

文章编号:1007-9629(2021)06-1163-06

# 不同养护温度下蒸养混凝土断裂性能研究

娄本星<sup>1</sup>, 胡少伟<sup>2</sup>, 范向前<sup>1</sup>, 叶宇霄<sup>1</sup>, 王亚民<sup>1</sup>

(1.南京水利科学研究所,江苏南京 210029; 2.重庆大学土木工程学院,重庆 400045)

**摘要:**为了研究不同养护温度条件下蒸养混凝土断裂性能的变化规律,开展了养护温度为 20、45、60、80、95℃的混凝土三点弯曲梁断裂试验.基于双K断裂理论,分析了不同养护温度下蒸养混凝土的断裂性能,探讨了高温养护条件下混凝土损伤因子与其断裂韧度损失率之间的关系.结果表明:45℃养护条件下与 20℃养护条件下的混凝土力学性能和断裂性能基本相同;养护温度大于 45℃后,随着养护温度升高,高温导致的热损伤效应增强,试件的起裂韧度、失稳断裂韧度、断裂能和特征长度均呈下降趋势;采用弹性模量或抗压强度定义的强度损伤因子与断裂韧度损失率具有较好的相关性.研究成果可为蒸养混凝土断裂参数研究提供依据.

**关键词:**养护温度;蒸养混凝土;断裂性能;损伤因子

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.006

## Fracture Properties of Steam-Cured Concrete under Different Curing Temperatures

LOU Benxing<sup>1</sup>, HU Shaowei<sup>2</sup>, FAN Xiangqian<sup>1</sup>, YE Yuxiao<sup>1</sup>, WANG Yamin<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** To study the fracture properties of steam-cured concrete under different curing temperatures, three-point bending (TPB) specimens at different curing temperatures (20, 45, 60, 80 and 95 °C) were tested. Based on the double-K fracture theory, the effects of curing temperatures on the mechanical and fracture properties of the steam-cured concrete were analyzed, and the relationship between the damage factor of concrete and the loss ratio of fracture toughness was discussed. The results indicate that the mechanical properties and fracture properties of concrete under 45 °C curing condition are consistent with that under 20 °C curing condition; when the curing temperature is higher than 45 °C, the thermal damage effect enhances, and the fracture parameters of the specimen (including initial fracture toughness, unstable fracture toughness, fracture energy and characteristic length) decrease with the increase of curing temperature; a good correlation between the loss ratio of fracture toughness and the strength damage factor defined by elastic modulus or compressive strength is observed, which provide a basis for the fracture parameters of steam-cured concrete.

**Key words:** curing temperature; steam-cured concrete; fracture property; damage factor

蒸汽养护在混凝土预制构件生产中是一种常用的养护方式,也是冬季混凝土结构施工时加快进度的一种有效手段.蒸汽养护下的高温度、高湿度可以

加速混凝土早期强度的增长,从而加快模具周转,缩短生产周期,通常其脱模强度要求达到设计强度的 70% 以上.贺智敏等<sup>[1-2]</sup>、Türkel 等<sup>[3]</sup>、Ba 等<sup>[4]</sup>研究表

收稿日期:2020-07-21; 修订日期:2020-08-14

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51739008);国家重大科研仪器研制项目(51527811)

第一作者:娄本星(1996—),男,河南新乡人,南京水利科学研究所博士生.E-mail: lbx0824@163.com

通讯作者:胡少伟(1969—),男,河南开封人,重庆大学教授,博士生导师,博士.E-mail: hushaowei@cqu.edu.cn

明,蒸汽养护会造成混凝土结构内部孔隙粗化、脆性增大等热损伤效应.Liu等<sup>[5]</sup>、苏扬等<sup>[6]</sup>、吴建华等<sup>[7]</sup>研究了蒸养制度、配合比、矿物掺和料等对混凝土强度的影响,发现蒸养能显著提高混凝土早期性能,但对混凝土长期性能不利.贺炯煌等<sup>[8]</sup>、李霖皓等<sup>[9]</sup>研究表明,与常温养护条件相比,蒸养过程中混凝土的力学性能显著提升,同时混凝土的自收缩变形速率显著增加,复杂的体积变形很可能导致构件开裂.谢友均等<sup>[10]</sup>研究发现,随着养护温度的升高,蒸养混凝土的内部缺陷增多,抗冲击性能明显降低.

相较于普通混凝土,在蒸养混凝土生产过程中,早期蒸养时恒温阶段的温度通常较高,有时甚至高达95℃.高温养护条件下水泥与粗骨料界面处会不同程度地出现裂缝,使得混凝土强度下降,呈现出较大的脆性<sup>[11]</sup>.因此,研究养护温度对蒸养混凝土断裂性能的影响,对于充分掌握蒸养混凝土的性能及其实际工程应用具有重要意义.目前,国内外学者对常温养护条件下混凝土断裂性能的研究已取得很多成果<sup>[12-15]</sup>,主要探讨了级配、自重、外水压力、尺寸效应等影响因素下混凝土断裂参数的数值变化规律,而涉及蒸养混凝土断裂性能的研究还不多见.鉴于此,本文对15根切口梁进行了三点弯曲(TPB)断裂试验,研究了不同养护温度(20、45、60、80、95℃)对蒸养混凝土断裂性能的影响,分析了养护温度对其断裂能、特征长度以及双K断裂参数的影响规律,并进一步分析了强度损伤因子与混凝土断裂韧度的相关关系,以期对蒸养混凝土养护温度的优化及其服役性能研究提供理论支持.

## 1 试验概况

### 1.1 试件制备

采用三点弯曲梁来研究混凝土断裂性能.设计了5组(分别与养护温度20、45、60、80、95℃对应)、每组3根,共15根三点弯曲梁,尺寸均为长( $L$ )×厚( $t$ )×高( $h$ )=500 mm×100 mm×100 mm,初始缝高比为0.3,预制缝长 $a_0$ 为30 mm.采用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试块来测定混凝土的抗压强度 $f_c$ 和抗拉强度 $f_t$ .

试验原材料为P·O 42.5普通硅酸盐水泥、连续颗粒级配碎石(最大直径10 mm)、天然河砂、水、奈系减水剂;配合比为 $m(\text{水}):m(\text{水泥}):m(\text{砂}):m(\text{石子})=0.40:1.00:1.47:2.69$ ;减水剂掺量(质量分数)为0.5%.混凝土28 d标准立方体抗压强度为52.3 MPa.浇筑弯曲梁试件时,用厚度3 mm的钢板预制裂缝,3 h

后拔出,然后将试件移至蒸汽养护箱中进行蒸汽养护.

### 1.2 养护制度

参照TB/T 3043—2005《预制后张法预应力混凝土铁路桥简支梁T梁技术条件》,采用的蒸汽养护制度为:混凝土浇筑成型后在20℃下静停3 h,然后以20℃/h的升温速率分别升至45、60、80、95℃,并在各温度下保持恒温12 h;恒温阶段结束之后,将试件从蒸汽养护箱中取出并自然冷却至室温.蒸养结束后移至标准养护室继续养护至28 d,然后测试试件的力学性能和断裂性能.

### 1.3 试验装置

采用电子万能试验机对三点弯曲梁进行加载,加载速率为0.05 mm/min.在试件的底部和裂尖处分别布置2个标距12 mm、最大位移2 mm的夹式引伸计,以测量裂缝张口位移CMOD和裂缝尖端张口位移CTOD.用于固定下部引伸计的薄钢片厚度为3 mm,用于固定正面引伸计的菱形楔块厚度为10 mm.测试装置如图1所示.



图1 加载装置  
Fig. 1 Test device

### 1.4 断裂参数计算方法

断裂能是裂缝扩展单位面积所需要的能量<sup>[16]</sup>.混凝土材料断裂能 $G_F$ 的计算式为:

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta_{\max}}{(h - a_0)t} \quad (1)$$

式中: $W_0$ 为外荷载沿跨中加载方向所做的功,N/m; $mg$ 为三点弯曲梁的有效跨度范围内自重,N; $\delta_{\max}$ 为跨中最大挠度值,m.

用特征长度 $L_{ch}$ 来评判混凝土的脆性,其值越小表示混凝土越脆<sup>[17]</sup>. $L_{ch}$ 可由下式确定:

$$L_{ch} = EG_F/f_t^2 \quad (2)$$

$$E = \frac{24a_0}{C_i th} v(a_0/h) \quad (3)$$

式中: $E$ 为混凝土的弹性模量; $C_i = \text{CMOD}_i/P_i$ ,即P-CMOD曲线的初始斜率的倒数; $v(a_0/h)$ 的计算见文献[17].

断裂韧度表征材料阻止裂纹扩展的能力,是度量材料韧度好坏的定量指标.基于双K断裂模型<sup>[18]</sup>,混凝土的断裂韧度由下式确定:

$$K_{IC}^{ini} = \frac{3P_{mi}S}{2th^2} \sqrt{a_0} f(a_0/h) \quad (4)$$

$$K_{IC}^{un} = \frac{3P_{un}S}{2th^2} \sqrt{a_c} f(a_c/h) \quad (5)$$

$$K_{IC}^c = \int_{a_0}^{a_c} [2\sigma(x)F_1(x/a_c, a_c/h)/\sqrt{\pi a_c}] dx \quad (6)$$

式中: $K_{IC}^{ini}$ 为试件起裂韧度, $K_{IC}^{un}$ 为试件失稳断裂韧度, $K_{IC}^c$ 为试件黏聚断裂韧度, $MPa \cdot m^{1/2}$ ;  $P_{mi}$ 为试件起裂荷载, $P_{un}$ 为试件峰值荷载,N; $S$ 为试件有效跨度,m; $a_c$ 为试件有效裂缝长度,可将峰值荷载 $P_{un}$ 和临界裂缝张口位移 $CMOD_c$ 代入到式(3)中解出; $f(a/h)$ 、 $F_1(x/a_c, a_c/h)$ 的计算见文献<sup>[18]</sup>; $\sigma(x)$ 是混凝土软化本构曲线,本文选用Pettersson双线性软化曲线来确定试件黏聚力分布情况.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验结果

图2给出了各组试件的力学性能.由图2可见:45℃养护试件与20℃养护试件的力学性能基本相同;养护温度从45℃升至95℃时,试件的抗压强度 $f_c$ 、抗拉强度 $f_t$ 及弹性模量 $E$ 均呈下降趋势.

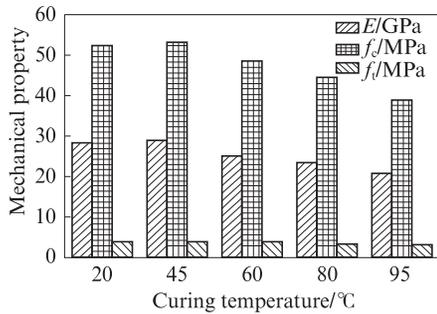


图2 试件的力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of specimens

图3是各组试件的实测 $P$ - $CMOD$ 曲线.起裂荷载采用曲线法确定,即 $P$ - $CMOD$ 曲线中线性段与非线性段的拐点.各组试件(每组3根试件)的起裂荷载 $P_{mi}$ 和峰值荷载 $P_{un}$ 如图4所示.由图4可见,与20℃养护试件相比,45℃养护试件的起裂荷载和峰值荷载均保持不变;60~95℃养护试件的起裂荷载平均值从2.02 kN下降至1.43 kN,分别降低了10.2%、28.5%和36.7%,峰值荷载平均值从3.86 kN下降至3.04 kN,分别降低了6.5%、19.5%和26.1%.由此可

见,合理的养护温度不仅可以使构件在早期具有较高的承载力,还能够保证其后期的力学性能.

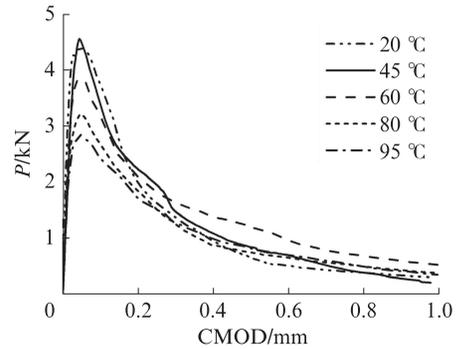


图3 不同养护温度下试件的 $P$ - $CMOD$ 曲线

Fig. 3  $P$ - $CMOD$  curves of specimens under different curing temperatures

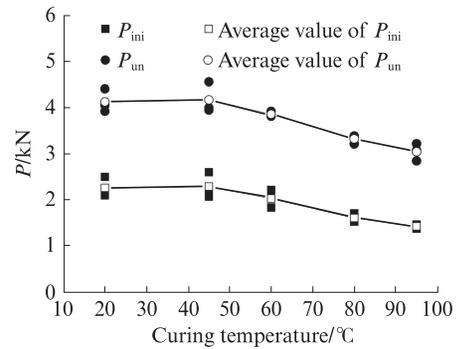


图4 各组试件的起裂荷载和峰值荷载

Fig. 4 Initiation load and maximum load of specimens

### 2.2 断裂能和特征长度计算结果

图5给出了各组试件的断裂能和特征长度.由图5可见:20℃养护试件与45℃养护试件的断裂能和特征长度基本相同;养护温度超过45℃后,随着养护温度的增加,断裂能从129.77 N/m下降到93.96 N/m,特征长度从302.0 mm减小到225.4 mm,均呈下降趋势

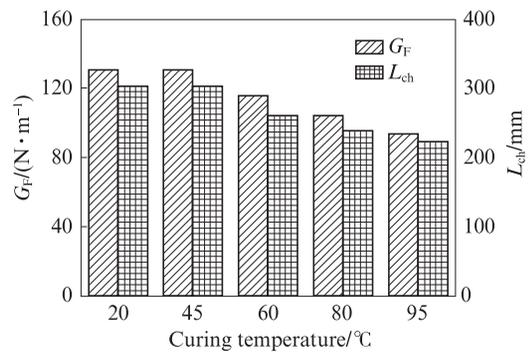


图5 各组试件的断裂能及特征长度

Fig. 5 Fracture energy and characteristic length of specimens

势;与45℃养护试件相比,60、80、95℃养护试件的断裂能分别降低11.0%、19.8%和27.6%,特征长度分别降低14.0%、20.6%和25.7%,说明随着养护温度的增加,混凝土脆性逐渐增大。

### 2.3 双K断裂参数计算结果

根据式(4)~(6)计算得到各组试件的起裂韧度 $K_{IC}^{ini}$ 、失稳断裂韧度 $K_{IC}^{un}$ 和黏聚断裂韧度 $K_{IC}^c$ 等断裂参数,如表1所示。为了验证曲线法测定的起裂韧度 $K_{IC}^{ini}$

的准确性,首先通过黏聚断裂韧度 $K_{IC}^c$ 计算起裂韧度 $K_{IC}^{ini*}$ ,即 $K_{IC}^{ini*} = K_{IC}^{un} - K_{IC}^c$ ,通过对比 $K_{IC}^{ini*}$ 和 $K_{IC}^{ini}$ 发现,两者之间的最大相对误差为9.7%,表明 $K_{IC}^{ini*}$ 与 $K_{IC}^{ini}$ 值吻合良好。分析断裂参数可知,养护温度从20℃升至95℃时,试件的起裂韧度从0.529 MPa·m<sup>1/2</sup>降至0.370 MPa·m<sup>1/2</sup>, $P_{mi}/P_{un}$ 的平均值从0.55降至0.47,说明随着养护温度的增加,混凝土更容易开裂,脆性增大。

表1 断裂试验结果

Table 1 Test results of TPB specimens

Curing temperature/℃	$P_{mi}/N$	$P_{un}/N$	CMOD <sub>c</sub> /μm	$a_c/mm$	$K_{IC}^{un}/(MPa \cdot m^{1/2})$	$K_{IC}^c/(MPa \cdot m^{1/2})$	$K_{IC}^{ini*}/(MPa \cdot m^{1/2})$	$K_{IC}^{ini}/(MPa \cdot m^{1/2})$
20	2 260	4 123	49.12	47.10	1.420	0.925	0.495	0.529
45	2 290	4 166	48.35	46.97	1.425	0.937	0.488	0.535
60	2 029	3 856	46.00	44.90	1.256	0.807	0.448	0.485
80	1 615	3 319	45.16	46.03	1.139	0.708	0.431	0.405
95	1 430	3 046	47.26	46.40	1.065	0.666	0.399	0.370

图6给出了不同养护温度下蒸养混凝土的断裂韧度变化趋势。由图6可知,各组试件的起裂韧度和失稳断裂韧度变化趋势大致相同。养护温度从20℃到45℃时,试件的起裂韧度和失稳断裂韧度基本保持不变;养护温度由45℃升至95℃时,试件的起裂韧度减小0.165 MPa·m<sup>1/2</sup>,失稳断裂韧度减小0.360 MPa·m<sup>1/2</sup>。与20℃养护试件相比,经过45~95℃蒸汽养护后,试件的起裂韧度分别达到其值的101.1%、91.6%、76.5%、69.8%,失稳断裂韧度分别达到其值的100.4%、88.4%、80.2%、75.0%。由此可见,45℃养护条件可以保证混凝土后期的断裂性能,60℃养护条件下,混凝土断裂韧度的损失程度约为10%。因此,考虑混凝土力学性能以及实际应用的经济性,就本文所研究的混凝土而言,其养护温度不宜超过60℃。

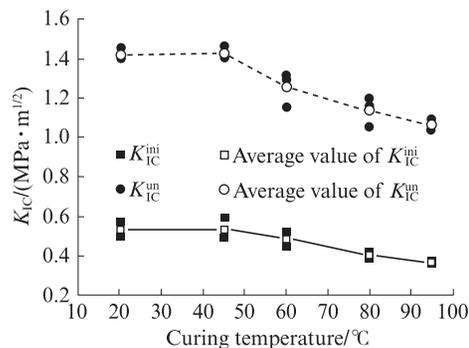


图6 不同养护温度下试件的断裂韧度  
Fig. 6 Fracture toughness of specimens

### 2.4 初始损伤与断裂韧度损失率的关系

图7中的黑色线条代表试件表面及内部由于热损伤效应引起的微裂纹。可以看出:45℃养护试件的表层完好,断裂面比较密实;95℃养护试件的损伤劣化严重,其表面及断裂面出现了许多微裂纹。说明随着养护温度的升高,混凝土表面和内部损伤逐渐严重,与文献[2]结论一致。因此上述断裂试验结果可以解释为:在蒸汽养护早期,浆体与骨料的结合面强度不足,随着养护温度的增加,混凝土内部由于热损伤造成的初始缺陷明显增多,降低了混凝土的断裂性能,导致其更容易开裂且脆性增大。

为了反映混凝土材料内部的劣化程度,研究者<sup>[19-21]</sup>通常采用弹性模量和抗压强度来描述混凝土的损伤劣化规律。因此,在上述试验结果分析的基础上,定义高温养护后试件的强度损伤因子和断裂韧度损失率为:

$$D(T) = 1 - f(T)/f_0 \quad (7)$$

式中: $D(T)$ 是养护温度 $T$ 下试件的强度损伤因子或断裂韧度损失率; $f(T)$ 是养护温度 $T$ 下试件的力学性能参数( $E_c$ 或 $f_c$ )或双K断裂韧度; $f_0$ 是20℃养护试件的力学性能参数( $E_c$ 或 $f_c$ )或双K断裂韧度。

通过式(7)计算了各组试件的强度损伤因子和断裂韧度损失率,结果见图8。由图8可见:养护温度从45℃升到95℃时,采用弹性模量定义的试件强度损伤因子 $D_E$ 值分别为-0.7%、10.0%、21.6%、

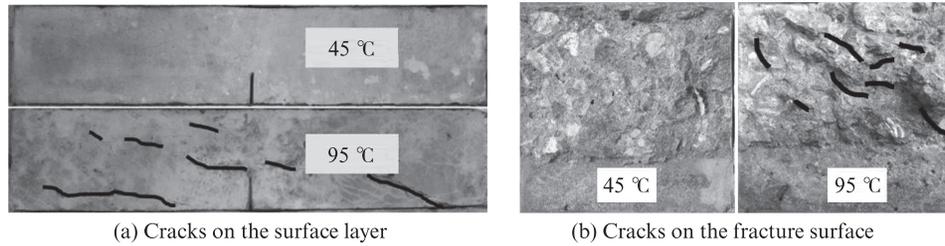


图7 试件表面及断裂面损伤示意图

Fig. 7 Degradation of surface layer and fracture surface of specimens

27.5%;采用抗压强度定义的试件强度损伤因子 $D_E$ 值分别为-1.7%、7.3%、14.7%、26.1%;断裂韧度损失率与强度损伤因子 $D_E$ 、 $D_{Ic}$ 值随着养护温度变化的趋势一致,呈正相关关系;其与 $D_E$ 和 $D_{Ic}$ 值的相关系数分别为0.99和0.97,最大相对误差分别为4.2%和8.7%。由此可见,断裂韧度损失率与强度损伤因子具有良好的相关关系,可以采用 $D_E$ 和 $D_{Ic}$ 值来近似预测混凝土断裂韧度的损失程度。

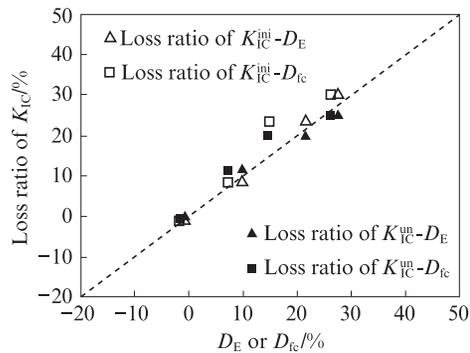


图8 强度损伤因子与断裂韧度损失率的关系

Fig. 8 Relationship between strength damage factors and loss ratio of fracture toughness

### 3 结论

(1)45℃养护条件与20℃养护条件下的混凝土力学性能和断裂性能基本相同,养护温度大于45℃后,随着养护温度的增加,混凝土的力学性能和断裂性能逐渐降低。

(2)养护温度在45~95℃范围时,随着养护温度的增加,混凝土的起裂荷载、峰值荷载、双K断裂参数、断裂能和特征长度均呈逐渐下降的趋势。

(3)过高的养护温度会在一定程度上降低混凝土的断裂性能.综合考虑蒸养过程中的热损伤及其对混凝土力学性能的影响,养护温度不宜高于60℃。

(4)采用弹性模量和抗压强度定义的强度损伤因子与混凝土断裂韧度损失率近似相等,可以采用

强度损伤因子为不同养护温度条件下蒸养混凝土的断裂参数提供依据。

### 参考文献:

- [1] 贺智敏,龙广成,谢友均,等.蒸养混凝土的表层伤损效应[J].建筑材料学报,2014,17(6):994-1000,1008.  
HE Zhimin, LONG Guangcheng, XIE Youjun, et al. Surface layer degradation effect of steam-cured concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(6): 994-1000, 1008. (in Chinese)
- [2] 贺智敏.蒸养混凝土的热损伤效应及其改善措施研究[D].长沙:中南大学,2012.  
HE Zhimin. Heat damage effects of steam curing on concrete and corresponding improvement measures[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [3] TÜRKEL S, ALABAS V. The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(2):405-411.
- [4] BA M F, QIAN C X, GUO X J. Effects of steam curing on strength and porous structure of concrete with low water/binder ratio [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1):123-128.
- [5] LIU B J, XIE Y J, ZHOU S Q, et al. Some factors affecting early compressive strength of steam-curing concrete with ultra-fine fly ash [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(10):1455-1458.
- [6] 苏扬,徐志辉,丑纪能,等.蒸养制度对预制构件混凝土早期强度的影响研究[J].混凝土与水泥制品,2019(3):48-50.  
SU Yang, XU Zhihui, CHOU Jineng, et al. Effects research of steam curing system on the early strength of precast concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2019(3): 48-50.(in Chinese)
- [7] 吴建华,刘运兰,邓少桢.蒸养混凝土早期强度影响因素研究[J].宁波大学学报(理工版),2010,23(4):112-116.  
WU Jianhua, LIU Yunlan, DENG Shaozhen. Effect of forepart strength of cured-concrete[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering), 2010, 23(4): 112-116. (in Chinese)
- [8] 贺炯煌,马昆林,龙广成,等.蒸汽养护过程中混凝土力学性能的演变[J].硅酸盐学报,2018,46(11):1584-1592.  
HE Jionghuang, MA Kunlin, LONG Guangcheng, et al. Me-

- chanical properties evolution of concrete in steam-curing process [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(11):1584-1592. (in Chinese)
- [9] 李霖皓, 龙广成, 刘芳萍, 等. 混凝土在蒸养过程中的变形性能[J]. *材料导报*, 2019, 33(8):1322-1327.  
LI Linhao, LONG Guangcheng, LIU Fangping, et al. Deformation behavior of concrete during steam curing [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(8):1322-1327. (in Chinese)
- [10] 谢友均, 王猛, 马昆林, 等. 不同养护温度下蒸养混凝土的冲击性能[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3):521-528, 536.  
XIE Youjun, WANG Meng, MA Kunlin, et al. Impact mechanical characteristic of steam cured concrete under different curing temperatures [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3):521-528, 536. (in Chinese)
- [11] KEPPERT M, FORT J, TRNÍK A, et al. Behavior of sandstones under heat treatment [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2017, 38(4):60.
- [12] GUAN J F, LI Q B, WU Z M, et al. Minimum specimen size for fracture parameters of site-casting dam concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93:973-982.
- [13] 尹阳阳, 胡少伟, 王宇航. 自重对混凝土三点弯曲梁断裂性能的影响[J]. *工程力学*, 2019, 36(7):48-57.  
YIN Yangyang, HU Shaowei, WANG Yuhang. Influence of self-weight on the fracture properties of three-point bending concrete beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(7):48-57. (in Chinese)
- [14] WANG Y, HU S W, FAN X Q, et al. Effect of water pressure on fracture parameters of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 199:613-623.
- [15] 范向前, 刘决丁. FRP增强预制裂缝混凝土的断裂性能[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2):328-333, 371.  
Fan Xianqian, LIU Jueding. Fracture characteristics of FRP reinforced precast cracked concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2):328-333, 371. (in Chinese)
- [16] RILEM Technical Committee 50-FMC. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams [J]. *Materials and Structures*, 1985, 18(106):287-290.
- [17] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6):773-782.
- [18] XU S L, REINHARDT H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams [J]. *International Journal of Fracture*, 1999, 98:151-177.
- [19] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1985, 107(1):83-89.
- [20] GUO Y Z, CHEN X D, LI X J. Experimental study on fracture behavior of three-graded concrete under cyclic loading after initial static loading [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, 103:1-12.
- [21] 薛翠真, 申爱琴, 乔宏霞. 掺CWCPM混凝土的冻融损伤机理及演化模型[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(3):136-144.  
XUE Cuizhen, SHEN Aiqin, QIAO Hongxia. Freezing-thawing damage mechanism and evolution model of concrete mixed with CWCPM [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 2020, 48(3):136-144. (in Chinese)