

粗骨料/浆体界面性能对混凝土力学性能影响的数值模拟

何 锐^{1,2}, 嵇绍华³, 黄平明⁴, 王振军^{1,2}

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 交通铺面材料教育部工程研究中心, 陕西 西安 710061; 3. 贵州省建筑设计研究院, 贵州 贵阳 550002; 4. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究粗骨料/浆体界面过渡区对混凝土力学性能的影响,利用随机骨料模型生成二维混凝土数值试件,采用基于内聚力损伤的界面本构关系对混凝土数值试件进行了单轴受压和三点弯曲断裂细观数值模拟,分析了粗骨料与硬化水泥浆体界面粘结强度对混凝土力学性能的影响。研究表明:当非均质因子小于 0.7 时,界面粘结强度对混凝土的抗压强度和弹性模量影响很小,而当非均质因子大于 0.7 时,抗压强度和弹性模量快速增长;非均质因子与混凝土的断裂能呈线性增长关系;混凝土断裂破坏过程中断裂裂纹绕过骨料沿着界面曲折性扩展。

关键词:道路工程;界面过渡区;内聚力模型;计算强度;弹性模量;断裂能

中图分类号:U414.18

文献标志码:A

Numerical simulation of the effect of interface transition zone between mortar and aggregates on the mechanics properties of concrete

HE Rui^{1,2}, JI Shao-hua³, HUANG Ping-ming⁴, WANG Zhen-jun^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. Engineering Research Center of Transportation Materials of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 3. Architectural Design Research Institute of Guizhou, Guiyang 550002, Guizhou, China; 4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the effect of interfacial transition zone between coarse aggregate and cement mortar on the mechanics properties of concrete, the 2-D numerical concrete specimens were generated by using random aggregates model. With the adoption of interface constitutive relation on the basis of cohesive zone damage, numerical simulation of uniaxial compression and three-point bending experiments were performed to analyze the influence of interface strength between mortar and aggregate on the mechanics properties of concrete. The results show that the interface strength has a negligible influence on the compressive strength and elastic modulus of concrete when the heterogeneity factor is less than 0.7, and the compressive strength and elastic modulus increase greatly when the heterogeneity is greater than 0.7. The fracture energy of concrete demonstrates a linear increase relationship with the interface strength. The cracks

收稿日期:2014-09-20

基金项目:教育部博士点基金项目(20130205110013);中国博士后科学基金项目(2014M552397);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G1311081,2013G3312018);陕西省自然科学基金项目(2014JM7272);河北省交通科技项目(T-2012107,Y-2012014)

作者简介:何 锐(1984-),男,湖北襄阳人,讲师,工学博士,E-mail:heruia@163.com。

propagate tortuously along the interface zone during the fracture process. 1 tab, 10 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; interface transition zone; cohesive zone model; macro strength; elastic modulus; fracture energy

0 引言

混凝土在细观层次上可看作由粗骨料、硬化水泥浆体和两者之间的界面过渡区(ITZ)组成的三相复合材料^[1-2],其宏观力学性质取决于细观各相介质的性能。Maso 的试验研究表明,界面过渡区是混凝土内部的最薄弱环节,对混凝土的断裂破坏路径和力学强度有显著影响^[3];Diamond 等通过 SEM 观测发现,在混凝土断裂过程中初始裂纹通常位于骨料与水泥浆体间的界面区^[4];陈惠苏等通过界面过渡区的微观结构研究发现,当混凝土达到极限水化程度时界面过渡区的孔隙率远远高于硬化水泥浆体^[5]。这些研究均表明界面过渡区对混凝土力学性能有重要的影响,但是目前关于 ITZ 性能对混凝土宏观力学性能的影响程度和混凝土破坏机制等方面的研究仍少有涉及^[6-7]。由于 ITZ 不能脱离粗骨料和硬化水泥浆体独立存在且具有尺度微小的特点,故导致常规的试验手段不能研究混凝土 ITZ 性能对混凝土的影响程度^[8]。为此,本文利用随机骨料模型,基于内聚力损伤界面理论,对在静载作用下混凝土试件单轴受压试验及带切口混凝土梁三点弯曲断裂试验进行了细观数值模拟,根据其力学响应特征分析了界面粘结强度对混凝土抗压强度、弹性模量和断裂能的影响规律。

1 混凝土各相本构关系和界面破坏准则

1.1 混凝土各相本构关系

混凝土是一种具有复杂力学性质的非均匀准脆性材料,其应力-应变曲线的非线性是由于其受力后的不断损伤引起微裂纹的萌生和扩展所造成,而不是由其塑性变形所引起的^[9]。唐春安等在混凝土断裂过程的声发射特性研究中发现,混凝土细观单元可以认为是弹-脆性体^[10]。因此,考虑到材料变形的非线性特点,在细观分析中可采用弹性损伤力学的本构关系式来描述混凝土中硬化水泥浆体和骨料的力学性质。

$$\sigma = (1-D)E\epsilon \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (1)$$

式中: D 为损伤变量; E 为初始弹性模量; σ 为应力; ϵ 为应变。

由于 ITZ 的复杂性,目前对 ITZ 的研究多集中在其微观结构及其形成与劣化机理等方面^[9],对界面本构关系的研究较少,一般都认为其属于简单的线弹性体。本文结合细观损伤力学的理论引入了带有界面损伤因子的内聚力界面模型^[11],该模型描述了界面开裂过程中应力与界面开裂位移之间的关系,如下式所示

$$[\sigma_n, \sigma_s, \sigma_t]^T = \mathbf{K}[\epsilon_n, \epsilon_s, \epsilon_t]^T \quad (2)$$

式中: σ_n 为界面法向应力; σ_s, σ_t 为界面切向应力; \mathbf{K} 为界面刚度矩阵; $\epsilon_n = \frac{\delta_n}{T_0}$; $\epsilon_s = \frac{\delta_s}{T_0}$; $\epsilon_t = \frac{\delta_t}{T_0}$; δ_n 为界面法向开裂位移; δ_s, δ_t 为界面切向开裂位移; T_0 为初始界面厚度。

1.2 界面破坏准则

混凝土内部单元处于复杂的应力状态下,因此选择采用最大名义应力准则来计算复合条件下单元的初始损伤阈值,即当界面单元的最大名义应力满足式(3)时,材料开始发生损伤。界面如果受到损伤破坏后,不但界面刚度发生变化,而且粘结强度也会发生变化,也就是说界面损伤后其峰值应力会下降,因此在粘结界面的本构模型中引进了界面损伤变量 D 来描述界面损伤后粘接界面本构关系。损伤变量 D 满足指数损伤变量演化模型,如下页图 1 所示。于是界面损伤本构模型变为式(4)。混凝土断裂损伤过程实际上是能量耗散的过程,因此,将界面单元的最终破坏准则定义为单元的断裂能 G_c 达到临界值更符合实际。

$$\max \left\{ \frac{\sigma_n}{\sigma_n^0}, \frac{\sigma_s}{\sigma_s^0}, \frac{\sigma_t}{\sigma_t^0} \right\} = 1 \quad (3)$$

式中: σ_n^0 为损伤临界法向应力; σ_s^0, σ_t^0 为损伤临界切向应力。

$$[\sigma_n, \sigma_s, \sigma_t]^T = (1-D)\mathbf{K}[\epsilon_n, \epsilon_s, \epsilon_t]^T \quad (4)$$

式中: $D = \int_{\delta_0}^{\delta_f} \frac{T_{\text{eff}}}{G_c - G_0} d\delta$, $D=0$ 时为无损伤状态, $D=1$ 时为完全损伤(断裂或失效)状态, $0 < D < 1$ 对应不同损伤阶段的损伤状态; T_{eff} 为有效界面张力; G_c 为完全损伤时断裂能; G_0 为损伤初始时弹性断裂能; δ_0 为界面损伤初始时位移; δ_f 为界面断裂时位移; δ 为位移; T 为张力。

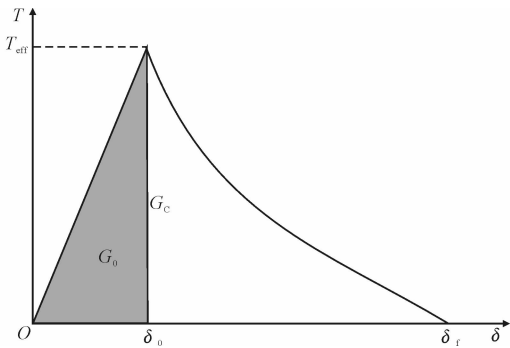


图 1 指数损伤变量演化模型
Fig. 1 Evolution model of index of damage variable

2 界面参数

2.1 界面厚度

目前大多数界面研究中对界面厚度并没有明确定义,大多是根据研究物相(如 AFt、孔隙率)沿骨料表面的分布曲线,当曲线趋于平缓时即认为 ITZ 的结束,然后给出界面厚度的大概范围。Bent 等根据计算模拟结果将界面厚度定义为当孔隙率值降至比基体部分孔隙率高 10% 时即为 ITZ 结束^[12]。Yang 等基于蒙特卡洛方法提出了一种界面厚度 H 定量的计算公式,该公式将界面厚度 H 表示成与水灰比和水泥颗粒最大直径有关的函数,并验证了该公式的准确性^[13]。但目前基于细观力学研究混凝土时,为考虑建模与计算机时等问题,界面单元的尺度取值一般比实际情况要大(通常取 0.05~0.5 mm)。

$$H=\begin{cases} \left(-4.3417\frac{w}{c}+52.621\right)\left(\frac{d_{\max}}{60}\right)^{1-\left(\frac{d_{\max}}{60}\right)^{15}} & 0\leq d_{\max}\leq 60 \\ -4.3417\frac{w}{c}+52.621 & d_{\max}>60 \end{cases} \quad (5)$$

式中: w/c 为混凝土水灰比; d_{\max} 为水泥颗粒最大粒径。

2.2 界面强度

由于边壁效应、微区泌水效应、单边生长效应以及脱水收缩效应的综合作用,使得 ITZ 孔隙率相对较高,CH 和 AFt 含量相对较多,CH 的取向性较高,力学性能、扩散和渗透性能均比基体的要弱,因此混凝土在加载之前在粗骨料和浆体的界面上已形成了微裂纹^[5]。而细观模拟的时候把 ITZ 当作均质的第 3 相。Rao 等根据试验结果提出,硬化水泥砂浆和骨料之间的界面粘结强度约为砂浆抗拉强度的 1/3^[14]。本文为了研究界面粘结强度对混凝土宏观性能的影响程度,分别选取 6 组不同的界面粘结强度:1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 MPa。

2.3 界面模量

目前对界面弹性模量的研究大多采用间接刚度法,该方法假设混凝土为三相串联或并联等模型,以砂浆和骨料的弹性模量与泊松比,以及混凝土试件的弹性模量为参数,并假定界面厚度,反算出界面弹性模量。Yang 等采用 Double Inclusion 方法与 Moritanka 理论,结合三相模型预测了 ITZ 的平均弹性模量^[15]。结果发现:当界面厚度为 20 μm 时,界面弹性模量为基体弹性模量的 30%~40%;当界面厚度为 40 μm 时,界面平均弹性模量为基体弹性模量的 50%~70%。展辰辉利用界面二次细化模型对界面区的弹性模量进行了估算,结果约为硬化水泥砂浆弹性模量的 80%^[16]。因此本文假定界面弹性模量小于硬化砂浆弹性模量,而硬化砂浆弹性模量又小于骨料弹性模量。混凝土及混凝土各组分材料参数取值见表 1。

表 1 混凝土及混凝土各组分材料参数
Tab. 1 Parameters of concrete and the ingredients

材料	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
骨料	50	0.16	10.0	27
硬化砂浆	25	0.22	3.5	21
ITZ	22	0.16	1.5~3.5	21
混凝土	30	0.20	3.0	24

3 数值模拟与分析

利用随机骨料模型生成 150 mm×150 mm×150 mm 两级配湿筛混凝土抗压试件,最大骨料粒径小于 40 mm。其中,40~20 mm 的骨料粒径等效为 30 mm,体积率为 18.8%;20~5 mm 的骨料粒径等效为 12 mm,体积率为 28.1%。基于瓦拉文公式计算得到的骨料级配为大骨料($d=30$ mm),颗粒数为 6 粒^[17];小骨料($d=12$ mm)的颗粒数取 56 粒。采用蒙特卡罗法在抗压试件截面内随机生成骨料分布如下页图 2 所示。为模拟实际加载方式,在试件的上端面施加垂直方向的单轴荷载,下端面在垂直方向施加约束,同时约束下端面中心节点水平位移。采用位移控制加载方式,加载速率为 0.001 mm/s,最终得到混凝土破坏过程的全曲线、裂纹扩展过程及最终的破裂形态。

混凝土弹塑性断裂力学认为,混凝土达到抗拉强度后并不立即断裂,还按应变软化曲线传递拉应力,当应变达到混凝土软化曲线极限值时,才发生断裂^[18]。因此,控制混凝土断裂的参数可以认为是混

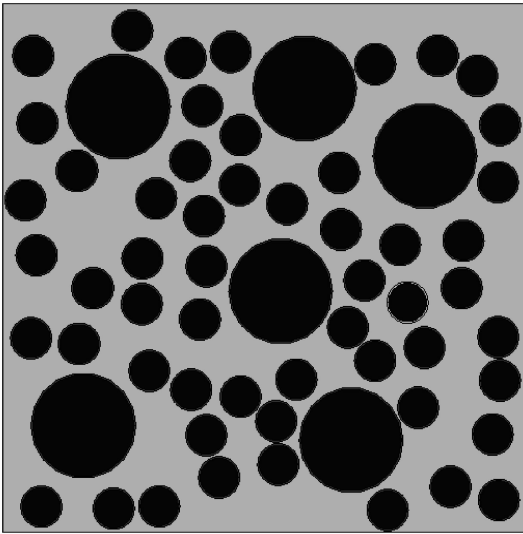


图 2 混凝土抗压试件模型

Fig. 2 Model of concrete specimen for compressive test

混凝土断裂能 G_F , 其定义为裂缝扩展单位面积所需的能量。数值模拟中选用 RILEM 推荐的混凝土三点弯曲梁试件计算混凝土的断裂能 G_F , 试件尺寸为 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 1\,190\text{ mm}^{[19]}$, 预制裂纹长度 $a=100\text{ mm}$, 试件的高 $W=200\text{ mm}$, 跨度 $S=1\,130\text{ mm}$, 相对缝深 $a/W=0.5$, 在跨度中间作用有集中载荷 P , 为了减少计算量, 只取跨中 400 mm 为非均质区, 其余部分看作各向同性的线弹性混凝土材料。混凝土梁试件的级配与材料参数和抗压试件相同, 生成的计算模型如图 3 所示。采用位移控制的加载方式, 加载速率为 0.001 mm/s , 最终得到混凝土梁破坏过程的全曲线和最终的破裂形态。

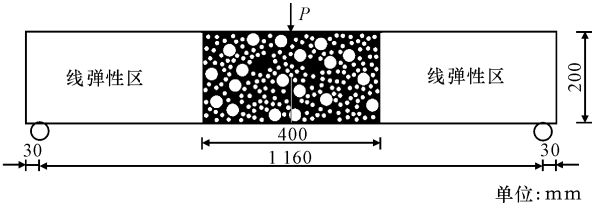


图 3 混凝土三点弯曲梁试件

Fig. 3 Concrete beam specimen for three-point bending test

3.1 计算抗压强度

图 4 为 6 组混凝土受压试件在单轴压缩载荷作用下的应力-应变曲线数值模拟结果。从图中可以看出, 曲线的上升段、峰值点和下降段与混凝土压缩试验的应力-应变曲线有很好的相似性。计算结果表明, 数值试件的极限荷载为 $28.4 \sim 30.6\text{ MPa}$, 单轴抗压强度平均值为 29.2 MPa 。

假定 σ_A 为硬化砂浆的抗拉强度, σ_B 为界面的粘结强度, 则 σ_A/σ_B 可定义为混凝土的非均质因子。

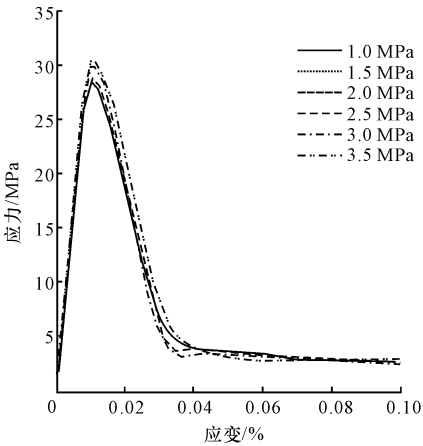


图 4 应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve

图 5 为混凝土强度随非均质因子的变化曲线。从图中可以看出, 混凝土越接近均质材料, 其极限承载力越大。这表明混凝土的抗压强度与界面粘结强度相关, 混凝土的抗压强度随非均质因子的增大而增大, 但并非呈线性关系。当混凝土试样的非均质因子小于 0.7 时, 混凝土的极限荷载变化较小。但随着 ITZ 粘结强度的增加, 混凝土的极限荷载明显增长, 混凝土的非均质因子由 0.7 增大到 1 时, 混凝土的极限荷载增长了 10.1%, 这也说明了界面粘结强度在一定程度上控制着混凝土的抗压强度。因此, 通过提高粗集料与硬化水泥砂浆界面结合能力可以达到混凝土增强的目的。

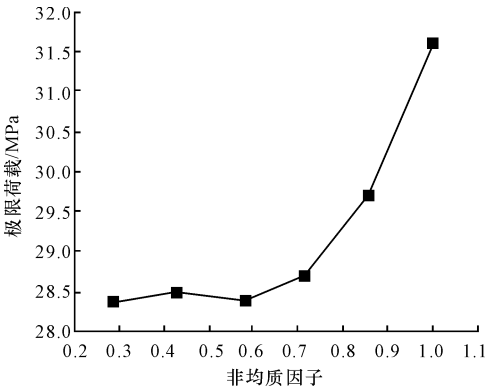


图 5 混凝土强度随非均质因子的变化曲线

Fig. 5 Curve between concrete strength and heterogeneity factor

下页图 6 为界面粘结强度为 2.5 MPa 时试件裂缝的扩展过程, 在单轴压缩初始加载至极限荷载 90% 时(图 6(a)), 细观单元出现拉损伤及拉破坏, 且几乎都位于骨料的界面单元处。但初始损伤的单元并不是布满整个试件, 而是沿着界面带的竖直向上扩展。在加载达到极限荷载 95% 时(图 6(b)), 细

观损伤单元迅速扩展,并且微裂纹逐渐向硬化水泥浆体中扩展,在试件的局部形成一些连通的裂纹。当加载到极限荷载时(图 6(d)),混凝土内部细小裂

纹迅速扩展并相互贯通形成多条连通的竖向裂缝,混凝土的断裂损伤带呈现两侧对称的倒锥形分布,最终导致试件失稳破坏。

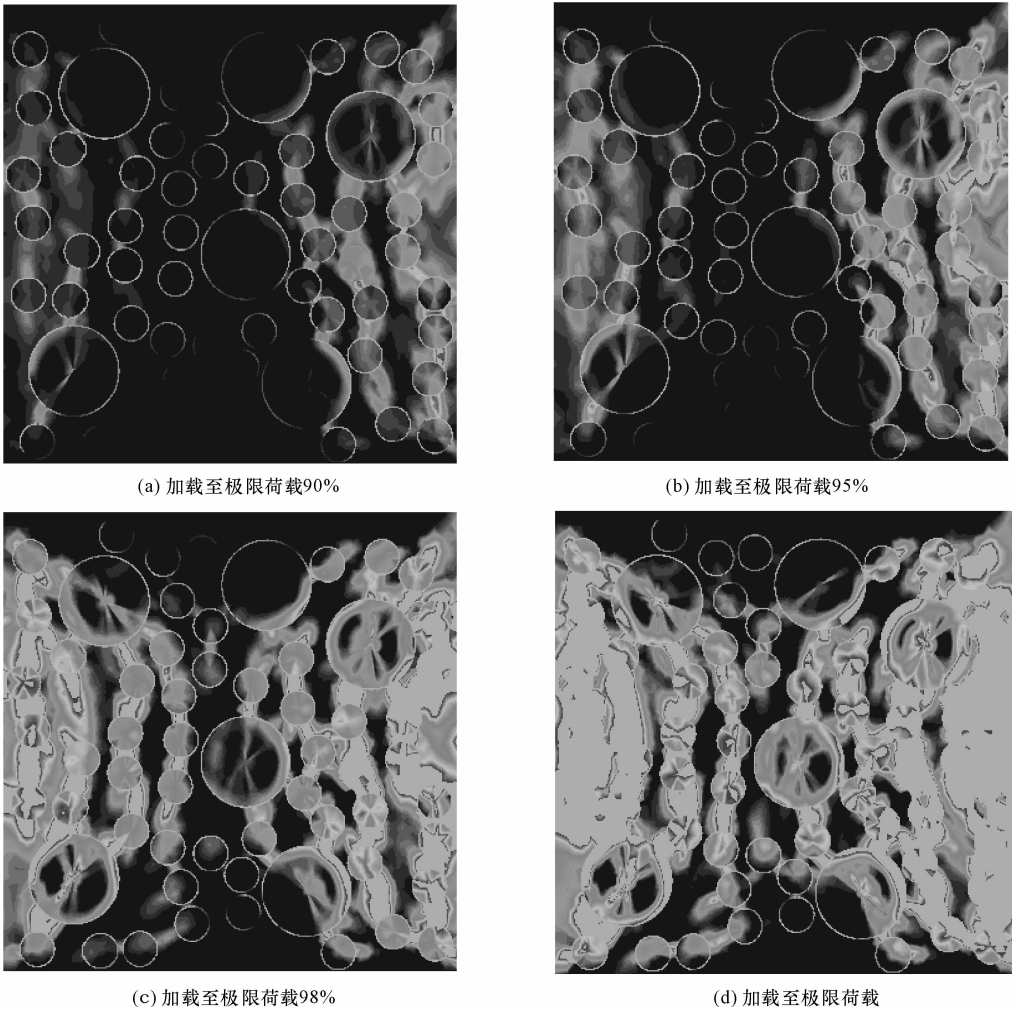


图 6 试件裂缝扩展过程(界面粘结强度 2.5 MPa)

Fig. 6 Crack propagation in the specimen (the interface bond strength is 2.5 MPa)

3.2 弹性模量

根据受压试件的两端面的反力与位移,平均化后计算混凝土试件的宏观弹性模量。数值试件的弹性模量在 30.75~31.97 GPa 之间变化,平均值为 31.22 GPa。图 7 为混凝土试件的弹性模量随非均质因子的变化曲线。从图中可以看出,非均质因子小于 0.7 时,界面粘结强度对混凝土的弹性模量的影响很小;而非均质因子大于 0.7 时,界面粘结强度对混凝土弹性模量有显著的影响。因此界面粘结强度对混凝土弹性模量的影响幅度与非均质因子有关,混凝土弹性模量的变化速度将随非均质因子的降低而降低,该结论与 Alexander 等的试验结果也相吻合^[20]。

3.3 断裂能

下页图 8 为 6 组混凝土梁试件在载荷作用下的

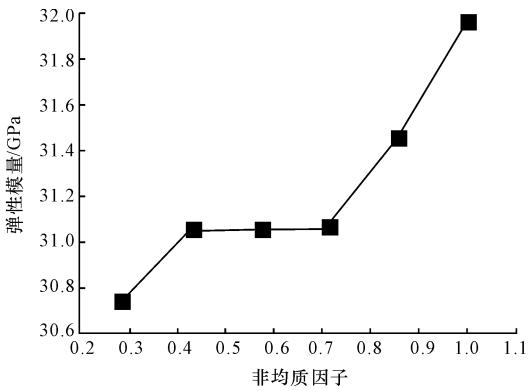


图 7 弹性模量随非均质因子的变化曲线

Fig. 7 Curve between elastic modulus and heterogeneity factor

荷载-加载点位移曲线的数值模拟结果。计算结果表明,数值试件的极限荷载在 12.87~20.08 kN 之

间变化,极限荷载平均值为 16.35 kN。图 9 为 ITZ 粘结强度为 2.5 MPa 时混凝土梁最终弯曲破坏裂纹图。从图 10 中可以看出,梁弯曲过程中预制裂纹并非垂直向上朝加载点扩展,而是绕过骨料沿着界面向上曲折扩展,这是由于混凝土的非均性引起,这也说明了强度较高的骨料对裂纹的扩展起着阻碍作用。

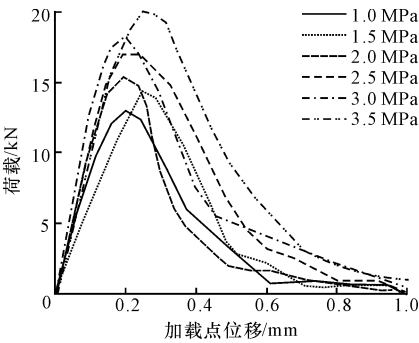


图 8 荷载-加载点位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve of the loading point

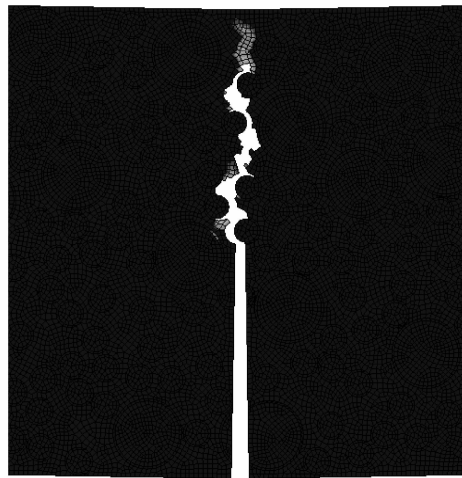


图 9 混凝土梁弯曲破坏裂纹

Fig. 9 Bending cracks of concrete beam

图 10 为混凝土断裂能随非均质因子的变化曲线。从图 10 中可以明显看出,提高界面粘结强度可以明显提高混凝土的断裂能,混凝土断裂能与非均质因子接近于线性关系。当非均质因子从 0.286 增长到 1 时,混凝土的断裂能由 37.11 N/m 增长到 84.28 N/m,增长幅度为 127%。这是由于当界面粘结强度较低时,ITZ 为混凝土内部最薄弱环节,随着荷载的增长,混凝土内部裂纹绕过骨料沿着界面处扩展;而随着 ITZ 粘结强度的提高,混凝土内部初始裂纹部分向砂浆基体甚至骨料中扩展,则裂纹的扩展需要消耗更多的能量。这也从侧面说明提高

界面粘结强度可以实现混凝土的增韧。

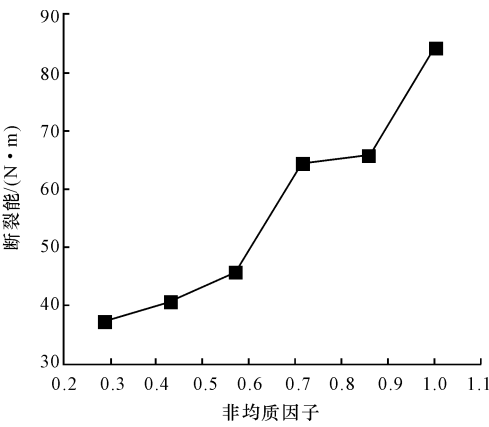


图 10 断裂能随非均质因子的变化曲线

Fig. 10 Curve between fracture energy and heterogeneity factor

4 结 语

(1)当界面粘结强度低于砂浆强度的 70% 时,混凝土抗压强度和弹性模量变化很小,这是因为界面粘结强度对混凝土抗压强度和弹性模量的影响一定程度上被硬化砂浆和骨料的性质以及骨料咬合等复合材料不均质性所掩盖。而当界面粘结强度大于砂浆强度 70% 时,抗压强度和弹性模量快速增大。因此,通过改善粗集料和硬化水泥砂浆之间的界面,可以提高混凝土的抗压强度和弹性模量。

(2)在细观层次上分析了混凝土单轴受压的破坏机理。混凝土细观微裂缝从界面单元开始,然后延伸到砂浆单元,微裂纹逐渐贯通形成宏观裂纹并扩展,导致混凝土失去承载力发生失稳破坏。数值试件破坏状态呈现为两侧对称的倒锥形断裂损伤带。

(3)从混凝土梁三点弯曲的数值模拟中得到界面粘结强度对混凝土的断裂能有显著影响,当界面粘结强度增长了 2.5 倍,混凝土断裂能增长了 1.27 倍,且混凝土断裂能与非均质因子接近于线性关系。同时发现混凝土梁弯曲断裂过程中裂缝绕过骨料沿其界面向上曲折扩展,这说明了强度较高的骨料颗粒对微裂纹的扩展有阻碍作用。

(4)对混凝土 ITZ 性能的研究有助于发现混凝土材料裂缝发展的规律以及预测混凝土的使用寿命。然而,在数值模拟中考虑到计算量的问题,ITZ 厚度要比实际情况要大,同时 ITZ 力学参数还需要在试验中进行验证,这些因素在研究 ITZ 性能对混凝土性能影响时需要进一步考虑。

参考文献:

References:

- [1] Prokopski G, Halbiniak J. Interfacial transition zone in cementitious materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(4): 579-583.
- [2] 刘光廷, 王宗敏. 用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 1996, 36(1): 84-89.
LIU Guang-ting, WANG Zong-min. Numerical simulation study of fracture of concrete materials using random aggregate model[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1996, 36(1): 84-89. (in Chinese)
- [3] Maso J C. Interface transition zone in concrete[M]. London: E&FN Spon, 1996: 65-74.
- [4] Diamond S, Huang J D. The ITZ in concrete: A different view based on image analysis and SEM observations[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2001, 23(2/3): 179-188.
- [5] 陈惠苏, 孙 伟, Stroeven P. 水泥基复合材料骨料与浆体界面研究综述(二): 界面微观结构形成以及劣化机理、影响界面微观结构的因素[J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(1): 71-81.
CHEN Hui-su, SUN Wei, Stroeven P. Interface 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): 71-81. (in Chinese)
- [6] WU Jian-min, LIANG Jia-ping, Adhikari S. Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition*, 2014, 1(6): 439-447.
- [7] Lee K M, Park J H. A numerical model for elastic modulus of concrete considering interfacial transition zone[J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(3): 396-402.
- [8] 王振军, 沙爱民. 水泥混凝土浆体-骨料界面过渡区结构与性能试验技术[J]. *南昌大学学报: 工科版*, 2007, 29(2): 175-180.
WANG Zhen-jun, SHA Ai-min. Experiment techniques on structures and performances of interface transition zone between mortar and aggregates in cement concrete[J]. *Journal of Nanchang University: Engineering & Technology*, 2007, 29(2): 175-180. (in Chinese)
- [9] Berthelot J M, Robert J L. Damage evaluation of concrete test specimens related to failure analysis [J]. *Journal of Engineer Mechanics, ASCE*, 1990, 116(2): 587-604.
- [10] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂-数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng. Concrete damage and fracture-numerical experimentation [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [11] Needleman A. A continuum model for void nucleation by inclusion debonding [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1987, 54(2): 525-531.
- [12] Bent D P, Garboczi E J. Computer modeling of interfacial transition zone microstructure and properties [C]//RELEM. Engineering and Transport Properties of the Interfacial Transition Zone in Cementations Composites. Cachan Cedex: RILEM Publication, 1999: 349-385.
- [13] Yang C C, Su J K. Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of content on the migration coefficient of mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(10): 1559-1565.
- [14] Rao G A, Prasad B K R. Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(2): 253-257.
- [15] Yang C C. Effect of the transition zone on the elastic module of mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 1998, 28(5): 727-736.
- [16] 展辰辉. 混凝土及其组成材料动力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
ZHAN Chen-hui. The study of dynamic properties on concrete and its component materials [D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese)
- [17] Walraven J C, Reinhardt H W. Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading[J]. *Heron Journal*, 1991, 26(1): 26-35.
- [18] 陈惠发. 土木工程材料的本构方程[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
CHEN Hui-fa. The constitutive equation of civil engineering materials [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001. (in Chinese)
- [19] Abdalla H M, Karihaloo B L. Determination of size-independent specific fracture energy of concrete from three-point bend and wedge splitting tests[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2003, 55(2): 133-141.
- [20] Alexander M G, Scrivener K. The influence of time-dependent changes in ITZ on stiffness of concretes made with two aggregate types [C]//RELEM. The Interracial Transition Zone in Cementitious Composites(RILEM Proceedings35). London: E&FN SPON, 1998: 292-300.