

# 钢渣细骨料混凝土软化曲线逆推分析

薛刚,张一帆\*,刘江森,董伟

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

**摘要:**为研究钢渣细骨料体积分数对混凝土软化特性的影响,选用安定性满足规范限值要求的钢渣细骨料配制混凝土进行楔入劈拉试验,通过 ISIGHT 集成 MATLAB 和 ABAQUS 建立逆分析程序,推演得到钢渣细骨料混凝土的三线性软化曲线,基于楔入劈拉试验结果验证了软化曲线有限元分析的准确性。结果表明:钢渣能够明显提高混凝土的抗拉强度并加大混凝土开裂后的应力降幅,当混凝土中钢渣的体积分数为 20% 时,三线性软化曲线第二段斜率降幅最大;软化曲线尾端混凝土开裂位移随钢渣体积分数的增加而降低,混凝土延性变差。钢渣细骨料混凝土逆推软化曲线为研究其软化性能提供了理论依据。

**关键词:**材料工程;钢渣混凝土;楔入劈拉;逆分析法;软化曲线

中图分类号:TU528.51

文献标志码:A

引用格式:薛刚,张一帆,刘江森,等. 钢渣细骨料混凝土软化曲线逆推分析[J]. 山东大学学报(工学版),2025,55(6):120-128.

XUE Gang, ZHANG Yifan, LIU Jiansen, et al. Inverse analysis on the softening curve of steel slag fine aggregate concrete[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(6):120-128.

## Inverse analysis on the softening curve of steel slag fine aggregate concrete

XUE Gang, ZHANG Yifan\*, LIU Jiansen, DONG Wei

(Civil Engineering School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** In order to study the influence of steel slag fine aggregate volume fraction on the softening characteristics of concrete, the steel slag fine aggregate with stability meeting the specification limit requirements was selected to prepare concrete for wedge splitting test, and the inverse analysis program was established by ISIGHT integrated MATLAB and ABAQUS, and the trilinear softening curve of steel slag fine aggregate concrete was deduced, and the accuracy of finite element analysis of the softening curve was verified based on the wedge splitting tensile test results. The results showed that steel slag could significantly improve the tensile strength of concrete and accelerate the stress reduction of concrete after cracking. When the steel slag volume fraction was 20%, the slope of the second segment of the trilinear softening curve decreased the most. The cracking displacement of concrete at the end of the softening curve decreased with the increase of steel slag volume fraction, and the ductility of concrete deteriorated. The softening curve of steel slag fine aggregate concrete provided a theoretical basis for studying its softening performance.

**Keywords:** materials engineering; steel slag concrete; wedge and split; inverse analysis method; softening curve

## 0 引言

目前我国钢渣堆存量高达 10 亿 t,有效利用率仅为 20% 左右,与发达国家相比还有很大差距<sup>[1]</sup>。为解决钢渣大规模资源化利用这一难题,可将钢渣作为骨料制备钢渣混凝土用于道路工程,或替代天

然砂石制备高强、高耐磨、高抗冻性混凝土路面砖。当路面承受的劈拉应力逐渐增加时,材料逐渐从弹性工作阶段进入塑性工作阶段,抵抗劈拉应力的能力逐渐降低,表现出软化现象。

钢渣粉磨工艺能耗较高,市场接受程度偏低,没有得到广泛应用和推广,将钢渣加工成粗骨料或细骨料后使用得到工程界和学术界的关注。钢渣

收稿日期:2024-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168032);2023年度内蒙古自治区直属高校基本科研业务费资助项目(2023RCTD025)

第一作者简介:薛刚(1968—),男,内蒙古包头人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为新型建筑材料与混凝土力学。

E-mail: xuegang-2008@126.com

\*通信作者简介:张一帆(1999—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为钢渣混凝土软化本构关系。E-mail:15952184224@163.com

成分复杂,与大块体钢渣相比,较小粒径钢渣的理化及力学性能更加稳定,并且钢渣细骨料混凝土的变形能力和延性指标优越于钢渣粗骨料混凝土。

钢渣混凝土由水泥、钢渣骨料、砂石骨料复合而成,其断裂性能特别是软化特性是评估路面安全性及长期耐久性的关键因素<sup>[2]</sup>。混凝土软化曲线描绘了混凝土从初始损伤至最终破坏的应力与位移之间的动态关系,直观展示了混凝土软化过程,由此可深入理解其断裂破坏机制<sup>[3-4]</sup>。目前国内外学者在普通混凝土软化特性方面已积累了较为丰富的研究成果,并建立了理论模型与试验方法,但有关钢渣细骨料混凝土软化特性还鲜有报道。鉴于钢渣混凝土在工程应用中存在弯折、断裂等问题,深入探究钢渣混凝土的软化特性显得尤为重要<sup>[5-6]</sup>。

确定软化曲线的方法一般有直接拉伸法、 $J$ 积分法<sup>[7]</sup>和逆分析法<sup>[8]</sup>等。直接拉伸法能够快速且直观地得到材料断裂过程的应力-应变关系曲线,该方法面临的挑战在于对试验测试系统要求极高且在获取混凝土软化曲线方面技术难度较大; $J$ 积分法可间接获得 $J$ 值和裂缝口位移 $w$ 的关系曲线( $J$ - $w$ 曲线),对 $J$ - $w$ 曲线微分可获得软化曲线,该法难以获得 $P$ - $w$ (荷载-裂缝口张开位移)曲线的尾端,需要大量试验作辅助以减少误差,很难获得准确的软化曲线;逆分析法借助有限元模型和逆分析程序获得软化曲线,分析过程中不断调整各参数限值范围,确保 $P$ - $w$ 模拟曲线与试验曲线高度一致,并准确重构加载过程中混凝土的软化行为,进而绘制出高精度的软化曲线。其中逆分析法在混凝土材料力学特性的研究具有重要地位,特别是在需要精确评估混凝土软化行为及其影响因素的场景中,更加凸显其应用价值。

本研究基于楔入劈拉试验,通过 ISIGHT 集成 MATLAB 和 ABAQUS 建立逆分析程序,逆推得到钢渣细骨料混凝土各体积分数的三线性软化曲线,为深入理解钢渣细骨料混凝土断裂过程的力学行为及破坏特性提供科学依据。

## 1 钢渣混凝土安定性

钢渣作为细骨料用于混凝土中,其稳定性是制约结构性能的关键因素<sup>[9]</sup>。钢渣成分复杂且含有安定性不良组分,其中游离氧化钙和方镁石水化反应容易造成试件体积膨胀,导致钢渣无法实现大规模高值化应用,通过安定性试验确定钢渣细骨料的

合理体积分数对钢渣混凝土的推广应用具有重要意义<sup>[10-11]</sup>。

### 1.1 试验方法

钢渣细骨料取自包钢集团公司,体积安定性试验依据《水泥压蒸安定性试验方法》(GB/T750—1992)<sup>[12]</sup>进行。制备钢渣体积分数分别为0、10%、20%、30%、50%的尺寸为25 mm×25 mm×280 mm的砂浆棒,标准养护24 h后拆模,测量初始长度;再将试件放在饱和蒸汽压力为2.0 MPa、温度为216 ℃的压蒸釜中压蒸3 h,待其冷却后取出试件,测量其长度并观察不同钢渣体积分数的混凝土的外观形态。膨胀率计算公式为

$$L_A = \frac{L_1 - L_0}{L} \times 100, \quad (1)$$

式中: $L_A$ 为试件膨胀率,%; $L$ 为试件有效长度,250 mm; $L_1$ 为试件压蒸后长度,mm; $L_0$ 为试件脱模后长度,mm。

### 1.2 试验结果

混凝土中钢渣的体积分数为0、10%、20%、30%、50%时,对应砂浆棒膨胀量分别为0.033、0.087、0.122、0.149、0.325 mm。随着钢渣体积分数的增加,砂浆棒膨胀率逐渐增加,且钢渣体积分数小于30%时砂浆棒安定性良好,能够满足《钢渣应用技术要求》(GB/T32546—2016)<sup>[13]</sup>中小于0.8%的限值要求。钢渣体积分数为50%的砂浆棒压蒸后,表面出现大面积脱落,不宜用于制备砂浆棒。

## 2 楔入劈拉试验设计

### 2.1 试验概况

相比于三点弯曲试验方法,楔入劈拉试验能更有效地减少试验误差。楔形加载架具有独特的倾斜面结构,施加的垂直力能够沿着预设路径,通过内置的滚轴系统向水平方向转换。为了保障竖向荷载均匀施加与稳定传递,将楔形加载架精确安置于2个经过严格校准的传力板之间,并确保处于水平状态。滚轴在此过程中不仅传递力,还显著降低了摩擦效应,确保能量高效转换并提高加载精度,降低试验过程的不确定性与误差源。在力学性能测试中,试件设有预留初始裂缝,底部双钢轴支承确保稳定加载,以便精准掌握钢渣混凝土劈拉过程中的力学响应。

试验装置安装完毕后,在楔形加载架上放置5 t油压千斤顶,在千斤顶上表面放置10 kN荷载传感器并与采集仪相连,实时测试加载架提供的反力。

裂缝口张开位移用 YYJ-4/10 夹式引伸计测量,用螺栓将夹式引伸计固定在试件中间预留凹槽处。加载前,用水平仪检测传力板与楔形加载架是否平衡,确保试件两侧的竖向力均匀。若出现不平衡的情况,则需在试件与传力板之间用垫片调节,使传力板保持水平。

加载时首先以较慢速率手动加载千斤顶,并在

加载装置与荷载传感器接触时微调传力装置使其完全对中,随后调节加载速率控制在 20~40 N/s。试验过程中应观察试件裂缝的出现和发展。

根据《水工混凝土断裂试验规程》(DL/T5332—2005)<sup>[14]</sup>,试件尺寸为 200 mm×200 mm×230 mm,具体尺寸如图 1 所示,试件分组及编号如表 1 所示。

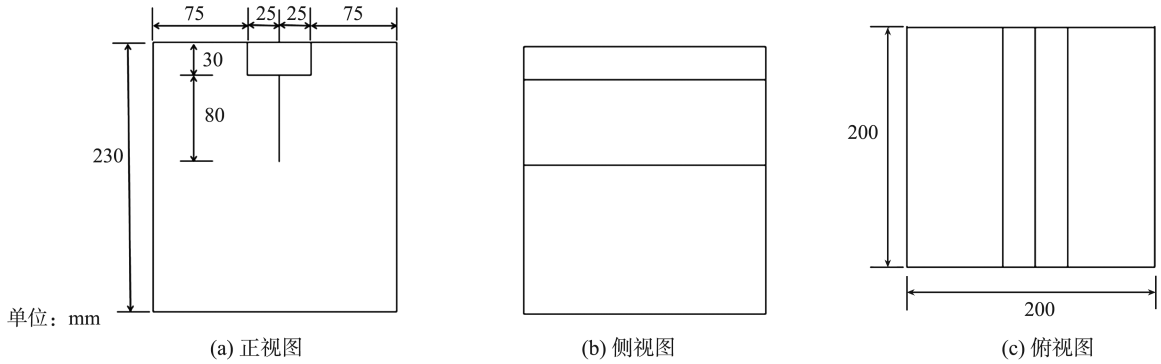


图 1 楔入劈拉试件尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of the size of the wedge-in splitting specimen

表 1 试件分组  
Table 1 Specimen group

| 试件编号      | 混凝土中钢渣的体积分数/% | 预制裂缝长度/mm | 缝高比 |
|-----------|---------------|-----------|-----|
| NC-80     | 0             | 80        | 0.4 |
| SSC-10-80 | 10            | 80        | 0.4 |
| SSC-20-80 | 20            | 80        | 0.4 |
| SSC-30-80 | 30            | 80        | 0.4 |

表 1 的试件编号中,NC 为普通混凝土,SSC 为钢渣混凝土,10、20、30 为混凝土中钢渣的体

积分数。

## 2.2 试验原材料

采用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,水泥的物理性能见表 2,水泥的化学成分见表 3。细集料采用普通河砂与钢渣,河砂最大粒径为 5 mm,细度模数为 2.6;钢渣细集料级配满足 II 区中砂要求,主要化学成分见表 4,钢渣骨料物理性能见表 5<sup>[15]</sup>;粗骨料采用 5~25 mm 石子,连续级配;采用聚羧酸高性能减水剂。

表 2 水泥物理性能指标

Table 2 Physical properties of cement

| 标准稠度用水量/% | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) | 安定性 | 初凝时间/min | 终凝时间/min | 抗压强度/MPa |      | 抗折强度/MPa |      |
|-----------|--------------------------|--|-----|----------|----------|----------|------|----------|------|
|           |                          |  |     |          |          | 3 d      | 28 d | 3 d      | 28 d |
| 27        | 3.14                     | 350                                      | 合格  | 115      | 255      | 24.6     | 47.7 | 5.7      | 9.3  |

表 3 水泥主要化学成分

Table 3 Main chemical composition of cement

| 化学成分   | SiO <sub>2</sub> | CaO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | SO <sub>3</sub> |
|--------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|
| 质量分数/% | 24.98            | 60.90 | 6.42                           | 3.56                           | 2.42 | 0.56            |

表 4 钢渣主要化学成分

Table 4 Main chemical composition of steel slag

| 化学成分   | SiO <sub>2</sub> | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | 其他  |
|--------|------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|
| 质量分数/% | 15.2             | 42.3 | 5.3                            | 22.9                           | 7.1 | 7.2 |

表 5 钢渣骨料物理性能指标

Table 5 Physical properties of steel slag aggregate

| 表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 细度模数 | 堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 吸水率/% | 含水率/% |
|----------------------------|------|----------------------------|-------|-------|
| 3 440                      | 2.94 | 1 800                      | 3.70  | 0.25  |

## 2.3 P-w 试验曲线

为了获得准确的 P-w 试验曲线(裂缝口张开位

移 CMOD 用 w 代替),提高逆推软化曲线的准确性,在试验中,将支承轴置于试件底部 1/4 处可大幅

度抵消竖向荷载,且计算水平荷载的补偿值以抵消竖向荷载的影响。

$P-w$  试验曲线峰值荷载的补偿荷载  $P_c$  计算结果如表 6 所示。表 6 中,  $G_1$ 、 $G_2$  之和为试件重力的一半,  $G_3$  为传力板的重力,  $P_v$  为竖向荷载,  $R_1$  为支

撑力,  $M_2$  为竖向荷载产生的力矩,  $P_c$  为转换后的水平荷载。利用 MATLAB 对补偿处理后的试验曲线进行线性插值,精确描绘出 1 mm 厚度试样的  $P-w$  试验曲线,如图 2 所示。

表 6 峰值荷载补偿计算结果

Table 6 Calculation results of peak load compensation

| 试件编号      | $G_1$ | $G_2$ | $G_3$ | $P_v$ | $R_1$ | $M_2$ | $P_c$ |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NC-80     | 0.853 | 0.254 | 0.341 | 2.472 | 2.684 | 0.289 | 1.865 |
| SSC-10-80 | 0.841 | 0.252 | 0.341 | 2.528 | 2.698 | 0.290 | 1.877 |
| SSC-20-80 | 0.847 | 0.253 | 0.341 | 2.834 | 2.858 | 0.308 | 1.987 |
| SSC-30-80 | 0.853 | 0.254 | 0.341 | 2.756 | 2.826 | 0.305 | 1.968 |

单位: N

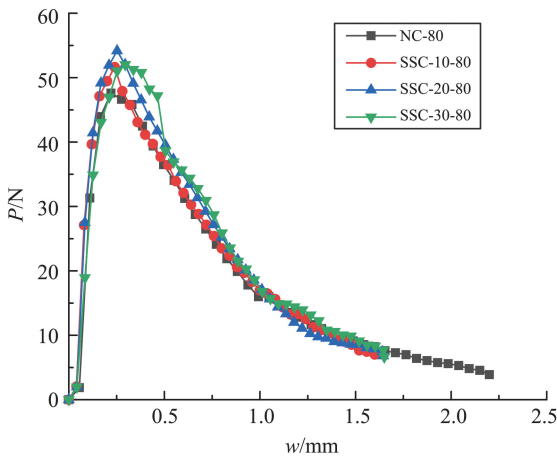


图 2 钢渣细骨料混凝土  $P-w$  试验曲线

Fig.2  $P-w$  test curve of steel slag fine aggregate concrete

ABAQUS 模拟劈拉断裂时,  $P-w$  曲线形状的影响因素不仅有软化曲线,还包括罚刚度  $K$  和弹性模量  $E$ 。本研究将弹性模量  $E$  和罚刚度  $K$  作为逆分析程序中的变化参数,以切线弹性模量  $E_t$  和割线弹性模量  $E_c$  作为弹性模量  $E$  变化的上下限,而对  $K$  的变化范围不做限定。

切线弹性模量计算式为

$$E_t = \frac{1}{bc} \left[ 13.18 \left( 1 - \frac{a_0 + h_0}{h + h_0} \right)^{-2} - 9.16 \right], \quad (2)$$

式中:  $a_0$  为初始裂缝长度, m;  $b$  为试件厚度, m;  $c_i$  为  $P-w$  曲线上上升段直线上任意一点的斜率,  $c_i = P_i/V_i$ , 其中  $V_i$ 、 $P_i$  分别为  $P-w$  曲线上上升段直线上任意一点的纵横坐标。

割线弹性模量计算式为

$$E_c = \frac{1}{bc} \left[ 13.18 \left( 1 - \frac{a_0 + h_0}{h + h_0} \right)^{-2} - 9.16 \right], \quad (3)$$

式中:  $h$  为有效试件高度, m;  $h_0$  为装置夹式引伸计刀口薄钢板的厚度, m;  $c$  为  $P-w$  曲线峰值荷载点与原点连线的斜率,  $c = P_{\max}/V_{\max}$ , 其中  $V_{\max}$ 、 $P_{\max}$  分别为  $P-w$  曲线的峰值荷载所对应的纵横坐标。

切线弹性模量  $E_t$  与割线弹性模量  $E_c$  分别由式

(2)、(3) 计算得到,刚度  $K$  为图 2 中峰值荷载点与原点的连线斜率,初始抗拉强度  $f_t$  为峰值荷载与受力面积的比值,计算结果如表 7 所示。

表 7 弹性模量相关参数计算结果

Table 7 Calculation results of elastic modulus related parameters

| 试件编号      | $E_c$ /MPa | $E_t$ /MPa | $K$ /( $N \cdot m^{-1}$ ) | $f_t$ /MPa |
|-----------|------------|------------|---------------------------|------------|
| NC-80     | 4 437      | 43 039     | 68.600                    | 1.849      |
| SSC-10-80 | 4 282      | 41 515     | 60.880                    | 1.989      |
| SSC-20-80 | 4 096      | 39 624     | 58.153                    | 2.090      |
| SSC-30-80 | 3 685      | 35 746     | 52.579                    | 2.040      |

### 3 软化曲线逆推与分析

#### 3.1 软化曲线的逆推

采用文献 [16] 推广的逆分析程序,通过 ISIGHT 集成 MATLAB 和 ABAQUS 协同工作进而逆推得到钢渣细骨料混凝土的软化曲线。

ABAQUS 模拟劈拉断裂试验试件网格划分如图 3 所示。本研究施加位移荷载,加载距离根据不同试验的裂缝口张开位移而定,位移加载距离为试验  $P-w$  曲线尾部最末点裂缝口张开位移的 3 倍。单元横向尺寸为 15 mm,预制裂缝宽 2.5 mm,紧靠预制裂缝处两侧的单元宽度为 10 mm。竖向尺寸预制裂缝下方为 5 mm,上方为 15 mm。单元数量为 474 个。

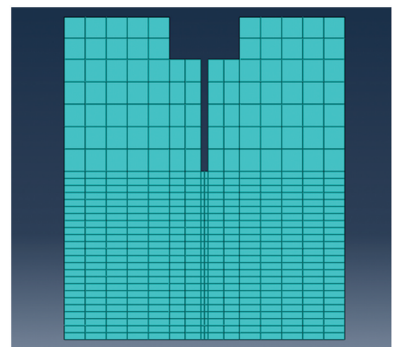


图 3 试件网格划分示意图

Fig.3 Schematic diagram of specimen meshing

用 ABAQUS 模拟裂缝扩展时采用黏性单元模型,其软化本构关系以损伤变量  $d$  和损伤位移  $w$  表述。损伤变量与位移关系示意如图 4 所示。软化本构关系公式为

$$\begin{cases} d=0, 0<\omega<\omega_0 \\ d=1-\frac{K_{1n}}{K}, \omega_0<\omega<\omega_1 \\ d=1-\frac{K_{2n}}{K}, \omega_1<\omega<\omega_c \\ d=1, \omega_c<\omega \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $d$  为损伤变量,即损伤程度的量化,无量纲; $K$  为罚刚度, $K=f_t/\omega_0$ ;  $w_0$  为拉应力达到  $f_t$  时的混凝土的变形量,mm,根据图 2 确定; $\sigma_1$ 、 $w_1$  分别为转折点处的应力、应变,单位分别为 N、mm; $K_{1n}$ 、 $K_{2n}$  分别为软化曲线的下降段尾端的罚刚度,根据图 2 确定, $K_{in} = \sigma_x/\omega_x$ ,  $\sigma_x$  为裂缝位移为  $w_x$  时裂

缝间的应力; $w_c$  为断裂时的裂缝位移,mm。

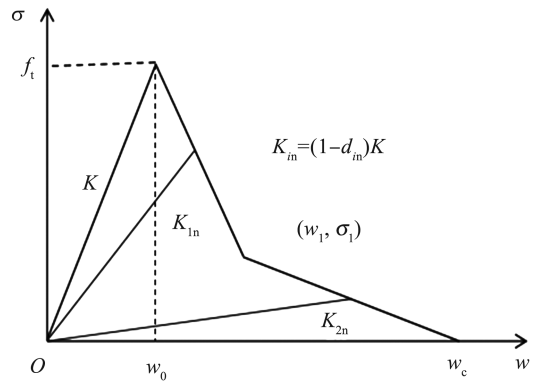


图 4 损伤变量与位移关系示意  
Fig.4 Schematic diagram of the relationship between damage variables and displacement

通过试验  $P-w$  曲线与式(4) 计算得到损伤变量  $d$  和损伤位移  $w$  如表 8 所示。

表 8 损伤变量与损伤位移计算结果

Table 8 Damage variables and damage displacement calculations

| 试件编号      | $d_1$ | $w_1/mm$ | $d_2$   | $w_2/mm$ | $d_3$   | $w_3/mm$ | $d_4$ | $w_4/mm$ |
|-----------|-------|----------|---------|----------|---------|----------|-------|----------|
| NC-80     | 0     | 0        | 0.885 6 | 0.064    | 0.995 4 | 0.249    | 1.0   | 0.534    |
| SSC-10-80 | 0     | 0        | 0.883 4 | 0.068    | 0.995 1 | 0.250    | 1.0   | 0.536    |
| SSC-20-80 | 0     | 0        | 0.882 8 | 0.074    | 0.994 6 | 0.255    | 1.0   | 0.539    |
| SSC-30-80 | 0     | 0        | 0.882 2 | 0.079    | 0.993 9 | 0.259    | 1.0   | 0.543    |

MATLAB 在整个逆分析程序中的作用主要有两方面:(1)在有限元模拟之前,需要将软化曲线的参数转化为刚度退化参数输入到有限元中,同时利用 MATLAB 对 ISIGHT 中输出的软化曲线参数取值范围进行限定,以此提高计算速度且获得更合理的软化曲线。(2)计算 ABAQUS 输出的  $P-w$  曲线与试验曲线误差,有限元软件输出的  $P-w$  曲线由数值点相连而成,数值点横轴间距需与图 2 中线性插值间距对应,以便能够计算 2 条曲线的误差。

ISIGHT 集成 ABAQUS 与 MATLAB 即可建成逆分析程序。ISIGHT 直接集成 ABAQUS 无法改写材料参数,所以在 ISIGHT 中的虚拟代码组件中,输入有限元中生成的模型代码可以模拟劈拉断裂,且能加快计算速度。ISIGHT 建立的逆分析程序界面如图 5 所示。

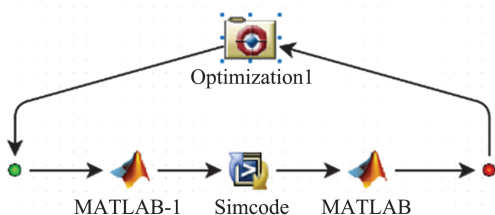


图 5 逆分析程序界面

Fig.5 The inverse analysis program interface

图 5 中,“MATLAB-1”模块作用是模拟前将软化曲线的参数转化为刚度退化参数输入有限元软件,保障计算顺畅进行;“Simcode”模块作用是模拟劈拉断裂试验并输出  $P-w$  曲线;“MATLAB”模块作用是计算 ABAQUS 输出的模拟  $P-w$  曲线与试验曲线的误差。

线性软化曲线分为单、双线性<sup>[17]</sup>与多线性<sup>[18]</sup>,其中多线性软化曲线由更多线段构成,能够更准确地表示混凝土软化关系。本研究采用三线性软化曲线模型描述钢渣细骨料混凝土的软化关系。三线性软化曲线如图 6 所示,该曲线 3 个阶段分别代表软化过程的初始阶段、中间过渡阶段和最终失效阶段。

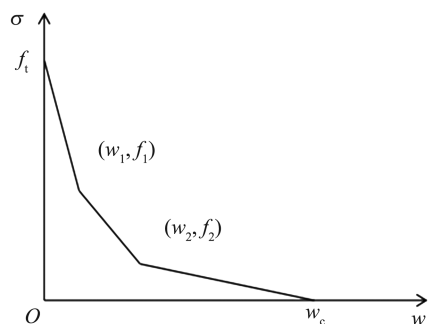


图 6 三线性软化曲线示意图

Fig.6 Schematic diagram of the three-linear softening curve

初始阶段代表微裂纹产生并扩展阶段,加载初期,裂纹出现在粗骨料周围并逐渐扩展;中间过渡阶段代表微裂纹扩展贯通形成主裂纹阶段,结构的整体性遭到破坏,曲线进入到下降段;最终失效阶段代表骨料摩擦拉出阶段,水泥浆体与骨料之间的黏结几乎完全丧失,骨料之间的相对位移增大,混凝土强度持续下降。

模拟混凝土在加载过程中裂缝扩展与承载能力下降的关系,三线性软化曲线的数学表达式为

$$\sigma = \begin{cases} f_t - \frac{(f_t - f_1)\omega}{\omega_1}, & 0 < \omega < \omega_1 \\ \frac{f_2 - f_1}{\omega_2 - \omega_1} \omega + \frac{f_1 \omega_2 - f_2 \omega_1}{\omega_2 - \omega_1}, & \omega_1 < \omega < \omega_c \\ f_2 - \frac{f_2(\omega - \omega_2)}{\omega_c - \omega_2}, & \omega_2 < \omega < \omega_c \\ 0, & \omega < \omega_c \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $f_t$  为抗拉强度,MPa;  $f_1$ 、 $f_2$  分别为曲线第一、

第二转折点的应力,MPa;  $w_1$ 、 $w_2$  分别为曲线第一、第二转折点的裂缝位移,mm。

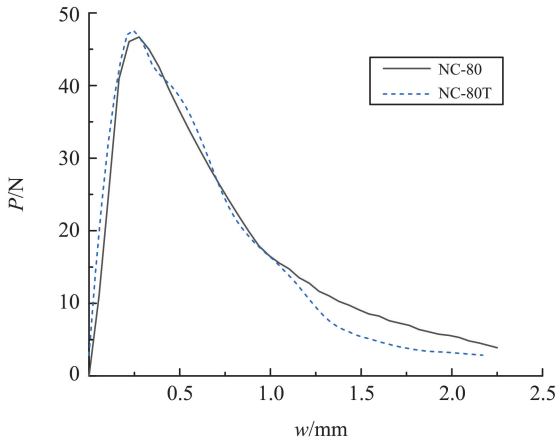
通过逆分析程序,获得了不同钢渣体积分数下的三线性软化曲线参数,如表9所示。

表9 三线性软化曲线参数

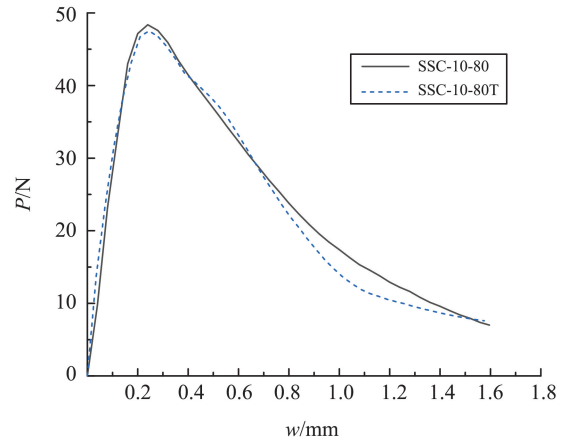
| 试件编号      | $f_t$ /MPa | $f_1$ /MPa | $f_2$ /MPa | $w_1$ /mm | $w_2$ /mm | $w_c$ /mm |
|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| NC-80     | 2.400      | 0.965      | 0.110      | 0.100     | 0.252     | 0.583     |
| SSC-10-80 | 2.400      | 1.140      | 0.156      | 0.111     | 0.299     | 0.638     |
| SSC-20-80 | 2.500      | 1.275      | 0.132      | 0.115     | 0.288     | 0.630     |
| SSC-30-80 | 2.700      | 1.282      | 0.126      | 0.120     | 0.269     | 0.621     |

### 3.2 三线性软化参数的验证

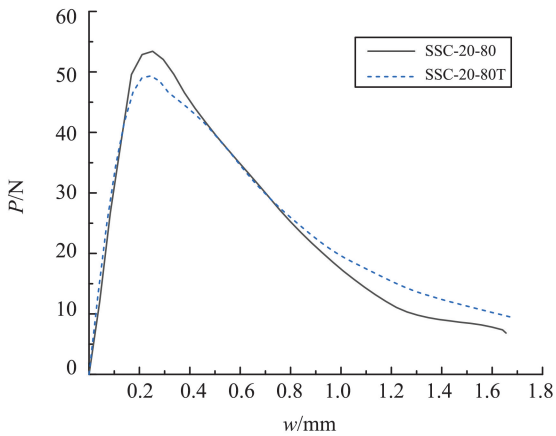
为了验证逆分析程序逆推所得三线性软化参数的准确性,将逆推所得参数代入有限元模型中,输出  $P-w$  曲线模拟结果,并与相同体积分数的试验  $P-w$  曲线对比,如图7所示。



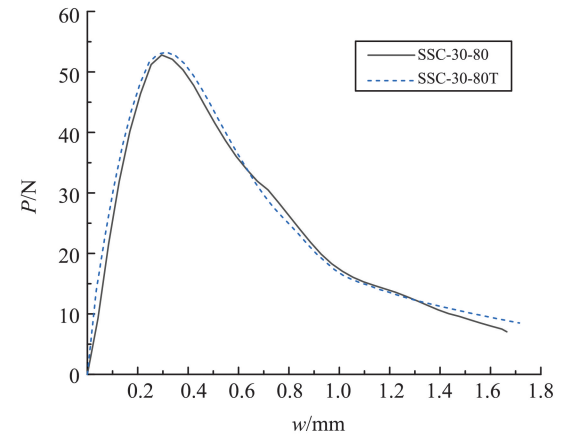
(a) NC-80模拟与试验  $P-w$  曲线图



(b) SSC-10-80模拟与试验  $P-w$  曲线图



(c) SSC-20-80模拟与试验  $P-w$  曲线图



(d) SSC-30-80模拟与试验  $P-w$  曲线图

图7 模拟与试验  $P-w$  曲线对比图

Fig.7 Comparison of  $P-w$  curves between simulation and experiment

由图7可以看出,  $P-w$  模拟曲线与试验结果拟合程度较高,说明逆推所得三线性软化参数较为精

确。上升段存在一定误差,主要原因是模拟中认为上升段是弹性阶段,不符合实际情况。混凝土的软

化发生在开裂后,因此只需要关注  $P-w$  曲线的下降段即可。

### 3.3 钢渣体积分数对软化曲线参数的影响

#### 3.3.1 钢渣体积分数对 $f_1$ 的影响

三线性软化参数  $f_1$  对比结果如图 8 所示,逆推所得的混凝土的抗拉强度  $f_1$  随钢渣体积分数的增加而增大,相较于普通混凝土,钢渣体积分数为 10%、20% 和 30% 的钢渣细骨料混凝土的抗拉强度分别增长 0.4、1.7% 和 12.50%。

钢渣细骨料混凝土抗拉强度增加的原因:界面过渡区作为连接骨料与水泥基体的关键微结构区域,对混凝土的抗拉性能具有重要影响。而钢渣表面粗糙,作为细骨料使用时表面孔洞与凝胶结合得较为密实,材料整体性得到明显改善,从而延缓了混凝土的破坏<sup>[19]</sup>。

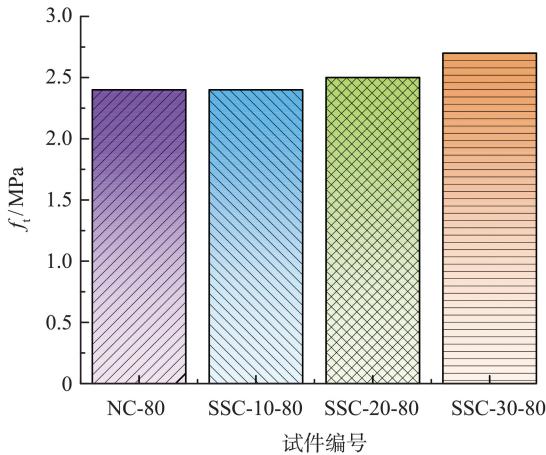


图 8 三线性软化参数  $f_1$  对比结果

Fig.8 Comparison of three linear softening parameters  $f_1$

#### 3.3.2 钢渣体积分数对 $f_1$ 和 $w_1$ 的影响

三线性软化曲线第一转折点的应力  $f_1$  和位移  $w_1$  随钢渣体积分数变化的对比结果如图 9、10 所示。

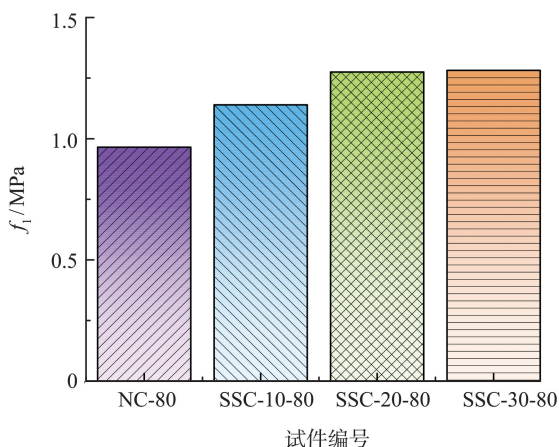


图 9 三线性软化参数  $f_1$  对比结果

Fig.9 Comparison of three linear softening parameters  $f_1$

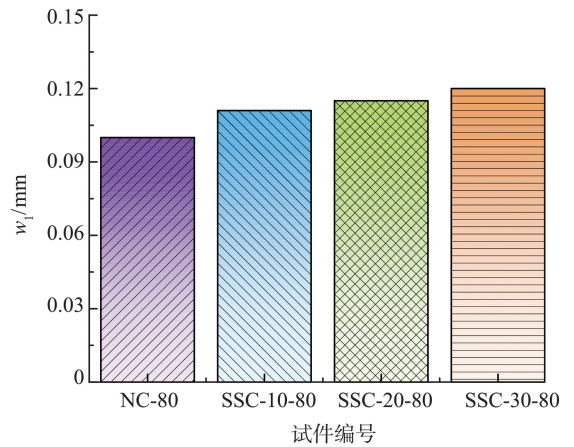


图 10 三线性软化参数  $w_1$  对比结果

Fig.10 Comparison of three linear softening parameters  $w_1$

由图 9 可以看出,  $f_1$  随钢渣体积分数的增加而增大。与普通混凝土相比,钢渣体积分数每增加 10%,应力  $f_1$  分别增长 18.1%、32.1%、32.8%,  $f_1$  随钢渣体积分数的变化机理与前文所述的抗拉强度变化机理类似。

由图 10 可以看出,三线性软化参数  $w_1$  随钢渣体积分数的增加而增大。钢渣体积分数每增加 10%,软化参数  $w_1$  的增长率分别为 11.00%、3.61%、4.34%,  $w_1$  在 0.115 mm 附近波动,最大  $w_1$  与最小  $w_1$  仅相差 7.5%,钢渣体积分数并未对软化参数  $w_1$  产生显著影响。无论是钢渣细骨料混凝土还是普通混凝土,软化曲线的第一转折点位移相近。

#### 3.3.3 钢渣体积分数对 $f_2$ 的影响

三线性软化参数  $f_2$  随钢渣体积分数的变化如图 11 所示。由图 11 可知,软化参数  $f_2$  随钢渣体积分数的增加先增大后减小,但不同钢渣体积分数的混凝土  $f_2$  均大于普通混凝土。钢渣细骨料混凝土体积分数每增加 10%,  $f_2$  先增长 41.80%,后分别下降 15.40% 和 4.54%。三线性软化曲线的第二段描述了断裂过程的裂纹扩展,前端为微裂纹扩展贯通阶段,此阶段钢渣细骨料混凝土的微裂纹少于普通混凝土,所有体积分数的  $f_2$  均大于普通混凝土;第二条线段的尾端对应多重裂纹连接撕裂进入骨料摩擦阶段,石子、砂浆抵抗外力的作用降低,随着钢渣体积分数的增大,混凝土的脆性性能得以体现,钢渣体积分数越大,应力  $f_2$  越小。

#### 3.3.4 钢渣体积分数对 $f_2/f_1$ 的影响

$f_1$ 、 $f_2$  分别对应三线性软化曲线第二段应力的始末,  $f_2/f_1$  代表三线性软化曲线第二段应力下降的速度,随着钢渣体积分数的增加其变化规律如图 12 所示。

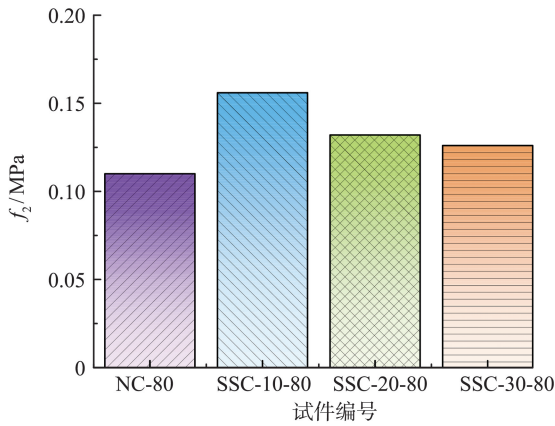


图 11 三线性软化参数  $f_2$  对比结果

Fig.11 Comparison of three linear softening parameters  $f_2$

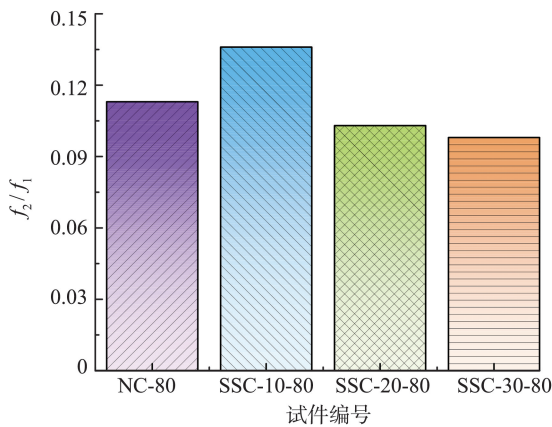


图 12 三线性软化参数  $f_2/f_1$  对比结果

Fig.12 Comparison of three linear softening parameters  $f_2/f_1$

由图 12 可知,与普通混凝土相比, $f_2/f_1$  先增加后减小,先增长 20.30%,然后分别下降 24.20%和 4.85%。钢渣加快了应力下降的速度,随着钢渣体积分数的增加,钢渣细骨料混凝土脆性更加明显。

### 3.3.5 钢渣体积分数对 $w_2$ 的影响

钢渣细骨料混凝土软化参数  $w_2$  随钢渣体积分数的变化规律如图 13 所示。

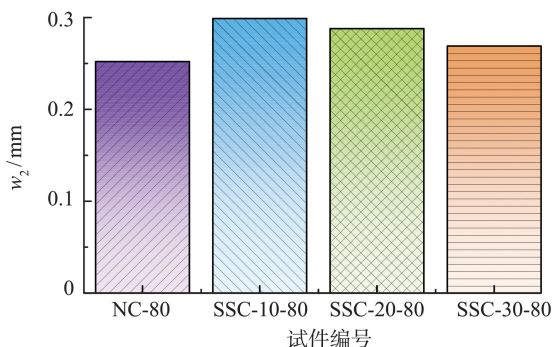


图 13 三线性软化参数  $w_2$  对比结果

Fig.13 Comparison of three linear softening parameters  $w_2$

由图 13 可知, $w_2$  随钢渣体积分数的增加先增大后减小,钢渣细骨料混凝土的  $w_2$  高于普通混凝土。主要原因在于,钢渣细骨料使混凝土微裂纹数

量增加,混凝土内部结构出现破坏,提前进入骨料摩擦拉出阶段,从而  $w_2$  随之减小。

### 3.3.6 钢渣体积分数对 $w_c$ 的影响

三线性软化参数  $w_c$  随钢渣体积分数变化的对比结果如图 14 所示。

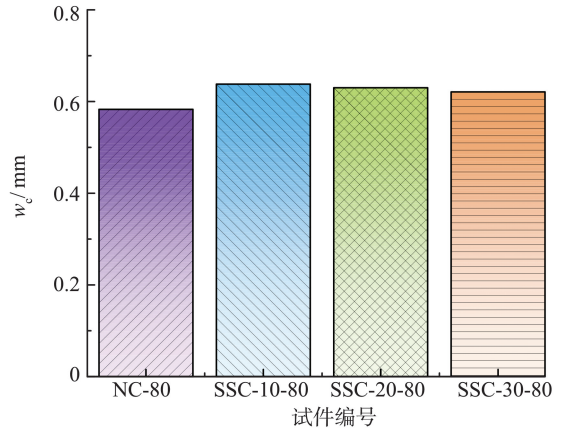


图 14 三线性软化参数  $w_c$  对比结果

Fig.14 Comparison of three linear softening parameters  $w_c$

由图 14 可知, $w_c$  随着钢渣体积分数的增加先增大后减小。钢渣体积分数为 10%、20%和 30%时,混凝土的  $w_c$  相较于普通混凝土的增长率分别为 9.43%、8.06%和 6.52%。 $w_c$  随钢渣体积分数的增加先增大后减小的原因与双线性软化曲线相同,相较于双线性软化曲线,三线性软化曲线的尾端几乎对应断裂过程区的骨料摩擦拉出阶段。钢渣细骨料相较于河砂有更强的变形能力,断裂时的残余强度仍能维持一定的稳定性。进入骨料摩擦阶段,仅靠骨料摩擦延缓开裂,变形大但应力较小。

## 4 结论

本研究结合钢渣细骨料混凝土楔入劈拉试验与软化关系逆推结果,揭示了钢渣体积分数对混凝土软化特性的影响规律,得到如下结论。

(1)通过建立逆分析程序并成功逆推得到钢渣细骨料混凝土的软化曲线,经验证,逆推所得三线性软化参数较为精确。

(2)软化曲线参数  $f_1$  随钢渣体积分数的增加而增大,钢渣的掺入对混凝土开裂有一定影响,在钢渣体积分数为 30%时抗拉强度达到最大,增长率达到 12.5%。

(3)钢渣的掺入使得软化曲线参数  $f_1$  增大, $f_2$  先增大后减小,故  $f_2/f_1$  先增大后减小,在体积分数为 20%处下降的幅度最大。随着钢渣体积分数的增加三线性软化曲线第二阶段的斜率逐渐减小,加快了混凝土开裂后应力降低的速度。

(4) 软化曲线参数  $w_2$  随着钢渣体积分数的增加先增大后减小,  $w_c$  随体积分数的增加而减小, 且均在钢渣体积分数为 10% 时达到最大。表明钢渣的掺入使混凝土提前进入骨料摩擦拉出阶段, 混凝土的开裂位移减小, 混凝土的延性变差。

#### 参考文献:

- [1] 庄剑恒, 朴星君, 王冠. 我国钢渣特性与主要处理方法及资源化利用现状[J]. 冶金标准化与质量, 2024, 62(1): 32-36.  
ZHUANG Jianheng, PIAO Xingjun, WANG Guan. Research progress of wastewater treatment in metallurgical industry[J]. Metallurgical Standardization and Quality, 2024, 62(1): 32-36.
- [2] 薛刚, 付乾, 周海峰, 等. 钢渣细骨料混凝土单轴受压应力-应变关系试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6): 1165-1174.  
XUE Gang, FU Qian, ZHOU Haifeng, et al. Experimental study on stress-strain relationship of steel slag fine aggregate concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6): 1165-1174.
- [3] 曹芙蓉, 杨珍, 王晨霞, 等. 不同取代率下钢渣混凝土力学特性及耐久性研究[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(2): 181-187.  
CAO Fubo, YANG Zhen, WANG Chenxia, et al. Mechanical properties and durability of steel slag concrete with different replacement ratios[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024, 41(2): 181-187.
- [4] OLATOYAN O J, OKEYINKA O M, OLUWAFEMI B, et al. Investigation of tensile strength performance of green concrete incorporating steel slag[J]. Hybrid Advances, 2024, 6: 100186.
- [5] 丁锐, 李文甫, 李博. 钢渣掺合料用于混凝土的研究进展及应用[J]. 北方建筑, 2024, 9(3): 100-103.  
DING Rui, LI Wenfu, LI Bo. Research progress and application of steel slag admixture in concrete[J]. Northern Architecture, 2024, 9(3): 100-103.
- [6] LI Y L, LIU F Q, YU F, et al. A review of the application of steel slag in concrete[J]. Structures, 2024, 63: 106352.
- [7] RICE J R. Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(1): 98.
- [8] ROELFSTRA P E, WITTMANN F H. Numerical modeling of fracture of concrete[C]//9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-9). Munich, Germany: DGM Verlag, 1987: 41.
- [9] 唐坤, 胡杰, 唐钰, 等. 含有安定性不良钢渣骨料的混凝土病害诊治研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(10): 94-99.  
TANG Kun, HU Jie, TANG Po, et al. Study on diagnosis and treatment of concrete diseases containing poor stability steel slag aggregate[J]. Building Structure, 2024, 54(10): 94-99.
- [10] 叶雁飞, 马伟克, 申振伟, 等. 钢渣对混凝土安定性的影响及评价[J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(2): 40-46.  
YE Yanfei, MA Weike, SHEN Zhenwei, et al. The influence and evaluation of steel slag on the stability of concrete[J]. Industrial Minerals & Processing, 2024, 53(2): 40-46.
- [11] 涂传红, 李文海, 计焕, 等. 不同钢渣粉掺量对混凝土强度和体积安定性的影响研究[J]. 江西建材, 2023(11): 42-43.  
TU Chuanhong, LI Wenhai, JI Huan, et al. Influence of different steel slag powder content on strength and volume stability of concrete[J]. Jiangxi Building Materials, 2023(11): 42-43.
- [12] 国家质量技术监督局. 水泥压蒸安定性试验方法: GB/T 750—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢渣应用技术要求: GB/T 32546—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [14] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工混凝土断裂试验规程: DL/T 5332—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [15] 刘秋雨, 薛刚, 谭俊清, 等. 基于落锤冲击试验的钢渣细骨料混凝土抗冲击性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(12): 4399-4407.  
LIU Qiuyu, XUE Gang, TAN Junqing, et al. Study on impact resistance of steel slag fine aggregate concrete based on drop hammer impact test[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(12): 4399-4407.
- [16] 陈蒙哥. 基于 Isight 的混凝土断裂性能逆推分析研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018: 25-36.  
CHEN Mengge. Inverse analysis of concrete fracture properties based on Isight[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018: 25-36.
- [17] HILLERBORG A, MODÉER 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): 773-781.
- [18] PETERSSON P E. Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials[D]. Stockholm: Lund Institute of Technology, 1981.
- [19] 赵出云. 钢渣混凝土的断裂性能试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.  
ZHAO Chuyun. Experimental research on fracture performance of steel slag concrete[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.