

# 混凝土基体材料断裂特性试验研究

朱 榆<sup>\*1,2</sup>, 徐世烺<sup>1</sup>, 赵 瑾<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 辽宁省建设科学研究院, 辽宁 沈阳 110005;

3. 沈阳铁道勘察设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110013)

**摘要:** 以水泥净浆和水泥砂浆两种最为基础的混凝土基体材料为研究对象研究了它们的断裂特性. 采用三点弯曲梁试件按强度和尺寸系列分别设计了3组断裂试件, 获得了  $P$ - $CMOD$  全曲线, 并测得了起裂荷载. 试验结果表明, 即使在基体中加入粒径很小的骨料也会大大改善基体的断裂性能. 水泥净浆并不是理想的脆性材料, 它在断裂过程中也呈现出一定程度的非线性断裂行为, 即在失稳破坏前存在着稳定的裂缝扩展过程, 且这个过程随着抗压强度的提高而变短. 试件尺寸越大起裂越早, 裂缝稳定扩展阶段也越长. 由此, 根据水工混凝土断裂试验规程计算了水泥净浆和砂浆双  $K$  断裂参数, 并对结果进行了分析讨论.

**关键词:** 混凝土; 水泥净浆; 水泥砂浆; 断裂; 三点弯曲切口梁

**中图分类号:** TU502.6 **文献标志码:** A

## 0 引言

断裂力学应用到水泥基材料始于20世纪60年代. 随着40多年来研究工作的不断进行, 人们对其认识愈来愈深入. 很多学者预言断裂力学将继续弹性力学及塑性力学之后成为指导结构设计尤其是混凝土结构设计的第三次革命性的理论工具. 我国早在80年代初, 在潘家铮院士的大力倡导下开始断裂力学的研究工作, 取得了很多可喜的研究成果, 并在2005年制定了《水工混凝土断裂试验规程》<sup>[1]</sup>. 在该规程中, 双  $K$  断裂理论是主要的理论基础. 它是由徐世烺等<sup>[2~5]</sup> 在实验研究的基础上, 结合所获得的虚拟裂缝解析解而提出的断裂过程判据. 其不仅形式简单理论完备, 能定量描述混凝土裂缝扩展断裂特性, 而且具有较高的可操作性.

混凝土是一种由硬化水泥浆基体、骨料及基体与骨料间的过渡区组成的复合材料, 其承载力及性质取决于各项的性质和它们之间的相互作用. 为了更好地研究混凝土材料的断裂特性, 各国

学者从不同方面研究了混凝土中各组分对其断裂性能的影响<sup>[6~9]</sup>. 其中, 骨料的种类和级配、骨料与基体的黏结性能及骨料和基体的自身性能对混凝土断裂性能影响的研究较多, 而对基体自身断裂特性的研究却非常有限. 水泥净浆和水泥砂浆是混凝土的基体成分, 了解它们的基本断裂特性对于研究混凝土材料的断裂性能及提高混凝土的断裂性能具有十分重要的意义. 为此本文基于三点弯曲梁试验, 采用不同尺寸、不同强度的水泥净浆和水泥砂浆试件, 以双  $K$  断裂理论为主要理论基础, 研究和分析水泥净浆和水泥砂浆的基本断裂特性.

## 1 试验概况

### 1.1 试件制作

本文采用图1所示的三点弯曲梁试件形式对水泥净浆和水泥砂浆进行了断裂研究, 分别按强度系列和尺寸系列设计了3组试件, 各组试件的尺寸及水灰比见表1, 每组试件中每系列取6个.

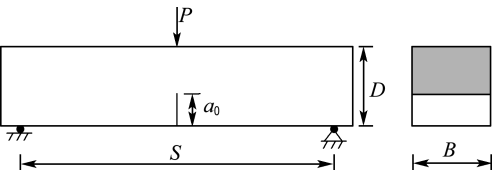


图 1 三点弯曲切口梁试件形式

Fig. 1 Configuration of three-point bending notched beam

表 1 试件尺寸、水灰比及抗压强度

Tab. 1 The dimension, water-cement ratio and compressive strength of each set of specimens

| 试件<br>类型 | 试件<br>编号 | $B \times D \times S /$<br>(mm $\times$ mm $\times$ mm) | $a_0 / D$ | $W / C$ | 28 d 抗压<br>强度 / MPa |
|----------|----------|---------------------------------------------------------|-----------|---------|---------------------|
| A        | P20A     | 40 $\times$ 40 $\times$ 160                             | 0.40      | 0.55    | 23.57               |
|          | P40A     | 40 $\times$ 40 $\times$ 160                             | 0.40      | 0.45    | 42.77               |
|          | P60A     | 40 $\times$ 40 $\times$ 160                             | 0.40      | 0.40    | 70.17               |
|          | M20A     | 40 $\times$ 40 $\times$ 160                             | 0.40      | 0.70    | 33.76               |
|          | M40A     | 40 $\times$ 40 $\times$ 160                             | 0.40      | 0.65    | 47.75               |
|          | M60A     | 40 $\times$ 40 $\times$ 160                             | 0.40      | 0.40    | 70.07               |
| B        | P40B     | 70 $\times$ 70 $\times$ 280                             | 0.40      | 0.45    | 42.77               |
|          | M40B     | 70 $\times$ 70 $\times$ 280                             | 0.40      | 0.65    | 47.75               |
| C        | P20C     | 100 $\times$ 100 $\times$ 400                           | 0.40      | 0.55    | 23.57               |
|          | P40C     | 100 $\times$ 100 $\times$ 400                           | 0.40      | 0.45    | 42.77               |
|          | P60C     | 100 $\times$ 100 $\times$ 400                           | 0.40      | 0.40    | 70.17               |
|          | M20C     | 100 $\times$ 100 $\times$ 400                           | 0.40      | 0.70    | 33.76               |
|          | M40C     | 100 $\times$ 100 $\times$ 400                           | 0.40      | 0.65    | 47.75               |
|          | M60C     | 100 $\times$ 100 $\times$ 400                           | 0.40      | 0.40    | 70.07               |
|          | C20C     | 100 $\times$ 100 $\times$ 400                           | 0.40      | 0.65    | 33.36               |
|          | C40C     | 100 $\times$ 100 $\times$ 400                           | 0.40      | 0.45    | 44.65               |
|          | C60C     | 100 $\times$ 100 $\times$ 400                           | 0.40      | 0.40    | 57.90               |

1.2 试验装置及过程

采用具有液压伺服控制功能的试验机按图 1 所示的方式布置加载. 试验采用位移加载控制. 为了测量裂缝口尖端附近区域应变场的变化情况及捕捉起裂荷载, 在试件两面从预制缝尖端开始以预制缝延长线为对称轴, 成对等间距布置了电阻应变片(1-1~1-5), 每对应变片与另外一对布置在相同组成材料的试件上的补偿片构成一个全桥回路. 除尺寸为 40 mm $\times$ 40 mm $\times$ 160 mm 的试件外, 其余尺寸试件还在预制缝的延长线上等间距布置了电阻应变片(2-1~2-4), 每个应变片与另外一个布置在相同组成材料的试件上的补偿片构成一个半桥回路. 所用应变片的规格为 10 mm $\times$ 2 mm, 电阻应变片测点布置见图 2. 所有应变片的上下间距均为 10 mm, 全桥应变片的水平间距如图 2 所示, 半桥应变片的对称轴与预制缝的延长线重合. 其中, 试件两面预制缝尖端处的两对

电阻应变片 1-1 和 1-5 用来测定起裂荷载  $P_{ini}$ , 其余的应变片用来观测裂缝扩展过程.

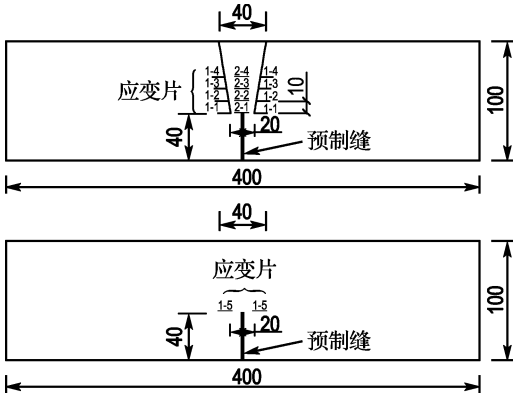


图 2 应变片布置图

Fig. 2 Arrangement diagram of the electric strain gauges

2 试验结果及分析

2.1 水泥净浆的稳定裂缝扩展及试验所得的  $P$ - $CMOD$  曲线

由于缺少对水泥净浆(硬化水泥浆)的了解, 很多学者都认为它是一种理想的脆性材料<sup>[10,11]</sup>, 一一起裂便会失稳破坏. 然而水泥净浆起裂后并没有马上发生脆性破坏, 而是经过了一个稳定的裂缝扩展过程(亚临界扩展), 这个过程在试验中可以很清晰地用肉眼观察到(见图 3). 图 4(a)列出了相同强度(水泥净浆为 42.77 MPa, 水泥砂浆为 47.75 MPa, 混凝土为 44.65 MPa, 本文近似认为三者抗压强度相同)、相同尺寸(100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 400 mm)的水泥净浆、水泥砂浆和混凝土的  $P$ - $CMOD$  曲线图. 从中也可以看出三者表现出相似的  $P$ - $CMOD$  曲线形状, 且都可以分为 3 个部分: (1) 试件开裂前的线弹性阶段; (2) 试件开裂后至失稳破坏前裂缝稳定扩展的非线性阶段; (3) 试件失稳破坏后的裂缝失稳扩展阶段. 虽然三者的  $P$ - $CMOD$  曲线具有如上的共性, 但抗压强度相同时, 混凝土承受的极限荷载大于水泥砂浆的, 二者的极限荷载又远大于水泥净浆的. 当试件开裂后, 对于具有相同裂缝口张开宽度的混凝土、水泥砂浆和水泥净浆, 三者承受的荷载依次递减. 当试件失稳破坏时, 混凝土和水泥砂浆的裂缝口张开位移均大于水泥净浆的. 从这些现象可以看出, 虽然三者抗压强度相同, 但由于混凝土和水泥砂浆中掺入的骨料在抵抗裂缝扩展时也要发生作用, 体

现出更好的断裂性能,承载能力也得到了显著的提高.虽然本试验采用的硅砂粒径很小(最大粒径为 1.2 mm),但作为骨料掺入水泥净浆中对其断裂性能的提高效果也非常显著.

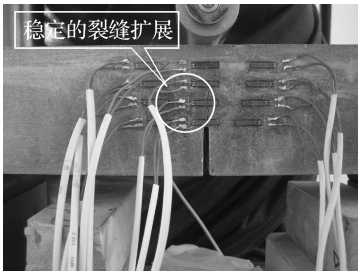


图 3 试验中观察到的水泥净浆裂缝的稳定扩展

Fig. 3 Stable crack propagation in hardening cement paste observed during the test

图 4(b)~(f) 分别列出了不同强度、不同尺寸类型(A、C 两种尺寸)的水泥净浆、水泥砂浆和混凝土的  $P$ - $CMOD$  曲线.从中可以看出,当抗压

强度增加时,曲线的峰值及其所包围的面积都有所增大,这表明随着抗压强度的提高,试件失稳破坏时的极限承载力以及断裂过程中所需的能量都会提高,试件抵抗裂缝扩展的能力也会提高.此外,随着抗压强度的增加,A 类型的水泥净浆  $P$ - $CMOD$  曲线的下降段变陡,当试件失稳破坏时,相应的裂缝口张开位移有所减小,这表明没有掺加骨料的水泥净浆随着抗压强度的提高所表现出的脆性更加明显,这对试件的断裂性能是不利的.但对于 C 类型的水泥净浆试件来说,这一特性表现得并不明显,这是由于试件尺寸增大,收缩对它们的影响更加显著,收缩裂缝的存在,导致它们的裂纹扩展路径发生不同的变化,进而使  $P$ - $CMOD$  曲线的下降段发生改变.对于相同尺寸的试件,强度为 20 系列的混凝土的极限承载力大于强度为 60 系列的水泥砂浆的极限承载力,而强度为 20 系列的水泥砂浆的极限承载力又远大于强度为 60 系列的水泥净浆的极限承载力.

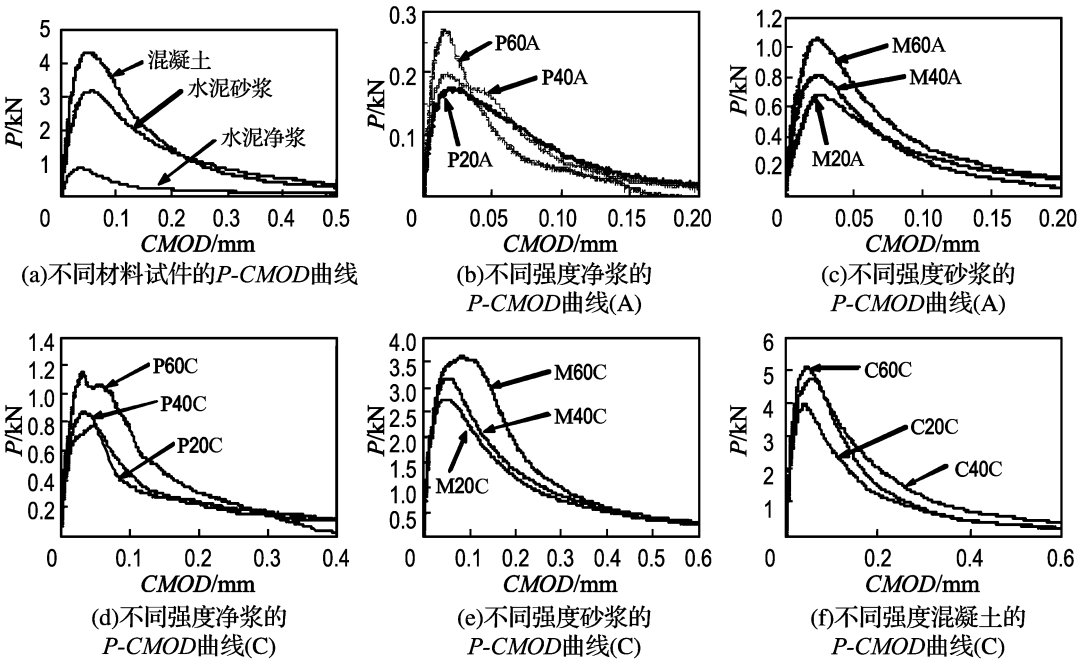


图 4 试验所得  $P$ - $CMOD$  曲线

Fig. 4  $P$ - $CMOD$  curves obtained from the test

从图 5 中也可以看出,当强度相同时,水泥净浆和水泥砂浆的  $P$ - $CMOD$  曲线形状受试件尺寸的影响较大,试件尺寸越大, $P$ - $CMOD$  曲线所包围的面积越大,对于相同的裂缝口张开位移,试件

尺寸越大,所承受的荷载就越大.综合图 4 和图 5 可以看出试件尺寸对  $P$ - $CMOD$  曲线的影响比强度的影响更为显著.

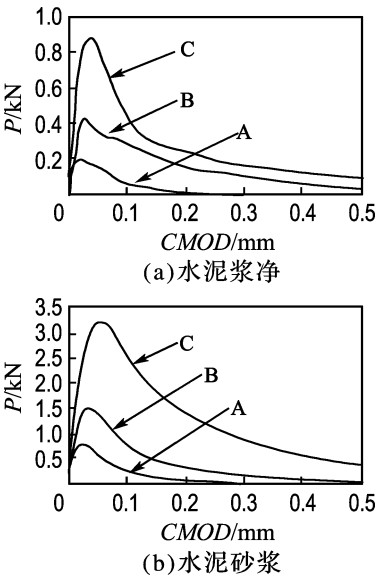


图 5 不同尺寸的水泥净浆和水泥砂浆  $P$ - $CMOD$  曲线

Fig. 5  $P$ - $CMOD$  curves of different sizes of cement paste and mortar

2.2 起裂荷载  $P_{ini}$  的确定原理

由上可知,根据试件两面预制缝尖端处的两对电阻应变片 1-1 和 1-5 测得的  $P$ - $\epsilon$  曲线便可确定起裂荷载  $P_{ini}$ .图 6 给出了 P20A 系列和 M20A 系列试件的预制缝尖端处应变片采集到的  $P$ - $\epsilon$  曲线,并给出了确定起裂荷载  $P_{ini}$  的图示.从中可以看出,在  $P$ - $\epsilon$  曲线上,随着荷载的增加,预制缝尖

端处的应变也随着增加,为拉应变,且二者基本呈线性关系;当拉应变增加到峰值时便不再增加,而荷载继续增加,此时试件预制缝尖端处的材料由于应力集中而开裂.试件开裂后,预制缝尖端两侧材料卸载,拉应力逐渐减小,应变片回缩,甚至出现压应变.因此,缝端处拉应变达到最大值时对应的荷载即为该试件的起裂荷载.从图中可以看出试件两面不一定同时开裂,所以试件的起裂荷载取应变片 1-1 和 1-5 所测得的起裂荷载的平均值,各组试件的起裂荷载列于表 2.采用此方法确定起裂荷载比在  $P$ - $CMOD$  曲线上找出线性与非线性分界点所对应的荷载值确定的起裂荷载更为直观和简便,精确度也更高.

2.3 起裂荷载  $P_{ini}$  与最大荷载  $P_{max}$

根据试验所测得的  $P$ - $\epsilon$  曲线找出每个试件的起裂荷载  $P_{ini}$ ,并在  $P$ - $CMOD$  曲线上找出相应的最大荷载  $P_{max}$ ,将每系列试件的平均值列于表 2.

从表 2 中  $P_{ini}$  与  $P_{max}$  的比值也可以看出水泥净浆在断裂过程中存在着稳定的裂缝扩展过程,二者比值越小,说明水泥净浆和水泥砂浆从起裂到失稳破坏所经历的亚临界扩展过程越长.严格意义上讲,水泥净浆和水泥砂浆起裂荷载与最大荷载的比值随着强度的增加基本上呈现上升的趋势,这表明强度越高,试件的脆性越明显,亚临界扩展阶段也就越短.

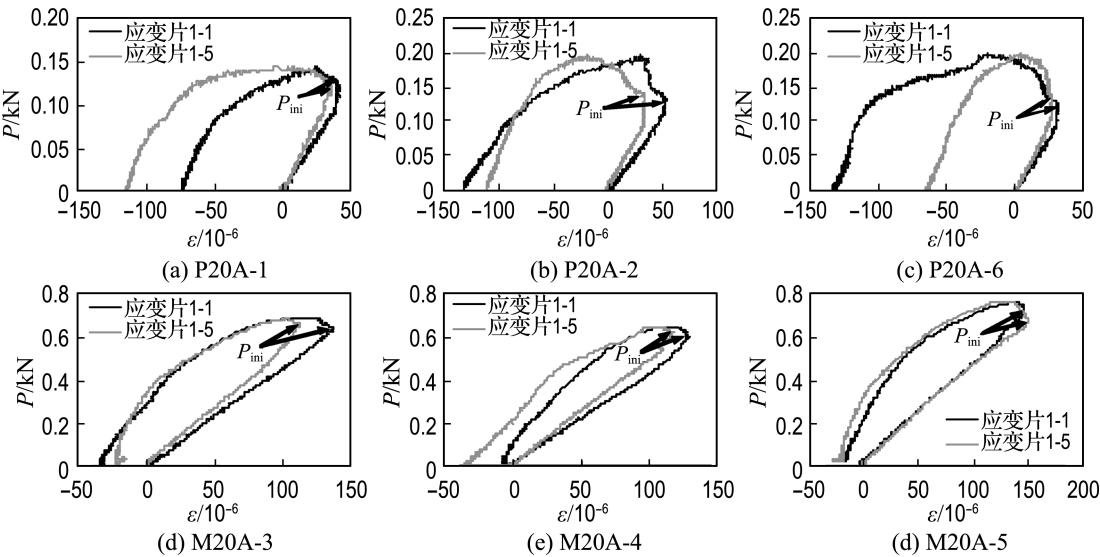


图 6 P20A 系列及 M20A 系列试件起裂荷载的确定图示

Fig. 6 Determination of the initial cracking load for specimens of series P20A and M20A



表 2  试验结果  
Tab. 2  Testing results

| 试件<br>类型 | 试件<br>编号 | $B \times D \times S /$<br>(mm×mm×mm) | $a_0 / D$ | $P_{ini} / \text{kN}$ | $K_{lc}^{ini} /$<br>(MPa · m <sup>1/2</sup> ) | $a_c / D$ | $P_{max} / \text{kN}$ | $K_{lc}^{un} /$<br>(MPa · m <sup>1/2</sup> ) | $P_{ini} / P_{max}$ |
|----------|----------|---------------------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------|-----------------------|----------------------------------------------|---------------------|
| A        | P20A     | 40×40×160                             | 0.400     | 0.132                 | 0.113                                         | 0.540     | 0.192                 | 0.276                                        | 0.688               |
|          | P40A     | 40×40×160                             | 0.400     | 0.172                 | 0.149                                         | 0.569     | 0.225                 | 0.361                                        | 0.764               |
|          | P60A     | 40×40×160                             | 0.400     | 0.212                 | 0.212                                         | 0.556     | 0.269                 | 0.437                                        | 0.788               |
|          | M20A     | 40×40×160                             | 0.400     | 0.663                 | 0.659                                         | 0.481     | 0.708                 | 0.878                                        | 0.936               |
|          | M40A     | 40×40×160                             | 0.400     | 0.761                 | 0.735                                         | 0.489     | 0.894                 | 1.133                                        | 0.851               |
|          | M60A     | 40×40×160                             | 0.400     | 0.775                 | 0.833                                         | 0.488     | 0.969                 | 1.300                                        | 0.799               |
| B        | P40B     | 70×70×280                             | 0.400     | 0.449                 | 0.226                                         | 0.557     | 0.607                 | 0.319                                        | 0.739               |
|          | M40B     | 70×70×280                             | 0.400     | 1.235                 | 0.523                                         | 0.490     | 1.545                 | 0.875                                        | 0.799               |
| C        | P20C     | 100×100×400                           | 0.400     | 0.473                 | 0.148                                         | 0.566     | 0.907                 | 0.354                                        | 0.521               |
|          | P40C     | 100×100×400                           | 0.400     | 0.588                 | 0.134                                         | 0.561     | 0.834                 | 0.369                                        | 0.705               |
|          | P60C     | 100×100×400                           | 0.400     | 0.829                 | 0.272                                         | 0.538     | 1.013                 | 0.516                                        | 0.818               |
|          | M20C     | 100×100×400                           | 0.400     | 2.095                 | 0.436                                         | 0.546     | 2.841                 | 1.069                                        | 0.737               |
|          | M40C     | 100×100×400                           | 0.400     | 2.147                 | 0.509                                         | 0.573     | 2.852                 | 1.241                                        | 0.753               |
|          | M60C     | 100×100×400                           | 0.400     | 2.913                 | 0.652                                         | 0.573     | 3.707                 | 1.600                                        | 0.786               |
|          | C20C     | 100×100×400                           | 0.400     | 3.117                 | 0.746                                         | 0.516     | 3.949                 | 1.411                                        | 0.789               |
|          | C40C     | 100×100×400                           | 0.400     | 3.801                 | 0.970                                         | 0.524     | 4.449                 | 1.625                                        | 0.854               |
|          | C60C     | 100×100×400                           | 0.400     | 4.010                 | 0.916                                         | 0.537     | 4.574                 | 1.747                                        | 0.877               |

图 7 为试件尺寸对相同强度的水泥净浆和水泥砂浆起裂荷载与最大荷载比值的影响. 在试件强度和初始缝高比都相同的情况下, 试件尺寸越大, 比值就越小. 因此, 对大尺寸试件, 裂缝起裂得较早, 裂缝稳定扩展过程也较长, 这与混凝土的规律也比较一致<sup>[12]</sup>.

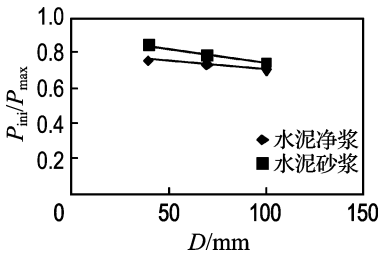


图 7   $P_{ini} / P_{max}$  与试件高度的关系  
Fig. 7  Relationship between  $P_{ini} / P_{max}$  and the depth of specimens

2.4  起裂断裂韧度  $K_{lc}^{ini}$  与失稳断裂韧度  $K_{lc}^{un}$

对于标准三点弯曲梁试件, 根据从试验中得到的起裂荷载  $P_{ini}$  和最大荷载  $P_{max}$  等参数, 就可以利用双  $K$  断裂理论分别计算试件的起裂断裂韧度  $K_{lc}^{ini}$  与失稳断裂韧度  $K_{lc}^{un}$ , 结果列于表 2. 从表中可以看出, 水泥净浆和水泥砂浆的起裂韧度和失稳韧度值均随着抗压强度的提高而增大, 这表明随着强度的提高, 水泥净浆和水泥砂浆起裂和失稳所需要的能量都会增加, 试件抵抗裂缝的扩展能力也会增强, 这与前面得出的结论是一致

的. 另外也可以看出, 对于相同强度和相同尺寸的水泥净浆和水泥砂浆试件来说, 前者的失稳韧度低于后者的起裂韧度, 进一步表明水泥净浆中由于加入了骨料, 水泥净浆的断裂韧度有了很大的提高, 大大增强了基体抵抗裂纹扩展的能力. 通过起裂韧度与失稳韧度之间的差值也可以看出, 水泥净浆和水泥砂浆起裂后并没有马上失稳破坏, 而是经过了一段裂缝扩展阶段才达到它们的失稳断裂韧度.

3  结  语

通过对两种最基本的混凝土基体材料水泥净浆和水泥砂浆三点弯曲梁的试验研究, 发现水泥净浆并不是理想的脆性材料, 一经起裂便马上失稳破坏, 而是在破坏前存在一个稳定的裂缝扩展过程, 且强度越高, 这个过程越短. 水泥净浆和水泥砂浆试件的  $P$ -CMOD 曲线受强度和试件尺寸的影响较大, 并且受试件尺寸的影响更为显著. 在强度和初始缝高比相同的情况下, 试件尺寸越大, 起裂越早, 裂缝稳定扩展阶段也越长. 此外, 本文所采用的全桥式应变片测点布置方法, 由于避开了预制缝的中心线, 在整个试验过程中可以完整地监测到测点处的应变规律, 应变信号不易中断. 而且采用此法也使得试件在由受拉至产生裂缝时应变片的灵敏度系数提高, 从而使得仪器反应更为灵敏, 所以可以更准确地测量起裂荷载.

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5532—2005 水工混凝土断裂试验规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2006
- [2] XU Shi-lang, REINHARDT H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle materials, part I: experimental investigation of crack propagation [J]. **International Journal of Fracture**, 1999, **98**(2):111-149
- [3] XU Shi-lang, REINHARDT H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle materials, part II: analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams [J]. **International Journal of Fracture**, 1999, **98**(2):151-177
- [4] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土结构裂缝扩展的双 K 断裂准则[J]. 土木工程学报, 1992, **25**(2):32-38
- [5] XU Shi-lang, REINHARDT H W. A simplified method for determining double-K fracture parameters for three-point bending tests [J]. **International Journal of Fracture**, 2000, **104**(2):181-209
- [6] AMPARANO F E, XI Y P, ROH Y S. Experimental study on the effect of aggregate content on fracture behavior of concrete [J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2000, **67**(1):65-84
- [7] 张 君, 王 林, 孙 明, 等. 粗细骨料比例和水泥石强度对混凝土断裂参数的影响[J]. 工程力学, 2004, **21**(1):136-142
- [8] LEE K M, AN K S. Factors influencing fracture toughness of mortar-aggregate interface in concrete [C] // MIHASHI H, ROKUGO K, eds. **Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings of FRAMCOS-3**. d-79104. Freiburg: Aedificatio Publishers, 1998:193-202
- [9] FENG N Q, JI X H, ZHUANG Q F, *et al.* Effect of concrete materials on fracture performance [C] // WITTMANN F H, ed. **Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings of FRAMCOS-2**. d-79104. Freiburg: Aedificatio Publishers, 1995:119-124
- [10] ALAEE E J, KARIHALOO B L. Fracture model for flexural failure of beams retrofitted with CARDIFRC [J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2003, **129**(9):1028-1038
- [11] CARPINTERI A, MASSABO R. Continuous vs. discontinuous bridged-crack model for fiber-reinforced materials in flexure [J]. **International Journal of Solids Structures**, 1997, **34**(18):2321-2338
- [12] 吴智敏, 徐世烺, 刘佳毅. 光弹贴片法研究混凝土裂缝扩展过程及双 K 断裂参数的尺寸效应[J]. 水利学报, 2001(4):34-39

## Experimental study of fracture properties of concrete matrix materials

ZHU Yu<sup>\*1,2</sup>, XU Shi-lang<sup>1</sup>, ZHAO Jin<sup>3</sup>

( 1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Liaoning Building Science Research Institute, Shenyang 110005, China;

3. Shenyang Railway Survey & Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110013, China )

**Abstract:** The fracture properties of cement paste and mortar which are two most basal matrix materials of concrete were studied using three groups of three-point bending beams with different sizes and strengths. A complete *P-CMOD* curve was directly obtained, and the initial cracking load was determined. The experimental results show that the resistance to crack propagation in matrix is enhanced due to sand aggregate in the matrix, even though the grain size used is very small. Cement paste is not an ideal brittle material, an apparent stable crack propagation before unstable failure is observed in cement paste, and this stable stage is shortened with the compressive strength increasing. The larger the size is, the earlier the crack initiation is, and the longer the stable crack propagation stage becomes. Therefore, based on the hydraulic engineering concrete fracture testing specification, the double-*K* fracture parameters were calculated for cement paste and mortar. The discussion on the obtained results was made.

**Key words:** concrete; cement paste; mortar; fracture; three-point bending notched beam