epsilon) d\epsilon} \cdot \frac{\int_0^{\epsilon_{cu}} \sigma(\epsilon) \cdot \epsilon d\epsilon}{\int_0^{\epsilon_{cu}} \sigma(\epsilon) d\epsilon}, \epsilon_{cu}$$

为混凝土极限应变。

### 3.5 承载力计算模型与试验对比

基于上述正截面承载力的计算公式,对文中4根锂渣混凝土梁的受弯承载力分别进行了计算,计

算结果见下表6。 $M_{u,T}$ 为 $N$ 次冷热循环次数下的试验值, $M_u$ 为 $N$ 次冷热循环下的理论公式计算值。由表6可知:本文中所得的公式计算得到的受弯承载力均小于试验极限弯矩值,不同冷热循环次数下 $M_u/M_{u,T}$ 的平均值为0.855,模型计算值是试验值的85.5%左右,从安全性的角度出发,理论模型值一般都会小于构件的实际极限承载力值,故该计算公式具有适用性。

表6 受弯承载力计算值与试验值

Tab.6 Calculation value and test value of flexural bearing capacity

试件编号	$x_c/\text{mm}$	$M_{u,T}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_u/M_{u,T}$
LiC-0-0	106.02	16.05	13.32	0.83
LiC-100-0.2	31.69	18.90	15.70	0.83
LiC-300-0.2	49.42	17.10	15.25	0.89
LiC-300-0.35	49.42	17.55	15.25	0.87

## 4 结论

(1) 锂渣的掺入可以提高混凝土的中后期强度,增强混凝土梁在正常使用情况下的抗冷热循环性能;在所选冷热循环次数及静载水平下,锂渣与水泥水化的正效应大于冷热循环及静载水平产生的负作用,极限荷载均高于对照梁。

(2) 随着冷热循环次数的增加,梁受弯承载力呈现先增大后减小的趋势,在100次和300次循环时,分别较对照组提高17.8%和6.5%,说明锂渣的掺入和冷热循环次数对梁的承载力影响较大。随静载水平由0.2增加至0.35,锂渣混凝土梁的破坏挠度下降14.1%,极限荷载增加2.6%,说明冷热循环作用时耦合荷载会降低锂渣混凝土梁的延性,但对承载力影响不大。

(3) 在300次冷热循环和0.35静载水平以内,锂渣混凝土梁仍能满足平截面假定;基于锂渣混凝土受压本构模型和梁截面的受力分析,得出了矩形截

面锂渣混凝土梁的正截面受弯承载力计算公式,公式计算结果略小于试验结果,符合实际工程的安全储备要求。

### 作者贡献声明:

张广泰:提出研究方向,指导并修改论文内容。

李雪藩:开展具体研究并撰写论文。

鲁海波:处理部分数据,并修改部分内容。

张晓旭:收集和处理部分试验数据。

赛买提·阿迪力:操作实验仪器,保障试验安全。

### 参考文献:

- [1] WU J, LI H, WANG Z, *et al.* Transport model of chloride ions in concrete under loads and drying-wetting cycles [J]. Construction & Building Materials, 2016, 112: 733.
- [2] 秦晓川, 刘加平, 石亮, 等. 荷载与氯离子耦合作用下混凝土耐久性试验方法与装置的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(3): 112.

- QIN Xiaochuan, LIU Jiaping, SHI Liang, *et al.* Research progress of concrete durability testing method and device under the coupling effect of load and chloride ion [J]. *Materials Reports*, 2020,34(3):112.
- [3] 孙香花, 王佳林, 左晓宝, 等. 荷载-环境耦合作用下钢筋混凝土柱退化过程分析[J]. *南京理工大学学报*, 2018,42(2):133. SUN Xianghua, WANG Jialin, ZUO Xiaobao, *et al.* Numerical investigation on degradation of reinforced concrete column subjected to coupling of loading and environment [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2018,42(2):133.
- [4] SUMARAC D. Damage of plain concrete due to thermal incompatibility of its phases [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 1998,7(2):129.
- [5] 余安明, 水中和, 王树和. 干燥大温差条件下混凝土界面过渡区的研究[J]. *建筑材料学报*, 2008,11(4):485. SHE Anming, SHUI Zhonghe, WANG Shuhe. Study on transition zone of concrete interface under dry and large temperature difference [J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(4):485.
- [6] 李一, 张广泰, 田虎学, 等. 锂渣聚丙烯纤维混凝土基本力学性能试验[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(4):60. LI Yi, ZHANG Guangtai, TIAN Huxue, *et al.* Basic mechanical properties test of lithium slag polypropylene fiber concrete [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2016,37(4):60.
- [7] 曹大富, 富立志, 杨忠伟, 等. 冻融循环作用下混凝土受压本构特征研究[J]. *建筑材料学报*, 2013,16(1):17. CAO Dafu, FU Lizhi, YANG Zhongwei, *et al.* Study on compressive constitutive characteristics of concrete under freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Building Materials*, 2013,16(1):17.
- [8] MARSAVINA L, AUDENAERT K, SCHUTTER G D, *et al.* Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete [J]. *Revue Française De Génie Civil*, 2016,20(1):231.
- [9] 毛婷厅. 新疆地区热冷循环作用下高强钢筋与纤维高强混凝土黏结性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014. MAO Tingting. The study of high strength steel and high strength concrete with fiber on bonding performance in Xinjiang region [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2014.
- [10] WARD C, RATTANAWANGCHAROEN N, GHEORGHIU C. Impact resonance method for damage detection in carbon-fibre-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams subjected to fatigue and thermal cycling [J]. *Revue Canadienne De Génie Civil*, 2008,35(11): 1251.
- [11] 张广泰, 魏飞来, 陈柳灼, 等. 冷热循环-荷载耦合下锂渣混凝土梁变形性能试验研究[J]. *混凝土*, 2020(3):24. ZHANG Guangtai, WEI Feilai, CHEN Liuzhuo, *et al.* Experimental study on the deformability of lithium slag concrete beams under coupling between loading and thermal-cold cycles [J]. *Concrete*, 2020(3):24.
- [12] 张广泰, 陈柳灼, 陈彪汉, 等. 加载装置及混凝土梁荷载与环境耦合试验装置 [P]. 新疆: CN206002392U, 2017-03-08. ZHANG Guangtai, CHEN Liuzhuo, CHEN Biaohan, *et al.* Loading device and load-environment coupling test device for concrete beam [P]. Xinjiang: CN206002392U, 2017-03-08.
- [13] 外墙外保温工程技术标准: JGJ144-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. Technical standard for external thermal insulation on walls: JGJ144-2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [14] 李景林, 张山清, 普宗朝, 等. 近50a新疆气温精细化时空变化分析[J]. *干旱区地理*, 2013,36(2):228. LI Jinglin, ZHANG Shanqing, PU Zongchao, *et al.* Spatial-temporal variation of seasonal and annual air temperature in Xinjiang during 1961 - 2010 [J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(2):228.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 混凝土结构试验方法标准: GB/T50152-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures: GB/T50152-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [16] PRATT P L, WANG S D, PU X C, *et al.* Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems [J]. *Advances in Cement Research*, 2015,27(7):93.
- [17] 张兰芳, 陈剑雄, 李世伟. 碱激发矿渣-锂渣混凝土试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2006,9(4):488. ZHANG Lanfang, CHEN Jianxiong, LI Shiwei. Examination study of alkali-activated slag-lithium slag concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2006,9(4):488.
- [18] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. GUO Zhenhai, SHI Xudong. Theory and analysis of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [19] 过镇海. 混凝土的强度和变形-试验基础和本构关系 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. GUO Zhenhai. Strength and deformation of concrete - test basis and constitutive relationship [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [20] 关斌, 牛荪涛, 李强, 等. 冻融环境钢筋混凝土梁抗弯承载力研究 [J]. *铁道学报*, 2017,39(11):108. GUAN Xiao, NIU Ditao, LI Qiang, *et al.* Research on the loading capacity of RC beam under freezing and thawing [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017,39(11):108.