

文章编号: 1001-4888(2011)06-0730-05

骨料尺寸对混凝土层裂强度的影响^{*}

张磊¹, 吴建华¹, 高伟亮¹, 陈力¹, 孙艳², 高笑娟²

(1. 总参工程兵科研三所, 河南洛阳 471023; 2. 河南科技大学 规划与建筑工程学院, 河南洛阳 471003)

摘要: 作为混凝土材料的主要组成部分, 骨料对混凝土力学性能具有重要影响。但骨料尺寸对混凝土层裂强度的影响仍缺少研究。本文利用大直径 Hopkinson 杆对混凝土细长杆件进行层裂实验, 通过放置在试件后方吸收杆上的波形测量混凝土层裂强度。对两种不同尺寸骨料的混凝土进行了不同冲击速度下的层裂实验研究。实验结果表明, 在相同加载条件下, 骨料尺寸越大混凝土层裂强度越低, 其主要原因是大尺寸骨料混凝土的界面过渡区强度更低; 混凝土层裂强度具有率效应, 即加载率越高其层裂强度也越高。但当加载波超过一定阈值时, 由于压缩损伤演化和积累, 层裂强度会降低。

关键词: Hopkinson 杆; 混凝土; 骨料尺寸; 层裂强度; 过渡区

中图分类号: O347.4 **文献标识码:** A

0 引言

混凝土是由粗骨料、砂浆基体和过渡区组成的三相复合材料, 其中粗骨料是混凝土结构的骨架部分, 其尺寸、材料和表面形状等因素对混凝土力学性能有重要影响。目前关于骨料尺寸对混凝土力学性能的影响主要局限于静态压缩和拉伸等方面的研究, 并取得了丰富的研究成果。研究表明当骨料粒径增大时, 混凝土静态压缩强度一般会增加^[1]。由于混凝土直接拉伸实验的困难, 一般主要利用劈裂实验测量其拉伸强度, Tülin Akçaoğlu^[2,3]等人研究表明, 骨料尺寸越大, 混凝土劈裂拉伸强度越低。

对承受侵彻、爆炸和高速撞击等强动载作用的混凝土结构而言, 强动载作用产生的压缩加载波在结构自由面反射形成拉伸波, 由于混凝土材料的抗拉强度低而容易发生层裂破坏, 所以混凝土层裂问题研究正受越来越多的关注^[4-6]。张磊等^[7]提出一种实验技术, 利用 Hopkinson 杆对混凝土杆进行冲击加载, 通过吸收杆应变波形测量混凝土的层裂强度, 并详细研究了加载率、材料抗压强度^[8-9]和钢纤维含量^[10]对层裂强度的影响。但骨料尺寸对混凝土层裂强度的影响目前仍无相关研究。

本文采用张磊等^[7]所提出的实验方法, 研究了相同基体材料、不同大小粗骨料的混凝土在不同加载率下层裂破坏, 以分析骨料尺寸对混凝土层裂强度的影响。

1 实验原理

图 1 为实验装置简图。撞击杆撞击 Hopkinson 杆产生压缩波沿杆向右传播, 对混凝土试件轴向冲击压缩加载。当加载波传播到试件与吸收杆接触面时, 由于吸收杆波阻抗 $(\rho C_0)_B$ 小于混凝土波阻抗 $(\rho C_0)_C$, 会反射成拉伸波而对试件进行拉伸加载。图 2 为层裂过程波传播的 $x-t$ 图。在 F 点, 试件拉伸应力达到层裂损伤演化阈值, 材料开始损伤软化, 软化过程中产生的弱间断压缩波向右传播并使接触

^{*} 收稿日期: 2011-07-12; 修回日期: 2011-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(10802098)

通讯作者: 张磊(1974—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事冲击动力学和材料动态力学性能研究。E-mail: ustczhanglei@163.com

面压力从 $\sigma_B = \sigma_{\min}$ 增加,在 D 点材料内拉伸损伤积累至一定程度使材料断裂。根据文献[7]的研究结果,可以由试件和吸收杆的接触面压力波形得到层裂强度:

$$\sigma_F = \frac{1}{2} [n(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) - (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})] \tag{1}$$

其中 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 为接触面压力最大值和最小值(压缩为正); $n = (\rho C_0)_C / (\rho C_0)_B$ 为混凝土与吸收杆的波阻抗比。

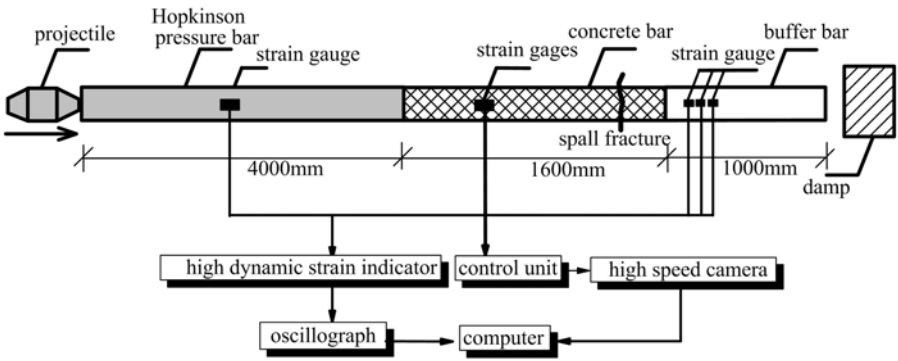


图 1 实验装置简图
Fig. 1 Scheme of experimental facility

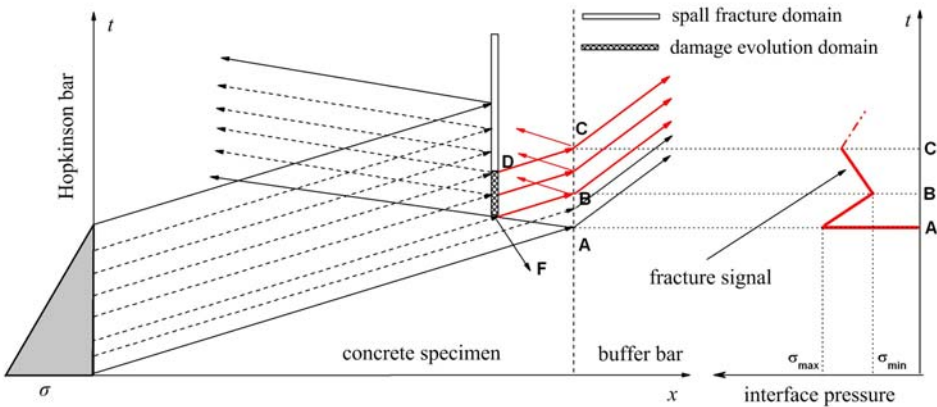


图 2 层裂过程的 $x-t$ 图和接触面压力波形
Fig. 2 $x-t$ diagram of spallation and profile of interface pressure

2 实验过程

试件材料为抗压强度 30MPa 的混凝土,粗骨料为石灰石碎石,岩芯实验抗压强度 98MPa,弹性模量 60GPa。为研究骨料尺寸对层裂强度的影响,选择了 2 种不同粒径粗骨料: C30-A 骨料粒径为 15~20mm, C30-B 最大骨料粒径小于 8mm,粗骨料照片见图 3。表 1 给出了养护 28 天后混凝土材料的主要力学性能。

表 1 试件材料的主要力学性能

Tab. 1 The major mechanical properties of specimen material

材料种类	密度(kg/m^3)	波速(m/s)	模量(GPa)	波阻抗($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$)	与吸收杆波阻抗比 n
C30-A	2400	4245	43.2	10.19	4.92
C30-B	2400	4210	42.5	10.10	4.88

由于混凝土中含有粗骨料,为减少材料不均匀性的影响,实验中采用了国内最大直径 $\Phi 100\text{mm}$ 的 Hopkinson 杆,试件和吸收杆直径也为 100mm。Hopkinson 杆材料为钢。为使试件能产生层裂破坏,

吸收杆选用波阻抗较低的尼龙材料,其本构方程(2)由利用不同应变率的压缩实验结果拟合得到:

$$\sigma(t) = 2057 \epsilon(t) + 1680 \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) e^{-\frac{\tau}{96}} d\tau \quad (2)$$

其中 $\sigma, \dot{\epsilon}, t$ 和 τ 分别代表应力、应变率、积分上限和时间,其单位分别为 MPa、 s^{-1} 、 μs 和 μs 。



图 3 粗骨料照片

Fig. 3 Photos of aggregate (a) C30-A, (b) C30-B

为减小波的弥散效应,采用梭形变截面子弹,实验结果表明,采用变截面子弹能较好的减少弥散影响。但波在尼龙中传播时,由于材料的粘弹性会产生波的衰减,为此采用文献[8]的方法:在吸收杆靠近试件端不同位置测量应变波形,利用(2)得到应力波形,利用各测点应力最大值和最小值可得到试件与吸收杆接触面压力的最大值 $\sigma_{\max}$ 和最小值 $\sigma_{\min}$,由式(1)得到材料的层裂强度。

共进行了三种不同撞击速度(6m/s、8m/s 和 11m/s)的层裂实验,每种实验条件下 5 个有效数据取其平均值作为材料层裂强度。利用试件上应变片所测应力波形上升沿的平均值作为对试件的加载率 $\dot{\sigma} = \sigma_{\max} / \tau$,其中 $\sigma_{\max}$ 为试件应力波峰值; τ 为上升时间。各种加载率下材料的层裂强度见表 2,其均方差也列于表 2 以表示实验结果离散性。

表 2 实验结果

Tab. 2 The experimental result

材料种类	撞击速度(m/s)	加载率(MPa/ μs)	层裂强度(MPa)	层裂强度均方差(MPa)
C30-A	6	0.5	9.1	0.14
	8	0.67	11.9	0.15
	11	0.92	10.3	0.28
C30-B	6	0.5	11.3	0.25
	8	0.67	12.8	0.26
	11	0.92	11.6	0.17

3 实验结果分析

3.1 骨料尺寸对层裂强度的影响

实验结果表明,在相同加载率下 C30-A 的层裂强度低于 C30-B,说明骨料尺寸大则层裂强度低,此规律与 Akçaoglu^[2,3]混凝土静态劈裂实验结论相同。众所周知,混凝土是由粗骨料、砂浆基体和过渡区组成的三相复合材料,其中过渡区是混凝土中最薄弱的一相,是影响混凝土抗拉强度最主要的因素。由于基体和骨料的模量不同,以及这两相材料养护过程中收缩不同,混凝土养护过程中会在过渡区产生大量微裂纹,而这些微裂纹是导致混凝土过渡区强度低的主要原因。Mustafa 等^[11]的研究表明,随骨料的体积增大,骨料和砂浆基体两相的模量差别的影响就更明显,会引起过渡区内更多的应力集中和骨料附近更多微裂纹,同时,骨料增大后由于骨料光滑的表面积而引起的负效果也会更明显,所以骨料尺寸越

大,混凝土过渡区强度越低,混凝土层裂强度就越低。过渡区强度不同,同时也可能会导致层裂破坏时裂纹扩展方式的不同,从而影响混凝土层裂强度。以 6m/s 撞击速度为例,图 3 为 C30-A 断口照片,其主要特征是骨料整体从基体中剥落,没出现骨料断裂的现象;图 4 为 C30-B 同样加载条件下断口照片,与同样加载速度时 C30-A 不同,其大部分骨料被拉断,断口平直。这种现象表明,在骨料尺寸较小时,由于骨料与水化水泥浆之间粘合力高,骨料一般不会从基体中脱落。层裂破坏的主要形式是裂纹穿透骨料的方式,由于骨料抗拉强度比过渡区高,所以混凝土层裂强度也会增加。

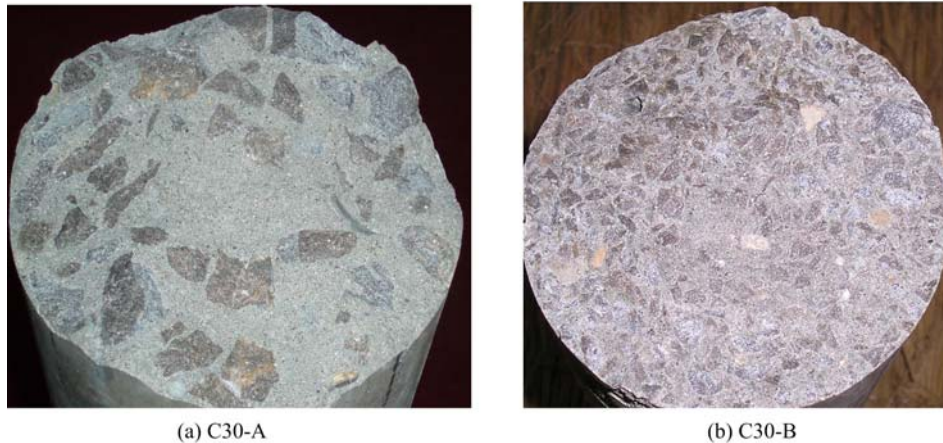


图 4 6m/s 撞击速度时试件断口形状

Fig. 4 Fracture surfaces of specimen with impact velocity 6m/s

3.2 加载率对层裂强度的影响

实验结果表明,混凝土层裂强度与加载率有关,但在实验范围内呈现了两种不同的变化规律。当加载率小于 $0.67\text{MPa}/\mu\text{s}$ 时,混凝土层裂强度随加载率的增加而增加。而当加载率增加至 $0.92\text{MPa}/\mu\text{s}$ 时,混凝土层裂强度反而降低。

混凝土层裂强度随加载率的增加而增加的实验现象多次被报道^[4-5,8,-9],其主要原因是不同加载率时混凝土内裂纹扩展方式不同:在低加载率时,裂纹主要沿过渡区扩展而绕过强度较高的粗骨料,这时混凝土的层裂强度主要取决于过渡区和基体强度。而在高加载率情况下,裂纹会直接穿透骨料而扩展,导致骨料被拉断而形成平直的断口,此时混凝土层裂强度主要取决于骨料强度。由于骨料的抗拉强度一般高于过渡区,所以高加载率时层裂强度会增加。但当加载应力高于混凝土压缩损伤阈值时,压缩加载波会引起混凝土的压缩损伤从而降低混凝土抗拉能力,从而使得材料可以在较低拉伸应力作用下层裂破坏,这种现象在张磊等^[9]以及 D. L. Grote 等^[12]的研究中均有报道。

4 结语

1) 在相同加载条件下,骨料越大的混凝土材料层裂强度越低,主要原因是由于大骨料混凝土在养护过程中,骨料与硬化水泥浆基体之间模量差别会导致过渡区内更多微裂纹存在,从而降低过渡区的强度。

2) 混凝土层裂强度具有率效应,即加载率越高层裂强度越高。但加载压缩波可能会导致材料的压缩损伤演化,从而降低材料层裂强度。

参考文献:

- [1] Larrard F, Belloc A. The influence of aggregate on the compressive strength of normal and high-strength concretes [J]. ACI Material Journal, 1997, 94(5): 417—425.
- [2] Akçaoglu T, Tokyay M, Çelik T. Effect of coarse aggregate size on the interfacial cracking under uniaxial compression [J]. Materials Letters, 2002, 57(3): 828—833.
- [3] Akçaoglu T, Tokyay M, Çelik T. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of

- concrete under uniaxial compression [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2004, 26(4): 633—638.
- [4] Klepaczko J R, Brara A. An Experiment Method for Dynamic Tensile Testing of Concrete by Spalling [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(4): 331—442.
- [5] Wu H J, Zhang Q M, Huang F L, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(4):605—617.
- [6] Brara A, Klepaczko J R. Experimental characterization of concrete in dynamic tension [J]. *Mechanics of Materials*, 2006, 38(4):253—267.
- [7] 张磊, 胡时胜. 混凝土层裂强度测量的新方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(6):537—542 (Zhang Lei, Hu Shisheng. A Novel Experimental Technique to Determine the Spalling Strength of Concretes [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(6):537—542 (in Chinese))
- [8] 张磊, 胡时胜, 陈德兴 等. 混凝土材料的层裂特性[J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(3):195—199 (Zhang Lei, Hu Shisheng, Chen Dexing, et al. Spall Characteristics of Concrete Materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(3): 537—542(in Chinese))
- [9] Zhang Lei, Hu Shisheng, Chen Dexing, et al. An Experimental Technique for Spalling of Concrete [J]. *Experimental Mechanics*, 2009, 49(4):523—532.
- [10] 张磊, 胡时胜, 陈德兴 等. 钢纤维混凝土的层裂特征[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(2):119—124 (Zhang Lei, Hu Shisheng, Chen Dexing, et al. Spall Fracture Properties of Steel-Fiber-Reinforced Concrete [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(2):119—124(in Chinese))
- [11] Mustafa T. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2004, 26(4):633—638.
- [12] Grote D L, Park S W, Zhou M. Experimental characterization of the dynamic failure behavior of mortar under impact loading [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(4):2115—2123.

On the Effect of Aggregate Size on Concrete Spalling Strength

ZHANG Lei¹, WU Jianhua¹, GAO Wei-liang¹, CHEN Li¹, SUN Yan², GAO Xiao-juan²

(1. The Third Engineering Scientific Research Institute, The Headquarters of the General Staff, Luoyang 471023, Henan, China;

2. College of Planning and Architectural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China)

Abstract: As a major ingredient of concrete, aggregate has an important effect on concrete mechanical behaviors, but up to now, less work was addressed to the influence of aggregate size on concrete spalling strength. Slender concrete rod spalling experiment was carried out by using a large diameter Hopkinson pressure bar equipment, in which stress pulse produced in buffer bar mounted behind the concrete rod was measured to determine spalling strength. Experiment is focused on the influence of two kinds of concrete with different aggregate sizes and subjected to different impact velocities on the concrete spalling. Results indicate that concrete containing larger size aggregates has lower spalling strength under the same loading condition. This can be attributed to the weakened strength in the larger aggregate interfacial transition zone. Results also reveal that spalling strength of concrete has a rate effect, namely, the higher loading rate is, the higher spalling strength is. However, when loading wave exceeds a threshold, the spalling strength decreases due to the evolution and accumulation of compressive damage in concrete.

Keywords: Hopkinson bar; concrete; aggregate size; spall strength; Interfacial transition zone