

文章编号: 1001-4888(2019)02-0224-07

再生大骨料自密实混凝土梁裂缝开展机理研究^{*}

李静¹, 王亚林¹, 赵致俊², 王昌³, 刘力搏⁴, 刘晨¹

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 青岛 266580; 2. 荣华建设集团, 青岛 266555;

3. 山东高速轨道交通集团有限公司, 济南 250101; 4. 中国寰球工程有限公司, 北京 100012)

摘要: 再生大骨料自密实混凝土梁的裂缝开展机理作为梁结构可靠性设计的理论基础, 具有重要的工程意义。本文对不同再生大骨料取代率的再生大骨料自密实混凝土梁进行了数值仿真模拟, 分析了再生大骨料自密实混凝土梁的裂缝开展情况和荷载—挠度曲线。结果表明, 采用随机骨料模型对再生大骨料自密实混凝土梁进行裂缝开展模拟的方法可行; 裂缝主要沿着再生大骨料和自密实混凝土交界面扩展, 少部分经过再生大骨料; 不同再生大骨料取代率的再生大骨料自密实混凝土梁的裂缝开展机理相同; 相比自密实混凝土, 再生大骨料自密实混凝土梁的承载力降低, 脆性增强。

关键词: 再生大骨料; 自密实混凝土; 随机骨料模型; 数值模拟; 裂缝开展

中图分类号: TU37 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-278

0 引言

再生大骨料自密实混凝土(Big recycled aggregate self-compacting concrete)是一种在再生混凝土和堆石混凝土基础上发展而来的新型堆积体混凝土^[1-4]。它的主要施工流程为: 将粒径为 80~150mm 的再生大骨料堆积入仓, 然后浇筑自密实混凝土, 利用自密实混凝土的高流动性能填充再生大骨料堆积体的空隙, 从而形成完整密实的混凝土^[5]。目前, 李静^[6,7]、王林富^[8]、王海超^[9]等通过试验研究了再生大骨料自密实混凝土的力学性能; 安雪晖等^[10]通过试验的方法综合评价了自密实混凝土充填堆石体的性能; 唐欣薇等^[11]对堆石混凝土抗折试验全过程展开了数值仿真模拟; 钟文等^[12]采用细观数值计算的方法分析了堆石混凝土抗压强度的影响因素; 肖建庄等^[13]对再生混凝土的破坏机理进行了仿真分析; 党娜娜等^[14]采用随机骨料模型研究了再生混凝土的细观损伤断裂机理。但是, 针对再生大骨料自密实混凝土梁的裂缝开展机理研究, 目前还鲜有报道。因此, 本研究将从细观层次出发, 将再生大骨料自密实混凝土离散为由再生大骨料和自密实混凝土两相介质组成的非均质复合材料, 通过建立随机凸多边形骨料模型, 利用混凝土塑性损伤模型对再生大骨料自密实混凝土梁进行裂缝开展模拟, 研究不同再生大骨料取代率下梁的裂缝开展情况。

1 随机凸多边形骨料模型

为解决骨料模型导入有限元软件的难题, 本文采用 MATLAB 编写程序代码, 建立骨料模型与有限元软件接口, 完成了随机凸多边形骨料的生成和随机投放。

^{*} 收稿日期: 2017-12-23; 修回日期: 2018-02-03

基金项目: 青岛市科技发展计划科技惠民专项(15-9-2-116-nsh)资助

通讯作者: 李静(1967—), 女, 博士, 教授, 博士后导师, 主要从事土木工程材料与结构方面的教学与科研工作。Email: lijing0681@163.com

随机多边形骨料模型的建立与投放过程为:首先,随机生成一定粒径的圆形基骨料;然后根据骨料边长判别准则生成任意凸多边形;最后,按 Monte Carlo 法完成骨料在一定区域内的投放。图 1 所示为两种不同取代率的随机凸多边形骨料模型。各粒径范围的骨料比例根据式(1)所示的 Walraven 公式^[15]确定。

$$P_c(D \leq D_0) = P_k \left[1.065 \left(\frac{D_0}{D_{\max}} \right)^{1/2} - 0.053 \left(\frac{D_0}{D_{\max}} \right)^4 - 0.012 \left(\frac{D_0}{D_{\max}} \right)^6 - 0.0045 \left(\frac{D_0}{D_{\max}} \right)^8 - 0.0025 \left(\frac{D_0}{D_{\max}} \right)^{10} \right] \quad (1)$$

式中, $D_{\max}$ 为最大骨料粒径, mm; P_k 为骨料体积与混凝土总体积的百分比; P_c 为骨料粒径 $D < D_0$ 的概率。

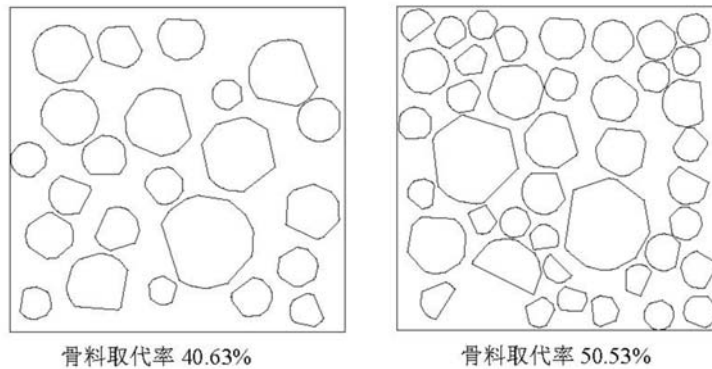


图1 随机凸多边形骨料模型

Fig. 1 Random polygon aggregate model

2 混凝土塑性损伤模型

本文再生大骨料和自密实混凝土均采用塑性损伤模型来描述静态载荷作用下细观单元的损伤退化,材料的失效准则均采用最大拉应变准则,其模型如图 2 所示。

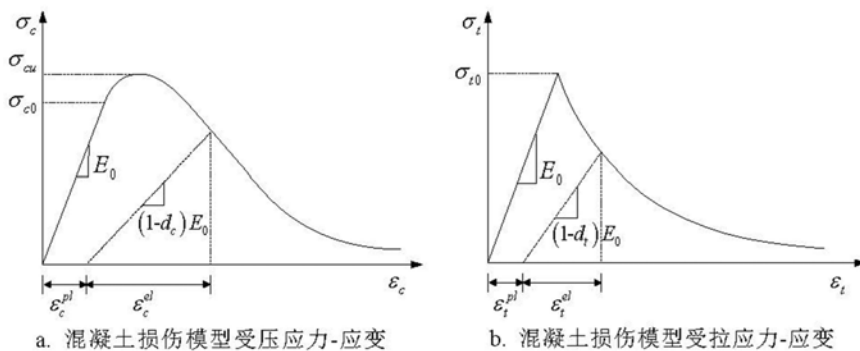


图2 混凝土塑性损伤模型

Fig. 2 Plastic damage model of concrete

混凝土塑性损伤模型中采用损伤因子 d 来度量材料内部的损伤和劣化程度,本文定义材料损伤因子大于 0.9 时,材料达到破坏状态^[16]。

损伤材料的应力-应变关系可表示为:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0(1-d)} \quad (2)$$

3 梁裂缝开展机理研究

3.1 有限元模型建立

由于再生大骨料在三维空间上分布的不确定性,当随机选取再生大骨料自密实混凝土试件二维断

面时,断面上会存在小于最小骨料粒径的再生大骨料,将二维截面上的再生大骨料粒径称为截面粒径(SOD)^[17]。再生大骨料自密实混凝土截面与骨料截面粒径关系如图 3 所示。

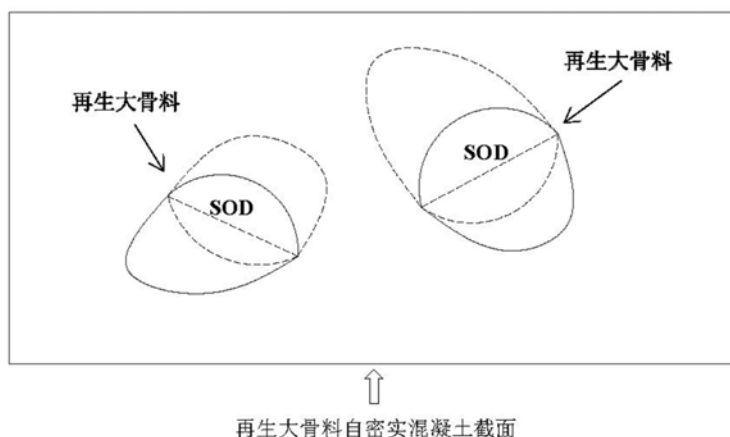


图 3 混凝土截面与骨料截面粒径关系

Fig. 3 Relationship between section and particle size

根据实际的再生大骨料粒径范围 80~150mm 以及上述再生大骨料自密实混凝土截面与骨料截面粒径的关系,将二维平面内的再生大骨料截面粒径设为 40~150mm,建立如图 4 所示的二维再生大骨料自密实混凝土有限元模型,编号为 SH。模型尺寸为 2700mm×450mm,其中,自密实混凝土强度等级为 C20,再生大骨料均为废弃混凝土块,再生大骨料取代率为 50%,各粒径范围的骨料比例如表 1 所示。

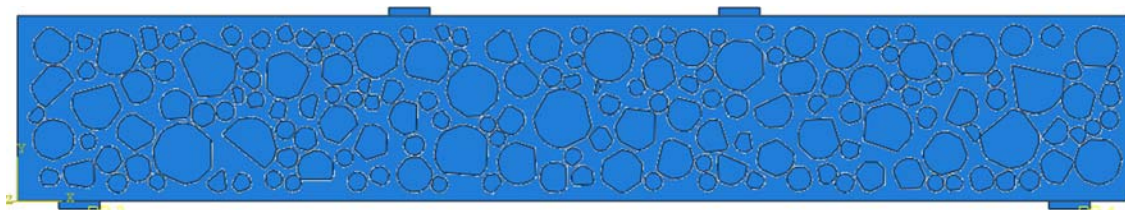


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

表 1 骨料比例分布

Tab. 1 Aggregate proportion distribution

截面粒径/mm	40~80	80~120	120~150
比例/%	33.34	42.89	23.57

3.2 各项材料力学参数设置

本文采用的自密实混凝土强度等级为 C20,再生大骨料强度等级设为 C30,根据《混凝土结构设计规范》^[18]以及相关试验结果,设定各项材料的力学参数如表 2 所示。

表 2 各项材料力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of various materials

材料	弹性模量/MPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
再生大骨料	30000	0.20	2.01	20.10
自密实混凝土	25500	0.20	1.54	13.40

3.3 梁裂缝开展机理研究

再生大骨料自密实混凝土梁裂缝开展过程如图 5 所示。由图可以看出,载荷施加初期,再生大骨料自密实混凝土梁纯弯段底部产生大量微裂缝,这些微裂缝均在自密实混凝土内。随载荷增加,宏观裂缝产生,并沿着再生大骨料边界向上扩展。根据图 5(c)裂缝扩展图可以看出,当裂缝扩展过程中遇到粒

径较小的再生大骨料时,裂缝将避开再生大骨料,沿再生大骨料边界继续扩展,在大骨料内部会有部分微裂纹产生。当裂缝遇到粒径较大的再生大骨料时,裂缝将直接穿过再生大骨料向上开展,如图 5(d) 试件破坏图所示。

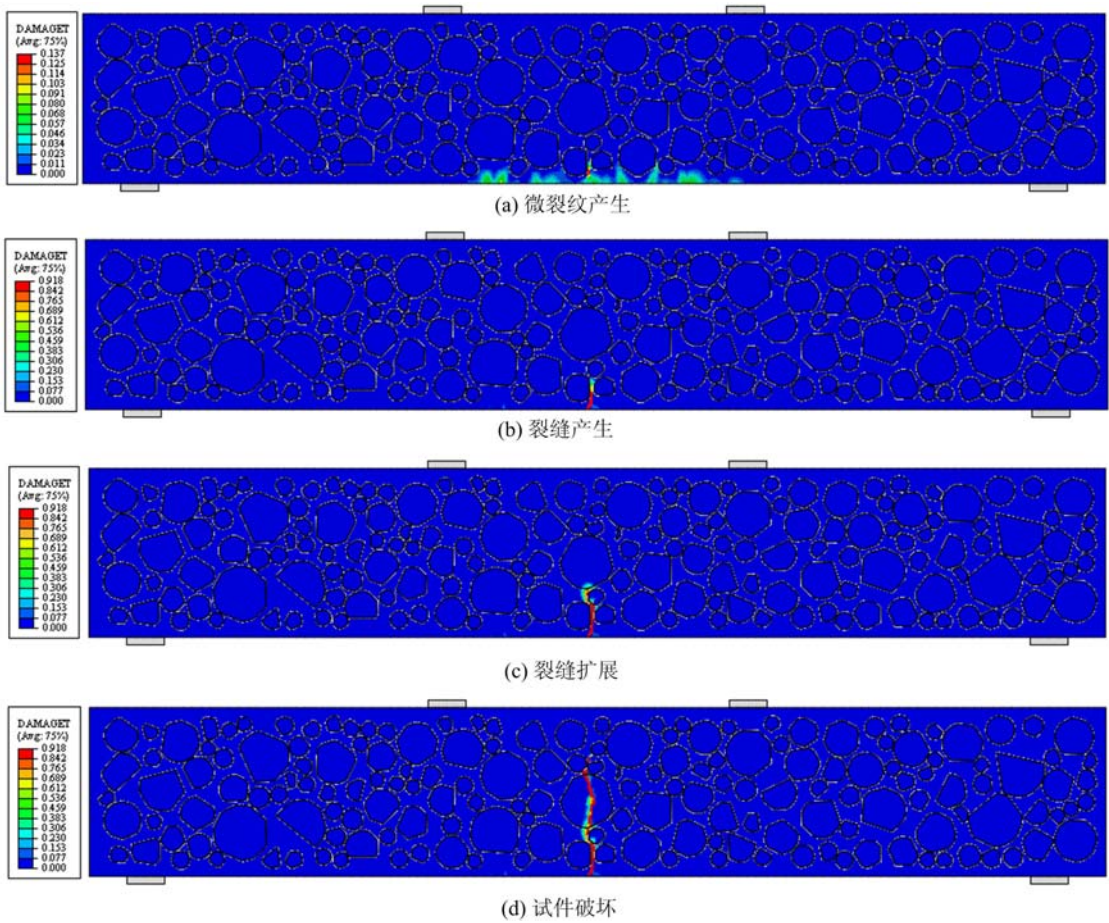


图 5 再生大骨料自密实混凝土梁裂缝开展过程

Fig. 5 Crack development process of big recycled aggregate self-compacting concrete beam



图 6 试验梁的断裂面

Fig. 6 Fracture surface of test beam



图 7 试验梁破坏

Fig. 7 Destruction of test beam

为了验证该模拟方法的可靠性,浇筑了一根和 SH 梁参数相同的再生大骨料自密实混凝土梁,进行三分点加载试验。该试验梁破坏后的断裂面和破坏图如图 6 和图 7 所示,可以看出,梁的裂缝产生在跨中纯弯段,梁的断裂主要发生在自密实混凝土处,部分大骨料也发生了断裂。

根据试验梁的破坏和数值模拟梁裂缝开展结果对比,可以看出,通过建立随机多边形骨料模型,采用混凝土塑性损伤本构关系对再生大骨料自密实混凝土梁裂缝开展数值模拟的结果与试验结果相一致,说明该数值仿真模拟方法可行。

3.4 再生大骨料取代率对梁裂缝开展机理的影响

按照同样的尺寸和混凝土强度等级建立四根再生大骨料取代率分别为 25.86%、30.89%、35.40%、41.18% 的再生大骨料自密实混凝土梁模型,编号分别为 SH-1、SH-2、SH-3、SH-4,以及一根强度等级为 C20 的自密实混凝土梁模型,编号为 SH-5,然后采用相同的方法开展数值模拟。取再生大骨料自密实混凝土梁纯弯段,SH-1、SH-2、SH-3、SH-4 梁的裂缝开展图如图 8 所示。

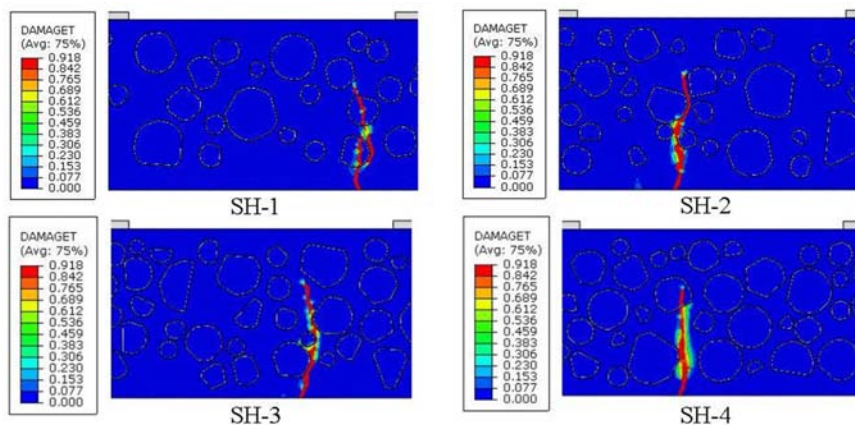


图 8 再生大骨料自密实混凝土梁裂缝开展图

Fig. 8 Crack development diagram of big recycled aggregate self-compacting concrete beam

由图 8 可以看出,不同再生大骨料取代率下,梁的裂缝开展情况相似,裂缝主要沿着再生大骨料和自密实混凝土交界面扩展,部分经过再生大骨料,离开交界面后,则在自密实混凝土内部扩展。

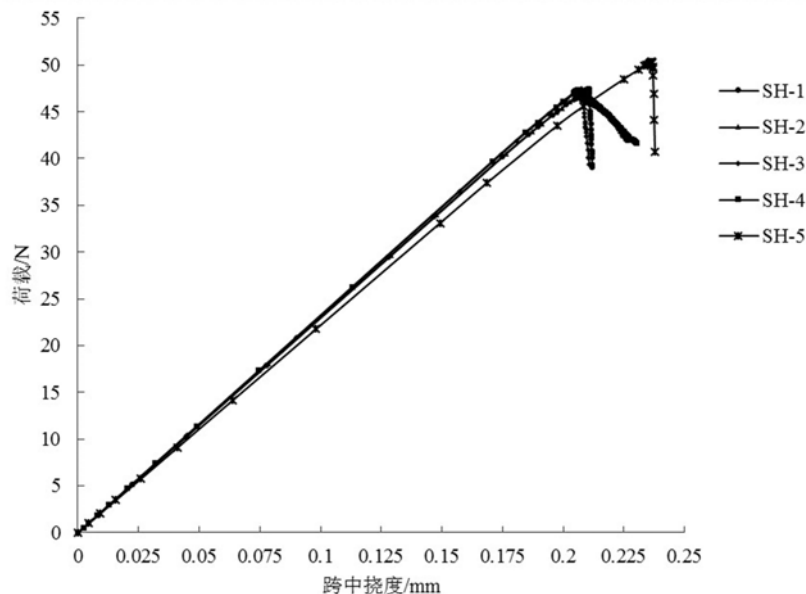


图 9 梁的荷载—挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curve of beams

由此可见,不同再生大骨料取代率下的再生大骨料自密实混凝土梁的裂缝开展机理相同。SH-1、SH-2、SH-3、SH-4、SH-5 五根梁的荷载—挠度曲线如图 9 所示,可以得到,四根再生大骨料自密实混凝土梁的荷载—挠度曲线基本重合,承载力基本相同。相比自密实混凝土梁,再生大骨料自密实混凝土梁的承载力略低一些。相同荷载作用下,再生大骨料自密实混凝土梁的挠度要比自密实混凝土梁的小,说明再生大骨料自密实混凝土的脆性比自密实混凝土更强,因此,在实际工程中需要采取措施来弥补再生大骨料自密实混凝土脆性强的问题。

4 结论

通过对不同取代率的再生大骨料自密实混凝土梁的裂缝开展机理对比研究,得到以下结论:

(1) 再生大骨料自密实混凝土梁的裂缝主要沿再生大骨料与自密实混凝土的交界面开展,部分通过再生大骨料内部。

(2) 对相同尺寸和强度等级的再生大骨料自密实混凝土梁,再生大骨料取代率对梁的裂缝开展机理无影响。

(3) 不同取代率下的再生大骨料自密实混凝土梁的承载力基本相同。相比自密实混凝土梁,再生大骨料自密实混凝土梁的承载力降低,脆性增强。

(4) 通过建立随机凸多边形骨料模型,对再生大骨料自密实混凝土梁裂缝开展情况的数值模拟结果与试验结果相吻合,说明该模拟方法可行。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008 (XIAO Jianzhuang. Recycled concrete[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2008 (in Chinese))
- [2] 金峰, 安雪晖, 石建军, 等. 堆石混凝土及堆石混凝土大坝[J]. 水利学报, 2005, 36(11):1347—1352 (JIN Feng, AN Xuehui, SHI Jianjun, et al. Study on rock-fill concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11):1347—1352 (in Chinese))
- [3] 欧阳雯欣, 王清远. 灾后再生混凝土的应用及推广分析[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(6):178—184 (OUYANG Wenxin, WANG Qingyuan. Application and extension analysis of regenerated concrete after disaster [J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(6):178—184 (in Chinese))
- [4] 卫国祥, 雷颖占. 混凝土再生骨料的研究分析[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(4):115—117 (WEI Guoxiang, LEI Yingzhan. The researching and analysing of regenerated aggregate of concrete[J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(4):115—117 (in Chinese))
- [5] 李静, 姜琳, 刘震, 等. 不同种类再生大骨料制作自密实堆积混凝土的实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(4): 425—430 (LI Jing, JIANG Lin, LIU Zhen, et al. Experimental study of self-compacting accumulation concrete prepared from different recycled big aggregate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(4):425—430 (in Chinese))
- [6] 李静, 王亚林, 姜琳, 等. 再生大骨料自密实混凝土梁正截面受力特性研究[J]. 实验力学, 2017, 32(6):781—788 (LI Jing, WANG Yalin, JIANG Lin, et al. Study on the normal section mechanical behavior of big recycled aggregate self-compacting concrete beam[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6):781—788 (in Chinese))
- [7] 李静, 王林富, 刘震, 等. 再生大骨料与自密实混凝土粘结性能研究[J]. 低温建筑技术, 2010, 32(9):10—12 (LI Jing, WANG Linfu, LIU Zhen, et al. Research on the binding properties between big recycled aggregates and self-compacting concrete[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010, 32(9):10—12 (in Chinese))
- [8] 王林富. 再生大骨料自密实混凝土受压力学性能研究[D]. 中国石油大学, 2011 (WANG Linfu. Research on compression mechanical properties of big recycled aggregate-filled Concrete[D]. China University of Petroleum, 2011 (in Chinese))
- [9] 王海超, 孙利敏. 再生大骨料自密实堆石混凝土力学性能研究[J]. 混凝土, 2013(8):137—139 (WANG Haichao, SUN Limin. Study on the mechanical behavior of big recycled aggregates fill concrete[J]. Concrete, 2007, 2013(8):137—139 (in Chinese))
- [10] 安雪晖, 金峰, 石建军. 自密实混凝土充填堆石体试验研究[J]. 混凝土, 2005(1):3—6 (AN Xuehui, JIN Feng, SHI Jianjun. Experimental study of self-compacting concrete filled prepacked rock[J]. Concrete, 2005(1):3—6 (in Chinese))
- [11] 唐欣薇, 石建军, 张志恒, 等. 自密实堆石混凝土力学性能的细观仿真与试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 844—849 (TANG Xinwei, SHI Jianjun, ZHANG Zhiheng, et al. Analysis on characteristics of spatial-temporal precipitation distribution based on cloud model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7):844—849 (in Chinese))

- Chinese))
- [12] 钟文, 潘坚文. 堆石混凝土抗压强度影响因素细观分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5):15—22 (ZHONG Wen, PAN Jianwen. Meso-scale analysis of influence factors on compressive strength of rock-filled concrete using particle-based discrete element method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(5):15—22 (in Chinese))
- [13] 肖建庄, 李文贵, 刘琼. 模型再生混凝土单轴受压性能细观数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(6):791—797 (XIAO Jianzhuang, LI Wengui, LIU Qiong. Meso-level numerical simulation mechanical properties of modeled recycled concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2011, 39(6):791—797 (in Chinese))
- [14] 党娜娜, 彭一江, 周化平, 等. 基于随机骨料模型的再生混凝土材料细观损伤分析方法[J]. 固体力学学报, 2013(S1):58—62 (DANG Nana, PENG Yijiang, ZHOU Huaping, et al. A meso-mechanical damage method base on random aggregate model for recycled aggregate concrete[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013(S1):58—62 (in Chinese))
- [15] Schlangen E, van Mier G M. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures[J]. Materials and Structures, 1992, 25(9):534—542.
- [16] 张安哥, 朱成九, 陈梦成. 疲劳、断裂与损伤[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2006 (ZHANG Ange, ZHU Chengjiu, CHEN Mengcheng. Fatigue, fracture and damage[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006 (in Chinese))
- [17] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 土石混合体细观结构及力学特性数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2):300—311 (XU Wenjie, HU Runlin, YUE Zhongqi, et al. Mesostructural character and numerical simulation of mechanical properties of soil-rock mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2):300—311 (in Chinese))
- [18] GB 50010—2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010 (GB 50010—2010, Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010 (in Chinese))

Study of cracking propagation mechanism of self-compacting concrete beam with recycled large aggregate

LI Jing¹, WANG Ya-lin¹, ZHAO Zhi-jun², WANG Chang³, LIU Li-bo⁴, LIU Chen¹

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. Ronghua Construction Group, Qingdao 266555, China; 3. Shandong High Speed Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250101, China; 4. China Huanqiu Contracting & Engineering Co., Ltd., Beijing 100012, China)

Abstract: As the theoretical basis for reliability design of beam structure, crack propagation mechanism of recycled large aggregate self-compacting concrete beam is of great engineering significance. In this paper, numerical simulation of recycled large aggregate self-compacting concrete beam with different big recycled aggregate replacement rate was carried out, and the crack propagation and load-deflection curve of recycled large aggregate self-compacting concrete beam were analyzed. Results show that the method of random aggregate model is feasible for the crack propagation simulation of recycled large aggregate self-compacting concrete beams. The cracks mainly propagate along the interface between recycled large aggregate and self-compacting concrete, and a few of cracks pass through the recycled large aggregate. The crack propagation mechanism of recycled large aggregate self-compacting concrete beam with different big recycled aggregate replacement rate is the same. Compared with self-compacting concrete, the bearing capacity of recycled large aggregate beam decreases, and the brittleness increases.

Keywords: recycled large aggregate; self-compacting concrete; random aggregate model; numerical simulation; crack propagation