

文章编号:1673-2049(2011)01-0091-05

砂浆-骨料界面拉伸软化性能试验

朱亚超, 宋玉普, 王立成

(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)

摘要:对砂浆-骨料复合试件进行了劈裂试验和三点弯曲试验, 基于试验结果和改进的 J 积分计算方法, 提出了砂浆-骨料界面的拉伸软化曲线模型及其表达式。分析结果表明: 砂浆基体的特性和粗骨料表面的粗糙度对砂浆-骨料界面的力学性能具有重要影响; 界面断裂能随着砂浆基体强度的提高和骨料表面粗糙度的提高而提高; 基体为普通强度砂浆的试件断裂多发生在界面附近的砂浆粘结层上; 基体为高强度砂浆的试件断裂多发生在砂浆粘结层和砂浆-骨料接合处的粘结层上。

关键词:砂浆-骨料界面; 劈裂试验; 三点弯曲试验; 粗糙度; 断裂能; 拉伸软化曲线

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

Experiment on Tension Softening Behavior of Mortar-aggregate Interface

ZHU Ya-chao, SONG Yu-pu, WANG Li-cheng

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Splitting tests and three point bending tests of mortar-aggregate composite specimens were carried out. Based on the test results and modified J-integral calculation method, tension softening curve model and its expression of mortar-aggregate interface were proposed. Analysis results indicate that the mortar matrix property and the roughness of aggregate interface have important effect on the mechanical properties of interface. The fracture energy of interface increases with the increasing of mortar matrix strength and aggregate surface roughness. The fracture interfaces of normal strength mortar specimens appear on the mortar joint interface, and the fracture interfaces of high strength mortar specimens appear on the mortar joint interface and mortar-aggregate interface.

Key words: mortar-aggregate interface; splitting test; three point bending test; roughness; fracture energy; tension softening curve

0 引言

在细观层次上模拟混凝土, 通常将其看成由砂浆、粗骨料以及两者之间的界面组成的三相非均质复合材料^[1]。由于在数值分析中进行单元划分后,

粗骨料单元、砂浆单元及界面单元的力学性质不同, 因此本构模型的选择对分析结果有着相当大的影响^[2-3]。细观力学研究中要将理论分析与试验结合起来, 理论研究提出细观力学的基本原理和理论模型, 而试验结果为理论分析提供基础数据(如材料的

收稿日期: 2011-01-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50838001); 国家自然科学基金重大研究计划项目(90815026);

教育部科学技术研究重点项目(109046)

作者简介: 朱亚超(1987-), 男, 辽宁沈阳人, 工学硕士研究生, E-mail: zhuyachao2006@163.com。

细观力学性质)和检验判断标准(真实试件的宏观试验结果)。很多研究者从微观层次上针对界面过渡区的影响因素、劣化机理做了大量的研究,然而这些研究成果很难与细观力学性能相联系,无法应用到混凝土结构的力学分析中^[4-5]。因此在细观层次上对混凝土的断裂过程进行模拟时,需要通过试验确定其三相组成材料的力学性能,以此为基础进行混凝土的断裂过程模拟。

劈裂试验广泛应用于混凝土、岩石等材料的抗拉强度测试中。劈裂试验是 1943 年由 Carneiro 等首先在第 5 届巴西标准化协会会议上提出,之后作为标准化试验方法被采用^[6]。Ramey 等^[7]采用 ASTM C496 标准试验方法作为指导提出了复合材料的劈裂试验,设计了一半为混凝土另一半为修复材料的试件,以此来确定基底混凝土与修复材料间的粘结强度。试验数据表明,采用圆柱体的劈裂试件可以得到与真实粘结强度相一致的结果。

进行细观分析时,界面拉伸软化性能的选择是一项非常重要的内容,可以采用基于 Hillerborg 等^[8]提出的虚拟裂缝模型的应力裂缝宽度关系来描述。目前,关于砂浆-骨料界面拉伸软化性能的研究非常少,还没有提出公认的试验方法。为了得到在拉伸作用下的软化性能,最直接的方法是轴向拉伸试验。然而,相比于弯曲试验,轴心受拉试验需要相当特殊和精细的方法来实现,难度较大。因此对于水泥基类材料,文献^[9]中采用带缺口梁的三点弯曲试验来测试界面 I 型断裂的断裂性质。

本文中笔者对砂浆-骨料复合试件采用劈裂试验测试界面的粘结强度,采用三点弯曲试验测试界面 I 型断裂的断裂性质,从而建立拉应力作用下的砂浆-骨料界面的拉伸软化曲线模型及其表达式,为混凝土的细观力学分析提供了依据。

1 试验概况

1.1 试件制作

采用一半为砂浆一半为岩石的复合试件,劈裂试验试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,三点弯曲试验试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm。骨料采用大连普兰店双塔石材厂生产的天然花岗岩石材。砂浆设计立方体抗压强度分别为 30、60 MPa,30 MPa 砂浆所用水泥为大连小野田水泥有限公司生产的 P. O42. 5R 普通硅酸盐水泥,60 MPa 砂浆采用 P. II 52. 5R 普通硅酸盐水泥,砂为中砂。砂浆配合比如表 1 所示,砂浆力学性能如

表 2 所示。

表 1 砂浆配合比
Tab. 1 Mixture Proportion of Mortars

砂浆类型	各材料用量/(kg·m ⁻³)			
	水泥	水	砂	减水剂
NM	650	292. 50	1 625	0. 00
HM	820	246. 00	1 640	8. 20

表 2 砂浆力学性能

Tab. 2 Mechanical Properties of Mortars

砂浆类型	水灰比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	剪切强度/MPa
NM	0. 45	33. 55	2. 87	3. 77
HM	0. 30	62. 48	3. 80	5. 64

为保证试件浇筑前骨料表面保持足够的湿度,将骨料在水中放置 24 h,在浇筑砂浆前将多余水分释放掉。

劈裂试验和三点弯曲试验各 12 个试件,模板采用钢模,浇筑时先将骨料放在钢模一侧,然后在另一侧浇筑砂浆。振动台振捣密实后,试件上表面覆盖塑料布,24 h 后脱模,在标准养护室养护 28 d 后取出进行试验。其中劈裂试验试件 NM-7、NM-12 和三点弯曲试验试件 NM-W12 在拆模过程中破坏,所有试验均在大连理工大学土木工程结构实验室完成。

1.2 劈裂试验

劈裂试验在 600 kN 液压式万能材料试验机上进行,加载如图 1 所示。试验时,将试件放在试验机下压板的中心位置,在上下压板与试件之间垫钢制弧形垫块及三合板垫条,垫条宽 6 mm,厚 3 mm,长度大于 150 mm。开动试验机前,先手动控制,当上压板与试件接近时,调整球座,使接触均衡,然后开动试验机,加载速度约为 0. 05 MPa·s⁻¹,直至试件破坏。



图 1 劈裂试验加载

Fig. 1 Loading of Splitting Test

1.3 三点弯曲试验

在本文研究中,对改进的砂浆-骨料复合梁试件

采用三点弯曲试验来测试砂浆-骨料界面的 I 型断裂能和拉伸软化性能。三点弯曲试验在 300 kN 计算机控制的电液伺服压力试验机上进行,加载如图 2 所示。采用位移传感器测量复合梁的挠度,2 个支承间的跨度为 340 mm。所有试件的试验都采用位移模式控制加载,加载速度为 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

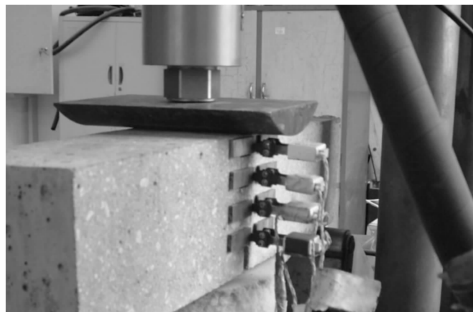


图 2 三点弯曲试验加载

Fig. 2 Loading of Three Point Bending Test

2 试验结果与分析

2.1 劈裂试验

对于复合试件的劈裂试验,可按式计算砂浆-骨料界面的劈裂抗拉强度

$$f_{st} = \frac{2P_{max}}{\pi A} = 0.637 \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

式中: f_{st} 为试件的劈裂抗拉强度; P_{max} 为试件承受的最大荷载; A 为试件的劈裂面面积。

由试验结果可知, HM 砂浆-骨料界面的粘结劈裂抗拉强度 f_{st} 约为 2.567 MPa, NM 砂浆-骨料界面的粘结劈裂抗拉强度 f_{st} 约为 1.588 MPa。由此可以看出,随着砂浆基体强度的提高,界面的粘结劈裂抗拉强度也提高。

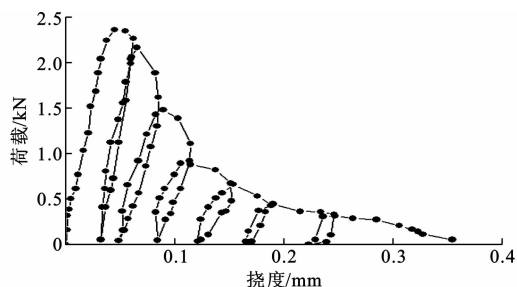
2.2 三点弯曲试验

参照文献[9]中的建议,采用带缺口梁的三点弯曲试验来测试砂浆-骨料界面的 I 型断裂性质。图 3(a)、(b) 分别为试验记录的试件 HM-W4 和 NM-W9 的典型荷载-挠度曲线,图 3(c)、(d) 分别为试验记录的 HM 和 NM 系列试件的荷载-挠度包络曲线。

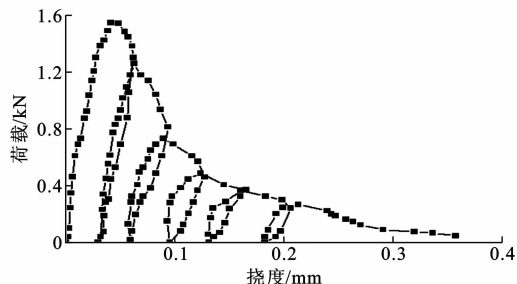
三点弯曲试验按下式计算砂浆-骨料界面的断裂能

$$G_F = \frac{W_0 + G\delta_0}{A_{lig}} \quad (2)$$

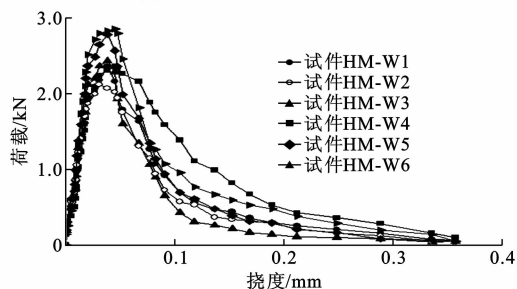
式中: G_F 为试件的断裂能; W_0 为荷载-挠度曲线下的面积; $G = G_1 + 2G_2$, G_1 为两跨间梁的质量, G_2 为附加在梁上试验仪器的质量; δ_0 为试件破坏时的挠度; A_{lig} 为试件的断裂面面积。



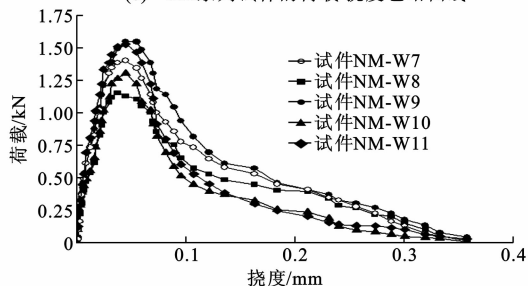
(a) 试件HM-W4的荷载-挠度曲线



(b) 试件NM-W9的荷载-挠度曲线



(c) HM系列试件的荷载-挠度包络曲线



(d) NM系列试件的荷载-挠度包络曲线

图 3 荷载-挠度曲线

Fig. 3 Load-deflection Curves

图 4 为砂浆-骨料界面的断裂能与骨料表面粗糙度的关系。由图 4 可见,界面的断裂能低于砂浆基体的断裂能,砂浆基体的强度提高时,界面的断裂能也随之提高,断裂能随骨料表面粗糙度的提高而提高。

2.3 断裂模式

图 5 为试件劈裂和三点弯曲破坏后断裂面的典型形态。一般地,基体为 NM 砂浆的试件断裂多发生在界面附近的砂浆粘结层上,表现为胶结物与骨料的分离,断裂后接合处粘结层很光滑。基体为 HM 砂浆的试件断裂多发生在砂浆粘结层和砂浆-

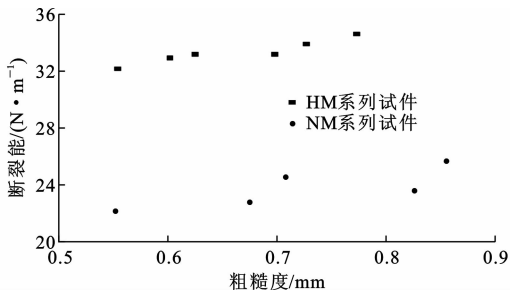


图 4 断裂能与粗糙度的关系

Fig. 4 Relations Between Fracture Energy and Roughness

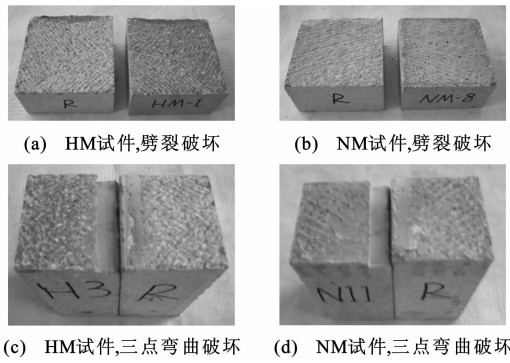


图 5 试件断裂面的典型破坏形态

Fig. 5 Representative Failure Modes of Specimen Fracture Surfaces

骨料接合处的粘结层上,通过肉眼可以看到砂浆与骨料侧相连接的体积是不同的。对于普通强度的砂浆基体(NM 系列),骨料的刚度和强度远大于硬化的砂浆基体,粘结破坏的最大荷载主要受控于水泥砂浆与骨料间的粘结作用,当粘结力不够时就表现为胶结物与骨料的分离。而对于高强度的砂浆基体(HM 系列),砂浆与骨料界面的粘结强度很高,从而引起接合粘结层或者骨料突出部分被拉断。

当对含砂浆-骨料界面的复合试件进行拉伸时,破坏时的应力状态主要依赖于砂浆和骨料间的粘结效果。当粘结效果较好时,意味着砂浆和骨料间的粘结强度大于界面周围砂浆层的强度,破坏的特点是在砂浆和骨料接合的粘结层上产生断裂;当粘结效果较差时,断裂将在砂浆层上产生。

3 砂浆-骨料界面的拉伸软化曲线

为了得到砂浆-骨料界面在峰值荷载后的拉伸软化曲线,Niwa 等^[10]基于改进的 J 积分提出了一种新的计算软化曲线的方法。考虑到裂缝的扩展和梁由于开裂而产生的弹性位移,J 积分定义的能量为沿断裂带裂缝扩展需要的能量等于试件开裂过程中吸收的总能量减去弹性位移消耗的能量。弹性位

移消耗的能量可以通过卸载和加载路径得到,因而 J 积分可以写成如下形式

$$E = \int_0^\delta P(\delta) d\delta - \frac{1}{2} P(\delta) (\delta - \delta_P) \quad (3)$$

式中: E 为虚拟裂缝扩展所需的能量; $P(\delta)$ 为试件所受的荷载; δ 为梁的挠度; δ_P 为完全卸载后梁的残余挠度。

虚拟裂缝扩展所需的能量 E 可以表示为

$$E = b \int_0^w e(\omega) \frac{a}{\omega} d\omega = \frac{ba}{\omega} \int_0^w e(\omega) d\omega \quad (4)$$

式中: $e(\omega)$ 为能量函数; a 为裂缝扩展长度; b 为梁的宽度; ω 为裂缝尖端的开裂宽度; ω 为虚拟裂缝宽度。

由此可得拉伸软化曲线表达式为

$$\left. \begin{aligned} \int_0^w e(\omega) d\omega &= \frac{\omega}{ba} E(\omega) \\ e(\omega) &= \frac{1}{ba} [E(\omega) + \omega E'(\omega)] \\ \sigma &= \frac{de(\omega)}{d\omega} = \frac{1}{ba} [2E'(\omega) + \omega E''(\omega)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: σ 为界面的拉应力。

经处理后的试件拉伸软化曲线如图 6 所示。界面的拉应力和裂缝宽度均进行了归一化处理,界面抗拉强度取自劈裂抗拉强度 f_{st} ,于是,拉伸软化曲线可以表达成如下形式

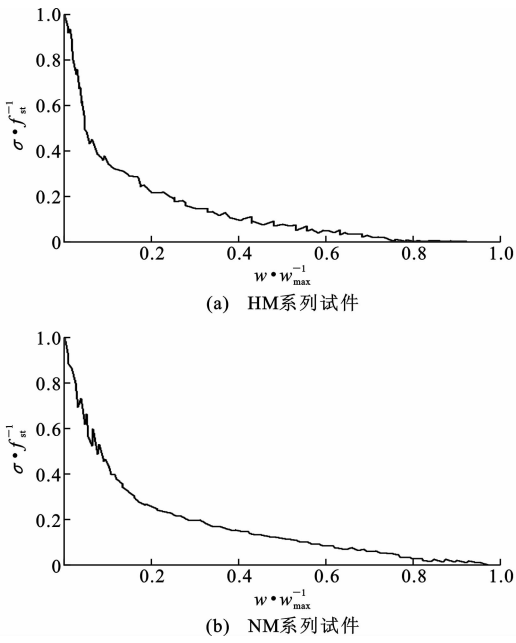


图 6 拉伸软化曲线

Fig. 6 Tension Softening Curves

$$\alpha \sqrt{\frac{\sigma}{f_{st}}} + \sqrt{\frac{\omega}{\omega_{max}}} = 1 \quad (6)$$

式中: w_{\max} 为裂缝尖端的最大开裂宽度; α 为待定参数。

对于 HM 和 NM 系列试件, α 分别为 1.093、0.984,劈裂抗拉强度 f_{st} 分别为 2.567、1.588 MPa。 w_{\max} 通过计算得到,对于 HM 和 NM 系列试件, w_{\max} 的平均值分别为 0.093 1、0.086 8 mm。

砂浆-骨料界面 I 型拉伸的本构关系可以分成 3 个部分,其表达式为

$$\sigma = \begin{cases} E_i w = \frac{f_{st}}{w_e} w & w \leq w_e \\ f(w) = \frac{f_{st}}{\alpha^2} (1 - \sqrt{\frac{w}{w_{\max}}})^2 & w_e < w \leq w_{\max} \\ 0 & w > w_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: E_i 为割线弹性模量,由抗拉强度和最大拉应力下的开裂宽度 w_e 的比值得到, w_e 基于试验观测资料得到,对于 HM 和 NM 系列试件, w_e 分别为 0.011 4、0.009 7 mm。

4 结 语

(1)三点弯曲试验可以用来估计砂浆-骨料界面的 I 型断裂参数。根据基于改进的 J 积分的计算方法可以得到界面的拉伸软化曲线。

(2)砂浆-骨料界面的 I 型断裂能很大程度上依赖于界面的粘结强度和骨料表面的粗糙度。随着砂浆基体强度的提高,断裂能也随之提高;当骨料表面粗糙度提高时,断裂能也随之提高。

(3)基体为普通强度砂浆的试件断裂多发生在界面附近的砂浆粘结层上,表现为胶结物与骨料的分离,断裂后接合处粘结层很光滑。基体为高强度砂浆的试件断裂多发生在砂浆粘结层和砂浆-骨料接合处的粘结层上,表现为接合粘结层或者骨料突出部分被拉断。

参考文献:

References:

- [1] ZAITESV Y B, WITTMANN F H. Simulation of Crack Propagation and Failure of Concrete[J]. Materials and Structures, 1981, 14(5): 357-365.
- [2] 王立成,陈桂斌.基于细观刚体弹簧元的轻骨料混凝土力学性能数值模拟[J].水利学报, 2008, 39(5): 588-595.
- WANG Li-cheng, CHEN Gui-bin. Mesoscopic Simulation for Mechanical Properties of Lightweight Aggregate Concrete by Rigid Body Spring Model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 588-

595.

- [3] 马怀发,陈厚群,黎保琨.混凝土细观力学研究进展及评述[J].中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(2): 124-130.
- MA Huai-fa, CHEN Hou-qun, LI Bao-kun. Review on Micro-mechanics Studies of Concrete[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, 2004, 2(2): 124-130.
- [4] 陈惠苏,孙伟,STROEVEN P.水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述(二):界面微观结构的形成、劣化机理及其影响因素[J].硅酸盐学报, 2004, 32(1): 70-79.
- CHEN Hui-su, SUN Wei, STROEVEN P. Interfacial Transition Zone Between Aggregate and Paste in Cementitious Composites (II): Mechanism of Formation and Degradation of Interfacial Transition Zone Microstructure, and Its Influence Factors[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(1): 70-79.
- [5] 王瑶,周继凯,沈德建,等.混凝土中骨料-浆体界面过渡区的力学性能研究综述[J].水利水电科技进展, 2008, 28(2): 89-94.
- WANG Yao, ZHOU Ji-kai, SHEN De-jian, et al. Review of Study on Mechanical Property of Aggregate-mortar Interface Transitionzone of Concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(2): 89-94.
- [6] ASTM C496-92, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens [S].
- [7] RAMEY G E, STRICKLAND A M. An Experimental Evaluation of Rapid Setting Patching Materials Used in the Repair of Concrete Bridges and Pavements[R]. New York: Alabama Highway Department, 1984: 48-56.
- [8] HILLERBORG A, MODEER 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.
- [9] RILEM Committe. Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three Point Bend Tests on Notched Beams[J]. Materials and Structures, 1985, 18(4): 287-290.
- [10] NIWA J, SUMRANWANICH T, TANTERMIS-IRIKUL S. New Method to Determine Tension Softening Curve of Concrete[C]//MIHASHI H, ROK-UGO K. Fracture Mechanics of Concrete Structures. Freiburg: Aedificatio Publisher, 1998: 347-356.