

不同砂率及骨料粒径对塑性混凝土断裂韧度的影响

刘国豪¹,甘磊¹,刘玉¹,吴志刚²,李健²,齐建飞²,许翼飞³

(1. 河海大学水利水电学院,江苏南京 210098; 2. 中国安能集团第二工程局有限公司,江西南昌 330000;
3. 青岛市水利勘测设计研究院有限公司,山东青岛 266100)

摘要:为研究不同砂率和骨料粒径对塑性混凝土断裂韧度的影响,开展了塑性混凝土力学性能测试和三点弯曲切口梁断裂试验,分析了不同配合比塑性混凝土物理力学韧度和表观形态,揭示了不同砂率和骨料粒径塑性混凝土断裂韧度的演化规律。结果表明:不同砂率和骨料粒径下的塑性混凝土强度和断裂韧度变化过程差异明显,随着砂率由45%增大至85%,塑性混凝土强度和断裂韧度在骨料粒径为0~5 mm时均下降明显,5~10 mm时均呈上升趋势,但断裂韧度上升幅度较低;骨料粒径为10~20 mm时,试件强度的变化规律与5~10 mm时相似,总体呈上升趋势,随着砂率由45%增大至85%时断裂韧度先下降后上升;同一配合比条件下塑性混凝土强度、特征荷载和断裂韧度随骨料粒径变化的变化规律较一致。

关键词:塑性混凝土;砂率;骨料粒径;抗压强度;抗拉强度;断裂韧度

中图分类号:TV41 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2024)03-0039-06

Effects of different sand rates and aggregate sizes on fracture toughness of plastic concrete//LIU Guohao¹, GAN Lei¹, LIU Yu¹, WU Zhigang², LI Jian², QI Jianfei², XU Yifei³ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Anneng Group Second Engineering Bureau Co., Ltd., Nanchang 330000, China; 3. Qingdao Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Qingdao 266100, China)

Abstract: To investigate the effects of different sand rates and aggregate sizes on the fracture toughness of plastic concrete, mechanical property tests and three-point bending notched beam fracture tests were conducted to analyze the physical and mechanical properties and apparent morphology of plastic concrete with different mix ratios. The evolution of fracture toughness of plastic concrete with different sand rates and aggregate sizes was revealed. The results show that the strength and fracture toughness of plastic concrete with different sand rates and aggregate sizes vary significantly. With an increase in the sand content from 45% to 85%, the strength and fracture toughness of plastic concrete exhibit a noticeable decline and an upward trend for aggregate particle sizes in the range of 0 to 5 mm and 5 to 10 mm, respectively, but the variation in fracture toughness is comparatively lower. For aggregate particle sizes ranging from 10 to 20 mm, the specimen strength variation law is comparable to that observed for particle sizes between 5 and 10 mm, with a general upward tendency. With an increase in the sand content from 45% to 85%, the fracture toughness first decreases and then increases. The changes in strength, characteristic load, and fracture toughness of plastic concrete under the same mix ratio conditions are relatively consistent with the variation of aggregate particle size.

Key words: plastic concrete; sand rate; aggregate size; compressive strength; tensile strength; fracture toughness

塑性混凝土由膨润土、黏土、水泥、砂、石子经搅拌凝结而形成,其弹性模量低,抗渗性和耐久性优^[1],被广泛应用于围堰和土石坝坝基防渗结构。采用膨润土替代部分水泥,可减少水泥用量,节约成本,同时可较好地适应周围土体变形^[2]。丁国庆

等^[3]对比分析了钠基和钙基膨润土对塑性混凝土抗压强度、弹性模量和渗透性能的影响;张雷顺等^[4]研究了砂率对塑性混凝土渗透性能的影响,指出膨润土掺量和砂率分别设置为40%和60%时,塑性混凝土抗渗性能较好;王四巍等^[5]研究了水泥和

基金项目:国家自然科学基金项目(52379123);河海大学优秀研究生学位论文培育项目(422003467);中国安能集团自筹科技项目(823166816)

作者简介:刘国豪(2000—),男,硕士研究生,主要从事水工程安全分析研究。E-mail:221302020015@hhu.edu.cn

通信作者:甘磊(1987—),男,教授,博士,主要从事水工程长效运行及功能提升研究。E-mail:ganlei2015@hhu.edu.cn

膨润土含量对塑性混凝土变形和破坏特征的影响;宋帅奇等^[6]研究了塑性混凝土抗压强度和劈拉强度的尺寸效应,分析了塑性混凝土抗压强度与龄期之间的定量关系。上述研究主要探讨了材料组成对塑性混凝土渗透性能和强度的影响,没有分析砂率和骨料粒径对塑性混凝土强度和断裂韧度的影响。

塑性混凝土抗拉强度远低于其抗压强度,而抗拉强度与断裂韧度密切相关,其抗拉强度和断裂韧度往往是决定其服役寿命的关键性能^[7]。目前,国内水泥基材料断裂参数主要采用徐世烺等^[8]提出的双K断裂参数方法进行测定,即基于三点弯曲切口梁断裂试验,采用双K断裂参数计算公式求解试件起裂韧度和失稳断裂韧度。例如:管俊峰等^[9]建立了确定无尺寸效应的混凝土开裂强度和起裂韧度、拉伸强度和断裂韧度等的理论和方法;王一超等^[10-13]基于三点弯曲切口梁断裂试验,分别研究了碳纤维、聚丙烯纤维、海水珊瑚和自燃煤矸石对混凝土断裂特性的影响。同时,粗骨料尺寸和含量对混凝土准静态力学性能、破坏能量和裂纹扩展形态的影响较为明显^[13-15]。例如:吴智敏等^[16]研究了最大骨料粒径对混凝土双K断裂参数的影响,指出最大骨料粒径为20~40 mm时,试件起裂韧度和失稳断裂韧度随着最大骨料粒径增大而增大;Zhang等^[17]基于三点弯曲试验成果,评估了不同粗骨料粒径对混凝土断裂参数的影响,指出较小的骨料粒径易导致抗拉强度的增大,且峰值后的应力急剧下降;Amparano等^[18]研究了骨料含量对混凝土断裂性能的影响,指出抗压强度随骨料体积分数的增大略有下降,而断裂能变化不超过25%。

塑性混凝土中含有膨润土和黏土,其结构发生破坏时,骨料本身并没有发生破坏。塑性混凝土强度主要取决于界面黏结强度与界面区受力是否均匀,这与普通混凝土差别较大^[19]。塑性混凝土通常砂率较大,大砂率可明显降低塑性混凝土弹性模量,但会致使塑性混凝土强度降低^[1],探究砂率与强度之间的关系可以在保证工程安全稳定的前提下节约成本。基材和粗骨料间会产生薄弱的界面,在荷载作用下,裂纹容易从薄弱界面产生^[20]。对于水泥、膨润土、砂子组成的体系来说,增大粗骨料粒径会削弱基材和粗骨料的黏结面和薄弱界面,从而增大混凝土的不均质性和不连续性。目前,针对塑性混凝土骨料粒径和砂率的系统性研究还较少,骨料和砂率对强度的影响机理尚不十分明晰,探究粗骨料粒径和砂率对塑性混凝土力学特性和断裂韧度的影响具有重要现实意义。为此,本文在浇筑不同砂率和骨料粒径的塑性混凝土试件基础上,开展塑性混凝土

强度和三点弯曲切口梁断裂试验,探究砂率和骨料粒径对塑性混凝土强度和断裂韧度的影响。

1 材料与方法

1.1 试验试件

试验采用海螺水泥股份有限公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥、钠基一级膨润土、粒径为0~20 mm的小石骨料、细度模数为2.7的中砂。其中,水泥各项物理力学性能指标满足GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》规定。为研究不同骨料粒径 d 对试件强度、断裂韧度的影响,筛选得到0~5 mm、5~10 mm、10~20 mm的骨料。塑性混凝土配合比见表1,不同组塑性混凝土级配曲线见图1。

表1 塑性混凝土的配合比

编号	水胶比	砂率/%	骨料粒径/mm	单位混凝土材料用量(kg/m ³)				
				水	水泥	膨润土	砂	石子
1	0.91	45	0~5	300	200	130	800	970
2	0.91	45	5~10	300	200	130	800	970
3	0.91	45	10~20	300	200	130	800	970
4	0.91	65	0~5	300	200	130	1150	620
5	0.91	65	5~10	300	200	130	1150	620
6	0.91	65	10~20	300	200	130	1150	620
7	0.91	85	0~5	300	200	130	1500	265
8	0.91	85	5~10	300	200	130	1500	265
9	0.91	85	10~20	300	200	130	1500	265

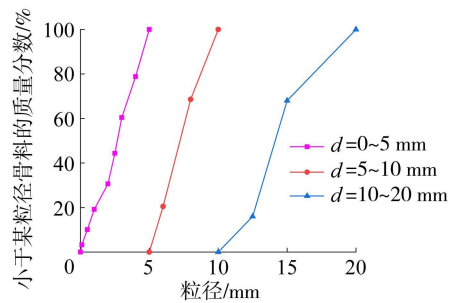


图1 不同组塑性混凝土的级配曲线

依据DLT 5303—2013《水工塑性混凝土试验规程》,分批浇筑混凝土试件。针对表1中塑性混凝土的9种不同配合比,分别浇筑6个立方体试件和3个三点弯曲切口梁试件,试件总数为81个。抗压强度和劈拉强度试验均采用150 mm×150 mm×150 mm的立方体试块,试件制备包括称量、搅拌、装样、振捣、脱模和养护等流程。断裂试验采用长方体带缺口的三点弯曲切口梁试件,梁的长度 $L=400$ mm,梁的宽度 $b=100$ mm,梁的高度 $h=100$ mm,长度方向中心位置处切口裂缝的初始缝长 $a_0=30$ mm。试件制备过程如下:待试件振捣密实后,放于室内成型,3 h后松动成缝钢片,24 h后取出钢片形成预制裂缝,48 h后对试件进行脱模处理并编号。完成脱模处理后,静置于养护室养护28 d,养护完成

的试件即可用于试验研究。

1.2 试验方法

试验设备包括 WAW-1000 型微机控制电液伺服万能试验机和 TestSoftV1.1 采集分析系统。三点弯曲断裂试验加载采用位移控制模式,加载速率为 0.05 mm/min。测试过程中,试验数据由动态采集系统记录并保存。通过应变-荷载曲线^[8]确定试验的起裂荷载 F_{ini} 和最大荷载 F_{max} ,采用混凝土三点弯曲切口梁试件双 K 断裂参数计算方法,计算起裂韧度 $K_{Q,IC}$ 和失稳断裂韧度 $K_{S,IC}$,具体公式如下:

$$K_{Q,IC} = \frac{0.003Sa_0^{1/2}(F_{ini} + mg/0.002)}{2bh^2} f_1(\alpha_0) \quad (1)$$

$$K_{S,IC} = \frac{0.003Sa_0^{1/2}(F_{max} + mg/0.003)}{2bh^2} f_2(\alpha) \quad (2)$$

其中

$$f_1(\alpha_0) = \frac{1.99 - \alpha_0(1 - \alpha_0)(2.15 - 3.93\alpha_0 + 2.7\alpha_0^2)}{(1 + 2\alpha_0)(1 - \alpha_0)^{3/2}}$$

$$f_2(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}}$$

$$\alpha_0 = a_0/h \quad \alpha = a_c/h$$

式中: m 为三点弯曲切口梁试件质量; g 为重力加速度; S 为三点弯曲切口梁底部两支座间的跨度,取 300 mm; α_0 、 α 分别为初始缝高比和临界缝高比; a_c 为临界裂缝等效长度。

2 结果与分析

2.1 混凝土强度

图 2 为不同骨料粒径和砂率下塑性混凝土抗压、抗拉强度变化曲线。由图 2(a)可知,塑性混凝土在不同骨料粒径条件下,其抗压强度随砂率的变化规律有所差异。 $d = 0 \sim 5$ mm 的塑性混凝土,随着砂率增大,抗压强度逐渐降低; $d = 5 \sim 10$ mm 的塑性混凝土,随着砂率的增大,其抗压强度逐渐增大; $d = 10 \sim 20$ mm 的塑性混凝土,随着砂率的增大,其抗压强度呈现先减小后增大的趋势。塑性混凝土抗压强度随骨料粒径变化呈现相似的变化规律,即当骨料粒径变大时,其抗压强度先减小后增大,其中 $d = 0 \sim 5$ mm 的塑性混凝土抗压强度大于 $d > 5$ mm 的塑性混凝土。砂率为 45% 的塑性混凝土, $d = 0 \sim 5$ mm 试件相比 $d = 5 \sim 10$ mm 试件的抗压强度高 54%,这表明 0 ~ 5 mm 骨料与水泥砂浆界面黏结强度很高,随着骨料粒径大小增大,界面黏结强度下降明显,界面区受力不均匀,强度下降明显。当骨料粒径由 5 ~ 10 mm 增大至 10 ~ 20 mm,抗压强度增大 13.6%,塑性混凝土不仅通过界面黏结提供强度,而且骨料自身也能提供一定的抗压强度。

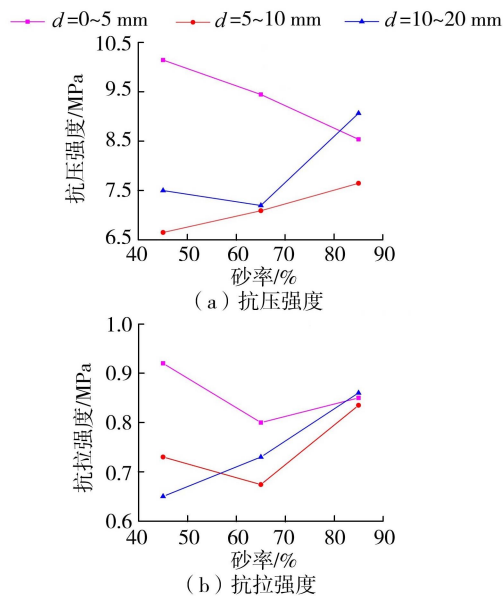


图 2 塑性混凝土强度变化曲线

由图 2(b)可知,塑性混凝土在不同骨料粒径条件下,其抗拉强度随砂率的变化规律差异明显。 $d = 0 \sim 5$ mm 的塑性混凝土,随着砂率的增大,其抗拉强度先减小后增大; $d = 5 \sim 10$ mm 的塑性混凝土,随着砂率的增大,抗拉强度先减小后增大; $d = 10 \sim 20$ mm 的塑性混凝土,随着砂率的增大,其抗拉强度逐渐增大。塑性混凝土配合比相同时,其劈裂抗拉强度均先减小后增大,其中 $d = 0 \sim 5$ mm 的试件抗拉强度较其他骨料粒径的大。对比图 2(a)和图 2(b)可知,塑性混凝土的抗拉强度变化规律与抗压强度变化规律基本一致,但抗拉强度随砂率的变化程度相对较大,而抗压强度随骨料粒径大小的变化程度相对较大。砂率为 45% 的塑性混凝土, $d = 0 \sim 5$ mm 试件相比 $d = 5 \sim 10$ mm 试件抗拉强度高 30.1%;当粒径由 5 ~ 10 mm 升至 10 ~ 20 mm 时,试件抗拉强度下降 12.3%,这与抗压强度规律有所不同,因为在抗拉状态下,大粒径骨料会增大裂纹扩展程度,从而降低抗拉强度。

2.2 断裂试验

2.2.1 特征荷载

不同骨料粒径的塑性混凝土三点弯曲切口梁试件 F -CMOD 曲线如图 3 所示,其中 F 为所受荷载,CMOD 为三点弯曲切口梁试件跨中缝口张开宽度。起裂荷载和峰值荷载变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,随着砂率和骨料粒径的变化,塑性混凝土试件起裂荷载和峰值荷载均发生变化,但变化幅度和趋势不同。 $d = 0 \sim 5$ mm 的塑性混凝土,随着砂率增大,其起裂荷载和峰值荷载逐渐减小,且在砂率为 45% 时达到峰值,分别为 0.70 kN 和 1.45 kN。 $d = 5 \sim 10$ mm 的塑性混凝土,随着砂率增大,其起裂

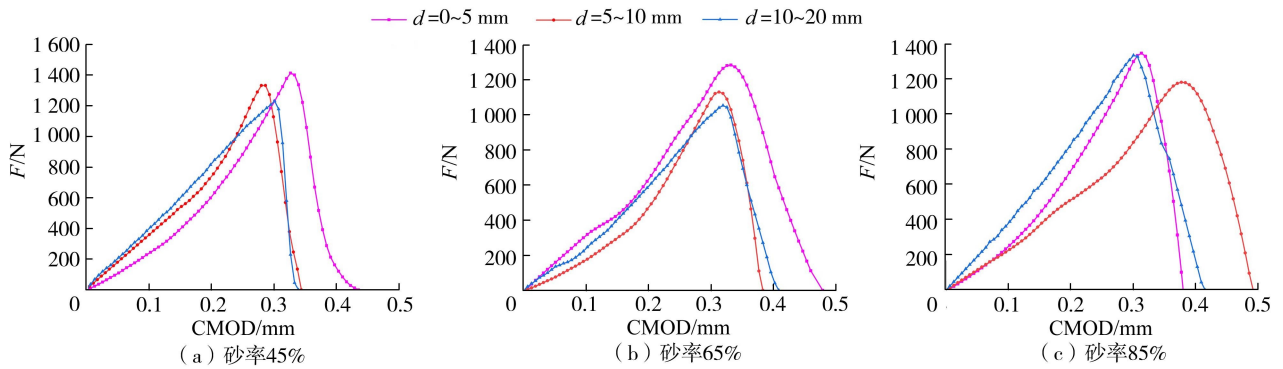


图3 不同砂率和骨料的塑性混凝土 F - $CMOD$ 曲线

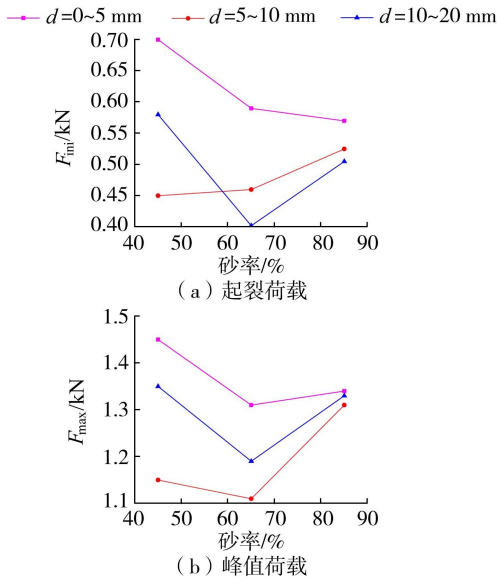


图4 塑性混凝土三点弯曲切口梁试件特征荷载变化曲线

荷载略有提高,峰值荷载先减小后增大。 $d = 10 \sim 20$ mm 的塑性混凝土,起裂荷载和峰值荷载均先减小后增大,且在砂率为 45% 时达到峰值,分别为 0.58 kN 和 1.35 kN。整个试验中,试件起裂荷载和峰值荷载比值在 0.34 ~ 0.48 之间。同一配合比的塑性混凝土试件,其起裂荷载和峰值荷载均先减小后增大。当砂率为 45% 时,随着骨料粒径的增大,试件起裂荷载和峰值荷载均呈现先减小后增大的变化趋势;当砂率为 65% 时,随着骨料粒径增大,试件起裂荷载呈现先减小后增大的趋势,峰值荷载单调减小;而当砂率为 85% 时,塑性混凝土试件起裂荷载和峰值荷载分别约为 0.50 kN 和 1.23 kN。同一配合比条件下,塑性混凝土起裂荷载和峰值荷载随骨料粒径增大呈现先减小后增大的趋势, $d = 0 \sim 5$ mm 时,塑性混凝土骨料与砂浆黏结能力较好,荷载主要由砂浆承担,其起裂荷载和峰值荷载均高于大粒径试件。当粒径增大至 5 ~ 10 mm,其特征荷载均有所下降,骨料与砂浆黏结能力下降,孔隙率增大导致峰值荷载下降。当粒径增大至 10 ~ 20 mm,塑性混凝土起裂荷载和峰值荷载均有上升趋势。

总体而言,塑性混凝土试件的起裂荷载和峰值荷载变化规律基本一致。砂率对起裂荷载的影响更为显著,当砂率接近 45% 且 $d < 5$ mm 时,塑性混凝土试件的起裂荷载和峰值荷载最大。

2.2.2 断裂韧度

通过式(1)和式(2),由起裂荷载和峰值荷载等数据计算不同骨料粒径的塑性混凝土切口梁试件起裂韧度和失稳断裂韧度,绘制起裂韧度和失稳断裂韧度变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,塑性混凝土在不同骨料粒径条件下,其起裂韧度、失稳断裂韧度与起裂荷载、峰值荷载变化规律较为一致。随着砂率的增大, $d = 0 \sim 5$ mm 的塑性混凝土试件起裂韧度和失稳断裂韧度逐渐降低。当砂率为 45% 时,试件起裂韧度和失稳断裂韧度达到最大,分别为 0.106、0.476 $\text{MPa}/\text{m}^{3/2}$;当砂率为 85% 时,试件起裂韧度和失稳断裂韧度分别下降至 0.081、0.404 $\text{MPa}/\text{m}^{3/2}$,相较砂率为 45% 的试件分别下降了 30% 和 18%,起裂韧度下降程度大于失稳断裂韧度;表明骨料粒径小且级配连续的情况下,增大砂率会导致强度下降,与普通混凝土试件的变化规律类似。随着砂率的增大, $d = 5 \sim 10$ mm 的塑性混凝土试件起裂韧度单调增大,失稳断裂韧度先减小后增大,但变幅较小;表明随着砂率的增大, $d = 5 \sim 10$ mm 的塑性混凝土孔隙率会增大,试件起裂韧度和失稳断裂韧度下降。当砂率继续增大时,塑性混凝土内部的颗粒间距将减小,导致颗粒间的相互作用变得更加紧密,试件起裂韧度和失稳断裂韧度随之增大。随着砂率的增大, $d = 10 \sim 20$ mm 的塑性混凝土试件起裂韧度和失稳断裂韧度先减小后增大,相比砂率为 45% 的塑性混凝土,砂率为 65% 的试件起裂韧度和失稳断裂韧度分别降低了 43% 和 19%,降幅较大;表明当砂率为 65% 时,具有较大骨料粒径的塑性混凝土内部存在较多孔隙,起裂韧度和失稳断裂韧度较低。随着砂率进一步增大,骨料间的孔隙逐渐被填充,混凝土内聚力提高,故试件起

裂韧度和失稳断裂韧度有所增大。此外,砂率的变化对粒径较大的塑性混凝土的影响更为显著。

的好坏。

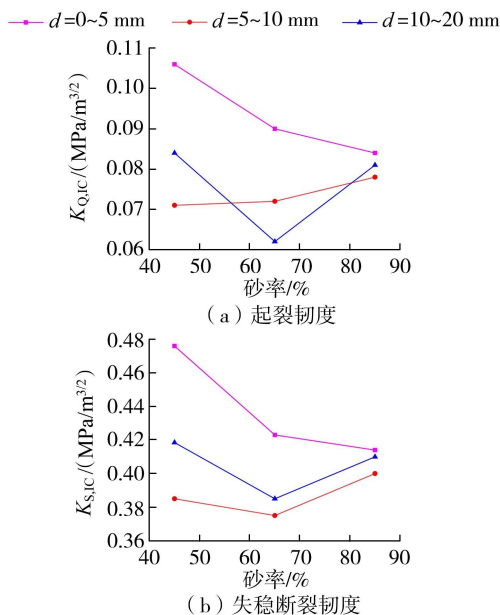


图5 塑性混凝土三点弯曲切口梁试件断裂韧度变化曲线

同一配合比下, $d = 0 \sim 5$ mm 的塑性混凝土试件有较大的起裂韧度和失稳断裂韧度,主要是由于骨料颗粒与水泥胶体的结合更为紧密。当砂率为 45% 时,随着骨料粒径的增大,试件起裂韧度和失稳断裂韧度均呈现先减小后增大的变化趋势;当砂率为 65% 时,随着骨料粒径增大,试件起裂韧度递减,失稳断裂韧度呈先减小后增大的变化趋势;当砂率为 85% 时,塑性混凝土试件起裂韧度和失稳断裂韧度基本集中在 0.08、0.40 MPa/m^{3/2} 附近。骨料粒径小对塑性混凝土的起裂韧度和失稳断裂韧度有利。当砂率增大时,骨料粒径对塑性混凝土起裂韧度和失稳断裂韧度的影响逐渐减小。总体而言,塑性混凝土试件起裂韧度和失稳断裂韧度变化规律基本一致。试件起裂荷载受砂率与骨料粒径的影响相比峰值荷载大。相比其他配合比的塑性混凝土, $d = 0 \sim 5$ mm、砂率为 45% 的试件的起裂荷载和峰值荷载最大。

2.3 断裂参数与抗拉强度关系

不同砂率和骨料粒径的塑性混凝土试件抗拉强度 f 与起裂韧度 $K_{Q,IC}$ 、失稳断裂韧度 $K_{S,IC}$ 的相关关系曲线如图 6 所示,不同砂率和骨料粒径的塑性混凝土抗拉强度与断裂参数之间存在良好的相关性,通过回归分析,拟合得到塑性混凝土起裂韧度、失稳断裂韧度和劈裂抗拉强度之间的定量关系:

$$K_{Q,IC} = 0.1057f \quad (R^2 = 0.9387) \quad (3)$$

$$K_{S,IC} = 0.4384f \quad (R^2 = 0.9482) \quad (4)$$

式中 R^2 为决定系数,用来描述数据对模型拟合程度

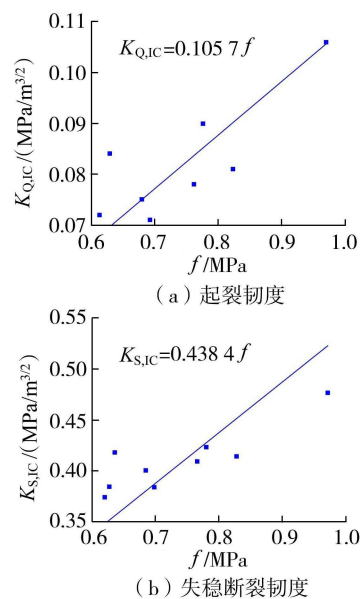


图6 塑性混凝土试件断裂参数与抗拉强度关系曲线

由图 6 可知,塑性混凝土起裂韧度、失稳断裂韧度均与其抗拉强度线性相关,其拟合优度均较好,其断裂特性与常规混凝土材料断裂特性吻合。混凝土是否破坏主要取决于材料内部微裂缝受拉应力,当裂缝尖端拉应力大于材料开裂强度时,裂缝会扩展,从而导致结构破坏。

3 结论

a. 随着砂率的增大, $0 \sim 5$ mm 骨料粒径的塑性混凝土试件起裂韧度、失稳断裂韧度均降低; $5 \sim 10$ mm 和 $10 \sim 20$ mm 骨料粒径的塑性混凝土试件起裂韧度、失稳断裂韧度先减小后增大。 $0 \sim 5$ mm 骨料粒径的塑性混凝土抗拉强度、失稳断裂韧度等参数高于其他骨料粒径试件 20% ~ 50%, 小骨料粒径对塑性混凝土断裂韧度的提升更为显著。

b. 配合比相同时,随着骨料粒径的增大,砂率为 45% 和 65% 的塑性混凝土试件抗压强度、峰值荷载和失稳断裂韧度等参数先减小后增大,砂率为 85% 的塑性混凝土试件抗拉强度、峰值荷载和失稳断裂韧度等参数随骨料粒径大小变化均不明显。塑性混凝土试件的起裂荷载和峰值荷载变化规律基本一致。砂率对起裂荷载的影响更为显著,当砂率接近 45% 且骨料粒径小于 5 mm 时,塑性混凝土试件的起裂荷载和峰值荷载最大。

c. 塑性混凝土起裂韧度、失稳断裂韧度与其抗拉强度之间存在良好的线性关系。骨料粒径小对塑性混凝土的起裂韧度和失稳断裂韧度有利。当砂率变大时,骨料粒径对塑性混凝土的起裂韧度和失稳

断裂韧度的影响逐渐减小。

参考文献:

- [1] 李家正, 王迪友, 杨华全. 塑性混凝土配合比设计及试验方法探讨[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(4): 58-61. (LI Jiazheng, WANG Diyou, YANG Huaquan. Inquiry into mix design and test method of soil concrete [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(4): 58-61. (in Chinese))
- [2] 吴胜兴, 孙克纬, 沈德建. 新拌混凝土骨料分布均匀性表征方法及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 67-75. (WU Shengxing, SUN Kewei, SHEN Dejian. Characterization method and application of the uniformity of aggregate distribution in fresh concrete[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 67-75. (in Chinese))
- [3] 丁国庆, 蒋林华, 储洪强, 等. 膨润土种类及掺量对塑性混凝土性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 34-37. (DING Guoqing, JIANG Linhua, CHU Hongqiang, et al. Influences of types and dosage of bentonite on properties of plastic concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2): 34-37. (in Chinese))
- [4] 张雷顺, 汤俊杰, 杨明林. 塑性混凝土抗渗性能的研究[J]. 混凝土, 2010(2): 1-3. (ZHANG Leishun, TANG Junjie, YANG Minglin. Research on impermeability of plastic concrete [J]. Concrete, 2010(2): 1-3. (in Chinese))
- [5] 王四巍, 李小超, 李杨, 等. 膨润土及水泥用量对塑性混凝土变形及破坏特征的影响[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(1): 33-37. (WANG Siwei, LI Xiaochao, LI Yang, et al. Effects of bentonite and cement content on plastic concrete deformation and failure[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(1): 33-37. (in Chinese))
- [6] 宋帅奇, 高丹盈, 胡良明, 等. 塑性混凝土强度和尺寸效应的试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 32-36. (SONG Shuaiqi, GAO Danying, HU Liangming, et al. Experimental study on strength and size effect of plastic concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3): 32-36. (in Chinese))
- [7] 甘磊, 沈振中, 徐力群, 等. 不同 pH 值硫酸盐侵蚀下水泥砂浆断裂韧度[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(3): 690-702. (GAN Lei, SHEN Zhenzhong, XU Liqun, et al. Fracture toughness of cement mortar under sulfate attack with different pH values[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(3): 690-702. (in Chinese))
- [8] 徐世焯, 王建敏. 水压作用下大坝混凝土裂缝扩展与双 K 断裂参数[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 119-125. (XU Shilang, WANG Jianmin. Crack propagation in a concrete dam under water pressure and determination of the double-K fracture parameters [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2): 119-125. (in Chinese))
- [9] 管俊峰, 刘泽鹏, 姚贤华, 等. 确定混凝土开裂与拉伸强度及双 K 断裂参数[J]. 工程力学, 2020, 37(12): 124-137. (GUAN Junfeng, LIU Zepeng, YAO Xianhua, et al. Determination of the cracking strength, tensile strength and double K fracture parameters of concrete[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(12): 124-137. (in Chinese))
- [10] 王一超, 李鹏, 周菊萍. 跨厚比对碳纤维复合材料三点弯曲性能的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2023(3): 83-88. (WANG Yichao, LI Peng, ZHOU Juping. Influence of span-to-thickness ratio on the three-point bending behavior of carbon fiber composites [J]. Composites Science and Engineering, 2023(3): 83-88. (in Chinese))
- [11] 梁宇慧, 缪庆旭, 刘新荣, 等. 聚丙烯纤维增强混凝土断裂韧度及软化本构曲线确定[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1144-1152. (LIANG Ninghui, LIAO Qingxu, LIU Xinrong, et al. Determination of fracture toughness and softening traction-separation law of polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1144-1152. (in Chinese))
- [12] 韩宇栋, 王振波, 刘伟康, 等. 不同强度海水珊瑚混凝土断裂性能对比研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 881-886. (HAN Yudong, WANG Zhenbo, LIU Weikang, et al. Comparative study on fracture properties of seawater coral aggregate concrete with different strengths[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 881-886. (in Chinese))
- [13] 杨尚谕, 周梅, 张玉琢, 等. 自燃煤矸石粗集料取代率对混凝土断裂韧性的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 858-864. (YANG Shangyu, ZHOU Mei, ZHANG Yuzhuo, et al. Effect of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate replacement ratio on fracture properties of three-point bending concrete beam [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 858-864. (in Chinese))
- [14] UDDIN M T, MAHMOOD A H, KAMAL M R I, et al. Effects of maximum size of brick aggregate on properties of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134: 713-726.

(下转第 87 页)

- in highly urbanized area of Lake Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35 (4): 1279-1295. (in Chinese))
- [11] 党晓戈,王世岩,刘畅,等. 基于 MIKE11 闸坝联合调控的北运河生态流量保障模拟[J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 94-100. (DANG Xiaoge, WANG Shiyang, LIU Chang, et al. Ecological flow guarantee simulation based on Mike11 in North Canal Gate dams joint regulation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7): 94-100. (in Chinese))
- [12] 高勋,陈星,卢娟娟,等. 台州主城区河道生态需水计算与水量调度[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 55-61. (GAO Xun, CHEN Xing, LU Juanjuan, et al. Ecological water demand calculation and water volume scheduling for river channels in Taizhou's main urban area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 55-61. (in Chinese))
- [13] 胡鹏,杨庆,杨泽凡,等. 水体中溶解氧含量与其物理影响因素的实验研究[J]. 水利学报, 2019, 50(6): 679-686. (HU Peng, YANG Qing, YANG Zefan, et al. Experimental study on dissolved oxygen content in water and its physical influence factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(6): 679-686. (in Chinese))
- [14] 陈俐丹,高成,陈妍清,等. 考虑水质及水动力条件的滨江圩区最优活水方案[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 16-19. (CHEN Lidan, GAO Cheng, CHEN Yanqing, et al. Optimal living water scheme of polder area along the Changjiang River considering water quality and hydrodynamic conditions [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(3): 16-19. (in Chinese))
- [15] 沈鑫. 圩区水动力提升模拟研究:以昆山市吴淞圩为例 [D]. 南京:东南大学, 2020.
- [16] 陈义华. 数学建模的层次分析法[J]. 甘肃工业大学学报, 1997, 23(3): 92-97. (CHEN Yihua. The analytic hierarchy process for mathematical modelling[J]. Journal of Gansu University of Technology, 1997, 23(3): 92-97. (in Chinese))
- [17] 张欣莹,解建仓,刘建林,等. 基于熵权法的节水型社会建设区域类型分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(2): 301-309. (ZHANG Xinying, XIE Jiancang, LIU Jianlin, et al. Analysis on the regional type of water-saving society based on entropy weight method [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(2): 301-309. (in Chinese))
- [18] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))
- [19] 郭金,顾冲时,何菁. 基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 117-122. (GUO Jin, GU Chongshi, HE Jing. Risk assessment for levee engineering based on a two-dimensional cloud model with combination weighting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 117-122. (in Chinese))
- [20] 李兵,庄文化,孙海龙. 改进熵权法在岩石边坡生态护坡效果综合评价中的应用[J]. 中国水土保持, 2019(9): 58-63. (LI Bing, ZHUANG Wenhua, SUN Hailong. Application of improved entropy weight method in comprehensive evaluation of eco-engineering protection for rock slope [J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(9): 58-63. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-07 编辑:俞云利)

(上接第 44 页)

- [15] SIM J I, YANG K H, JEON J K. Influence of aggregate size on the compressive size effect according to different concrete types[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44(7): 716-725.
- [16] 吴智敏,徐世焱,刘红艳,等. 最大骨料粒径对混凝土双K断裂参数的影响[J]. 大连理工大学学报, 2000(3): 358-361. (WU Zhimin, XU Shilang, LIU Hongyan, et al. Influences of maximum aggregate sizes on double-K fracture parameters of concrete [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000(3): 358-361. (in Chinese))
- [17] ZHANG J, LEUNG C K Y, XU S. Evaluation of fracture parameters of concrete from bending test using inverse analysis approach [J]. Materials and Structures, 2010, 43(6): 857-874.
- [18] AMPARANO F E, XI Y, 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.
- [19] 李清富,张鹏. 塑性混凝土强度试验研究[J]. 混凝土, 2006(5): 75-79. (LI Qingfu, ZHANG Peng. Experimental research on strength of plastic concrete [J]. Concrete, 2006(5): 75-79. (in Chinese))
- [20] 李家正,严建军,杨华全. 塑性混凝土在三峡工程中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 159-164. (LI Jiazheng, YAN Jianjun, YANG Huaquan. Application of plastic concrete in TGP [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 159-164. (in Chinese))

(收稿日期:2023-05-08 编辑:骆超)