

文章编号:1671-8879(2019)02-0065-08

# 自密实混凝土加固碳化混凝土界面剪切性能试验

罗育明<sup>1,2</sup>, 张建仁<sup>1</sup>, 张旭辉<sup>1,3</sup>, 彭建新<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南交通职业技术学院 路桥工程学院, 湖南 长沙 410132; 3. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:**为研究混凝土构件长期暴露大气中表面形成的碳化层对自密实混凝土加固混凝土黏结界面剪切性能的影响,为该类结构加固设计提供依据,设计不同碳化程度 Z 形黏结试件进行直剪试验,考察混凝土碳化深度、混凝土强度和界面处理方式等对黏结试件破坏形式和抗剪强度的影响,并在试验基础上建立碳化混凝土黏结界面抗剪强度预测模型。研究表明:混凝土碳化引起黏结界面剪切裂缝分布形式的改变;混凝土碳化后强度和弹性模量均有所增强,在黏结界面间形成一个局部强化区域,剪切裂缝由原来的界面裂缝逐渐向老混凝土内部转移,扩展至碳化强化区与未碳化区交界面;混凝土碳化使得黏结界面抗剪强度增强,碳化初期,黏结界面抗剪强度增长迅速,达到一定碳化深度后,其增长幅度变小;黏结界面抗剪强度与新老混凝土的强度、界面处理方式等也密切相关,对于 I 类和 II 类界面,一定范围内增大新混凝土强度对于提高界面抗剪强度具有积极作用;当新老混凝土强度相差超过 2 个标号时,继续提高新混凝土强度作用不大;III 类界面植筋能有效提高抗剪强度,且其抗剪强度由较低强度混凝土控制。

**关键词:**桥梁工程;自密实混凝土;直剪试验;混凝土碳化;剪切性能

**中图分类号:**U445.7 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.02.008

## Experimental of interface shear behavior between self-compacting concrete and carbonation concrete

LUO Yu-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-ren<sup>1</sup>, ZHANG Xu-hui<sup>1,3</sup>, PENG Jian-xin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China;  
2. School of Road and Bridge Engineering, Hunan Communication Polytechnic, Changsha 410132, Hunan, China;  
3. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of carbonation on the interface shear behavior between self-compacting concrete and carbonation concrete, when the concrete structures exposed to air for a long period of time will become carbonized, and help determine the reinforcement applied to carbonized concrete structures. A series of Z-type specimens with different carbonation depths were designed and tested under a direct shear force. The influence of the concrete carbonation depth, concrete strength, and interfacial treatment modes on the failure mode and ultimate shear

收稿日期:2018-12-19

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB057706);国家自然科学基金项目(51708477,51178060);  
湖南省交通科技计划项目(201422);湖南省教育厅科学研究项目(15B015);  
中国博士后科学基金项目(2018T110837,2017M620350)

作者简介:罗育明(1971-),男,湖南沅江人,湖南交通职业技术学院高级工程师,长沙理工大学工学博士研究生,  
E-mail:18100665@qq.com。

strength of the tested specimens were clarified. Further, an analytical model was developed to predict the shear strength between the self-compacting concrete and the carbonation concrete based on the experimental. The results show that concrete carbonation leads to the change of shear crack distribution at bond interface. A local reinforced region is formed within the interface owing to the increase in the ultimate strength and elastic modulus of concrete caused by carbonization. The shear crack gradually transfers from the original interface crack to the old concrete, and extends to the interface between the carbonization strengthening area and the non-carbonization area. The carbonation also leads to an increase in the shear strength. The increase in shear strength within the interface occurs extremely quickly for the specimens during the early stage of carbonization, and then shows a slightly increase as the carbonation depth exceeds a critical value. The shear strength within the interface is also affected by the concrete strength and the interfacial treatment modes etc. For specimens with type-I and type-II interface modes, the increase in new concrete strength within a certain range can effectively improve the shear strength. The further increase in the new concrete strength has little influence on the increase in shear strength as it exceeds a critical value. Moreover, the type-III interface mode with a plated reinforcement bar significantly increases the shear strength, and it is dependent on the concrete with an ultimate low strength. 3 tabs, 9 figs, 23 refs.

**Key words:** bridge engineering; self-compacting concrete; direct shear test; concrete carbonation; shear behavior

## 0 引言

中国桥梁建设发展迅速,截止2017年中国公路桥梁总数已经突破80万座。服役桥梁运营过程中由于受到风、雨、水流的侵蚀,车辆荷载及冲击作用等影响,会引起桥梁结构性能退化。随着时间推移,一些病害会不断累积发展,甚至会影响结构的使用和安全,许多桥梁已经无法满足交通承载需求。中国在役桥梁中,15%以上的桥梁需要维修加固或重建来维持现有服役水平。通常情况下,桥梁的加固改造与重建相比可节省大量的资金,能以较小的成本提高现有桥梁服役能力,缓解交通压力实现桥梁建设可持续发展。

桥梁维修加固的常用方法有:增大截面加固法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维复合材料加固法、体外预应力法及改变结构体系加固法。在众多混凝土结构修复加固技术中,增大截面加固法施工工艺简单,经济实用,适应性强,是一种广泛使用的方法<sup>[1-2]</sup>。常规的普通混凝土加大截面时,由于空间窄小、钢筋密集等条件的限制,往往会存在混凝土浇筑不密实、施工质量差等问题。自密实混凝土作为一种新型材料,不需要附加振动,在自身重力作用下便能够流动、密实,即使在致密钢筋情况下也能完全填充模板,获得良好的效果,在桥梁增大截面加固领域逐渐被重视<sup>[3-5]</sup>。

国内外学者在自密实混凝土力学性能方面进行了广泛研究。通过适当的添加剂能有效改善混凝土的流动性,实现自流密实,其力学性能与普通混凝土基本类似,但也有其自身的特点。Karamloo等指出自密实受骨料尺寸影响很大,大尺寸骨料能有效提高混凝土的断裂韧性和延性<sup>[1]</sup>。在废旧材料利用、轻质高强改性方面,一些学者也开展了一些工作。通过合理的级配设计和材料掺入,能够实现预制混凝土废料的多循环自密实混凝土制备<sup>[2]</sup>。聚丙烯纤维和钢纤维的掺入能进一步提高自密实混凝土的力学性能、抗冲击性能和耐久性能<sup>[4]</sup>。自密实混凝土向可循环、高性能的方向不断发展,在土木工程多领域得到了应用<sup>[3]</sup>。

增大截面加固中,新老混凝土间的黏结性能和协同工作能力是加固工作是否成功的关键因素,很多加固工程中由于新老混凝土黏结强度差而导致达不到预期加固效果。目前一些学者对新老混凝土界面性能进行了研究。白文君等指出界面黏结强度随着粗糙度的增加而增加,但当其达到一定程度后,黏结强度的增幅会减小<sup>[6]</sup>。赵志方等发现,新老混凝土之间的黏结强度低于新、老混凝土本体的相应强度<sup>[7]</sup>。谢慧才等指出,新老混凝土黏结面间的疏松多孔薄弱层减小了界面间的有效接触面积,进而引起其黏结强度下降<sup>[8]</sup>。王振领等指出,结合面的不同处理方法对其抗剪性能影响较大,涂刷水泥净浆

能有效提高界面剪切强度<sup>[9]</sup>。潘传银等指出,界面的抗剪强度随着植筋率的增大而提高,但不是正比关系,最佳植筋率在 0.3%~1%之间<sup>[10]</sup>。综上,新老混凝土界面黏结强度受到界面粗糙度、界面处理剂、新老混凝土性能以及界面植筋等多因素的影响。

自密实混凝土加固混凝土界面黏结性能方面,国内外学者也已开展了一些研究。陈峰等试验发现,自密实混凝土与老混凝土黏结面抗剪性能优于普通混凝土,界面粉煤灰水泥净浆和植筋能有效提高剪切强度<sup>[11]</sup>。Diab 等指出,自密实混凝土与老混凝土间的斜向剪切强度依赖于新老混凝土强度比值和界面粗糙度<sup>[12]</sup>。柴敏等发现,加密刻槽对于提高界面剪切强度效果显著<sup>[13]</sup>。陈峰等还建立了自密实混凝土与老混凝土黏结滑移有限元分析方法,并且提出了基于塑性极限分析的自密实新老混凝土界面剪切强度计算模型<sup>[14-15]</sup>。

综上,关于自密实混凝土与老混凝土间的界面行为已经有了初步的认识,然而,现有研究中尚未明确混凝土碳化对界面剪切性能的影响。随着时间推移,在桥梁服役过程中混凝土结构表面都会存在一定程度的碳化<sup>[16-21]</sup>。混凝土碳化是大气中的二氧化碳和水泥水化后的碱性物质发生的复杂物理化学反应,其不仅导致混凝土水化产物的改变,还会引起混凝土微观结构的变化。对此类混凝土结构进行自密实混凝土加大截面设计时,需要明确碳化层对新老混凝土界面性能的影响,进而对碳化层采取凿除或保留措施。目前,碳化对新老混凝土黏结界面剪切性能的影响,尤其是对自密实混凝土与既有混凝土界面的黏结性能影响尚未明确。

为此,本文制作了 39 个 Z 形黏结试件,分别设计了不同的混凝土碳化深度,进而对试验试件进行了直剪试验,旨在明确碳化对新老混凝土黏结界面剪切性能的影响,以期自密实混凝土增大截面加固混凝土结构设计提供依据。

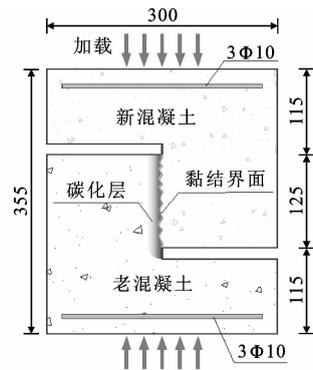
## 1 试验概况

本试验采用 Z 形试件进行新老混凝土黏结界面剪切性能试验,试验步骤依次是:①浇筑老混凝土;②老混凝土碳化;③黏结界面处理;④浇筑新混凝土;⑤Z 形试件抗剪试验。

### 1.1 试件设计

本试验采用的 Z 形试件如图 1 所示。试件厚度为 100 mm,新老混凝土接触面为 100 mm×125 mm。老混凝土采用常规的振捣密实方法成型,标准条件

下养护 28 d 以后,对其进行实验室快速碳化,达到不同碳化深度后进行界面处理和浇筑新混凝土,新混凝土采用自流密实工艺成型。



单位: mm

图 1 Z 形试件示意

Fig. 1 Sketch of Z type specimen

老混凝土按 C30 进行设计,采用 325 普通硅酸盐水泥、湘江中砂和河卵石浇筑,配合比为水泥:水:沙:卵石=1:0.46:1.58:3.18,28 d 混凝土抗压强度实测值为 33 MPa。新混凝土添加 GMA 无收缩自流密实混凝土外加剂改变其和易性,外加剂掺量为水泥质量的 20%,共设计 C30、C35 和 C40 三种强度,对应的配合比和实测材料强度如表 1 所示。

表 1 新混凝土配合比和材料性能

Tab. 1 Mix proportion and materials performance of new concrete

混凝土等级	水泥种类	不同材料配合比					28 d 抗压强度/MPa
		水泥	GMA 外加剂	水	沙	卵石	
C30	325	1	0.2	0.41	1.73	1.80	34
C35	325	1	0.2	0.36	1.45	1.57	39
C40	425	1	0.2	0.42	1.76	1.91	43

本试验共设计 39 个试件,根据碳化时间、混凝土强度以及黏结界面处理方式的差异等分为 13 种不同的类型,每种类型均设计 3 个重复试件。各类型试件的设计参数如表 2 所示。

表 2 试件试验参数设计

Tab. 2 Parameters of designed specimens

编号	老混凝土	新混凝土	碳化时间/d	界面处理	编号	老混凝土	新混凝土	碳化时间/d	界面处理
S0	C30	C35	0	Ⅱ类	S7	C30	C30	56	Ⅲ类
S1	C30	C35	14	Ⅱ类	S8	C30	C35	56	Ⅰ类
S2	C30	C35	28	Ⅱ类	S9	C30	C35	56	Ⅲ类
S3	C30	C35	56	Ⅱ类	S10	C30	C40	56	Ⅰ类
S4	C30	C35	84	Ⅱ类	S11	C30	C40	56	Ⅱ类
S5	C30	C30	56	Ⅰ类	S12	C30	C40	56	Ⅲ类
S6	C30	C30	56	Ⅱ类					

## 1.2 混凝土碳化

老混凝土浇筑、标准养护 28 d 达到设计强度之后,将试件移至多功能碳化实验室进行快速碳化。碳化实验室  $\text{CO}_2$  浓度设定为  $20\% \pm 3\%$ ,温度设定为  $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ ,按照设计的碳化时间碳化后,取出试件,采用 1% 的酚酞酒精溶液测得各试件的平均碳化深度,如表 3 所示。通过对比分析可以发现,混凝土碳化初期速率较快,14 d 以后其碳化速率逐渐减小。

表 3 老混凝土试块碳化参数

Tab. 3 Parameters of carbonization of old concrete specimens

试件编号	S0	S1	S2	S3	S4	其他
碳化时间/d	0	14	28	56	84	56
碳化深度/mm	0	10	14	20	24	20

## 1.3 黏结界面处理

试件碳化完成后,采用 3 种方式处理新老混凝土的黏结界面:①凿毛洗净(I类),浇筑新混凝土前洒水润湿,晾干到表面无水状态,老混凝土表面不干燥;②凿毛洗净涂刷高标号水泥净浆(II类),涂刷水泥净浆在混凝土浇筑前进行,涂刷完到浇筑新混凝土的时差不超过 1 h;③凿毛洗净后界面植筋(III类),在黏结界面对称均匀植入 2 根  $\Phi 10$  抗剪钢筋,钢筋锚固长度为 10 cm。

上述界面处理中均采用电锤对混凝土表面进行凿毛处理,使其表面呈高低不平状,采用灌砂法测得平均灌砂深度为 2.1~2.5 mm,所有试件表面的凿毛程度几乎相同。凿毛深度均小于混凝土的碳化深度(大于 10 mm),凿毛并未完全破除老混凝土表面的碳化层,故新混凝土仍在碳化层与老混凝土黏结。

新混凝土浇筑时,将老混凝土块平放,使新老混凝土界面水平,新混凝土从黏结界面上部浇筑密实成型。同时,为了浇筑施工的方便,在新老混凝土间的 2 个非黏结界面上分别布置了泡沫隔板,在浇筑过程中能有效将新老混凝土在局部位置处隔开,同时由于泡沫板弹性模量小,Z 形试件抗剪试验时也不会对其结构产生影响,具体的试件如图 2 所示。

## 1.4 试验加载

新混凝土浇筑、养护 28 d 以后,采用 YES-2000B 混凝土压力试验机进行加载测试,如图 3 所示。加载速率控制在 0.1~0.12 kN/s,试验荷载值由试验压力机自动读取,以荷载无法继续增大或黏结界面出现明显裂缝作为最终状态,对应的荷载即为极限荷载。

试验完成后,根据下式可以计算得到极限荷载



图 2 Z 形试件

Fig. 2 Z type specimen

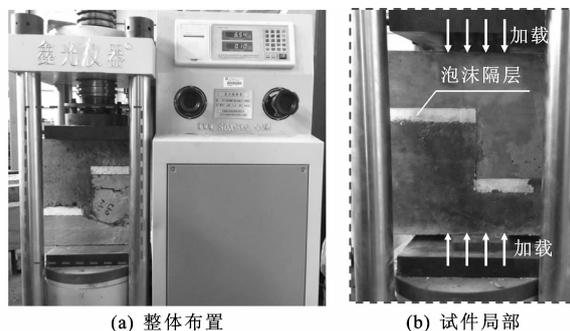


图 3 加载装置示意

Fig. 3 Sketch of loading device

作用下新老混凝土黏结接触面上的剪切应力,即

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中: $\tau$  为黏结接触面上的剪切应力; $F$  为试验过程中试件所承受的最大荷载; $A$  为新老混凝土黏结界面面积,本文试验取  $0.0125\text{ m}^2$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏特征

各试件的破坏过程较为类似,试验荷载作用下,首先在黏结界面的末端出现裂缝,随着荷载增加裂缝逐渐扩展,最后贯穿整个黏结界面,引起新老混凝土的剥裂。总体而言,黏结界面裂缝的形状具有一定随机性,由于设计参数的差异,各类型试件裂缝的分布也存在一些差异。

未碳化试件的界面剪切裂缝相对平整,多是单条贯穿型裂缝,直接将新老混凝土劈开,如图 4(a)所示;随着碳化时间的增加,黏结界面裂缝逐渐向老混凝土转移,试件的剪切破坏面由新老混凝土交界面逐渐向老混凝土内部转移,并随着碳化时间的增加,破裂面偏向老混凝土内部的距离越大,其与碳化深度表现出一定线性关系,如图 4(b)、(c)所示。

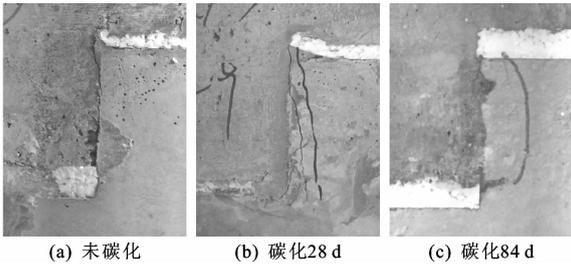


图 4 不同碳化程度下黏结界面裂缝分布

Fig. 4 Distributions of interface shear crack of specimens with different carbonization depths

不同混凝土强度下黏结界面也表现出一定的差异。当新老混凝土强度相近时,黏结界面剪切裂缝表现出较为明显的单条贯穿特征,而当新老混凝土强度相差较大时通常会出现分叉的情况,甚至是多条裂缝分叉的情况,分叉裂缝末端多偏向于老混凝土内部。

I类和II类界面处理方式的试件,其界面剪切裂缝的分布没有明显的统计差异,但III类配置了抗剪钢筋的试件,其裂缝分布情况较为一致,裂缝均为单条裂缝贯穿型,且裂缝宽度较宽,直到加载结束,其新老混凝土块都未分开。

## 2.2 老混凝土碳化深度的影响

图 5 给出了不同碳化程度试件黏结界面抗剪强度,可以发现,随着老混凝土碳化程度的加深,新老混凝土黏结界面的抗剪强度逐渐增强。未碳化试件黏结界面抗剪强度平均值为 3.76 MPa,随着碳化程度的加深,对碳化深度为 10、14、20、24 mm 的试件,其黏结界面抗剪强度平均值分别为 4.58、4.63、4.76、4.87 MPa,对应增长率为 18%、19%、20%和 23%。可见,碳化初期,试件黏结界面抗剪强度增长迅速,达到一定碳化深度以后,其增长幅度变小。

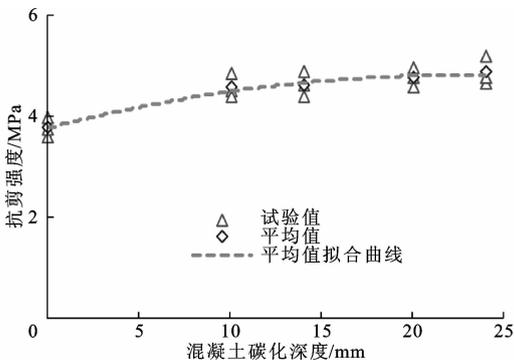


图 5 混凝土碳化影响

Fig. 5 Effects of concrete carbonization

老混凝土碳化引起新老混凝土黏结界面抗剪强度的增长,其原因可能是混凝土碳化后的抗压强度

和变形刚度增强引起的。现有研究表明,混凝土碳化后,其抗压强度和弹性模量分别增长 40%~70%和 50%~70%<sup>[22]</sup>。碳化混凝土的强度和变形刚度均远大于原有混凝土,加之新混凝土的强度也高于老混凝土,因此,有可能在碳化混凝土和新混凝土间形成较为有效的黏结,而黏结薄弱面逐渐转为碳化混凝土和老混凝土的临界面,黏结试件的破坏也由原来新老混凝土界面破坏,转变为老混凝土的内部剪切破坏,故试件的抗剪强度会有所增加。

将所有试件抗剪强度分别除以未碳化试件的抗剪强度值进行标准化处理后,通过回归拟合的方法,可以建立标准化的新老混凝土黏结界面抗剪强度与混凝土碳化深度的计算表达式

$$R_c(d) = 1 + 0.025 3d - 0.000 6d^2 \quad (2)$$

式中: $R_c(d)$ 为标准化的新老混凝土黏结界面抗剪强度; $d$ 为混凝土碳化深度。

## 2.3 新混凝土强度对抗剪强度的影响

图 6 给出了老混凝土碳化深度均为 20 mm,自密实新混凝土强度不同时各试件抗剪强度对比。通过对比可以发现,新老混凝土黏结界面抗剪强度与混凝土的强度差相关,同时也受到界面处理方式的影响。

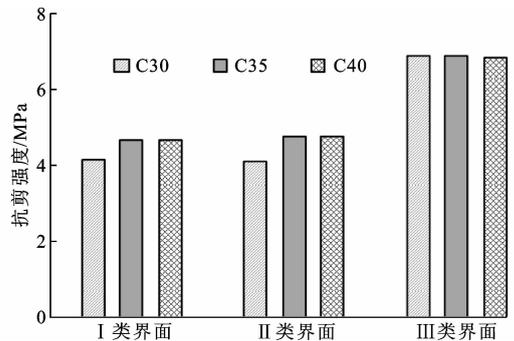


图 6 混凝土强度影响

Fig. 6 Effects of concrete strength

由图 6 可知:对于 I 类、II 类 2 种界面处理方式试件,当自密实新混凝土强度从 C30 提高到 C35 时,黏结界面抗剪强度明显增大,分别增大 12%和 16%;但是当新混凝土强度从 C35 增大到 C40 时,黏结界面抗剪强度增长不大,甚至略有降低。该现象可以通过不同强度试件黏结界面的破裂机理进行解释。老混凝土设计标号为 C30,当新混凝土强度也为 C30 时,新老混凝土黏结界面可能相对薄弱,荷载作用下引起黏结界面直接错动;而当新混凝土强度提高到 C35,新老混凝土界面间能形成有效黏结,剪切作用下的破坏面发生在强度相对较低的老

混凝土内部,有效提高了其抗剪强度;但是当新混凝土强度再进一步提高到 C40 以后,其破坏仍发生在老混凝土内部,故其抗剪强度不再增加。

对于Ⅲ类植入抗剪钢筋的界面处理方式,不同混凝土强度试件抗剪强度基本相同,新老混凝土黏结界面的抗剪强度并未随着新混凝土强度的提高而增强。黏结界面植入抗剪钢筋后,其破坏形式可能是抗剪钢筋与混凝土内部的剪切破坏。3类试件的新混凝土强度依次增大,但老混凝土强度相同,故其抗剪强度相差不大。可见,对于植入抗剪钢筋的试件,其黏结界面抗剪强度由较低强度混凝土控制。

## 2.4 界面处理方式对抗剪强度的影响

图7对比了不同界面处理方式下新老混凝土界面抗剪强度值。Ⅰ类和Ⅱ类界面处理方式对本文试验试件的黏结界面抗剪强度影响不大,试件的抗剪强度实测值并没有出现明显的差异。Ⅲ类植入抗剪钢筋的界面处理方式能有效提高界面抗剪强度,与Ⅰ类和Ⅱ类界面处理方式相比,其界面抗剪强度值增大45%~70%,其原因是界面破裂机理的改变引起的。Ⅰ类和Ⅱ类界面处理方式的界面破裂存在于新老混凝土界面之间或者是老混凝土内部,破裂面与黏结界面平行,面积基本相等;而植入抗剪钢筋以后的破裂转为抗剪钢筋与混凝土内部的剪切破坏,破裂面与抗剪钢筋数量、位置和锚固深度等相关,破裂面增大,故其抗剪强度也相应增大。

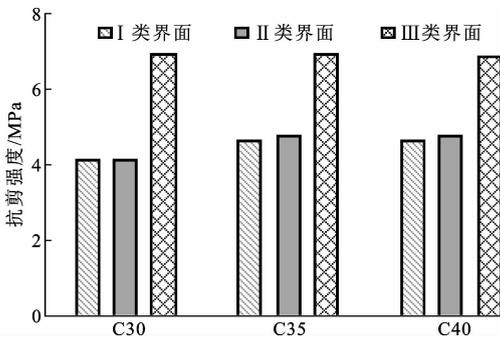


图7 界面处理方式影响

Fig. 7 Effects of interfacial treatment modes

## 3 机理分析及计算探讨

### 3.1 碳化对新老混凝土界面抗剪性能的影响分析

新老混凝土界面抗剪性能受新老混凝土强度以及混凝土碳化等因素共同影响,其界面破裂机理见图8。新混凝土与老混凝土接触位置会存在一个薄弱面,新混凝土强度较低时,对应的薄弱面较为明显。此时,黏结界面的抗剪强度会相对较低,其破裂

面必然也出现在这个薄弱位置,如图8(a)所示。

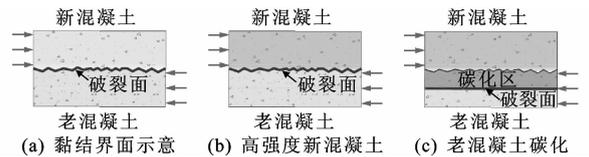


图8 界面破裂机理

Fig. 8 Splitting mechanism between interfaces

当新混凝土强度提高以后,新老混凝土间的薄弱面可能会有所改善,其界面抗剪强度也会有所提高。此时,破裂面出现的位置依赖于薄弱面被改善的程度。若薄弱面弱于老混凝土,则破裂面出现在新老混凝土界面,如图8(b)所示,并且随着新混凝土强度的提高,界面抗剪强度会进一步提高;薄弱面强于老混凝土,则破裂面会随机出现在靠近黏结界面的老混凝土内部,并且界面的抗剪强度基本保持不变。

对于碳化后的老混凝土,其强度和弹性模量均增强,会在一定范围内形成一个强化区,能在一定程度上改善新老混凝土界面间的薄弱面,因此能提高界面间的抗剪强度,其破裂面的出现位置也与混凝土强度有关。当新混凝土强度较低时,破裂面必然出现在新老混凝土交界面,但当新混凝土强度提高时,新混凝土、黏结界面以及碳化强化区会形成一个整体协同变形,其破裂面可能出现在老混凝土内部的碳化强化区与未强化区的分界面。

### 3.2 碳化混凝土界面抗剪强度计算探讨

陈峰等建立了自密实混凝土与非碳化混凝土的黏结抗剪强度计算公式<sup>[11]</sup>如下

$$\tau = \alpha_1 \alpha_2 \tau_p + 0.89 \rho_v f_y \quad (3)$$

$$\tau_p = 0.75 \sqrt{f_c f_t} \quad (4)$$

式中: $\alpha_1$ 为混凝土强度影响系数,对于自密实混凝土取0.42; $\alpha_2$ 为界面影响系数,当不涂刷界面剂时 $\alpha_2$ 取1.0,涂刷粉煤灰水泥净浆时 $\alpha_2$ 取1.34; $\tau_p$ 为整体混凝土的纯剪强度(MPa); $f_c$ 为混凝土抗压强度(MPa); $f_t$ 为混凝土抗拉强度(MPa),根据ACI规范<sup>[23]</sup>取 $f_t = 0.56 f_c^{0.5}$ ; $\rho_v$ 为抗剪钢筋植筋率; $f_y$ 为钢筋抗拉强度(MPa)。

根据本文试验结果,对上述公式进行适当的改进,以预测自密实混凝土与碳化混凝土的黏结抗剪强度,具体改进如下:①采用本文建立的式(2)修正整体混凝土的纯剪强度 $\tau_p$ ,以此来考虑碳化的影响;②由于Ⅰ类和Ⅱ类界面处理对抗剪强度无明显影响,故对于这2类试件均取 $\alpha_2 = 1.0$ ;③由于新老混

混凝土强度差过大对抗剪强度提高无积极影响,故对高标号新老混凝土强度进行折减,新老混凝土强度按不超过一个标号差计算。

采用改进的模型对试验试件抗剪强度进行计算,得到各类型试件的抗剪强度计算值和试验值的对比,如图9所示。由图9可知,试验值和计算值基本相等,二者吻合良好,本文模型精度较高。

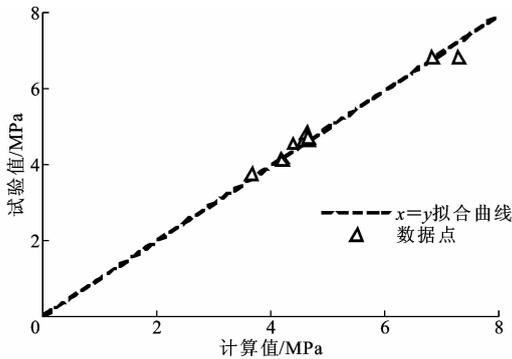


图9 计算值和试验值的对比

Fig. 9 Comparisons of calculated and tested results

## 4 结 语

(1)混凝土碳化引起黏结界面剪切裂缝分布形式的改变。混凝土碳化后强度和弹性模量均有所增强,并在黏结界面间形成一个局部强化区域,剪切裂缝由原来的界面裂缝逐渐向老混凝土内部转移,基本扩展至碳化强化区与未碳化区交界面。

(2)混凝土碳化使得黏结界面抗剪强度增强。碳化初期,黏结界面抗剪强度增长迅速,达到一定碳化深度以后,其增长幅度变小。根据试验结果,建议实际加固工程中,在混凝土碳化深度不影响钢筋耐久性的前提下可不必凿除。

(3)自密实新混凝土加固碳化混凝土黏结界面抗剪强度与混凝土强度、界面处理方式密切相关。对于Ⅰ类和Ⅱ类界面,一定范围内增大自密实新混凝土强度对于提高其界面抗剪强度具有积极作用;当新老混凝土强度相差较大时,继续提高新混凝土强度作用不大,建议采用较高强度自密实混凝土加固,但不宜高于碳化混凝土两级。Ⅲ类界面植筋能有效提高界面抗剪强度,且其由相对较低强度的混凝土控制。

(4)由于试件样本有限,本文试验中仅研究了混凝土碳化、新老混凝土强度以及界面处理方式等因素对自密实新老混凝土界面剪切强度的影响。界面粗糙度、界面处理剂的影响以及更加系统全面的计算预测模型有待进一步研究。

## 参考文献:

### References:

- [1] KARAMLOO M, MAZLOOM M, PAYGANEH G. Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 508-515.
- [2] SALESA A, PEREZ-BENEDICTO J A, ESTEBAN L M, et al. Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects[J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 364-373.
- [3] RAHAL K N, KHALEEFI A L, AL-SANEE A. An experimental investigation of shear-transfer strength of normal and high strength self compacting concrete [J]. Engineering Structures, 2016, 109: 16-25.
- [4] CONFORTI A, MINELLI F, PLIZZARI G A. Shear behaviour of prestressed double tees in self-compacting polypropylene fibre reinforced concrete[J]. Engineering Structures, 2017, 146: 93-104.
- [5] MASTALI M, DALVAND A. Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC) [J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 196-209.
- [6] 白文君, 何兆益, 胡金玉. 新老混凝土黏结强度特性研究[J]. 混凝土, 2008(1): 45-49.  
BAI Wen-jun, HE Zhao-yi, HU Jin-yu. Bonding strength between old and repair concrete [J]. Concrete, 2008(1): 45-49.
- [7] 赵志方, 赵国藩, 刘健, 等. 新老混凝土粘结抗拉性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 51-56.  
ZHAO Zhi-fang, ZHAO Guo-fan, LIU Jian, et al. Experimental study on adhesive tensile performance of young on old concrete[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 51-56.
- [8] 谢慧才, 李庚英, 熊光晶. 新老混凝土界面粘结力形成机理[J]. 硅酸盐通报, 2003, 22(3): 7-10, 18.  
XIE Hui-cai, LI Geng-ying, XIONG Guang-jing. The mechanism formed the bonding force between new and old concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2003, 22(3): 7-10, 18.
- [9] 王振领, 林拥军, 钱永久. 新老混凝土结合面抗剪性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 600-604.  
WANG Zhen-ling, LIN Yong-jun, QIAN Yong-jiu. Experimental research on shear properties of new-to-old concrete interface[J]. Journal of Southwest Jiao-

- tong University, 2005, 40(5): 600-604.
- [10] 潘传银, 石雪飞, 周可攀. 新、老混凝土粘结抗剪强度试验[J]. 交通科学与工程, 2014, 30(2): 6-12.  
PAN Chuan-yin, SHI Xue-fei, ZHOU Ke-pan. Study on shear strength of new and old concrete bonding interface[J]. Journal of Transport Science and Engineer, 2014, 30(2): 6-12.
- [11] 陈峰, 郑建岚. 自密实混凝土与老混凝土粘结强度的直剪试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(1): 59-63.  
CHEN Feng, ZHENG Jian-lan. Experimental research on direct shear behavior of adhesion of self-compacting concrete on existing concrete[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 59-63.
- [12] DIAB A, ELMOATY A, EL-DIN M. Slant shear bond strength between self compacting concrete and old concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 130: 73-82.
- [13] 柴敏, 罗素蓉. 自密实混凝土与老混凝土粘结抗剪性能试验研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2013, 41(5): 922-927.  
CHAI Min, LUO Su-rong. Experimental research on shear properties of self-compacting concrete on existing concrete[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2013, 41(5): 922-927.
- [14] 陈峰, 郑建岚. 自密实混凝土与老混凝土粘结滑移关系的有限元分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2014, 47(6): 774-778.  
CHEN Feng, ZHENG Jian-lan. Finite element analysis of bonding-slip relationship between old concrete and freshly cured self-compacting concrete[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(6): 774-778.
- [15] 郑建岚, 陈峰. 自密实混凝土与老混凝土粘结剪切强度的塑性极限分析[J]. 工程力学, 2008, 25(8): 164-168.  
ZHENG Jian-lan, CHEN Feng. The plastic limit analysis of adhesive shear strength between self-compacting concrete and old concrete[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(8): 164-168.
- [16] 陈艾荣, 冯师蓉, 马如进. 基于退化机理的混凝土桥梁耐久性环境区划[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 331-337.  
CHEN Ai-rong, FENG Shi-rong, MA Ru-jin. Environmental zoning for durability performance of concrete bridges based on deterioration mechanism[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(3): 331-337.
- [17] JIANG C, HUANG Q, GU X, et al. Experimental investigation on carbonation in fatigue-damaged concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 99: 38-52.
- [18] LO T Y, LIAO W, WONG C, et al. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings[J]. Construction and Building Materials, 2016, 107: 299-306.
- [19] LI G, DONG L, BAI Z A, et al. Predicting carbonation depth for concrete with organic film coatings combined with ageing effects[J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 59-65.
- [20] 邓华锋, 肖瑶, 胥焘, 等. 碳纤维水泥基复合材料加固节理岩体试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 242-251.  
DENG Hua-feng, XIAO Yao, XU Tao, et al. Experiment on reinforcement of jointed rock mass by carbon fiber cement-based composite material[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 242-251.
- [21] 刘人太, 郑卓, 李术才, 等. 破碎岩体注浆加固后的力学特性研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 284-291.  
LIU Ren-tai, ZHENG Zhuo, LI Shu-cai, et al. Mechanical properties of fractured rock mass with consideration of grouting reinforcement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 284-291.
- [22] 何薇. 混凝土碳化及其对地下结构力学性能的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
HE Wei. Research on concrete carbonization and its influence on the mechanical behavior of underground structures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [23] ACI 318-08, Building code requirements for structural concrete and commentary[S].