

型钢再生混凝土界面黏结应力组成及其强度

郑华海¹, 陈宗平^{2,3}, 苏益声²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 广西大学 土木建筑工程学院,
广西 南宁 530004; 3. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 为研究型钢再生混凝土(SRRC)界面黏结应力组成与各部分黏结应力的大小, 首先分析了型钢与再生混凝土的黏结应力组成, 再根据 17 个型钢再生混凝土试件的推出试验, 研究型钢再生混凝土界面黏结滑移的全过程; 接着, 通过理论分析并结合试验数据, 求解了型钢再生混凝土界面的化学胶结应力和摩擦应力的大小, 并推导了型钢屈服时的临界黏脱长度 l_{cr} 计算公式; 最后, 对影响化学胶结应力和摩擦应力大小的因素进行了分析. 研究表明: 增大混凝土强度、配箍率与保护层厚度可提高摩擦应力, 增大保护层厚度可提高摩擦应力与化学胶结应力.

关键词: 型钢再生混凝土; 黏结应力; 化学胶结应力; 摩擦应力; 黏脱长度

中图分类号: TU398

文献标志码: A

Composition and Magnitude of Interface Bond Stress of Steel Reinforced Recycled Concrete

ZHENG Huahai¹, CHEN Zongping^{2,3}, SU Yisheng²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structure Safety of the Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to study the composition of bond stress for steel reinforced recycled concrete (SRRC), composition of bond stress between steel and recycled aggregate concrete was analyzed first, and according to the push out test of 17 specimens, the whole process of SRRC interface bond slip was analyzed. Then, on the basis of the test and theoretical analysis, the level of chemical cementation stress and friction stress of SRRC interface were solved out, and the calculation formula of critical stick length l_{cr} when steel yield was derived. Finally, factors influencing the level of chemical

cementation stress and friction stress were analyzed. Results show that increasing concrete strength, stirrup ratio and thickness of the protective layer can enlarge friction stress, and increasing the protective layer thickness can increase friction stress and chemical cementation stress.

Key words: steel reinforced recycled concrete; bond stress; chemical cementation stress; friction stress; bond divorced length

型钢再生混凝土组合结构(steel reinforced recycled concrete, 简称 SRRC 结构)是一种新型的组合结构, 既具有普通 SRC 结构承载力高、刚度大和抗震性能好的优点, 又能对废弃混凝土进行回收利用, 解决环境污染的问题, 并减少资源消耗, 具有显著的社会、经济和环境效益^[1]. 近年来, 国内外学者^[2-6]对型钢再生混凝土组合梁、组合柱的静力承载力以及抗震性能开展了相关研究. 随着研究的深入, 研究者发现: 与 SRC 结构一样, 黏结滑移同样影响着 SRRC 构件的强度、刚度以及相应构造措施的确立. 但以往相关研究成果均粗略地选取整个锚固长度的黏结强度平均值, 无法反映各部分黏结应力的大小.

与 SRC 结构类似, SRRC 结构中型钢与再生混凝土共同工作的基础是它们之间的黏结作用, 这种黏结作用保证型钢与再生混凝土共同抵抗各种外部作用. 研究表明: 钢筋与混凝土的黏结力主要由化学胶结力、摩擦力和机械咬合力组成^[10-11], 并且该结论已被普遍认同. 但目前学术界对型钢与混凝土黏结力的组成尚未达成共识. 有的认为黏结力包括化学胶结力、摩擦力和机械咬合力^[12], 有的认为仅有化学胶结力和摩擦力^[10-11]. 至今尚未有关于型钢与混凝土

收稿日期: 2015-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(51268004, 51578163)

第一作者: 郑华海(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为型钢再生混凝土结构. E-mail: zhenghuahai2008@163.com.

通讯作者: 陈宗平(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢与混凝土结构、再生混凝土结构、异型柱结构. E-mail: zpchen@gxu.edu.cn

土黏结应力中的化学胶结应力、摩擦应力大小的研究,已有的研究都是基于整个锚固长度得到平均的黏结强度.针对这些问题,本文通过试验研究与理论分析,研究了组成型钢再生混凝土黏结应力的化学胶结应力与摩擦应力的大小,分析了化学胶结应力与摩擦应力的工作原理与黏结破坏机理.研究成果可为 SRRC 结构与构件建立精细化的强度、刚度计算模型提供支持.

1 型钢与混凝土的黏结应力组成

钢筋与混凝土的黏结力主要由化学胶结力、摩擦力和机械咬合力三部分组成^[5].化学胶结力为浇注混凝土时水泥浆体对钢筋表面氧化层的渗透以及水化过程中水泥晶体的生长和硬化而在钢筋与混凝土接触面形成的化学吸附作用,这种吸附作用仅存在于无相对滑移的接触面,一旦接触面发生相对滑移即消失.混凝土收缩时将钢筋紧紧地握裹而产生的力称为摩擦力,钢筋和混凝土之间的挤压力越大、接触面越粗糙,摩擦力就越大.机械咬合力是钢筋的横肋与混凝土机械咬合力,这种力往往很大,是带肋钢筋黏结力的主要来源.可见,光圆钢筋和带肋钢筋的黏结机理主要差别是:光圆钢筋黏结力主要来自化学胶结力和摩擦力,而带肋钢筋的黏结力主要来自机械咬合力.带肋钢筋与混凝土的机械咬合作用,改变了钢筋与混凝土的相互作用方式,显著地提高黏结强度.

和钢筋与混凝土的黏结机理类似,型钢与再生混凝土的黏结作用也应该由化学胶结力、摩擦力和机械咬合力组成.与带肋钢筋相比,型钢表面比较平整,虽说也有凹凸不平,但是相对带肋钢筋的横肋,型钢表面的凹凸不平程度还是远远不如带肋钢筋.型钢表面的微小凹凸不平的作用到底应该看做机械咬合作用还是看做摩擦作用,学术界尚未达成共识.

摩擦力与机械咬合力的根本区别是接触面的粗糙程度,如果接触面的粗糙度低于某个限值,则表现为摩擦力,如果高于某个限值就为机械咬合力.钢材表面的凹凸高差一般是 $10\ \mu\text{m}$ 的数量级^[13];摩擦力是由于两接触面相对滑移而产生的机械相互作用和分子相互作用,机械相互作用发生在固体表面 $10\ \mu\text{m}$ 范围内,而分子相互作用发生在固体表面 $100\ \mu\text{m}$ 范围^[14].可见,型钢表面的凹凸程度并不高,型钢表面 $10\ \mu\text{m}$ 的数量级的凹凸高差只产生摩擦力.因此,认为型钢与混凝土的黏结应力 τ 由化学胶结

应力 $\tau_{\text{胶结}}$ 和摩擦应力 $\tau_{\text{摩擦}}$ 组成,不包括机械咬合应力 $\tau_{\text{咬合}}$.

2 黏结滑移试验

2.1 试件设计

设计了 17 个试件进行推出试验 (Push-out test).试件均采用 Q235 的 10 号普通工字钢,试件配钢形式见图 1a.试件的型钢均长 510 mm,型钢埋入混凝土均为 460 mm,型钢一端与混凝土平齐,另一端则伸出试件 50 mm,如图 1b 所示.应变片布置见图 2.再生混凝土强度设计等级为 C30,配合比为水泥:水:细骨料:粗骨料=1:0.41:1.05:2.34.所采用的混凝土与钢材的材性试验结果见表 1 和表 2.试件参数见表 3.

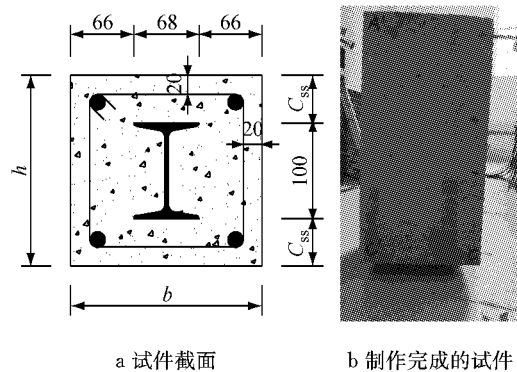


图 1 试件设计 (单位: mm)

Fig.1 Specimens design(unit: mm)

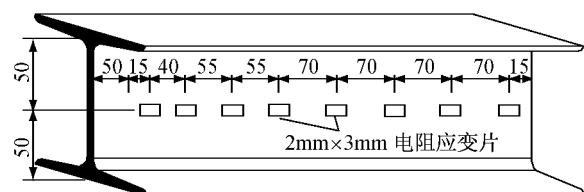


图 2 应变片布置示意

Fig.2 Strain gauge arrangement

试验所用的再生混凝土是以普通混凝土(取代率为 0)配合比为基准,按照粗骨料总质量不变,不同取代率时,仅改变再生粗骨料和天然粗骨料比例的方法配制.由表 1 可知,再生混凝土立方体抗压强度随取代率增大而呈现出逐渐增大的趋势.由于再生粗骨料的吸水性大于天然粗骨料,拌制混凝土时,水份被再生骨料吸收,导致实际水灰比变小,被吸收的水份在混凝土硬化过程中再缓慢释放,这些有利因素促使再生混凝土立方体抗压强度随取代率增大而增大.

表 1 混凝土立方体试块抗压强度

Tab.1 Compressive strength of concrete cube

取代率/%	立方体抗压强度 f_{cu} /MPa	取代率/%	立方体抗压强度 f_{cu} /MPa
0	31.5	60	37.0
10	33.1	70	39.6
20	34.1	80	40.8
30	33.1	90	39.3
40	36.0	100	38.5
50	35.7		

注:取代率是再生粗骨料质量占再生粗骨料和天然粗骨料总质量的百分比.

表 2 钢材力学指标

Tab.2 Steel mechanics indexes

钢材类型	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 E /MPa
纵筋 HRB335	376.9	571.9	2.231
箍筋 HPB235	271.4	430.6	2.217
型钢	320.3	426.5	2.170

2.2 试验装置

试件加载采用 RMT-201 岩石与混凝土力学试验系统,如图 3a所示.为了将型钢从混凝土中推出,

表 3 试件设计参数表

Tab.3 Specimens parameters

试件编号	取代率/%	配箍形式	截面尺寸 $b \times h$ /mm	试件编号	取代率/%	配箍形式	截面尺寸 $b \times h$ /mm
SRRC-1	0	$\Phi 6@200$	200×200	SRRC-10	90	$\Phi 6@200$	200×200
SRRC-2	10	$\Phi 6@200$	200×200	SRRC-11	100	$\Phi 6@200$	200×200
SRRC-3	20	$\Phi 6@200$	200×200	SRRC-12	70	$\Phi 6@140$	200×200
SRRC-4	30	$\Phi 6@200$	200×200	SRRC-13	70	$\Phi 6@100$	200×200
SRRC-5	40	$\Phi 6@200$	200×200	SRRC-14	70	$\Phi 6@80$	200×200
SRRC-6	50	$\Phi 6@200$	200×200	SRRC-15	70	$\Phi 6@200$	180×180
SRRC-7	60	$\Phi 6@200$	200×200	SRRC-16	70	$\Phi 6@200$	220×220
SRRC-8	70	$\Phi 6@200$	200×200	SRRC-17	70	$\Phi 6@200$	240×240
SRRC-9	80	$\Phi 6@200$	200×200				

在试件自由端垫上一块经过加工厚度为 30 mm 的钢板(图 3b),加载时试件自由端混凝土受压,加载端型钢受压,从而将内部型钢推出外包混凝土.通过在

加载端和自由端布置位移计,量测试件加载过程中滑移值,如图 3c.

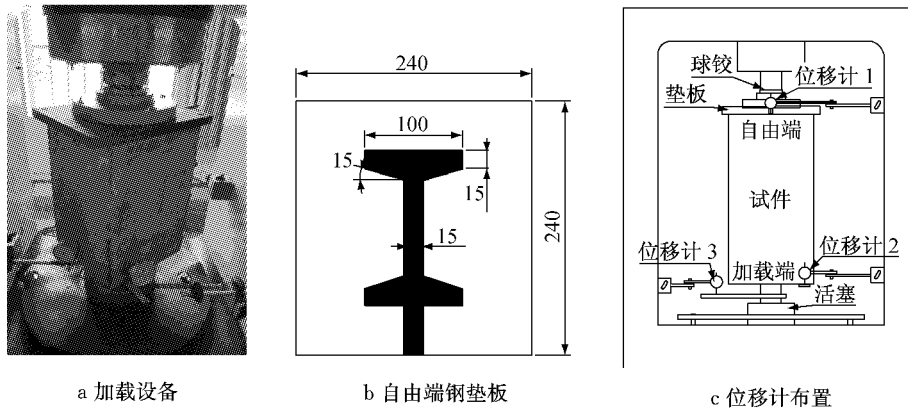


图 3 试验加载装置(单位:mm)
Fig.3 Test setup(unit:mm)

2.3 试验过程与现象

试验采取位移控制的加载制度,加载速率为 $0.002 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,当加载端位移达到 6 mm 时结束加载.

型钢再生混凝土推出试验中,试件的受力破坏过程是加载端首先出现滑移,接着在自由端与型钢翼缘平行的试件表面出现从自由端向加载端开展的裂缝,随后,裂缝慢慢向加载端发展,裂缝宽度也逐

渐变宽.继续加载,首先开裂的裂缝形成一条主裂缝贯穿试件整个长度,此时已接近荷载峰值.随着“砰”的一声响,荷载突然间跌落至极限荷载的 60%~80%,滑移已经发展到试件的自由端,试件自由端开始滑移.此后试件加载端和自由端的滑移增量几乎一致.继续加载,部分试件在荷载突降之后首先经历一段荷载相对下降较快的阶段,慢慢地下降速度变得平缓.而有的试件在荷载陡降之后,荷载就一直很

平缓的下降,直至加载结束. 试件的最终破坏形态及裂缝发展图如图 4 所示.

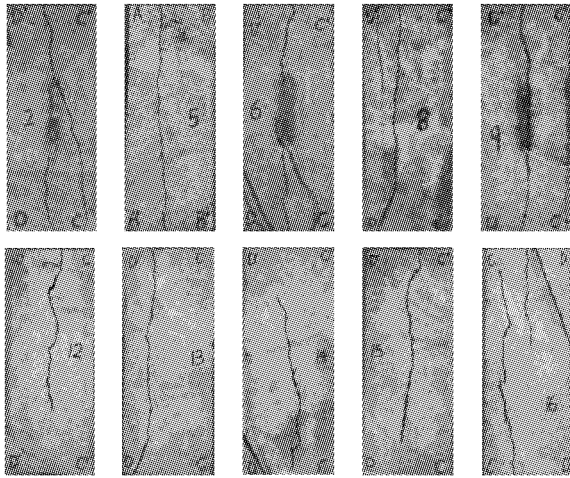


图 4 试件裂缝图

Fig.4 Specimens fractures

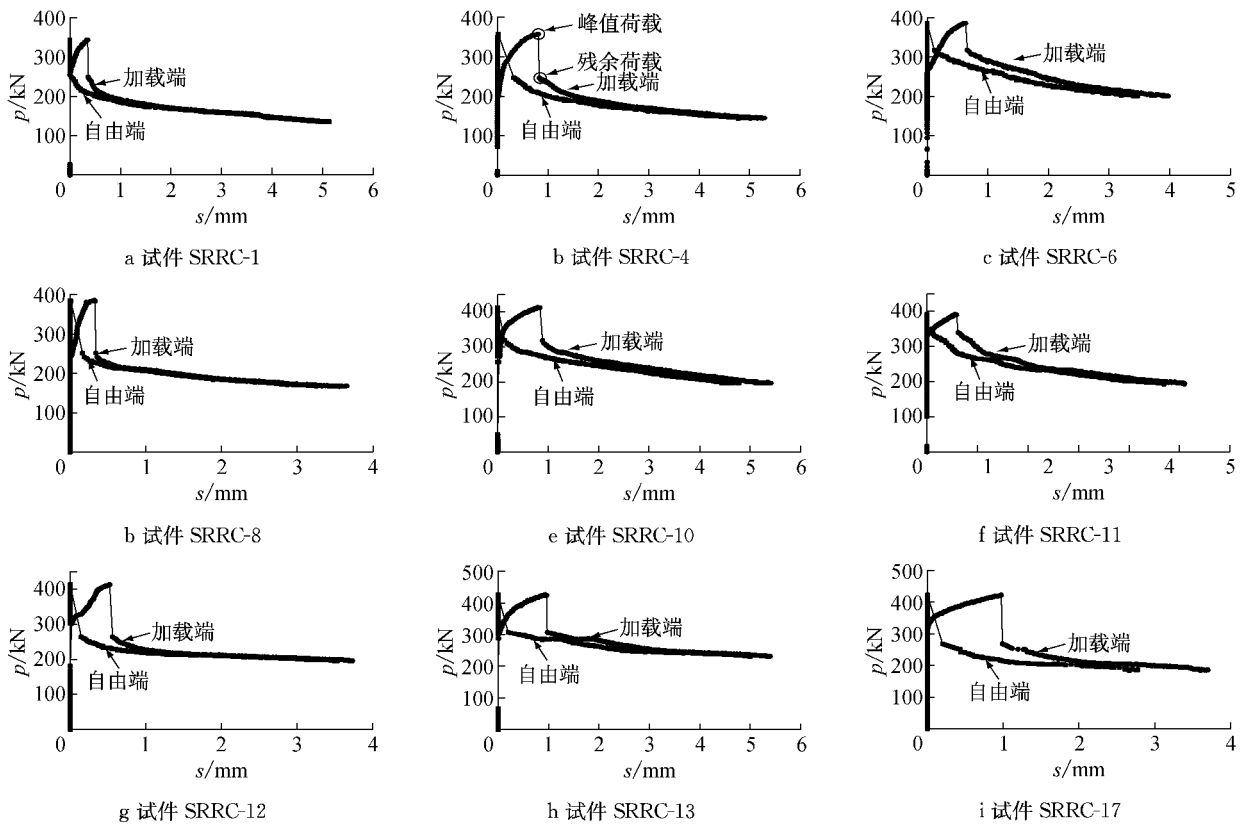


图 5 试件加载端和自由端荷载-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves of specimens loading end and free end

外荷载作用下,型钢受力如图 7a 所示. 沿型钢埋置长度 x 分布的黏结应力 τ 在型钢埋置长度上的积分与外荷载 P 大小相等,即

$$P = \int_0^l \tau(x) \cdot C dx \quad (1)$$

截取图 7b 所示从任意位置 x 至试件自由端的部分型钢,根据平衡条件,该段型钢的受力平衡方程

2.4 试验结果

部分试件的加载端和自由端的荷载-位移曲线见图 5. 如图 5b 所示,曲线峰值点为极限荷载 P_u ,下降段起点为残余荷载 P_r ,与 P_u 和 P_r 对应的分别为极限黏结强度平均值 τ_u 和残余黏结强度平均值 τ_r . 各试件的 P_u, P_r, τ_u 和 τ_r 汇总于表 4.

由图 5 可见,荷载较小时整个试件均没有发生滑移;随着荷载增大加载端首先出现滑移,在达到极限荷载前,自由端几乎也未发生滑移;当达到极限荷载时,承载力突然降至极限荷载的 60%~80%,并且试件自由端开始滑移.

2.5 应变-应力分析

在荷载上升阶段的不同荷载下,沿埋置长度各试件的实测型钢应变可用指数函数对应变进行拟合,如图 6 所示.

为

$$A_s \cdot \sigma(x) = \int_x^l \tau(x) \cdot C dx \quad (2)$$

整理后得到黏结应力 $\tau(x)$ 为

$$\tau(x) = -\frac{E_s A_s}{C} \cdot \frac{d\epsilon(x)}{dx} \quad (3)$$

式中: $l=460$ mm,为型钢埋在混凝土中的长度;

表 4 试件特征荷载和黏结强度平均值一览表

Tab.4 Characteristics loads and average bond strengths of specimens

试件编号	P_u /kN	P_r /kN	τ_u /MPa	τ_r /MPa	试件编号	P_u /kN	P_r /kN	τ_u /MPa	τ_r /MPa
SRRC-1	342.9	222.1	1.724	1.147	SRRC-10	413.2	318.8	2.078	1.603
SRRC-2	378.8	240.2	1.905	1.208	SRRC-11	390.3	279.3	1.963	1.404
SRRC-3	345.8	264.1	1.739	1.328	SRRC-12	413.3	264.7	2.078	1.331
SRRC-4	357.8	246.9	1.799	1.241	SRRC-13	424.9	307.9	2.137	1.548
SRRC-5	345.2	223.6	1.736	1.124	SRRC-14	442.2	337.4	2.224	1.696
SRRC-6	385.5	317.5	1.938	1.596	SRRC-15	258.9	198.2	1.302	0.997
SRRC-7	409.1	283.7	2.057	1.426	SRRC-16	394	250.8	1.981	1.261
SRRC-8	385.6	241.4	1.939	1.214	SRRC-17	412	268.9	2.125	1.352
SRRC-9	378.5	249.3	1.905	1.254					

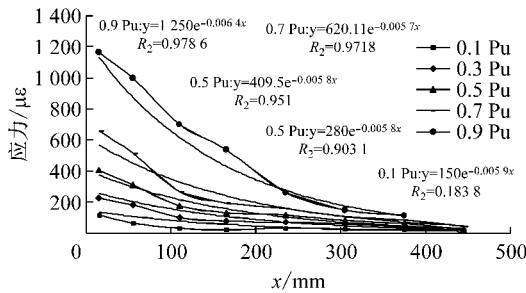


图 6 应变 $\varepsilon(x)$ 沿型钢埋置长度 x 的分布规律
Fig.6 Strain distribution along steel embedment length x

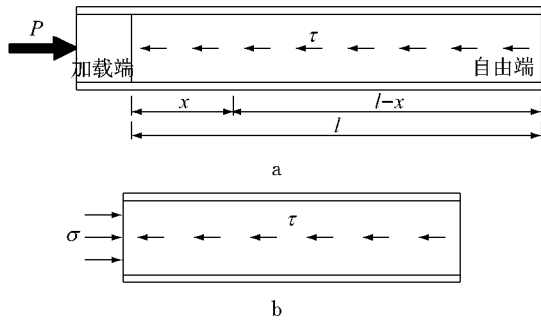


图 7 试件中的型钢受力
Fig.7 Force diagram

σ 为型钢横截面上的应力,MPa; C 为型钢截面周长,mm; E_s 为型钢的弹性模量, $N \cdot mm^{-2}$; A_s 为型钢的受压面积, mm^2 . 由式(3)可知,黏结应力呈指数分布.

3 黏结滑移发展过程分析

通过对试验现象及荷载-位移曲线的分析,将黏结滑移破坏全过程分为三个滑移阶段(无滑移阶段、局部滑移阶段及全部滑移阶段)和两个极限状态(无滑移极限状态和局部滑移极限状态).在黏结滑移破坏过程,它们出现的顺序是:无滑移阶段→无滑移极限状态→局部滑移阶段→局部滑移极限状态→全部滑移阶段.

3.1 无滑移阶段

随着外荷载从零逐渐变大,型钢与混凝土界面

产生相对滑动的趋势而产生化学胶结力,并从零逐渐增大.当黏结界面某一位置处的黏结应力达到极限化学胶结强度,该位置即发生滑移.界面的黏结应力从零逐渐增大到某一位置处的黏结应力达到极限化学胶结强度的这段过程称为无滑移阶段.由第 1 节的分析可知,无滑移阶段的黏结应力只有化学胶结力.由沿着纵向布置的应变片测得的应变转化为应力,沿锚固长度黏结应力的分布如图 8a 所示.但由于加载端奇异现象(加载端处,按照变形协调条件,型钢的应变是最大,但是由于边界条件,黏结应力为零),因此,最大的化学黏结应力并不是出现在加载端,而是出现在离加载端一定距离的位置^[15],如图 8b 所示.

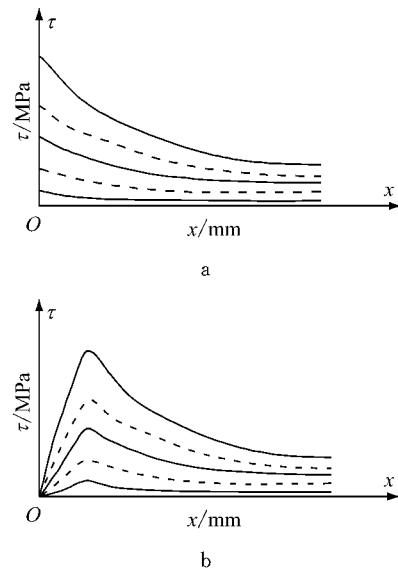


图 8 无滑移阶段应力分布
Fig.8 Stress distribution in no slip stage

3.2 无滑移极限状态

无滑移极限状态是指型钢与混凝土交界面尚未发生相对滑移,但界面某个位置上的化学胶结应力达到极限值的时刻.在此状态下,黏结应力沿着型钢纵向长度的分布如图 9 所示:加载端黏结应力为零,

距离加载端某个位置的黏结应力达到最大化学胶结应力;在出现最大化学胶结应力的部位至自由端的区域,黏结应力呈指数分布.

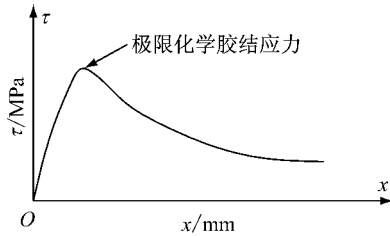


图 9 无滑移极限状态应力分布

Fig. 9 Stress distribution at no-slip ultimate state

3.3 局部滑移阶段

试件处于无滑移阶段极限状态下,只要外荷载一增大,因达到最大化学胶结应力的界面的化学胶结应力无法继续增大,此处界面发生黏结破坏,加载端至最大化学胶结应力部位的这段区域也迅速发生黏结破坏(实测的滑移值是加载端先出现),试件从无滑移极限状态进入局部滑移阶段.随着外荷载增大,滑移逐渐向自由端扩展,直至外荷载达到极限值,此过程称为局部滑移阶段.

局部滑移阶段的黏结应力由未滑移界面的化学胶结应力和滑移界面的摩擦应力组成,应力曲线如图 10.由于曲线下降段起点的滑移值很小,忽略滑移部位的型钢与混凝土交界面的摩擦系数的变化,认为滑移部位摩擦应力沿埋置长度保持不变.由于此状态下的未滑移部位的最大化学胶结应力与无滑移阶段的最大化学胶结应力相等,未滑移区域的化学胶结应力曲线 $c'd'$ 可由无滑移极限状态的化学胶结应力曲线 cd 向自由端平移而得.

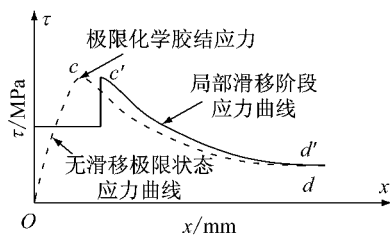


图 10 局部滑移阶段应力分布

Fig. 10 Stress distribution at local slip stage

3.4 局部滑移极限状态

随着外荷载继续增大,滑移逐渐向自由端发展,承载力慢慢向峰值逼近,承载力达到峰值的时刻称为局部滑移极限状态.局部滑移极限状态的黏结应力沿型钢纵向的分布如图 11 的曲线 $ABCD$,并具有以下特征: AB 的延长线与 CD 交于自由端 D 点,即自由端的化学胶结应力与滑移区域的摩擦应力相

等,也就是说当自由端化学胶结应力与滑移区域的摩擦应力相等的时候,外荷载达到峰值.因此状态下黏结应力曲线与 x 轴所包围的面积最大.若此时的黏结力不是峰值,当外荷载继续增大,化学胶结应力曲线 CD 将向自由端平移到 $C'D'$ 位置(BB' 为无穷小).曲线 $AB'C'D'$ 与 x 轴围成的面积比曲线 $ABCD$ 与 x 轴围成的面积小.故在局部滑移极限状态下,自由端的化学胶结应力与滑移区域的摩擦应力相等.

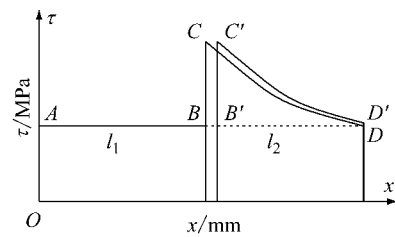


图 11 局部滑移极限状态最大承载力图解

Fig. 11 Illustration of the maximum bearing capacity at local slip ultimate state

此状态有平衡方程如下:

$$P_u = C \cdot (\tau_{\text{摩擦}} l_1 + \tau_{\text{胶结}} l_2) \quad (4)$$

式中: $\tau_{\text{摩擦}}$ 为摩擦应力,MPa; $\tau_{\text{胶结}}$ 为平均化学胶结应力,MPa; l_1, l_2 分别是局部滑移极限状态下型钢滑移长度及未滑移长度,mm.

3.5 全部滑移阶段

试件处于局部滑移阶段极限状态下,只要外荷载一增大,型钢与混凝土的黏结界面全部发生相对滑移(因为此时加载端和自由端均测到滑移量),试验进入下降段直至试验结束,该阶段称为全部滑移阶段.由于整个黏结界面都发生了相对滑移,化学胶结力消失,黏结力只有摩擦力,且该阶段任一时刻,整个界面的摩擦应力是常数.虽然首先发生滑移的界面的摩擦系数会随滑移量增大而变小,但相对于整个全部滑移阶段摩擦系数的减小量,由于先滑移的界面的滑移量很小,其摩擦系数的减小量也很小.可认为相同时刻整个界面的摩擦系数是常数,即摩擦应力是常数.

此阶段的平衡方程为

$$P_r = \tau_{\text{摩擦}} lC = \tau_r lC \quad (5)$$

4 型钢与再生混凝土的化学胶结应力

4.1 化学胶结应力求解

界面黏结力经过黏结长度 x 传递后,型钢与混凝土之间没有滑移,两者变形协调,应变相等.如图

12 所示,在变形协调截面处,根据力的平衡有

$$P = P_c + P_s = E_c' A_c \epsilon_c + E_s A_s \epsilon_s = E_c' A_c (\epsilon_c + \alpha \beta \epsilon_s) \quad (6)$$

$$E_c' = \frac{10^5}{2.8 + \frac{40.1}{f_c'}} \quad (7)$$

变形协调截面处的混凝土受到的压力为

$$P_c = \int_0^x \tau(x) C dx = A_c E_c' \epsilon_c \quad (8)$$

因为变形协调截面处 $\epsilon_c = \epsilon_s = \epsilon$, 由式(6)可得

$$\epsilon = P / E_c' A_c (1 + \alpha \beta) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得

$$P_c = \int_0^x \tau(x) C dx = P / (1 + \alpha \beta) \quad (10)$$

式中: P_c, P_s 分别为型钢与混凝土协调变形起始截面各自所受的压力; A_c, A_s 分别为再生混凝土和型钢的受压面积; E_c', E_s 分别为再生混凝土和型钢的弹性模量; ϵ_c, ϵ_s 分别为型钢与混凝土两者协调变形时的应变; $\alpha = E_s / E_c', \beta = A_s / A_c$; $\tau(x)$ 为型钢与混凝土已发生滑移部位的黏结强度; x 为型钢滑移长度, 在本文有 $x = l_1$.

由 3.5 节可知 $\tau(x)$ 是常数且 $\tau(x) = \tau_{\text{摩擦}}$, 因此式(10)变为

$$x = P / [(1 + \alpha \beta) C \tau_{\text{摩擦}}] \quad (11)$$

式(11)为型钢与混凝土发生滑移后的任意受力时刻的型钢与混凝土滑移长度。

由几何条件有

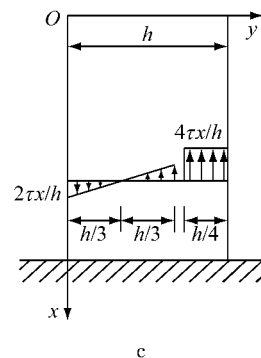
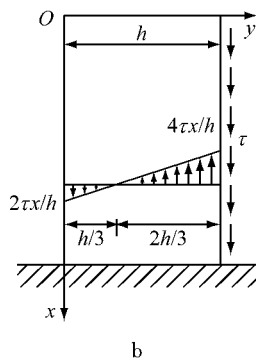
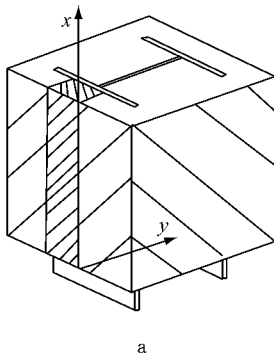


图 13 受压混凝土的应力分布

Fig. 13 Stress distribution of concrete under compressive load

4.2 型钢与混凝土的临界滑移长度

如果锚固长度足够, 外力作用下型钢再生混凝土构件因为型钢发生屈服而失效. 此时, 型钢与混凝土发生滑移的长度称为临界滑移长度 l_{cr} , 型钢承担的荷载为

$$P_y = f_y A_s \quad (13)$$

由式(11)和式(13)求得临界滑移长度 l_{cr} , 即

$$l_1 + l_2 = l = 460 \quad (12)$$

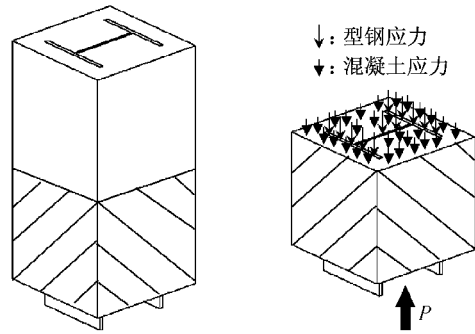


图 12 变形协调截面内外力平衡示意

Fig. 12 Diagrammatic of internal and external force balance in deformation harmony section

在横截面中的任一位置, 取出图 13a 阴影部分的混凝土隔离体, 与 x 轴垂直的截面任意位置的隔离体混凝土受压应力(图 13b)^[17]如下:

$$\sigma_x = \frac{2\tau x}{h} \left(1 - \frac{3y}{h}\right)$$

$$\text{当 } y = \frac{h}{3} \text{ 时, } \sigma_x = 0; y = 0 \text{ 时, } \sigma_x = \frac{2\tau x}{h}; y = h \text{ 时,}$$

$$\sigma_x = -\frac{4\tau x}{h} \text{ (压应力).}$$

如图 13c 所示, 应力大小能够达到 $E_c \epsilon_c$ 的受压面积仅为全部面积的 1/4, 即实际上 $\beta = A_s / (1/4 A_c)$. 然后, 再根据表 2 的数据求解由式(4)一式(5)和式(11)一式(12)组成的方程组, 结果如表 5.

$$l_{cr} = f_y A_s / [(1 + \alpha \beta) C \tau_{\text{摩擦}}] \quad (14)$$

为了有效地提高型钢与再生混凝土的黏结强度, 可在一定长度的型钢上设置抗剪栓钉或喷砂等措施. 设置抗剪栓钉或喷砂等提高黏结强度措施的部位应该是型钢与混凝土发生滑移的部位, 该部位的长度可按式(14)计算确定.

表 5 方程组的解

Fig.5 Solution of equations

试件编号	l_1/mm	l_2/mm	$\tau_{胶结}/MPa$	$\tau_{摩擦}/MPa$	试件编号	l_1/mm	l_2/mm	$\tau_{胶结}/MPa$	$\tau_{摩擦}/MPa$
SRRC-1	231.534	228.465	2.341	1.117	SRRC-10	203.016	256.983	2.455	1.603
SRRC-2	239.080	220.919	2.661	1.208	SRRC-11	218.146	241.853	2.469	1.404
SRRC-3	199.716	260.283	2.056	1.328	SRRC-12	244.890	215.109	2.932	1.331
SRRC-4	219.821	240.178	2.312	1.241	SRRC-13	216.470	243.529	2.662	1.548
SRRC-5	238.039	221.960	2.394	1.124	SRRC-14	205.625	254.374	2.653	1.696
SRRC-6	186.915	273.084	2.175	1.596	SRRC-15	186.517	273.482	1.511	0.997
SRRC-7	223.502	236.497	2.656	1.426	SRRC-16	266.549	193.450	2.977	1.261
SRRC-8	250.496	209.503	2.808	1.214	SRRC-17	278.013	181.986	3.175	1.352
SRRC-9	239.273	220.726	2.610	1.254					

5 影响因素分析

5.1 取代率

由图 14 可知,当取代率为 0 时, $\tau_{摩擦} = 1.117$ MPa,再生混凝土各取代率下的 $\tau_{摩擦}$ 都比非再生混凝土大,并随着取代率的提高呈现增大趋势,且 $\tau_{摩擦}$ 随取代率变化的趋势与立方体试块抗压强度随取代率变化的趋势一致. 因为随着取代率的提高,立方体抗压强度增大,摩擦界面的硬度就越大,界面摩擦系数也越大,因此 $\tau_{摩擦}$ 随着取代率的提高呈现增大趋势.

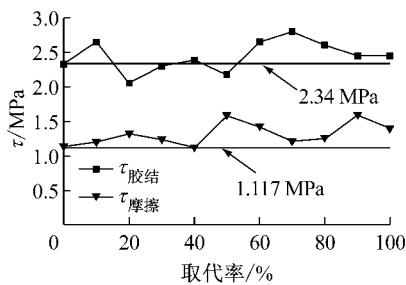


图 14 不同取代率下的 $\tau_{胶结}$ 与 $\tau_{摩擦}$
Fig.14 $\tau_{胶结}$ and $\tau_{摩擦}$ under different substitution rates

除取代率为 20%, 30% 与 50% 之外,其他各取代率的 $\tau_{胶结}$ 均比非再生混凝土大;而取代率为 30% 的 $\tau_{胶结}$ 与取代率为 0 的 $\tau_{胶结}$ 几乎相等(这三个取代率的 $\tau_{胶结}$ 比取代率为 0 的 $\tau_{胶结}$ 小,可能是试验误差引起). $\tau_{胶结}$ 随取代率变化的趋势与 $\tau_{摩擦}$ 一致,即 $\tau_{胶结}$ 随取代率的提高呈现增大趋势. 因为化学胶结力的吸附作用与界面的硬度与粗糙度有关,界面的硬度与粗糙度越大,吸附作用越强, $\tau_{胶结}$ 越大.

5.2 截面配箍率

由图 15 可知, $\tau_{摩擦}$ 随着配箍率增大而增大,并呈现近似线性增大. $\tau_{摩擦}$ 与摩擦系数及再生混凝土对型钢的握裹作用有关,摩擦系数及握裹作用越大, $\tau_{摩擦}$ 就越大. 本组试件的混凝土强度相同,摩擦面的硬度相同,因此摩擦系数相同. 横向箍筋的作用在于约束

混凝土,特别是当混凝土保护层开裂之后,对裂缝的发展有约束作用,越大的配箍率给型钢提供的握裹作用越大,因此 $\tau_{摩擦}$ 越高.

另外,随着配箍率增大 $\tau_{胶结}$ 的变化不大. 由黏结机理可知, $\tau_{胶结}$ 是再生混凝土对型钢的吸附作用,受再生混凝土性能的影响,与配箍率无关.

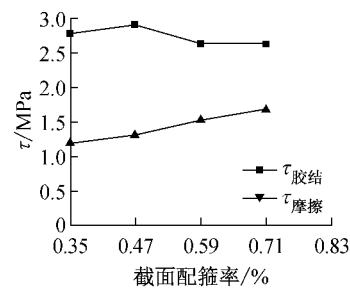


图 15 不同截面配箍率下的 $\tau_{胶结}$ 与 $\tau_{摩擦}$

Fig.15 $\tau_{胶结}$ and $\tau_{摩擦}$ under different Stirrup ratios

5.3 保护层厚度

由图 16 可知, $\tau_{摩擦}$ 随着保护层厚度的增大而呈现近似线性增大. 与 $\tau_{摩擦}$ 随着配箍率增大而增大的道理一样,本组试件采用同一种型钢,其横截面不变,随着保护层厚度增大,配钢率减小,握裹型钢的混凝土增多,混凝土对型钢的包裹作用增强;并且随着保护层厚度增大,保护层的抗裂性能也得到增强,因此 $\tau_{摩擦}$ 随着保护层厚度的增大而增大.

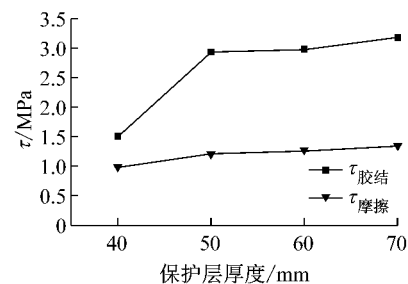


图 16 不同保护层厚度下的 $\tau_{胶结}$ 与 $\tau_{摩擦}$

Fig.16 $\tau_{胶结}$ and $\tau_{摩擦}$ under different layer thickness

当保护层厚度为 40 mm 时, $\tau_{胶结}$ 较小,仅为 1.511 MPa,因为试件加载时很早就开裂,影响化学

胶结性能的充分发挥;而当保护层厚度在 50 mm~70 mm 时, $\tau_{\text{胶结}}$ 仅在 2.808 MPa~3.175 MPa 之间,变化幅度很小,即当保护层厚度足够时, $\tau_{\text{胶结}}$ 随保护层厚度增大略微增大,但保护层厚度对 $\tau_{\text{胶结}}$ 影响不大。

6 结论

通过对 17 个推出试件的试验与理论分析,研究了型钢再生混凝土界面的化学胶结应力和摩擦应力的因素,并分析了影响化学胶结应力和摩擦应力大小的因素,主要得到以下结论:

(1)型钢与混凝土的黏结应力主要由化学胶结应力和摩擦应力组成。

(2)型钢再生混凝土推出试验黏结-滑移全过程包括三个滑移阶段(无滑移阶段、局部滑移阶段及全部滑移阶段)和两个极限状态(无滑移极限状态和局部滑移极限状态)。

(3)型钢再生混凝土发生滑移的临界长度 l_{cr} 可按式(14)计算确定,应在 l_{cr} 长度上设置抗剪栓钉或喷砂等提高型钢与混凝土黏结强度的措施。

(4) $\tau_{\text{摩擦}}$ 随取代率、配箍率与保护层厚度增大而增大; $\tau_{\text{胶结}}$ 随取代率增大而增大,而与配箍率无关;当保护层厚度足够时, $\tau_{\text{胶结}}$ 随保护层厚度增大略微增大,但保护层厚度对 $\tau_{\text{胶结}}$ 的影响不大。

参考文献:

- [1] 陈宗平, 钟铭, 陈宇良, 等. 型钢再生混凝土偏压柱受力性能试验及承载力计算[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 160.
CHEN Zongping, ZHONG Ming, CHEN Yuliang, *et al.* Mechanical behavior and computed bearing capacity of steel reinforced recycled-aggregate-concrete columns under eccentric loading[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 160.
- [2] Gholamreza F, Razaqpur A G, Burkan Isgor O, *et al.* Shear capacity evaluation of steel reinforced recycled concrete (RRC) beams[J]. Engineering Structures, 2011, 33(3): 1025.
- [3] Gholamreza F, Razaqpur A G, Burkan I O. Flexural performance of steel-reinforced recycled concrete beams [J]. ACI Materials Journal, 2009, 106(6): 858.
- [4] Gholamreza F, Razaqpur A G, Burkan I O, *et al.* Shear strength of steel reinforced recycled concrete beams with stirrups[J]. Magazine of Concrete Research, 2010, 62(10): 685.
- [5] 王妮, 陈宗平, 燕柳斌, 等. 型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 133.
WANG Ni, CHEN Zongping, YAN Liubin, *et al.* Experimental study on the behavior of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns under axial compression loading [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 133.
- [6] 薛建阳, 马辉, 刘义. 反复荷载下型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(1): 36.
XUE Jianyang, MA Hui, LIU Yi. Experimental study on seismic performance of steel reinforced recycled concrete columns under low-cyclic reversed loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1): 36.
- [7] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990.
XU Youlin. Experimental study on bond-anchorage properties of deformation bar in concrete [D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.
- [8] 徐友邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋砼粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(3): 26.
XU Youlin, SHEN Wendu, WANG Hong. An experimental study of bond-anchorage properties of bar in concrete [J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(3): 26.
- [9] 过镇海. 钢筋混凝土基本原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
GUO Zhenhai. The basic principle of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [10] 刘灿, 何益斌. 劲性混凝土粘结性能的试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2002, 29(3): 168.
LIU Can, HE Yibin. Experimental study on bond behavior of steel reinforced concrete [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2002, 29(3): 168.
- [11] 郑山锁, 邓国专, 田微, 等. 型钢与混凝土之间粘结强度的力学分析[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 96.
ZHENG Shansuo, DENG Guozhuan, TIAN Wei, *et al.* Theoretical study on bond strength between shaped steel and concrete in SRC composite structures [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 96.
- [12] 刘锡军, 李艳慧, 杨芳, 等. 钢-混凝土光滑界面粘结性能研究[J]. 湖南工程学院学报, 2011, 21(4): 63.
LIU Xijun, LI Yanhui, YANG Fang, *et al.* Study on bonding performance of steel-concrete structures [J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2011, 21(4): 63.
- [13] 程滑耀. 方钢管混凝土界面粘结性能的试验研究与理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
CHENG Huayao. Experimental and theoretical study on the bond properties at the interface of concrete filled square steel tubes [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology Building, 2007.
- [14] 翟玉生, 李安, 张金中. 应用摩擦学[M]. 青岛: 石油大学出版社, 1996.
ZHAI Yusheng, LI An, ZHANG Jinzhong. Application of tribology [M]. Qingdao: Petroleum University Press, 1996.
- [15] 杨勇. 型钢混凝土粘结滑移基本理论及应用研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
YANG Yong. Study on the basic theory and its application of bond-slip between steel shape and concrete structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology Building, 2003.
- [16] 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 & Building Press, 2008.
- [17] 徐芝纶. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
XU Zhiguan. Introductory tutorial elastic mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.