

文章编号: 1000-4750(2013)10-0054-11

再生混凝土与钢筋粘结滑移性能的 试验研究及力学分析

王 博¹, 白国良¹, 代慧娟¹, 吴淑海^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055; 2. 中冶南方工程技术有限公司, 武汉 430223)

摘 要: 良好的粘结性能是确保再生混凝土与钢筋能够共同工作的前提条件。通过 120 个试件的拉拔试验, 并结合非平衡态热力学与损伤力学的相关理论分析再生混凝土与钢筋间的粘结滑移性能。提出三段式的粘结滑移本构模型, 对比表明该模型对实测粘结滑移曲线具有较好的模拟效果。分析了粘结破坏过程中的能量守恒与能量耗散特性, 给出了耗散能与弹性变形能代表值的计算公式, 探讨了初始弹性变形能与极限弹性变形能的关系, 并基于本构破坏能, 对影响粘结性能的因素进行了分析。提出相对损伤变量的概念, 定义了界面相对损伤变量, 推导出相对损伤滑移方程, 分析了界面初始损伤、界面损伤发展阶段以及界面损伤的发展速度。研究结果可为推广应用钢筋再生混凝土结构提供基础研究资料。

关键词: 再生混凝土; 粘结滑移性能; 本构模型; 能量; 界面损伤; 拉拔试验

中图分类号: TU502; TU528.0; TU13 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.0396

EXPERIMENTAL AND MECHANICAL ANALYSIS OF BOND-SLIP PERFORMANCE BETWEEN RECYCLED CONCRETE AND REBAR

WANG Bo¹, BAI Guo-liang¹, DAI Hui-juan¹, WU Shu-hai^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. WISDRI Engineering & Research Incorporation Limited, Wuhan 430223, China)

Abstract: Good bond performance is a prerequisite to ensure that the recycled concrete and the rebar can work together. According to the pull-out test with 120 test specimens, the bond-slip performance between the recycled concrete and the rebar is investigated using the theory of non-equilibrium thermodynamics and damage mechanics. The bond-slip constitutive model is proposed and the analysis result shows that the model has better simulation effect. The characteristics of the energy conservation and dissipation during the bond failure process are analyzed, and then the formula to represent the dissipated energy and elastic deformation energy are proposed. The relationship between the initial elastic deformation energy and the limit elastic deformation energy is studied. The main factors affecting the bond performance are analyzed based on the constitutive energy. Then, this paper proposes the concept of relative damage variation which defines the interface relative damage variation, and proposes the equation of relative damage to slip. Besides, the initial damage, the stages of interface damage development and the growth rate of interface damage are analyzed. The results of the present study could provide fundamental research data to promote the application of reinforced recycled concrete structure.

收稿日期: 2012-06-05; 修改日期: 2012-07-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAK48B05); 陕西省自然科学基金研究计划重点项目(2009JZ012)

通讯作者: 王 博(1985—), 男, 河南南阳人, 博士生, 从事再生混凝土结构与工程结构抗震研究(E-mail: chnwangbo@163.com).

作者简介: 白国良(1955—), 男, 陕西西安人, 教授, 博士, 博导, 从事结构工程及其抗震研究(E-mail: guoliangbai@126.com);

代慧娟(1985—), 女, 河南洛阳人, 讲师, 博士, 从事混合结构体系与再生混凝土结构研究(E-mail: daihuijuan1985@163.com);

吴淑海(1982—), 男, 海南海口人, 工程师, 硕士, 从事再生混凝土结构研究(E-mail: wushuhai168@163.com).

Key words: recycled concrete; bond-slip performance; constitutive model; energy; interface damage; pull out test

研究再生混凝土与钢筋间的粘结滑移性能是推广应用钢筋再生混凝土结构需要进行的基础工作之一。近年来,国内外不少单位对该问题展开了研究^[1-6],但是综合分析已有研究可以看出:大多数主要集中在对粘结强度及其影响因素的分析上,而对再生混凝土与钢筋粘结滑移本构关系的研究相对偏少;另外,由于再生骨料的地域差异性,不同单位所得的研究结论差别较大,甚至出现结论截然相反的情况,导致其推广应用受阻。作者认为,要打破再生混凝土研究的局限性,除了应不断增大对同一问题的研究样本,以提供更多的基础试验研究资料外,还应该从细(微)观的角度在理论上进行深入分析,以从根源上揭示各参数对再生混凝土与钢筋粘结性能的作用机制及粘结破坏机理。其中,从能量与损伤的角度研究其破坏机理不失为一种合理的选择。

已有研究^[7-10]表明,将非平衡态热力学理论^[11]应用于岩石变形破坏的分析可有效地揭示岩石的破坏机理。文献[12]初步分析了将非平衡态热力学理论应用于再生混凝土与钢筋粘结性能研究的可行性,但并未进行深入分析。此外,损伤力学^[13]虽已广泛应用于混凝土的研究当中,但在混凝土与钢筋粘结性能的分析中还少有应用。文献[14-15]虽根据损伤力学的相关理论对普通混凝土与钢筋

以及FRP片材的粘结性能进行了初步分析,但所定义的损伤变量与损伤力学的相关概念不符。

鉴于此,本文首先根据拉拔试验得到的粘结滑移曲线,提出适用于再生混凝土与钢筋的粘结滑移本构模型,以丰富再生混凝土与钢筋粘结滑移本构关系的研究资料;然后,利用非平衡态热力学与损伤力学的相关理论,分别从能量和损伤的角度对再生混凝土与钢筋的粘结滑移性能进行分析,为进一步从细(微)观的角度深入研究再生混凝土与钢筋的粘结机理、进而打破不同单位研究结论的局限性提供研究基础。

1 拉拔试验结果分析

取再生骨料取代率、钢筋类型以及再生混凝土强度等级作为主要分析参数,共制作120个拔出试件进行试验研究。为确保试验数据有效、可靠,同类参数的试件各制作3个。试验中主要测试各级荷载下钢筋自由端与加载端的滑移值;各级荷载值及其对应的粘结段所有测点的钢筋应变值。具体试验方案以及再生骨料与天然骨料的材料性能详见文献[6]。采用基于自由水灰比的配合比设计方法^[16],考虑混凝土工作性能的要求,分别选取0.55与0.40作为C20与C30强度等级的自由水灰比。具体配合比与进行粘结试验时的实测抗压强度详见表1。

表1 再生混凝土粘结试验配合比与抗压强度
Table 1 Mix ratio and compressive strength of recycled concrete

强度等级	自由水灰比	取代率/(%)	水泥/(kg/m ³)	水/(kg/m ³)	砂/(kg/m ³)	天然石子/(kg/m ³)	再生骨料/(kg/m ³)	60d 抗压强度/MPa
C20	0.55	0	355	178	650	1180	0	43.61
		30	355	178	650	826	354	39.39
		50	355	178	650	590	590	34.03
		70	355	178	650	354	826	29.05
		100	355	178	650	0	1180	27.80
C30	0.40	0	475	190	540	1180	0	52.48
		30	475	190	540	826	354	47.04
		50	475	190	540	590	590	43.73
		70	475	190	540	354	826	42.41
		100	475	190	540	0	1180	41.71

图1为实测的部分粘结滑移曲线($\tau-s$ 曲线)。

对比所有实测 $\tau-s$ 曲线,可以得出再生混凝土与钢筋的粘结滑移曲线存在如下特点:

1) 钢筋直径为12mm和18mm的试件所对应的粘结滑移曲线均有上升段和下降段组成,而钢筋

直径为25mm的试件对应的粘结滑移曲线则仅有上升段而没有下降段。这主要是由于钢筋直径为25mm的试件在试验过程中均发生了劈裂破坏造成的,而其他类试件则发生的是拔出破坏。

2) 各粘结滑移曲线上上升段的滑移量的变化均

较为缓慢,但平均粘结应力的变化均比较快;在平均粘结应力达到极限粘结强度之前,曲线形态分为明显不同的两段,前一段近似呈直线变化,而后一段则呈曲线变化。

3) 在平均粘结应力超过极限粘结强度后,下降段的变化与上升段刚好相反,滑移量快速增大,而平均粘结应力则缓慢减小,曲线近似呈斜直线变化。

4) 所有的粘结滑移曲线虽大体上均存在以上3个特点,但不同参数下的曲线对应的特征值(曲线各段起止点的取值)则存在较为明显的差别。

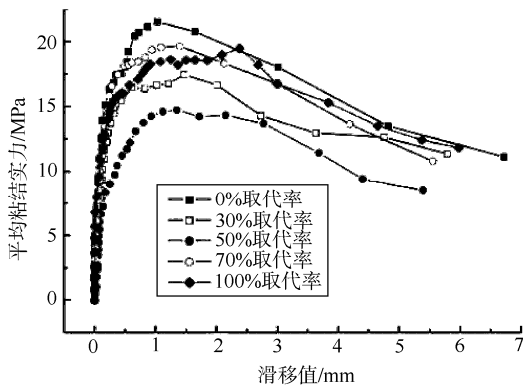


图1 C30、Φ12 试件对应的粘结滑移曲线

Fig.1 Bond-slip curves of specimen C30 and Φ12

2 适用于再生混凝土与钢筋的三段式粘结滑移本构模型

参考文献[17]中普通混凝土粘结滑移本构模型的建立方法,根据实测的粘结滑移曲线,结合曲线分布特点,本文提出适用于再生混凝土与钢筋的三段式粘结滑移本构模型。其中,该模型的第一段和第三段均采用直线函数表示;第二段采用幂函数表示。结合试件破坏过程,分析认为该模型的第一段代表微滑阶段,第二段代表内裂滑阶段,第三段代表拔出破坏阶段。

式(1)为再生混凝土与钢筋的粘结滑移本构关系式。

$$\tau = \begin{cases} \left[(0.8 + 0.16a^{-1}) \frac{s}{s_u} \right] \tau_u, & 0 \leq \frac{\tau}{\tau_u} < 0.8 \\ -a \frac{s}{s_u} + a + 1 \tau_u, & 0.8 \leq \frac{\tau}{\tau_u} < 1 \\ \left(-b \frac{s}{s_u} + b + 1 \right) \tau_u, & \frac{s}{s_u} \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_u (N/mm²) 为极限粘结强度; s_u /mm 为极限粘结强度所对应的滑移值,称为峰值滑移; a 、 b 为回

归确定的参数,分别控制上升段与下降段的斜率, a 值越小,曲线上段越陡峭, b 值越小,曲线下段越平缓。

为验证该粘结滑移本构模型的准确性,对比按式(1)计算得到的粘结滑移曲线与实测粘结滑移曲线,如图2、图3所示。由图可以看出本文所提出的三段式粘结滑移本构模型对实测曲线具有较好的模拟效果。

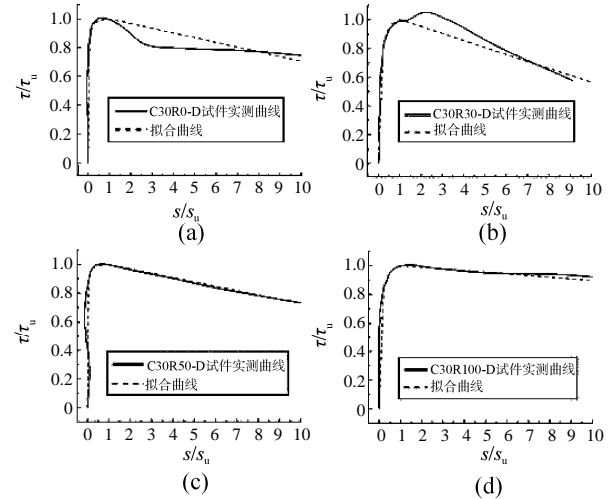


图2 C30、Φ12 试件计算与实测无量纲化 τ - s 曲线对比

Fig.2 Comparison of calculation and test bond-slip curves of specimen C30 and Φ12

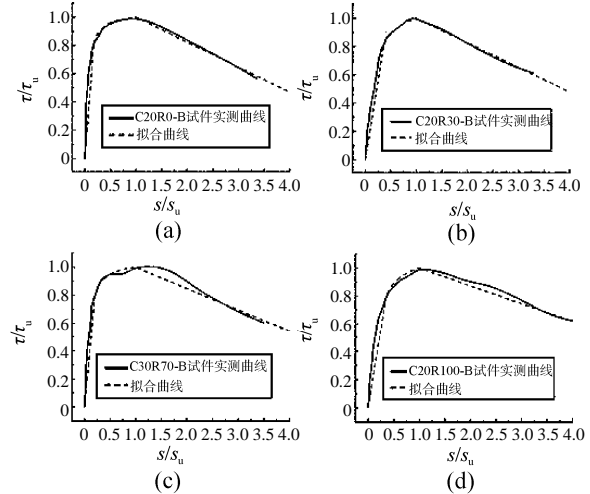


图3 C20、Φ18 试件计算与实测无量纲化 τ - s 曲线对比

Fig.3 Comparison of calculation and test bond-slip curves of specimen C20 and Φ18

3 再生混凝土与钢筋粘结滑移性能的能量分析

3.1 粘结破坏过程的能量守恒及能量耗散特性

试件在拉拔力作用下的粘结破坏是一个功能转化的过程,粘结破坏过程中外力(拉拔力)所做的

功全部用来引起粘结界面内能的变化,其能量守恒的实质是外力做功产生的机械能 W 与界面内能变化量 ΔU 之间的平衡,可用下式表示:

$$W = \Delta U \quad (2)$$

其中,弹性变形能 U_e 、塑性变形能 U_p 、表面能 U_b 以及辐射能 U_m 等均是界面内能的主要组成部分,它们之间存在一定的相互关系,可用下式表示:

$$\Delta U = f(U_e, U_p, U_b, U_m) \quad (3)$$

由于机械能随着外力的变化而不断增加,以及界面内能各种组成部分之间的相互转化特性,导致粘结破坏是一个动态的能量守恒过程。

根据非平衡态热力学理论^[11]分析认为,在粘结破坏过程中,当微缺陷的尺寸与数量处于较低规模时,涨落不会引起界面热力学状态的突变,界面在宏观上表现为能量耗散的特点,外力所做的功主要以弹性变形能的形式储存在界面内部。当界面上的微缺陷发展到一定程度时,将会集中分布在某一区域,诱发宏观裂纹的产生,引起界面热力学状态的突变,使界面在宏观上表现为能量释放的特点,储存的弹性变形能释放出来,导致失稳破坏。其中,耗散能与弹性变形能的表达式分别见式(4)与式(5):

$$U^h = G(U_p, U_b, U_m) \quad (4)$$

$$U^s = U_e \quad (5)$$

伴随着能量的转化,界面所处的状态也在不断发生变化。总体来说,可以分为以下4个阶段:

1) 初始稳定态阶段。当无外力作用时,界面所处的状态比较稳定,称为初始稳定态。相当于试件已安装就位但尚未加载的阶段。

2) 亚稳定态阶段。在此阶段,随着外力的不断增大,界面相对于初始稳定态而言越来越不稳定,但尚未劣化到足以引起失稳。该阶段对应着三段式粘结滑移本构模型的上升段,且上升段中第二段(曲线段)的稳定性明显低于第一段(直线段)的稳定性。

3) 临界态阶段。按照耗散结构理论^[11],在亚稳定态末期,界面偏离初始稳定态越来越远,由于涨落的放大而导致界面向另一种新的定态发展,这种不稳定的定态称为临界态。该阶段对应着粘结滑移本构模型的峰值点,即达到极限粘结强度时所对应的状态。

4) 失稳阶段。在外力达到极限拉拔力之后,界面发生失稳,开始大量释放能量,直至发生粘结破坏,而破坏后界面所处的定态则称为新稳定态。该

阶段对应着三段式粘结滑移本构模型的下降段。

上述分析表明,伴随着稳定性的劣化,界面从初始稳定态经过亚稳定态到达临界态,最后随着能量的大量释放而形成新稳定态的过程与粘结破坏的全过程相对应。这说明本文提出的三段式粘结滑移本构模型具有明确的物理意义。其中,第一段(直线函数段)代表着亚稳定态初期,界面相对较为稳定;第二段(幂函数段)代表着亚稳定态末期,界面的稳定性越来越差,直至到达临界态;第三段(直线函数段)代表着失稳破坏阶段。

3.2 耗散能与弹性变形能代表值

上节分析表明,界面内的能量在粘结破坏过程中的任意时刻都可以分为耗散能与弹性变形能两类。图4为耗散能与弹性变形能关系示意图。

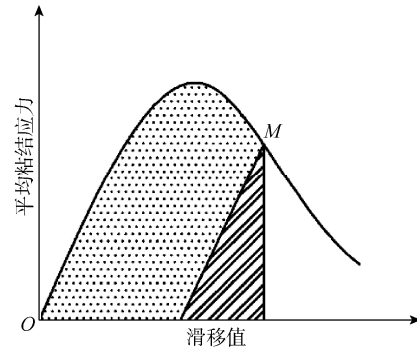


图4 耗散能与弹性变形能的关系

Fig.4 Relationship between the dissipated energy and the elastic deformation energy

图4中点状阴影面积反映某一时刻界面内耗散能的大小,称为耗散能代表值;条状阴影面积反映某一时刻界面内弹性变形能的大小,称为弹性变形能代表值。

结合再生混凝土与钢筋粘结滑移本构关系式(1),易得弹性变形能代表值计算公式,见下式:

$$U_i^s = \frac{(\tau_i)^2}{2B^0} \quad (6)$$

式中, τ_i 是指粘结破坏过程任意时刻的平均粘结应力; B^0 是初始割线抗滑模量,可用三段式粘结滑移本构模型的第一段的直线斜率表示。

任意时刻界面内总的能量,也即耗散能和弹性变形能代表值之和可按式(7)计算:

$$U_i = \int_0^{S_i} \tau \cdot dS \quad (7)$$

根据式(6)、式(7),易得任意时刻的耗散能代表值的计算公式,见下式:

$$U_i^h = U_i - U_i^s = \int_0^{S_i} \tau \cdot dS - \frac{(\tau_i)^2}{2B^0} \quad (8)$$

特殊的, 粘结滑移曲线所包围的总面积称为本构破坏能, 可用下式表示:

$$U_z = \int_0^{S^0} \tau \cdot dS + \int_{S^0}^{S_u} \tau \cdot dS + \int_{S_u}^{S_r} \tau \cdot dS \quad (9)$$

式中, S^0 、 S_u 、 S_r 分别是指劈裂粘结应力、极限粘结应力与残余粘结应力对应的滑移值。

3.3 初始弹性变形能与极限弹性变形能的关系

结合式(6)分析可知, 界面内储存的弹性变形能在粘结滑移曲线的峰值点之前不断增大, 而在峰值点之后则不断减小。这主要是由于界面在达到临界态之后开始向外界大量释放能量所致。

初始弹性变形能是指粘结界面在损伤未发展状态下储存的弹性变形能。根据式(6), 易得其计算公式, 见下式:

$$U_0^s = \frac{(\tau_{cr})^2}{2B^0} \quad (10)$$

极限弹性变形能是指平均粘结应力达到极限粘结强度时界面内储存的弹性变形能。根据式(6), 易得其计算公式, 见下式:

$$U_u^s = \frac{(\tau_u)^2}{2B^0} \quad (11)$$

式(1)给出的粘结滑移本构关系式中, 劈裂粘结应力与极限粘结应力存在如下关系式:

$$\tau_{cr} = 0.8\tau_u \quad (12)$$

由式(10)~式(12)可以计算得出极限弹性变形能与初始弹性变形能代表值之比如下式所示:

$$\gamma = \frac{U_u^s}{U_0^s} = 1.563 \quad (13)$$

式(13)表明, 极限弹性变形能与初始弹性变形能代表值之比是定值, 不受再生骨料取代率、钢筋类型以及再生混凝土强度等级等参数的影响。这相当于从能量的角度给出了粘结应力达到极限粘结强度的条件, 只要当弹性变形能增大到初始弹性变形能的 1.563 倍时, 即代表粘结应力达到极限粘结强度。这说明, 不同参数下的粘结性能虽然差别较大, 但是若从能量的角度分析则可以将其统一起来, 上述分析亦初步表明将能量理论应用于研究再生混凝土与钢筋粘结滑移性能优越性。

3.4 基于本构破坏能的粘结性能影响因素分析

良好的粘结性能既应该具有较高的粘结强度, 还应该具有良好的延性性能。已有研究^[1-5]主要考虑了粘结强度, 而没有综合考虑粘结应力的分布情况, 即延性性能。鉴于能量属于宏观的、可包络各

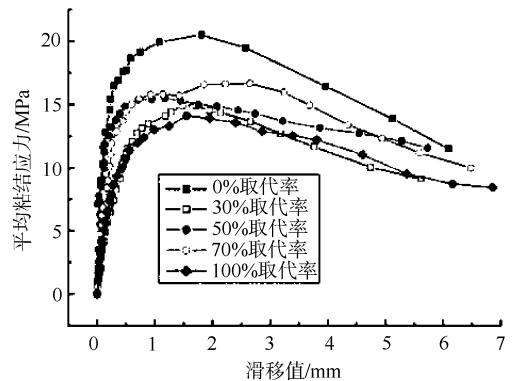
因素影响的变量, 本文尝试从能量的角度分析粘结性能的优劣。首先结合式(6)~式(9), 从能量的角度定义粘结界面的损伤变量, 见下式:

$$D = \frac{U_i^h}{U_z} = \frac{U_i - U_i^s}{U_z} = \frac{\int_0^{S_i} \tau \cdot dS - \frac{(\tau_i)^2}{2B^0}}{\int_0^{S^0} \tau \cdot dS + \int_{S^0}^{S_u} \tau \cdot dS + \int_{S_u}^{S_r} \tau \cdot dS} \quad (14)$$

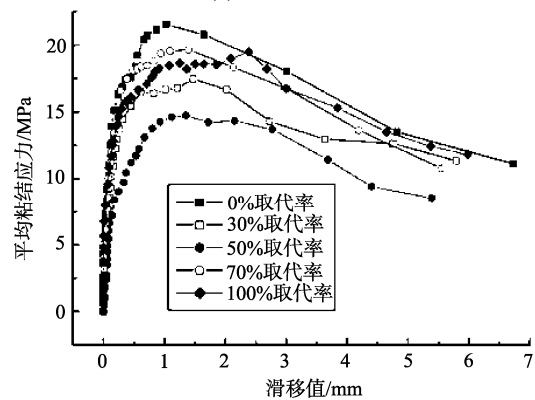
由式(14)可以看出, 本构破坏能 U_z 越大, 在耗散能相同时, 界面损伤相对越小, 表明粘结性能劣化程度越小, 粘结性能越好。从另一角度来说, 本构破坏能越大, 发生粘结破坏所需的外力功就越大, 从而也可表明再生混凝土与钢筋间的粘结性能越好。因此, 对比本构破坏能的大小即可得到不同因素对粘结性能的影响情况。

1) 再生骨料取代率的影响

图 5 为不同再生骨料取代率下的粘结滑移曲线。由图可以看出: 普通混凝土对应的粘结滑移曲线所包围的面积最大; 相对于普通混凝土, 粘结滑移曲线所包围的面积随着再生骨料取代率的增大虽有不同程度的减小, 但并没有明显的变化规律。



(a) C20、 $\Phi 12$



(b) C30、 $\Phi 18$

图 5 不同再生骨料取代率下的粘结滑移曲线

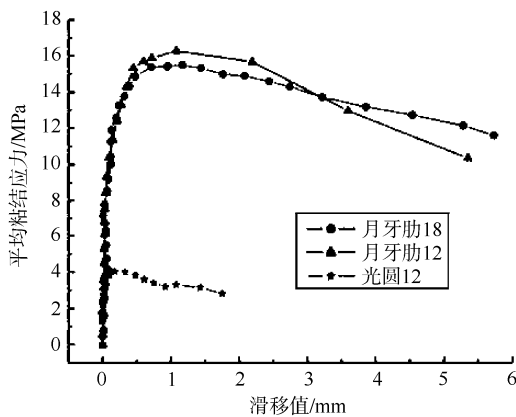
Fig.5 Bond-slip curves of different replacement rate of recycled aggregate

这表明：普通混凝土对应的试件发生粘结破坏所需的外力功最大，其与钢筋间的粘结性能优于再生混凝土与钢筋间的粘结性能；随着再生骨料取代率的增大，本构破坏能并没有表现出一致的规律，没有持续增大或减小，这说明，再生骨料取代率较大时对应的粘结性能不一定差于再生骨料取代率较小时的粘结性能，反之亦然。分析认为这主要是由于再生骨料与天然骨料间的耦合效应造成的。所谓骨料耦合效应是指由于随着再生骨料的变化，天然骨料的含量必然向着相反方向变化，并非孤立不变，从而导致两种骨料的作用机制相互影响的现象。骨料耦合效应的存在使得粘结性能并非随着再生骨料取代率的增大而持续增大或减小，而是在中间某一取代率下出现拐点。

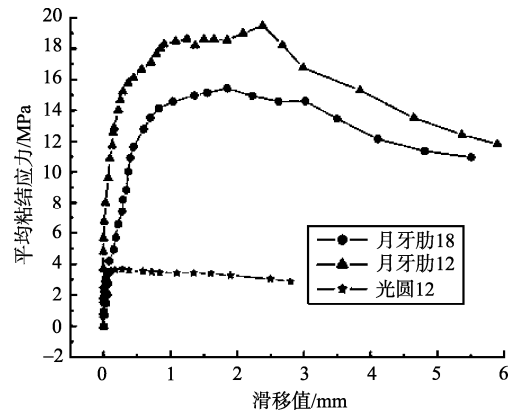
2) 钢筋类型的影响

图 6 为不同钢筋类型下的粘结滑移曲线。由图可以看出：变形钢筋对应的粘结滑移曲线所包围的面积明显大于光圆钢筋对应的面积；同为变形钢筋时，钢筋直径越小，对应的粘结滑移曲线所包围的面积越大；当钢筋直径变小时，粘结滑移曲线所包围的面积的增长幅度随着再生混凝土强度等级的提高而增大。

这表明：再生混凝土与变形钢筋间的粘结性能明显优于再生混凝土与光圆钢筋间的粘结性能，这主要是由于两类钢筋的粘结作用机理不同造成的^[6]；当同为变形钢筋时，钢筋直径越小，粘结性能越好，分析认为这主要有两方面的原因引起的：一方面，钢筋直径越小，混凝土的握裹力相对越强，另一方面，文献[6]分析表明粘结应力不均匀系数随着钢筋直径的减小而减小，也即，与大直径钢筋相比，小直径钢筋对应的粘结应力沿锚长分布较为均匀，延性较好；随着再生混凝土强度等级的提高，钢筋直径对粘结性能的影响更为明显。



(a) C20 强度等级、50%取代率



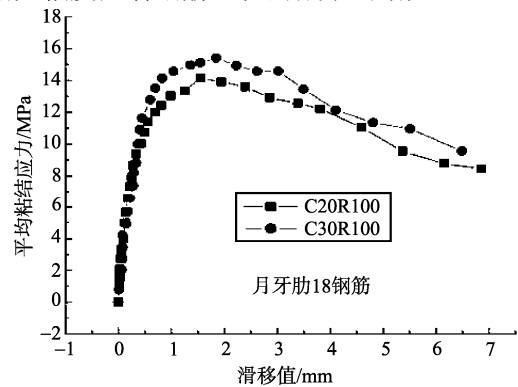
(b) C30 强度等级、100%取代率

图 6 不同钢筋类型下的粘结滑移曲线

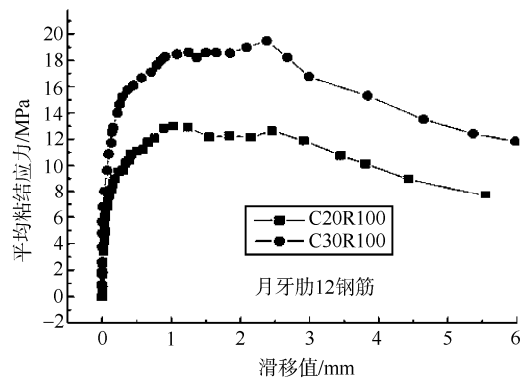
Fig.6 Bond-slip curves of different steel types

3) 再生混凝土强度等级的影响

图 7 为不同再生混凝土强度等级下的粘结滑移曲线。由图可以看出：粘结滑移曲线所包围的面积随着再生混凝土强度等级的提高而增大；当再生混凝土强度等级提高时，粘结滑移曲线所包围的面积的增长幅度随着钢筋直径的减小而增大。



(a)



(b)

图 7 不同再生混凝土强度等级下的粘结滑移曲线

Fig.7 Bond-slip curves of different strength grades of recycled concrete

这表明：再生混凝土强度等级越高，本构破坏能越大，发生粘结破坏所需的外力功越大，粘结性

能越好,分析认为这是由于试件的抗劈裂能力随着再生混凝土强度等级的提高而增强引起的;随着钢筋直径的变小,再生混凝土强度等级对粘结性能的影响更明显,由于第2)部分在分析钢筋类型的影响时表明钢筋直径对粘结性能的影响与再生混凝土强度等级有关,因此分析认为,这主要是由于各参数对粘结性能的影响并不是单独起作用的,相互之间存在耦合所造成的。

4 再生混凝土与钢筋粘结界面损伤分析

4.1 基于粘结滑移本构模型的界面相对损伤变量的定义

由于再生混凝土与钢筋界面材料的复杂性以及初始缺陷的必然存在性,导致确定出可用于反映界面无损伤状态下的粘结性能指标比较困难。为进行界面损伤分析,本文提出了相对损伤变量的概念。可用下式表示:

$$D^* = \frac{Q^0 - \bar{Q}}{Q^0} \quad (15)$$

式中: D^* 表示相对损伤变量; \bar{Q} 表示由于损伤的发展而导致材料劣化后性能强弱的参数; Q^0 表示只有初始损伤的情况下材料性能强弱的参数。

当 $D^* = 0$ 时,表示材料上只有初始损伤;当 $D^* = 1$ 时,表示材料上布满损伤;当 $0 < D^* < 1$ 时,表示材料在初始损伤的基础上有不同程度的新损伤产生。

上述分析表明,相对损伤变量反映的是材料在初始损伤的基础上受到外力或环境作用所引起的损伤发展过程。由于损伤的发展是导致材料性能劣化乃至破坏的根源,因此定义相对损伤变量进行损伤分析能够从一定程度上分析材料的劣化机理。同时,由于相对损伤变量的定义不需要确定无损状态下的性能指标,因此,比传统的损伤变量更易定义。

根据式(15)可定义出基于割线抗滑模量的界面相对损伤变量,如下式所示:

$$D^* = \frac{B^0 - \bar{B}}{B^0} \quad (16)$$

式中: B^0 表示初始割线抗滑模量,可用粘结滑移本构模型的第一段(图8中的直线 OA 段)的斜率表示; \bar{B} 表示粘结破坏过程中任意时刻的割线抗滑模量,可用图8中原点(O 点)与曲线上任一点 M 的连线的斜率表示,代表抵抗单位滑移所需要的粘结力。由

图8可以看出,割线抗滑模量随着滑移量的增大而不断减小,与外力作用下粘结性能的不断劣化相一致,这说明采用割线抗滑模量作为反映粘结性能随着界面损伤的发展而不断劣化这一过程的参数是合理的。

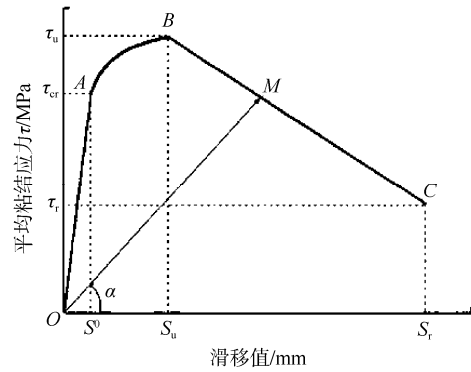


图8 粘结滑移本构模型

Fig.8 Bond-slip constitutive model

4.2 滑移等效原理

为推导界面相对损伤滑移方程,本文首先参考损伤力学中的应变等效原理^[13],给出滑移等效原理如下。

第一种损伤状态下的有效粘结应力在第二种损伤状态下的滑移和第二种损伤状态下的有效粘结应力在第一种损伤状态下的滑移等效。可用下式表示:

$$S = \frac{\bar{\tau}_1}{B_2} = \frac{\bar{\tau}_2}{B_1} \quad (17)$$

式中: $\bar{\tau}_1$ 、 $\bar{\tau}_2$ 分别为第一种损伤状态和第二种损伤状态下的有效粘结应力; B_1 、 B_2 分别为第一种损伤状态和第二种损伤状态下的割线抗滑模量。

特殊的,无损状态和损伤状态下的滑移等效以及初始损伤状态和损伤发展状态下的滑移等效可以分别用式(18)和式(19)表示:

$$S = \frac{\bar{\tau}}{B} = \frac{\tau}{B} \quad (18)$$

$$S = \frac{\tau^0}{B} = \frac{\bar{\tau}}{B^0} \quad (19)$$

式中: τ^0 、 $\bar{\tau}$ 分别为初始损伤状态和损伤发展状态下的有效粘结应力; B^0 、 \bar{B} 分别为初始损伤状态和损伤发展状态下的割线抗滑模量。

式(17)~式(19)即为滑移等效原理。可通过有效粘结应力的概念和损伤变量的定义证明。

4.3 界面相对损伤滑移方程

由式(18)易得:

$$\tau = \bar{B} \cdot S \quad (20)$$

由式(16)易得:

$$\bar{B} = B^0 \cdot (1 - D^*) \quad (21)$$

组合式(20)、式(21)可得:

$$\tau = S \cdot B^0 (1 - D^*) \quad (22)$$

特别的, 当 $0 \leq S \leq S^0$ 时, $\bar{B} = B^0$, $\tau = S \cdot B^0$ 。

由式(22)即可得到界面相对损伤模型, 见下式:

$$D^* = \begin{cases} 0 & , 0 \leq S < S^0 \\ 1 - \frac{\tau}{S \cdot B^0} & , S \geq S^0 \end{cases} \quad (23)$$

把式(1)代入式(23)可得界面相对损伤滑移方程, 见下式:

$$D^* = \begin{cases} 0 & , 0 \leq S < S^0 \\ 1 + \frac{aS^0 S_u}{0.8S^2} - \frac{(a+1)S^0}{0.8S} & , S^0 \leq S < S_u \\ 1 + \frac{bS^0}{0.8S_u} - \frac{(b+1)S^0}{0.8S} & , S \geq S_u \end{cases} \quad (24)$$

式中, S^0 称为临界滑移值, 是指粘结应力为 τ_{cr} 时的滑移值, 可由式 $S^0 = \frac{0.8S_u}{0.8 + 0.16a^{-1}}$ 计算得到。

根据式(24)即可绘制出各参数下的 $D^* - S$ 曲线。

4.4 界面初始损伤分析

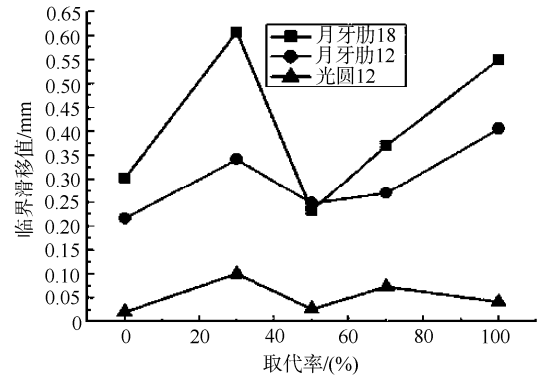
临界滑移值是指界面相对损伤变量为零时, 也即在初始损伤状态下产生的最大滑移。分析认为临界滑移值能够反映界面初始损伤的大小, 在粘结作用机理相同时, S^0 越大, 表明界面初始损伤越大。对比分析不同参数下的 S^0 即可得到界面初始损伤的变化规律。

1) 再生骨料取代率对界面初始损伤的影响

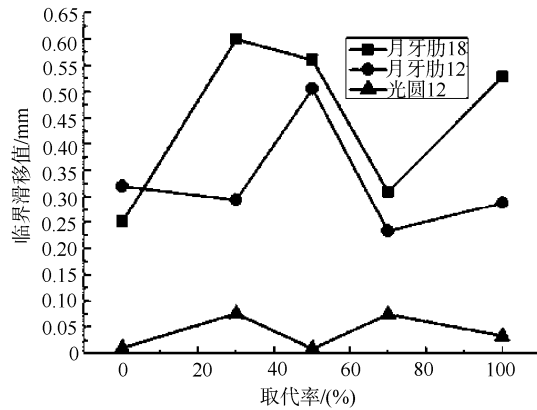
图 9 为 S^0 与再生骨料取代率的关系图。由图可以看出: 普通混凝土对应的 S^0 值最小, 随着再生骨料取代率的增大, S^0 值的变化没有明显一致的规律, 既没有不断减小也没有不断增大, 但相对于普通混凝土对应的 S^0 值基本上均有不同程度的增大。

这表明: 相对于普通混凝土而言, 界面初始损伤随着再生骨料取代率的增大有不同程度的增大, 这是由于再生骨料是经破碎处理而成, 微裂纹较多, 从而造成钢筋与再生混凝土的界面初始损伤大于钢筋与普通混凝土的界面初始损伤; 由于受骨料间的耦合效应影响, 界面初始损伤并非随着再生骨

料取代率的增大而不断增大, 而是当取代率取为 0%~100% 的某一值时达到最大, 而界面最大初始损伤与再生骨料取代率之间明显关系的确定则有待于将再生骨料以及天然骨料作为研究单元从微观作用机理以及组合影响机制上进行深入研究。



(a) C20 强度等级



(b) C30 强度等级

图 9 S^0 与再生骨料取代率的关系

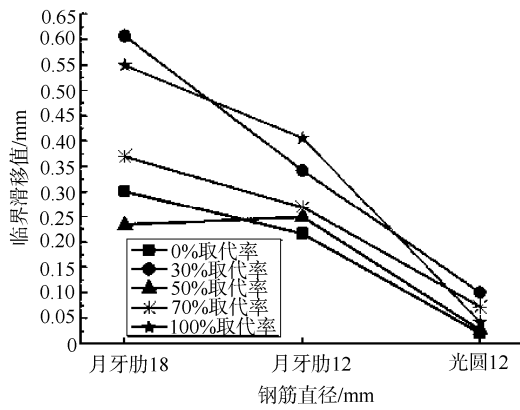
Fig.9 Relationship between S^0 and the replacement rate of recycled aggregate

2) 钢筋类型对界面初始损伤的影响

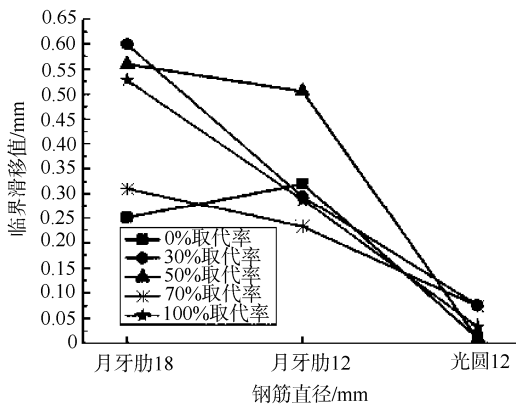
图 10 为 S^0 与钢筋类型的关系图。由图可以看出: 光圆钢筋对应的 S^0 几乎为零, 远小于变形钢筋对应的 S^0 ; 对变形钢筋, S^0 随着钢筋直径的增大而增大。

这表明: 与钢筋直径的大小相比, 钢筋类型(是否带肋)对界面损伤的影响更大, 变形钢筋所对应的界面初始损伤远大于光圆钢筋对应的界面初始损伤。由于光圆钢筋与再生混凝土间的粘结作用主要是由摩擦力提供, 而界面损伤对摩擦力影响不明显, 所以导致光圆钢筋对应的临界滑移值几乎为零。界面初始损伤随着钢筋直径的增大而增大。这是因为钢筋直径越大, 所形成的界面面积就越大, 从而导致在其他因素相同的情况下, 大直径钢筋对

应的界面初始损伤就大于小直径钢筋。



(a) C20 强度等级



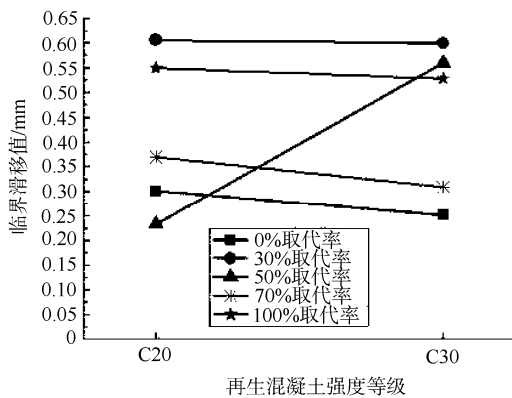
(b) C30 强度等级

图 10 S^0 与钢筋类型的关系

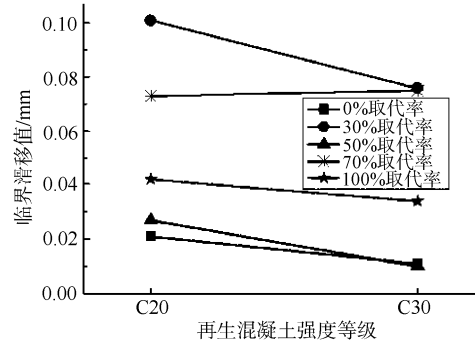
Fig.10 Relationship between S^0 and the type of the rebar

3) 再生混凝土强度等级对界面初始损伤的影响

图 11 为 S^0 与再生混凝土强度等级的关系图。由图可以看出，除月牙肋 18、再生骨料取代率为 50% 的试件外(试验误差造成，占所分析试件总数的 3.3%)， S^0 随着再生混凝土强度等级的提高均有小幅度的减小。



(a) $\phi 18$



(b) $\phi 12$

图 11 S^0 与再生混凝土强度等级的关系

Fig.11 Relationship between S^0 and the strength grade of recycled concrete

这表明：随着再生混凝土强度等级的提高，界面初始损伤有小幅度的减小。这是由于再生混凝土强度等级越高，砂浆收缩不均匀所造成的微裂纹就越少，从而导致界面初始损伤就越小。

4.5 界面损伤发展阶段与损伤发展速度分析

根据式(24)可计算绘制出界面相对损伤变量-滑移曲线(D^*-S 曲线)，如图 12 所示。综合所有的 D^*-S 曲线，分析认为再生混凝土与钢筋的界面损伤发展过程可以分为初始损伤、损伤快速发展和损伤缓慢累积三个阶段。主要存在如下特点：

- 1) 在初始损伤阶段， $D^*=0$ ，界面上没有新损伤产生，可近似认为粘结性能没有劣化，滑移量缓慢增大至临界滑移值 S^0 。
- 2) 在损伤快速发展阶段， D^* 快速增大，界面上的新损伤快速产生，粘结性能不断劣化，而粘结应力则不断增大，直至达到极限粘结强度 τ_u 。
- 3) 在损伤缓慢累积阶段， D^* 缓慢增大，界面损伤发展速度较为缓慢，粘结性能继续劣化，而粘结应力则开始不断减小，直至破坏。

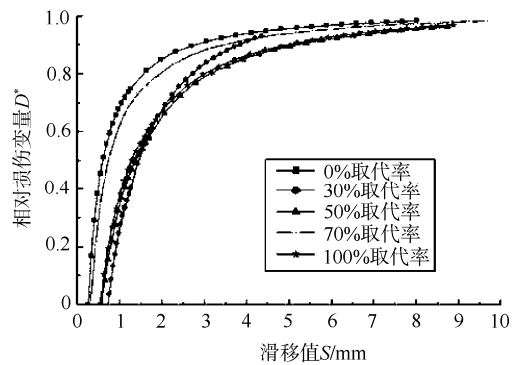


图 12 C20、 $\phi 18$ 试件的 D^*-S 曲线

Fig.12 Curve of D^*-S of specimen C20 and $\phi 18$

上述分析表明，界面损伤发展是一个损伤发展

速度不断减慢的过程,在此过程中界面损伤不断累积,直至发生粘结破坏。

随着界面损伤的发展,再生混凝土与钢筋间的粘结作用开始削弱。界面损伤发展越快,粘结作用削弱就越快。定义平均界面损伤发展速度为单位滑移增量值对应的相对损伤增量,则粘结破坏过程中任意时刻的界面损伤发展速度可通过 $D^* - S$ 曲线上相应的斜率来反映,斜率越大表明界面损伤发展速度越大。可用下式表示:

$$V_D = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta D^*}{\Delta S} \quad (25)$$

根据损伤力学^[13]中损伤变量的定义方法及本文提出的相对损伤变量的概念,分析认为可定义出基于滑移值的界面相对损伤变量,见下式:

$$D^* = \frac{S - S^0}{S} \quad (26)$$

组合式(25)、式(26)可得:

$$V_D = \lim_{S_2 \rightarrow S_1} \frac{S^0}{S_1 \cdot S_2} \quad (27)$$

式中, S_1 、 S_2 分别是指先后两个不同时刻的滑移值,且 $\Delta S = S_2 - S_1$ 。

由式(27)可得临界滑移值处的界面损伤发展速度如下:

$$V_D^0 = \frac{1}{S^0} \quad (28)$$

定义临界滑移值处的界面损伤发展速度为初始界面损伤发展速度。式(28)表明,初始界面损伤发展速度的快慢与临界滑移值的大小成反比。由于4.4节分析认为临界滑移值可以反映界面初始损伤的大小,因此,综合分析可得初始界面损伤发展速度随各因素的变化规律与界面初始损伤随各因素的变化规律相反。对比不同参数下 $D^* - S$ 曲线上临界滑移值处的斜率亦可得出此结论。

5 结论

本文采用试验与理论相结合的方法对再生混凝土与钢筋间的粘结滑移性能进行了分析。所得主要结论如下:

(1) 提出适用于再生混凝土与钢筋的三段式粘结滑移本构模型,结果表明该模型对实测粘结滑移曲线具有较好的模拟效果,且能量分析表明该模型具有明确的物理意义。

(2) 再生混凝土与钢筋的粘结破坏是一个动态

的能量守恒过程,且任意时刻界面内的能量都可以分为耗散能与弹性变形能两类。给出了弹性变形能和耗散能代表值的计算公式。分析指出,界面内储存的弹性变形能在粘结滑移曲线峰值点之前不断增大,而在峰值点之后则不断减小,且极限弹性变性能与初始弹性变形能之比恒为定值。

(3) 提出以本构破坏能作为评价粘结性能优劣的指标。再生混凝土与钢筋的粘结性能随着再生骨料取代率的增大有不同程度的减弱,但受骨料耦合效应影响并没有一致的变化规律;随着钢筋直径的减小而增强,且再生混凝土与变形钢筋间的粘结性能明显优于再生混凝土与光圆钢筋间的粘结性能;随着再生混凝土强度等级的提高而增强。不同参数对粘结性能的影响不是单独起作用的,各参数之间存在耦合作用。

(4) 提出相对损伤变量的概念,定义了基于割线抗滑模量的界面相对损伤变量,提出滑移等效原理,推导出界面相对损伤模型,得出界面相对损伤滑移方程。

(5) 分析表明:临界滑移值可作为评定界面初始损伤大小的指标;再生混凝土与钢筋的界面初始损伤随着再生骨料取代率的增大有不同程度的增大,均大于普通混凝土对应的界面初始损伤,但受再生骨料与天然骨料间的耦合影响,随着再生骨料取代率的增大没有一致的变化规律;变形钢筋对应的界面初始损伤明显大于光圆钢筋对应的界面初始损伤,且随着钢筋直径的增大而增大;界面初始损伤随着再生混凝土强度等级的提高而减小。

(6) 再生混凝土与钢筋的界面损伤发展过程可以分为初始损伤、损伤快速发展和损伤缓慢累积三个阶段;界面损伤的发展是一个发展速度不断减慢的过程;初始界面损伤发展速度随各因素的变化规律与界面初始损伤随各因素的变化规律相反。

(7) 从能量和损伤的角度对再生混凝土与钢筋间的粘结滑移性能进行分析可作为一种新的研究思路。建议在后续研究中引入其他试验手段(如 CT 扫描、声发射、红外热像等技术),确定具体的损伤与能量表征参数进行更为细致的分析,以彻底揭示各参数对粘结性能的作用机制以及粘结破坏机理,早日打破再生混凝土研究的区域局限性。

参考文献:

- [1] Ajdukiewicz A, Kliszczewicz A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC [J].

- Cement and Concrete Composites, 2002, 24: 269—279.
- [2] Roos F A. Contribution for the calculation of concrete with recycled aggregate according to DIN 1045-1 [D]. Munich: Munich University, 2002.
- [3] 肖建庄, 李丕胜, 秦薇. 再生混凝土与钢筋间的粘结滑移性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 13—16.
Xiao Jianzhuang, Li Pisheng, Qin Wei. Study on bond-slip between recycled concrete and rebars [J]. Shanghai: Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(1): 13—16. (in Chinese)
- [4] 赵军. 再生混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
Zhao Jun. Experimental research on the bond behavior between recycled concrete and rebars [D]. Nanning: Guangxi University, 2007. (in Chinese)
- [5] 胡琼, 陈伟伟, 邹超英. 再生混凝土粘结性能试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(12): 1849—1854.
Hu Qiong, Chen Weiwei, Zou Chaoying. Experimental study on bonding properties of recycled concrete [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2010, 42(12): 1849—1854. (in Chinese)
- [6] 王博, 白国良, 李坚, 等. 钢筋与再生混凝土粘结应力分布的试验研究及理论分析[J]. 工业建筑, 2012, 42(4): 10—14.
Wang Bo, Bai Guoliang, Li Jian, et al. Experimental and theoretical analysis of bond stress distribution between the rebar and the recycled concrete [J]. Industrial Construction, 2012, 42(4): 10—14. (in Chinese)
- [7] 彭瑞东, 谢和平, 周宏伟. 岩石变形破坏的热力学分析[J]. 金属矿山, 2008, 381(3): 61—64, 132.
Peng Ruidong, Xie Heping, Zhou Hongwei. Thermodynamic analysis of rock deformation and failure process [J]. Metal Mine, 2008, 381(3): 61—64, 132. (in Chinese)
- [8] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003—3010.
Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003—3010. (in Chinese)
- [9] 赵忠虎, 谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 40(2): 26—31.
Zhao Zhonghu, Xie Heping. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture [J]. Journal of Sichuan university (Engineering Science Edition), 2006, 40(2): 26—31. (in Chinese)
- [10] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729—1740.
Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1729—1740. (in Chinese)
- [11] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986: 50—67.
Li Rusheng. Non-equilibrium thermodynamics and dissipative structure [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986: 50—67. (in Chinese)
- [12] 王博, 白国良. 钢筋与再生混凝土黏结破坏过程的能量机制研究[J]. 混凝土, 2011, 256(2): 32—35.
Wang Bo, Bai Guoliang. Energy mechanism of the bonding failure process between the rebars and the recycled concrete [J]. Concrete, 2011, 256(2): 32—35. (in Chinese)
- [13] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 61—68.
Li Zhaoxia. Damage mechanics and application [M]. Beijing: Science Press, 2002: 61—68. (in Chinese)
- [14] 黄闰莉. 钢筋混凝土界面损伤研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
Huang Minli. Study on interface damage of reinforced concrete [D]. Nanjing: Hehai University, 2006. (in Chinese)
- [15] 潘元, 刘伯权, 黄华. FRP片材加固混凝土结构黏结界面损伤分析[J]. 混凝土, 2008, 229(11): 25—28.
Pan Yuan, Liu Boquan, Huang Hua. Interface damage analysis of the concrete structures strengthened by FRP sheet [J]. Concrete, 2008, 229(11): 25—28. (in Chinese)
- [16] 史魏, 侯景鹏. 再生混凝土技术及其配合比设计方法[J]. 建筑技术开发, 2001, 28(8): 18—20.
Shi Wei, Hou Jingpeng. Technology and mix design on recycled concrete [J]. Building technique development, 2001, 28(8): 18—20. (in Chinese)
- [17] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 159—162.
Guo Zhenhai, Shi Xudong. Reinforced concrete theory and analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 159—162. (in Chinese)