

网络出版时间:2014-09-10 18:19

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.10.034

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.10.034.html>

界面处理对自密实混凝土与老混凝土 黏结滑移的影响

陈 峰¹, 郑建岚^{1,2}

(1 福建江夏学院 环保节能型高性能混凝土协同创新中心, 福建 福州 350108; 2 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

【摘 要】 【目的】通过新老混凝土的黏结剪切试验, 考察不同界面处理方法对新老混凝土黏结滑移的影响。【方法】以自密实混凝土为新混凝土材料, 通过自行设计的推出式剪切试验装置, 考虑不同粗糙度(自然光滑面、粗糙面 I 和粗糙面 II, 对应粗糙度分别为 0, 2.0, 3.2 mm)和不同界面剂处理(不涂界面剂的粗糙面 I 及涂刷界面剂 I 和界面剂 II)对新老混凝土黏结界面的影响, 利用测定的沿受力方向上新老混凝土各点处的应变值, 推算黏结面上黏结应力的分布, 进而分析不同界面处理下新老混凝土的黏结滑移关系。【结果】新老混凝土界面处黏结应力分布呈三段式曲线发展; 自然光滑界面的黏结试件上, 黏结应力传递不均匀; 涂抹界面剂的试件黏结应力在加载端处增长较快; 涂刷界面剂与否对新老混凝土黏结滑移影响不大; 通过回归分析得到了黏结滑移的本构关系函数式。【结论】粗糙度处理对新老混凝土黏结滑移影响较大, 涂刷界面剂的影响较小, 回归得到的黏结滑移本构关系可供实际工程参考。

【关键词】 自密实混凝土; 黏结滑移; 粗糙度; 界面剂; 黏结应力

【中图分类号】 TU528

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)10-0211-07

Effect of interface treatment on bond-slip behavior of self-compacting concrete and old concrete

CHEN Feng¹, ZHENG Jian-lan^{1,2}

(1 Coordinative Innovation Center for Environmentally Friendly and Energy Saving High-performance Concrete, Fujian Jiangxia University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 2 School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: 【Objective】 Shear experiment of new and old concretes was conducted to study the effect of interface treatment on bond-slip behavior of self-compacting concrete and old concrete. 【Method】 Using the self-compacting concrete as new concrete, effect of different roughness (smooth surface, rough surface I, and rough surface II with according average filling sand depths of 0, 2.0, and 3.2 mm) and interface treatment (no binder, binder I, and binder II) on bounding interface was studied using push-out shear testing device. The strains of new concrete at different sites along the loading direction were measured to calculate the bond stress of interface and analyze the bond-slip behavior of old and new concretes. 【Result】 The distribution curve of bonding strength at the interface of old and new concretes had three stages. The bond stress transfer on the interface without roughness was not uniform. The bond stress of interface with binders increased fast in the loading end. Interface agent had minor effect on bond-slip behavior. The constitutive relation of bond stress-slip was also obtained through regression analysis. 【Conclusion】 Roughness had larger effect on the bond-slip behavior than interface agent. The obtained constitutive relation of bond stress-slip could be used as reference for practical structural design.

【收稿日期】 2013-07-16

【基金项目】 国家自然科学基金项目(51278124)

【作者简介】 陈 峰(1980—), 男, 福建福州人, 副教授, 博士, 主要从事高性能混凝土结构研究。E-mail: cfxfh@fzu.edu.cn

Key words: self-compacting concrete; bond-slip; roughness; interface agent; bond stress

自密实高性能混凝土在自重下能流动、密实,且具有良好的均匀性,因此吸引国内外诸多学者的关注,罗素蓉等^[1]、马少军等^[2]、Zhu 等^[3]、Casanova 等^[4]、Hadda 等^[5]、Kalkan 等^[6]、Aslani 等^[7]进行了大量研究工作并取得了丰富的成果。由于自密实混凝土良好的工作性能,目前已经广泛应用于混凝土的加固及修复工作之中,因此新老混凝土之间的黏结性能成为工程界关注的焦点。自密实混凝土与老混凝土之间的自然黏结是保证新老混凝土整体工作的基础^[8-9],然而完全黏结只在一定的受力阶段内存在^[10],当新浇自密实混凝土加固层横截面上的剪应力超过界面的黏结强度后,该段界面就会出现剥离和剪切破坏^[11-12],从而使新老混凝土之间会产生一定的相对滑移。这种滑移不是自由滑移,而是受到老混凝土的黏结以及界面摩阻力的约束,是一种黏结滑移^[13]。显然,新老混凝土结合面的黏结滑移关系是采用理论或数值计算分析其受力变形性能的基础,但目前这方面的研究工作还相对较少。本研究

利用自行设计的推出式剪切试验装置,通过新老混凝土黏结剪切试验,分析不同界面处理方法对黏结滑移的影响,以期为提高新老混凝土之间的黏结性能提供参考。

1 材料与方法

1.1 原材料及配合比

老混凝土为普通混凝土试件,采用的材料为 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥、中砂(细度模数为 2.3)、花岗岩碎石(粒径为 5~20 mm)。老混凝土设计强度等级为 C30,龄期约 90 d,在浇筑新混凝土之前测得立方体抗压强度为 34.4 MPa。

制作自密实混凝土的材料是在老混凝土原材料基础上增加了Ⅰ级粉煤灰以及萘系高效减水剂,新自密实混凝土设计强度等级为 C40。根据已有的研究结果^[14],设计了新混凝土的配合比并测定了其力学性能,详见表 1。同时采用坍落筒测定新自密实混凝土的工作性能,其坍落度为 266 mm,扩展度为 640 mm。

表 1 新自密实混凝土的配合比及力学性能

Table 1 Mix ratio and properties of freshly cured self-compacting concrete

强度等级 Strength grade	混凝土材料用量/(kg·m ⁻³) Amount of concrete					减水剂 Super plasticizer	水胶比 Water- binder ratio	砂率/% Sand percentage	28 d 抗压 强度/MPa Compressive strength	弹性模量/ (N·mm ⁻²) Elastic modulus
	水泥 Cement	粉煤灰 Fly ash	砂 Sand	石 Gravel	水 Water					
C40	350	200	817	815	170	3.6	0.31	50.1	47.6	3.16×10 ⁴

1.2 黏结滑移试验设计

根据新老混凝土黏结的不同情况,本研究主要设计了 2 种界面处理:①不同界面粗糙度处理。老混凝土表面设 3 个粗糙度水平,分别为自然光滑面、粗糙面Ⅰ和粗糙面Ⅱ,用灌砂法^[15]测量平均灌砂深度(即粗糙度),上述 3 个水平分别对应的平均灌砂深度为 0、2.0 与 3.2 mm;②界面剂处理。设 3 个水平,分别为不涂刷界面剂的粗糙面Ⅰ及在粗糙面Ⅰ上涂刷同水胶比粉煤灰水泥浆(界面剂Ⅰ)或掺质量分数 0.75% 纳米氧化硅的粉煤灰水泥浆(界面剂Ⅱ)。

表 2 不同界面处理条件下黏结试件的破坏荷载

Table 2 Breaking load of bonding specimen at different treatments

指标 Index	自然光滑面 Smooth surface	粗糙面Ⅰ Rough surface I	粗糙面Ⅱ Rough surface II	界面剂Ⅰ Binder I	界面剂Ⅱ Binder II
破坏荷载/kN Breaking load	8.23	27.43	28.65	31.65	34.16

然后,每种情况再各取 1 个试件以破坏荷载 P_u 的 10% 为增量逐级施加荷载 P ,使得新老混凝土交错运动,在黏结面上产生剪应力。由于加载点并不

试验共制作 5 组共 15 个试件,其中新混凝土的设计尺寸为 100 mm×100 mm×250 mm,老混凝土的设计尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm。

1.3 剪切试验装置

本研究自行设计的推出式剪切试验装置如图 1 所示。利用该装置能够同时测定沿受力方向上新老混凝土加载端、自由端及局部的黏结滑移关系。试验时每种情况各取 1 个试件,先固定老混凝土,在新混凝土的一侧采用液压千斤顶加载至破坏,测出破坏荷载 P_u (表 2)。

直接通过新老混凝土黏结面,因此会有附加弯矩的影响。但由于本试验主要考察黏结力与新老混凝土相对位移(即黏结滑移)的关系,且加载点与黏结面

的偏离不大(其对黏结面应力的影响在 5% 左右), 因此本研究中不考虑这种弯曲效应的影响。同时在新自密实混凝土两侧靠近黏结面处,沿加载方向交错布置应变片(图 2),以测定局部黏结滑移性能。

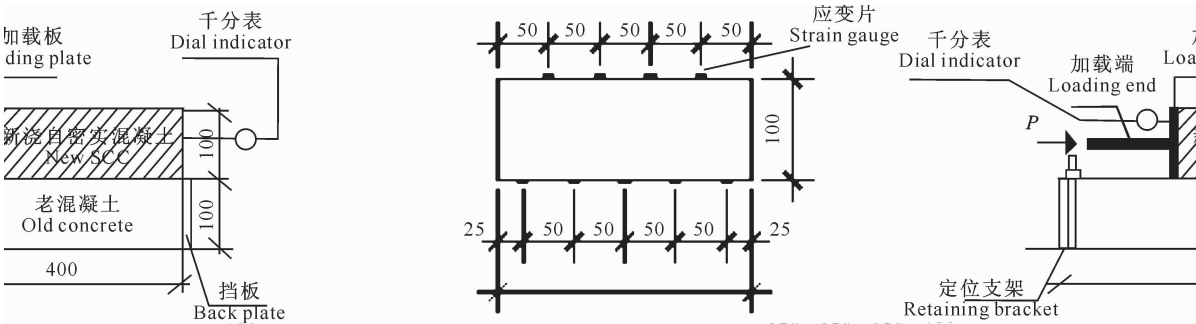


图 1 推出式剪切装置示意图(单位:mm)

Fig. 1 Diagram of push-out shear experiment device (Unit:mm)

图 2 新老混凝土黏结面处应变测点的布置(单位:mm)

Fig. 2 Arrangement of strain gauge on the bonding interface (Unit:mm)

2 结果与分析

2.1 黏结面应变的分布

通过 IMP 应变采集仪测得不同测点处的混凝土应变 ϵ ,图 3 即为各种处理条件下新老混凝土黏结试件在不同加载下各测点应变的分布,其中横坐标 X 为距自由端距离, P_u 为破坏荷载。

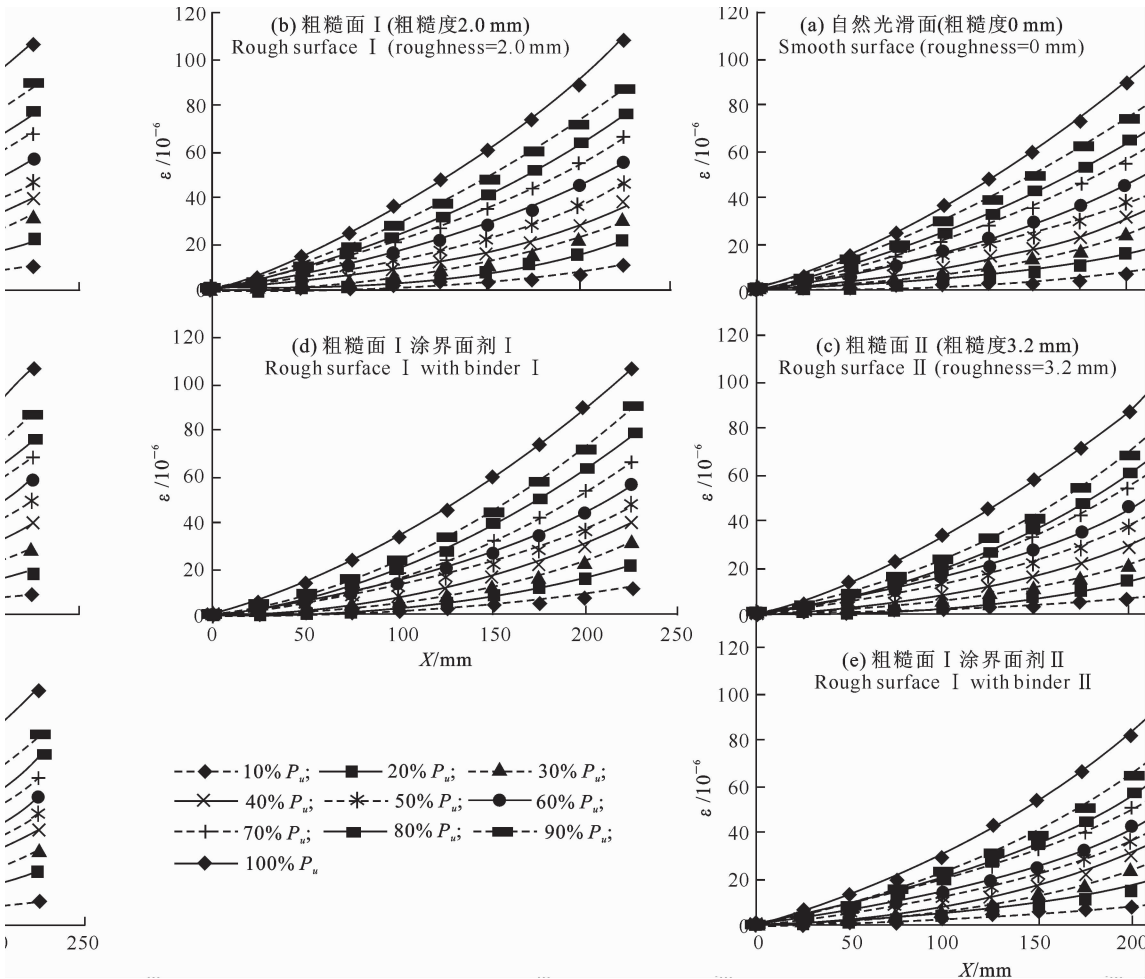


图 3 不同界面处理及荷载条件下新老混凝土黏结面应变的分布

Fig. 3 Strain distribution of bonding interface with different interface and load treatments

由图 3 可以看到,不同处理下混凝土黏结面的应变发展及分布均比较相近。以粗糙面 I 的自密实混凝土黏结试件为例,刚开始加载时,自密实混凝土应变沿黏结长度的变化很小,测得最大应变($X=225\text{ mm}$ 处)与最小应变($X=25\text{ mm}$ 处)仅相差 10.8×10^{-6} ;而随着荷载的逐步加大,加载端附近混凝土的应变增长速度明显大于自由端附近的混凝土,在图形上表现为应变曲线不断上翘,直至极限荷载时最大与最小应变差值达到最大,为 103.3×10^{-6} 。

2.2 混凝土试件黏结应力的变化

设界面上黏结应力 τ 沿黏结长度(加载方向)传递,如图 4 所示(其中垂直于平面方向为新混凝土高 h),由微段 dX 上力的平衡关系:

$$\tau \cdot dX \cdot b = d\sigma \cdot b \cdot h. \tag{1}$$

即

$$\tau = E_c h \frac{d\varepsilon}{dX}. \tag{2}$$

式中: b 为试件宽, $b=100\text{ mm}$; h 为试件高, $h=100\text{ mm}$; E_c 为混凝土弹性模量, σ 为横截面上正应力。

设 2 个相邻应变测点与自由端的距离为 X_i 和 X_j ,相应的应变值分别为 ε_i 和 ε_j ,则这 2 点间黏结应力 τ 由下式计算:

$$\tau \left(\frac{X_i + X_j}{2} \right) = E_c h \frac{\varepsilon_j - \varepsilon_i}{X_j - X_i}. \tag{3}$$

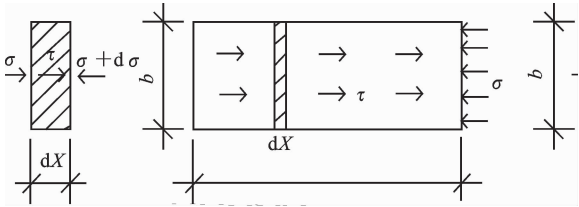


图 4 黏结面及微段 dX 受力分析

Fig. 4 Stress analysis of bonding interface and micro segment dX

各种界面处理及荷载条件下新老混凝土黏结试件的黏结应力曲线如图 5 所示。

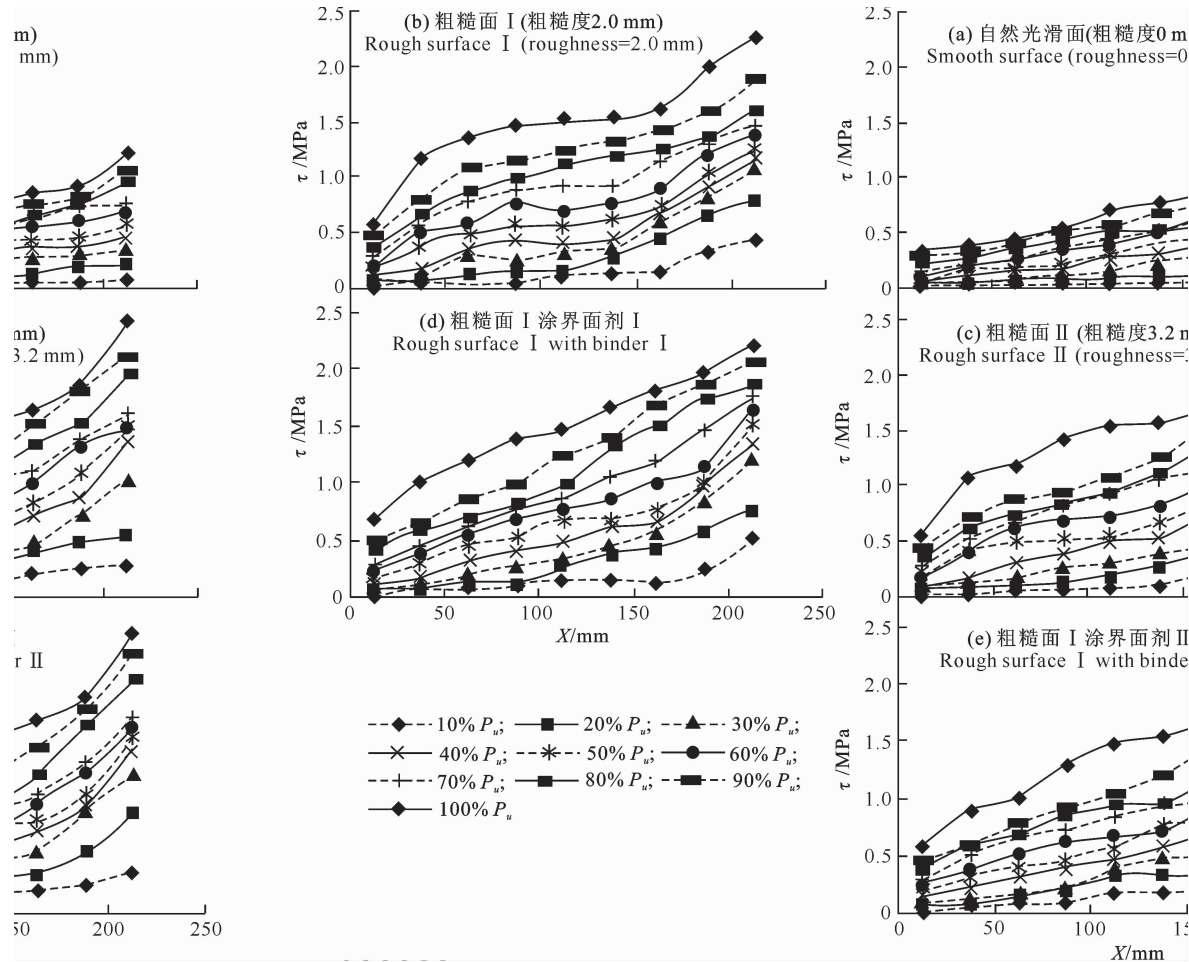


图 5 不同界面处理及荷载条件下新老混凝土黏结试件应力的分布

Fig. 5 Distribution of bonding stress with different interface and bond treatments

图 5 表明,除了自然光滑面外,其余进行了界面处理的试件,在刚开始加载时,加载端附近应力较大,而自由端附近却几乎没有应力。此后随着荷载逐步增大,黏结面不同测点处应力也不断增大。荷载加至 40% P_u 后,试件黏结的应力沿加载方向的分布大致成“两头变化快,中间较平稳”的发展趋势,即自由端与加载端附近混凝土黏结面上的应力增长较快,而中间部分的应力变化较小,在变化曲线上表现出明显的三段式变化特点。尤其当荷载加至 80% P_u 以上时,沿黏结长度上黏结应力分布比较均匀,仅在靠自由端与加载端处应力有较大变化,并且沿黏结长度上的应力都要较其他各级荷载明显增大。这说明随着外荷载的不断增大,剪应力也将迅速增大,且更均匀地沿着黏结面传递。

对于界面为自然光滑面(图 5-a)的黏结试件,随着外荷载的不断加大,其应力曲线也不断向上翘起,即应力从自由端到加载端不断增大,曲线斜率不断增加;有别于有粗糙度界面的黏结试件(图 5-b、c)中间部分应力变化较小的情况。这是由于光滑界面的机械咬合力较弱,无法对老混凝土形成足够的约束,

应力传递很不均匀,从而使得自由端至加载端应力不断增大且变化速度较快。

对于涂刷界面剂的黏结试件(图 5-d、e),由于界面剂作为一个过渡层存在,使得其应力分布较不涂刷界面剂的试件略有不同,主要表现在试件中间部分混凝土的应力分布并不平稳,而是随着距自由端距离的不断增加而增大,曲线变化表现为曲线尾端不断上翘,表明在加载端附近应力增加较快。

2.3 黏结滑移关系分析

由位移传感器可测得试件自由端的滑移 S_f ,则在黏结长度上任一点的滑移可表示为:

$$S(X)=S_f+\int_0^X \epsilon(X) dX.$$

(4)

式中: S_f 为自由端滑移值, X 为距自由端的距离。由于无法连续测得试件的应变,因此式中的积分可近似用不连续的应变测试值(离散数值)之和代替,即:

$$S(X_i)=S_f+\sum_{j=1}^i \epsilon_j(X_j-X_{j-1}).$$

(5)

这样由黏结应力 τ 与滑移 S 就可以得到 $\tau-S$ 关系。图 6 列出了新老混凝土黏结试件的黏结滑移试验结果。

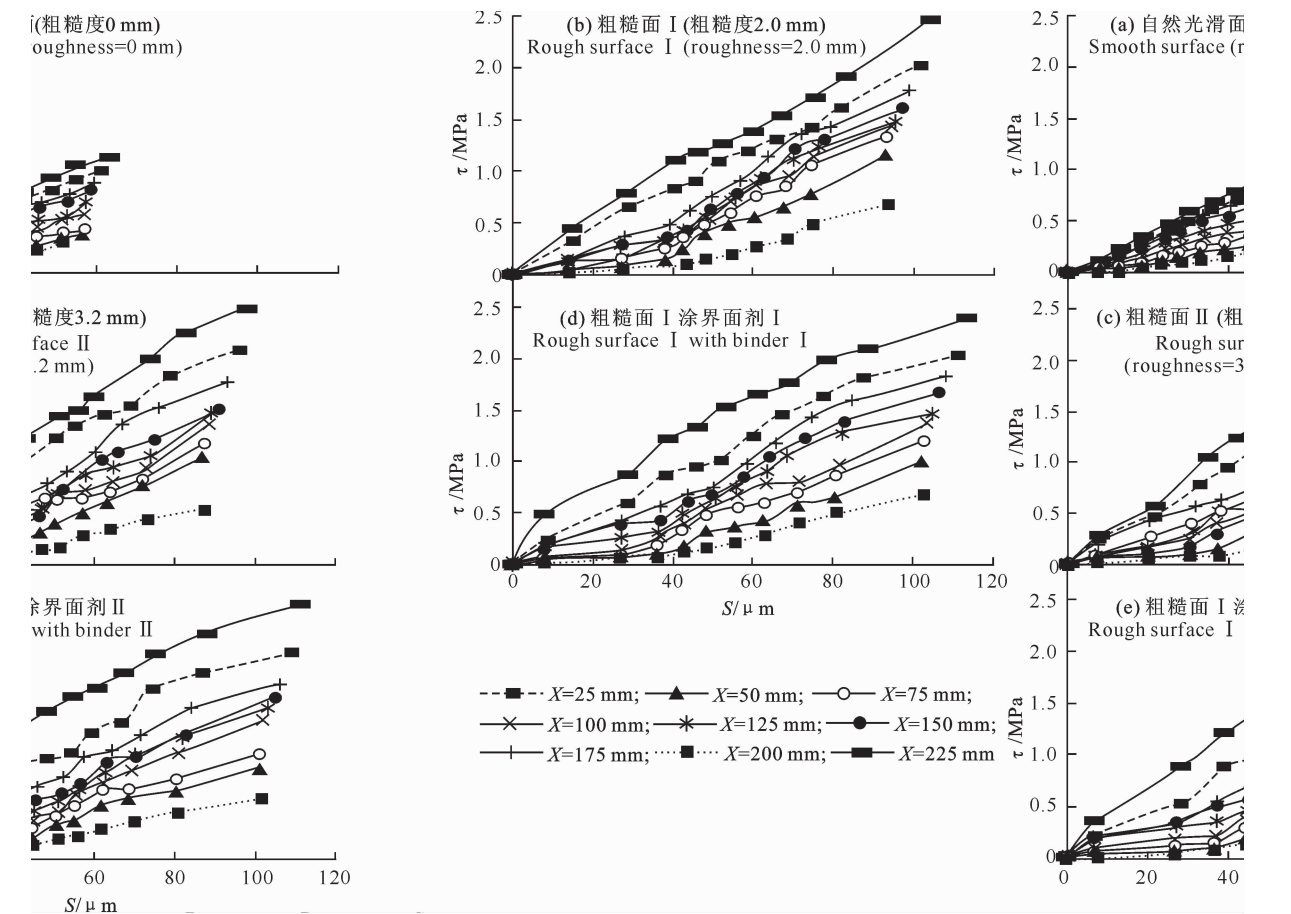


图 6 不同界面处理条件下新老混凝土的黏结滑移试验结果

Fig. 6 Measured bond stress-slip curves with different interface treatments

由图 6 可知,各种试验条件下黏结试件的黏结滑移关系表现出相似的分布与发展规律。由于黏结应力的不断增大,新老混凝土局部的黏结滑移不断增加。黏结面处发生的是脆性破坏,因而得到的 τ - S 关系曲线没有下降段。在靠近自由端处,由于加载后黏结面上的应力增长较慢,因此曲线斜率较小;在加载至 $50\% P_u$ 后,黏结应力才开始逐渐加快增长,曲线也逐步向上翘起;在靠近加载端处,由于受到加载的影响较大,因此黏结应力与滑移均增长得较快;在沿黏结长度方向的大部分区域($X=75\sim 175$ mm)内,黏结面在克服了初始静摩擦后滑移迅速增长,至弹塑性阶段滑移随应力增长有所减缓,在临近极限荷载时又迅速增加直至破坏。

通过图 6 还可看出,涂刷界面剂与否对黏结滑移的发展规律影响并不大,涂有界面剂的黏结试件(图 6-d、e)的自由端、加载端和中部的黏结滑移曲线形式基本与粗糙面 I 的黏结试件(图 6-b)相近。自然光滑面的黏结试件(图 6-a)与粗糙面 I、粗糙面 II(图 6-c)相比,其加载端与自由端的局部黏结滑移曲线之间距离较小,曲线更为接近且斜率要小得多;而界面为粗糙面 II 的黏结试件,其局部黏结滑移曲线则与粗糙面 I 十分相近。可见,是否对黏结面进行粗糙处理对黏结滑移性能有明显影响,而在对老混凝土表面进行一定的粗糙处理后,其粗糙度的大小对新老混凝土的黏结滑移性能影响并不大。

对图 6 结果进行回归分析,可知自由端处曲线发展可采用二次函数来描述,即:

$$\tau = 0.000\ 06S^2 + 0.001\ 1S - 0.013\ 7, R^2 = 0.976. \quad (6)$$

加载端曲线发展可采用一次函数来描述,即:

$$\tau = 0.022S + 0.242\ 3, R^2 = 0.963. \quad (7)$$

中间部分的黏结滑移关系可采用分段函数来表示,即:

$$\begin{cases} S=0, & 0 \leq \tau \leq 0.06\ \text{MPa}; \\ \tau = 0.008S + 0.068, & 0 \leq S \leq 35\ \mu\text{m}; \\ \tau = 0.108\ 6 \ln(S) - 3.624, & 35 < S \leq 75\ \mu\text{m}; \\ \tau = 1.013 \ln(S) - 3.263, & 75 < S \leq 102\ \mu\text{m}. \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, $R^2 = 0.942$ 。

3 结 语

(1) 本研究通过自行设计的推出式剪切试验装置,进行了自密实混凝土与老混凝土的黏结滑移关系试验,通过测定新老混凝土在加载端、自由端的位移以及沿受力方向上各点的应变来推算黏结面上的

黏结应力,再结合沿黏结面长度方向上各点的位移值,推算新老混凝土的黏结滑移关系。

(2) 通过对试验数据的分析可知,各种界面处理下的新老混凝土黏结面处的应变分布和发展基本相近,越靠近加载端的混凝土应变增长越快,变化曲线上表现为曲线尾端随荷载增大而不断上翘。

(3) 通过对新老混凝土黏结界面上各处黏结应力的推算,表明各试件的黏结应力曲线呈明显的三段式曲线发展,且剪应力随外荷载的增大而更加均匀地沿着黏结面传递。界面为自然光滑面的黏结试件,应力传递不均匀,自由端至加载端应力不断增大且变化速度较快;而涂刷界面剂的黏结试件,由于界面剂作为一个过渡层存在,使得试件中间部分的混凝土应力分布随着距自由端距离的不断增大而增大,尤其在加载端附近应力增加较快。

(4) 通过本试验结果可以得到新老混凝土不同界面处理情况下黏结试件的黏结滑移关系,其中涂刷界面剂与否对黏结滑移的发展规律影响并不大;而界面为自然光滑面的试件,各点间黏结滑移曲线比较接近且斜率较小,黏结面的粗糙处理对新老混凝土的黏结有明显增强效果。经过回归分析后能得到新老混凝土黏结滑移的本构关系函数式,可供实际工程计算参考。

[参考文献]

- [1] 罗素蓉,郑建岚. 自密实混凝土在加固工程中的应用研究 [J]. 建筑材料学报, 2006, 30(9): 330-336.
- [2] Luo S R, Zheng J L. Study on the application of self-compacting concrete in strengthening engineering [J]. Journal of Building Materials, 2006, 30(9): 330-336. (in Chinese)
- [3] 马少军,姚汝方,李光宇,等. 硅粉粉煤灰双掺高性能混凝土的配制及其应用 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(4): 127-134.
- [4] Ma S J, Yao R F, Li G Y, et al. Mix design and application of high performance concrete double-combined with silica fume and fly ash [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2004, 32(4): 127-134. (in Chinese)
- [5] Zhu W Z, Peter J M B. Permeation properties of self-compacting concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(6): 921-926.
- [6] Casanova A, Jason L, Davenne L. Bond-slip behavior of self-compacting concrete and vibrated concrete using pull-out and beam tests [J]. Engineering Structures, 2012, 41(6): 1073-1089.
- [7] Hadda R H, Odeh R A, Amawi H A, et al. Thermal performance of self-compacting concrete: Destructive and nondestructive evaluation [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(12): 1205-1214.

- [6] Kalkan L, Lee J H. Effect of shrinkage restraint on deflections of reinforced self-compacting concrete beams [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(7): 1672-1681.
- [7] Aslani F, Nejadi S. Bond behavior of reinforcement in conventional and self-compacting concrete [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 15(12): 2033-2051.
- [8] Anna H. Influence new-to-old concrete interface qualities on the behaviour of support zones of composite concrete beams [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 4072-4078.
- [9] Ourania T T, Andreas P L, Stephanos E D. Experimental investigation of interface behaviour of RC beams strengthened with concrete layers [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 50-59.
- [10] Long G C, Xie Y J, Ding W W, et al. Long-transport characteristics of new-old concrete composite system [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(2): 790-798.
- [11] Santos P M D, Julio E N B S. Factors affecting bond between new and old concrete [J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(4): 449-456.
- [12] 陈 峰, 郑建岚. 自密实混凝土与老混凝土的黏结收缩试验研究 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2009, 48(6): 844-847.
- [13] 陈 峰, 郑建岚. 自密实混凝土与老混凝土的黏结-滑移性能 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 56-60.
- [14] 罗素蓉, 郑建岚, 王国杰. 自密实高性能混凝土力学性能的研究与应用 [J]. 工程力学, 2005, 22(1): 164-169.
- [15] Austin S, Robins P, Pan Y. Shear bond testing of concrete repairs [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7): 1067-1076.
- [16] Chen F, Zheng J L. Experimental research on shrinkage of adherence of self-compacting concrete on old concrete [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science Edition, 2009, 48(6): 844-847. (in Chinese)
- [17] Chen F, Zheng J L. Bond-slip relationship between self-compacting concrete and old concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 56-60. (in Chinese)
- [18] Luo S R, Zheng J L, Wang G J. Study on mechanical property of self-compacting concrete and its engineering application [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 164-169. (in Chinese)
- [19] Liang C G. Construction program of the concrete facing rock-fill dam of Tianshengqiao First-cascade Hydropower Station [J]. Water Power, 1999(3): 32-35.

(上接第 210 页)

- [11] 沙迎春, 吴中如. 用 Marc 软件提供的接触分析功能简化网格划分 [J]. 红水河, 2003(2): 61-64.
- [12] 杜丽惠, 邓良军, 陈宏钧, 等. 直接约束法在水工建筑物接触分析中的应用 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(11): 1534-1537.
- [13] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1968, 94(3): 637-660.
- [14] 费 康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 1-4, 126-134, 343-392.
- [15] 梁传国. 天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝施工程序 [J]. 水力发电, 1999(3): 32-35.
- [16] Sha Y C, Wu Z R. Simplification of the mesh partitioning through contact analysis provided by MSC. Marc [J]. Red Water River, 2003(2): 61-64. (in Chinese)
- [17] Fei K, Zhang J W. ABAQUS application in geotechnical engineering [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010: 1-4, 126-134, 343-392. (in Chinese)
- [18] Liang C G. Construction program of the concrete facing rock-fill dam of Tianshengqiao First-cascade Hydropower Station [J]. Water Power, 1999(3): 32-35.