**文章编号:**1007-9629(2023)08-0914-08

# 高延性地聚合物与既有混凝土界面的黏结性能

李 杉\*, 陈得锋, 卢亦焱, 李伟韬

(武汉大学土木建筑工程学院,湖北武汉 430072)

摘要:对65个高延性地聚合物(HDGC)与既有混凝土的黏结试件进行了斜剪试验,研究了界面黏结 角度、既有混凝土强度、HDGC延伸率和界面粗糙度对其界面黏结性能的影响,并基于 Mohr-Coulomb屈服准则进行塑性极限分析,建立了破坏应力与界面黏结角度、内聚力和内摩擦角的 计算式.结果表明:界面黏结角度对试件的失效模式起主要控制作用,界面黏结角度越大,试件的界 面黏结强度越小;当既有混凝土强度提高时,试件的界面黏结强度略有降低;当HDGC延伸率为 6.77%时,试件的界面黏结强度最大;随着界面粗糙度的增大,试件的界面黏结强度逐渐提高,但提 高幅度呈降低趋势;建立的计算式计算结果与试验结果吻合较好.

关键词:地聚合物;界面黏结性能;失效模式;塑性极限分析

**中图分类号:**TU528 文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.08.012

## Interfacial Bonding Performance between High Ductility Geopolymer and Existing Concrete

LI Shan<sup>\*</sup>, CHEN Defeng, LU Yiyan, LI Weitao (School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Slant shear tests were carried out on 65 bonding specimens of high ductility geopolymer(HDGC) and existing concrete. The effects of interface bonding angle, existing concrete strength, HDGC elongation and interface roughness on HDGC-existing concrete interfacial bonding performance were studied. Based on Mohr-Coulomb yield criterion, the plastic limit analysis was carried out, and a formula was established to calculate failure stress using interface bonding angle, cohesion and internal friction angle. The results show that the interface bonding angle controls the failure mode. The slant shear bonding strength decreases with the increase of the interface bonding angle. As the compressive strength of existing concrete increases, the slant shear bonding strength is slightly reduced. When the HDGC elongation is 6.77%, the slant shear bonding strength is the largest. With the increase of interface roughness, the slant shear bonding strength is decreases. The calculated results form the established formula are in good agreement with the experimental results.

Key words: geopolymer; interfacial bonding performance; failure mode; plastic limit analysis

地聚合物是一种由硅铝质原料和碱激发溶液制成的新型绿色无机材料<sup>[1]</sup>,具有早强快硬、耐高温、耐酸碱腐蚀等优点<sup>[2-3]</sup>,在工程结构修复加固领域得到了初步的应用.彭小芹等<sup>[4]</sup>采用地聚合物进行快速路面修补,其制备的地聚合物8h抗折强度和抗压强度

分别为3.25、43.60 MPa,已经成功应用于某公路工程的维修.Franca等<sup>53</sup>对比了地聚合物和普通砂浆加固素混凝土梁的受力性能,发现普通砂浆加固梁发生了界面整体脱落,地聚合物加固梁则未发生界面剥离现象,而且地聚合物加固梁的极限荷载比普通

收稿日期:2022-09-28;修订日期:2022-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078391)

第一作者(通讯作者):李 杉(1979—),男,云南昆明人,武汉大学教授,博士生导师,博士.E-mail:lishan@whu.edu.cn

砂浆加固梁略有增加.Laskar等<sup>[6]</sup>采用地聚合物修复 损伤的钢筋混凝土梁,发现修复梁在3、28d的极限 荷载分别是对照梁的1.01、1.11倍,且表现出更好的 延性.

将地聚合物应用于结构修复加固,良好的界面 黏结性能是保证其结构加固效果的关键<sup>[7]</sup>. 闫东明 等<sup>[8]</sup>和Romanazzi等<sup>[9]</sup>通过拉拔试验研究了地聚合物 与钢筋及玻璃纤维筋的黏结性能及其相关影响因 素,李克亮等<sup>[10]</sup>通过三点弯曲试验研究了不同龄期 时地聚合物与花岗岩及大理石的界面黏结强度,但 目前对于地聚合物与混凝土的界面黏结性能还缺乏 深入研究.斜剪试验是研究新旧混凝土黏结性能最 合适的试验方法之一,已经被编入了许多相关国际 规范<sup>[11-12]</sup>.这是因为黏结劈裂<sup>[13-14]</sup>、拉拔<sup>[14]</sup>等试验在界 面处可能产生弯矩造成应力集中,而斜剪试验的界 面同时承受剪切和压缩应力,界面上的应力分布相 对均匀<sup>[15]</sup>. 此外,斜剪试验还具有试验装置简单、测 试对影响参数变化敏感度高等优点<sup>[16]</sup>.

鉴于此,本文采用斜剪试验研究高延性地聚合物(HDGC)-既有混凝土界面黏结性能的影响因素和破坏模式.在试验基础上,通过塑性极限分析,建立 HDGC-既有混凝土试件的破坏应力与界面黏结角度、内聚力和内摩擦角的计算式,以期为HDGC应用 于工程结构的修复加固提供参考.

#### 1 试验

#### 1.1 试件制备

HDGC-既有混凝土斜剪试件(见图1)为 100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体,上部为 HDGC,下部为混凝土.图1中:HDGC-既有混凝土 黏结界面与水平方向的夹角即界面黏结角度( $\beta$ )为 15°、30°、45°、60°、75°; $h_1$ =(300-100 tan  $\beta$ )/2; $h_2$ = 100 tan  $\beta$ + $h_1$ .设计了每组5个、13组共计65个 HDGC-既有混凝土斜剪试件:(1)先浇筑下部混凝 土.混凝土强度等级分别为C30、C40和C50,其立方 体抗压强度分别为 35.68、43.17、53.21 MPa. 标准养 护28d后,采用刻痕方式对其进行界面粗糙化处理, 刻痕的宽度和深度分别为4、5mm,界面粗糙度分别 为0、0.8243、1.1657、1.5071mm,依次记为N、S、 M、L.(2) 再浇筑上部 HDGC. HDGC 由质量比为 14.000: 4.000: 1.000: 1.000: 6.667: 0.030: 3.750: 5.100:0.957的粉煤灰、矿渣、偏高岭土、硅灰、石英 砂、碳纳米管、水、硅酸钠和NaOH 配制而成.设置聚 乙烯醇(PVA)纤维的体积分数 $V_{i}$ 分别为0%、1.5%、 2.0% 和 2.5%, 得到 4 种不同延伸率的 HDGC, 其抗 压强度分别为42.46、46.86、49.54、47.68 MPa,抗拉 强度分别为2.16、4.34、4.64、4.32 MPa,延伸率分别 为 0.18%、6.77%、7.43%、2.89%.(3) 浇筑完成后置 于标准养护室内养护至28d,然后进行加载试验. HDGC-既有混凝土斜剪试件的设计参数见表1.

#### 1.2 试验装置

斜剪试验装置如图2所示.设计了专用于斜剪 试验的钢套,其内部截面尺寸与试件相同.钢套分 为上下两个部分,上钢套和下钢套分别延伸到距离 试件黏结界面1 cm 的位置,预留间隙以保证界面 处的黏结滑移破坏不受钢套的影响.试验在 1 000 kN电液伺服压力试验机上进行,加载速率为 0.2 mm/min,沿黏结界面方向布置位移计,荷载和 位移数据通过东华3816 N系统自动采集,采样频 率为2 Hz.

### 2 结果与分析

#### 2.1 破坏形态

HDGC-既有混凝土斜剪试件典型的破坏模式 如图3所示.根据试件破坏特征可以将其分为3类:



图 1 HDGC-既有混凝土斜剪试件 Fig. 1 HDGC-existing concrete slant shear specimens(size: mm)

表1 HDGC-既有混凝土斜剪试件的设计参数

Table 1         Design parameters of HDGC-existing concrete slant shear specimens							
Specimen No.	$\beta/(^{\circ})$	Concrete strength grade	$V_{\rm f}/\sqrt[9]{_0}$	Concrete interface roughness/mm	HDGC elongation/%		
A15-C30-2.0%-M	15	C30	2.0	1. 165 7	7.43		
A30-C30-2.0%-M	30	C30	2.0	1.1657	7.43		
A45-C30-2.0%-M	45	C30	2.0	1.1657	7.43		
A60-C30-2.0%-M	60	C30	2.0	1.1657	7.43		
A75-C30-2.0%-M	75	C30	2.0	1.1657	7.43		
A45-C40-2.0%-M	45	C40	2.0	1.1657	7.43		
A45-C50-2.0%-M	45	C50	2.0	1.1657	7.43		
A45-C30-0%-M	45	C30	0	1.1657	0.18		
A45-C30-1.5%-M	45	C30	1.5	1.1657	6.77		
A45-C30-2.5%-M	45	C30	2.5	1.1657	2.89		
A45-C30-2.0%-N	45	C30	2.0	0	7.43		
A45-C30-2.0%-S	45	C30	2.0	0.8243	7.43		
A45-C30-2.0%-L	45	C30	2.0	1.507 1	7.43		



图2 斜剪试验装置 Fig. 2 Slant shear test setup

(1)界面破坏(X型).破坏发生在黏结界面上,破 坏后HDGC和既有混凝土部分均未出现明显损伤, 既有混凝土黏结界面上可见积聚的HDGC浮浆.此 类破坏发生在粗糙度为0mm的A45-C30-2.0%-N 组试件中,由于黏结界面未进行刻痕,界面黏结抗剪 强度低,因此界面较两侧基体薄弱得多,在剪应力作 用下很快发生黏结滑移破坏.

(2)混合破坏(Y型).破坏主要发生在黏结界面 上,同时在HDGC和既有混凝土中出现局部压碎或 脱黏现象,既有混凝土黏结界面刻痕处嵌有HDGC, 可见大量 PVA 纤维被拉断或拔出.此类破坏发生在 黏结角度较大的刻痕试件中,主要因为粗糙化处理 有效地增大了界面黏结抗剪强度,使得部分基体被 局部压碎后才发生破坏.

(3)材料破坏(Z型).破坏发生在HDGC或既有 混凝土中,破坏后在既有混凝土和HDGC中出现贯 穿裂缝,其破坏应力由HDGC或既有混凝土的材料 强度控制.此类破坏发生在A15-C30-2.0%-M和部 分A30-C30-2.0%-M组试件中,因为当黏结角度较 小时,界面处受到的正应力与剪应力的比值较大,在 达到界面破坏前,正应力使两侧基体压碎.

HDGC-既有混凝土斜剪试件的破坏模式、内聚 力(c)和内摩擦角( $\varphi$ )见表2.



(a) Interface failure

(b) Mixed failure 图 3 HDGC-既有混凝土斜剪试件典型的破坏模式 Fig. 3 Typical failure modes of HDGC-existing concrete slant shear specimens

表 2 HDGC-既有混凝土斜剪试件的破坏模式、内聚力和内摩擦角 Table 2 Failure modes, cohesions and internal friction angles of HDGC-existing concrete slant shear specimens

Specimen No.	Failure mode	c/MPa	$arphi/(^\circ)$
A15-C30-2.0%-M	Ζ	_	_
A30-C30-2.0%-M	Y/Z	5.918	24.7
A45-C30-2.0%-M	Υ	5.918	24.7
A60-C30-2.0%-M	Υ	5.918	24.7
A75-C30-2.0%-M	Υ	5.918	24.7
A45-C40-2.0%-M	Υ	8.620	24.7
A45-C50-2.0%-M	Υ	7.034	24.7
A45-C30-0%-M	Υ	7.686	24.7
A45-C30-1.5%-M	Υ	9.794	24.7
A45-C30-2.5%-M	Υ	8.279	24.7
A45-C30-2.0%-N	Х	5.918	8.2
A45-C30-2.0%-S	Υ	5.918	19.3
A45-C30-2.0%-L	Υ	5.918	33.3

#### 2.2 荷载-位移曲线

HDGC-既有混凝土斜剪试件的荷载-位移曲线

600 A15-C30-2.0%-M A30-C30-2.0%-M 500 A45-C30-2.0%-M A60-C30-2.0%-M A75-C30-2.0%-M 400 Load/kN 300 200 100 0 0.3 0.6 0.9 1.2 1.5 1.8 Displacement/mm (a) Influence of interface bonding angles 500 A45-C30-0%-M ---- A45-C30-1.5%-M A45-C30-2.0%-M 400 A45-C30-2.5%-M 300 Load/kN 200 100 1.2 0 0.3 0.6 0.9 1.5 1.8 2.1 2.4 Displacement/mm (c) Influence of HDGC elongation

如图4所示.由图4可见:在加载初期,荷载随着位移 的增大呈线性快速增长,当达到峰值荷载后,界面瞬 间发生破坏,荷载陡降;界面黏结角度越小,其加载 初期的荷载-位移曲线上升越快,而随着界面黏结角 度的增大,峰值荷载逐渐降低,但峰值滑移量有所增 大;既有混凝土强度等级为C30和C40试件的峰值荷 载相近,既有混凝土强度等级为C50试件的峰值荷 载最低:HDGC 延伸率对试件峰值滑移量的影响较 大,但没有表现出规律性,延伸率为6.77%的 HDGC-既有混凝土斜剪试件的峰值荷载和滑移量最 大,相应的PVA纤维体积分数为1.5%,表明适当掺 入PVA纤维后,通过应力重新分布可以有效地改善 试件开裂后的变形性能,较好地抑制微小裂缝向宏 观裂缝扩展[17],从而使界面承受更大的滑移变形;界 面粗糙度对峰值荷载的影响较大,其中界面粗糙度 为0mm试件的峰值荷载最小,界面粗糙度较大的2 组试件峰值荷载和滑移量相近.



Fig. 4 Load-displacement curves of HDGC-existing concrete slant shear specimens

#### 2.3 斜剪试件界面黏结强度的影响因素

$$\tau = \frac{P \cos \beta}{A} \tag{1}$$

HDGC-既有混凝土斜剪试件的界面黏结强度 (*τ*)计算式为<sup>[11]</sup>:

式中:P为破坏荷载,kN;A为棱柱体斜剪试件的截面

积,mm<sup>2</sup>.

图 5为各因素对 HDGC-既有混凝土界面黏结强 度的影响.由图 5可见:

(1)界面黏结角度对HDGC-既有混凝土界面黏结强度的影响较大,随着界面黏结角度的增加, HDGC-既有混凝土的界面黏结强度降低,且降幅呈 增大趋势.这是因为垂直于界面方向的正应力(σ<sub>n</sub>)可 以增大界面之间的摩擦力,对界面间的化学胶着力 也有一定的提升作用;正应力与剪应力(τ<sub>n</sub>)的比值由 界面黏结角度控制,当界面黏结角度越大时,法向正 应力分量的占比越小,切向剪应力分量的占比越大, 因而界面更容易产生剪切滑移破坏.

(2)随着既有混凝土强度的提高,HDGC-既有混凝土的界面黏结强度呈降低趋势,这可能是HDGC与既有混凝土的弹性模量失配所导致,Austin等<sup>[18]</sup>的

研究证明了这一点.在斜剪试验中,当2种材料的弹 性模量差异较大时,会产生荷载偏心,引起局部应力 集中,从而导致其界面黏结强度降低.

(3)增大HDGC的延伸率可以在一定程度上提高HDGC-既有混凝土界面的黏结强度,但界面黏结强度的变化并没有明显的规律.当HDGC延伸率为6.77%(PVA纤维体积分数为1.5%)时,HDGC-既有混凝土的界面黏结强度最大;当HDGC延伸率为7.43%(PVA纤维体积分数为2.0%)时,HDGC-既有混凝土的界面黏结强度反而有所下降.一方面,适当掺入PVA纤维能减少界面泌水<sup>[19]</sup>,降低界面处的水灰比,提高黏结效果;另一方面,当PVA纤维体积分数较高时,HDGC拌合物较为黏稠,无法充分渗入到既有混凝土界面的刻痕中,界面处呈现较多气孔和浮浆,造成初始缺陷,降低了界面黏结强度.





(4)界面粗糙化处理对HDGC-既有混凝土界面 黏结强度的影响最为显著,随着界面粗糙度的增加, HDGC-既有混凝土的界面黏结强度逐渐提高.其主 要原因是粗糙化处理使黏结界面的表面积增大,界 面处的机械咬合力增强.此外,随着界面粗糙度的 增加,界面黏结强度的提高幅度呈降低趋势.当界 面粗糙度从 0.824 3 mm 增加到 1.165 7 mm 时, 界面 黏结强度提高了 78.06%; 当界面粗糙度从 1.1657mm增加到1.5071mm时,界面黏结强度仅 提高了3.61%.由此可见,粗糙化处理可以有效提升



(a) Plastic flow and stress

图6 斜剪试件的受力分析模型 Fig. 6 Force analysis model of slant shear specimen

由图 6(a)可得黏结界面处的应力分量,分别如 式(2)~(4)所示:

$$\sigma_0 = \frac{P}{A} \tag{2}$$

$$\sigma_{\rm n} = \sigma_0 \cos^2 \beta \tag{3}$$

$$\tau_{n} = \sigma_{0} \sin \beta \cos \beta \tag{4}$$

式中:σ<sub>0</sub>为破坏应力,MPa.

由图 6(b)可得 Mohr-Coulomb 准则的表达式,如 式(5)所示:

$$f(\tau_{n}, \sigma_{n}) = \tau_{n} + \sigma_{n} \tan \varphi - c = 0 \qquad (5)$$

根据塑性力学的正交流动法则,可得 式(6)、(7):

$$\frac{\dot{\boldsymbol{u}}_{r}}{\dot{\boldsymbol{u}}_{\sigma}} = \frac{\delta f / \delta \boldsymbol{\tau}_{n}}{\delta f / \delta \boldsymbol{\sigma}_{n}} = \frac{1}{\tan \varphi} \tag{6}$$

$$\dot{\boldsymbol{u}}_{\sigma} = \dot{\boldsymbol{u}}_{\tau} \tan \varphi \qquad (7)$$

式中: *u*<sub>a</sub>和 *u*<sub>z</sub>为位移率矢量.

因此,单位面积的内能耗散率矢量(W<sub>1.0</sub>)如式 (8)所示:

$$W_{1,0} = \tau_n \dot{u}_\tau + \sigma_n \dot{u}_\sigma = \tau_n \dot{u}_\tau + \sigma_n \dot{u}_\tau \tan \varphi = c \dot{u}_\tau (8)$$
将式(8)乘以黏结失效面积 $\frac{A}{\cos\beta}$ ,得到总内能耗  
散率矢量( $\dot{W}_1$ ),如式(9)所示:

HDGC-既有混凝土的界面黏结强度,但是当界面粗 糙度达到一定值后,其对界面黏结强度的影响会 减弱.

#### 基于 Mohr-Coulomb 准则的斜剪试 3 件塑性极限分析

斜剪试件的受力分析模型如图6所示,基于 Mohr-Coulomb 屈服准则进行塑性极限分析. 当试件 在外部荷载作用下沿着黏结界面发生滑移破坏时, 黏结界面处于剪应力与正应力的共同作用.



(b) Mohr-Coulomb criterion

 $\dot{W}_{\rm I} = \dot{W}_{\rm I,0} \frac{A}{\cos\beta} = \frac{cA}{\cos\beta} \dot{u}_{\rm T}$ (9)

外部荷载做功速率矢量(W<sub>E</sub>)如式(10)所示:

$$\dot{W}_{\rm E} = P(\dot{u}_{\tau}\sin\beta - \dot{u}_{\tau}\tan\varphi\cos\beta)$$
 (10)

由 $\dot{W}_{I} = \dot{W}_{E}$ ,可得式(11):

$$\sigma_0 = \frac{c}{\cos\beta(\sin\beta - \tan\varphi\cos\beta)}$$
(11)

由式(11)可见,斜剪试件的破坏应力与界面黏 结角度、内聚力和内摩擦角有关.当 $\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ 时, 式(11)中的破坏应力最小,此界面黏结角度为临界 界面黏结角度(β<sub>crit</sub>),将临界界面黏结角度代入式 (11),得式(12):

$$\sigma_{0,\min} = \frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{12}$$

式中: σ<sub>0</sub> min 为临界界面黏结角度下的破坏应力, MPa.

对其他因素相同、界面黏结角度不同(30°、45°、 60°和75°)的试件数据进行分析,黏结界面处τ,-σ,关 系如图7所示,此时内聚力为5.918 MPa,内摩擦角 为24.7°.将内聚力和内摩擦角代入式(11)进行计算, 得到τ。与β的关系,如图8所示,其中拟合曲线与试验 数据吻合良好,同时得到临界界面黏结角度为57.4°, 相应的破坏应力为18.47 MPa.



研究表明:在相同界面黏结角度的情况下,内摩 擦角主要由界面粗糙度决定,当界面粗糙度相同时, 内摩擦角不会发生变化,因此对界面粗糙度和界面黏 结角度相同的试件,内摩擦角仍取24.7°,依据式(11) 分析内聚力对破坏应力的影响,结果如图9所示.由图 9可见,内聚力越大,在相同界面黏结角度下,斜剪试 件的破坏应力越大.

当界面粗糙度发生改变时,内摩擦角随之发生





变化,依据式(11)分析内摩擦角对破坏应力的影响, 结果如图10所示.由图10可见:内摩擦角越大,在相 同界面黏结角度下,斜剪试件的破坏应力越大;当界 面黏结角度较小时,内摩擦角增大使得破坏应力显 著提高,随着界面黏结角度的变大,内摩擦角增大对 破坏应力的提高效果减弱;内摩擦角越大,临界界面 黏结角度越大,表明越粗糙的界面具有越大的临界 界面黏结角度.



Fig. 10 Influence of internal friction angle on failure stress

#### 4 结论

(1)高延性地聚合物(HDGC)-既有混凝土斜剪 试件的破坏模式包括界面破坏、混合破坏和材料破 坏.当黏结界面粗糙度较小时,斜剪试件主要发生界 面破坏;当黏结界面粗糙度一定时,界面黏结角度对 HDGC-既有混凝土斜剪试件的破坏模式起主要控制 作用,界面黏结角度较大时发生混合破坏,界面黏结 角度较小时发生材料破坏.

(2)界面粗糙化处理可以显著提高HDGC-既有 混凝土界面的黏结性能,当界面粗糙度达到一定值 后,其对界面黏结强度的影响会减弱;既有混凝土强 度对界面黏结性能有一定影响,既有混凝土强度提 高,界面黏结强度略有降低;HDGC的高延性特征能 显著提高界面黏结性能,但HDGC的延伸率变化对 界面黏结性能的改善没有明显规律.

(3) 基于 Mohr-Coulomb 屈 服 准 则,建立了 HDGC-既有混凝土斜剪试件的破坏应力计算式,计 算结果与试验结果吻合良好.同时也表明 HDGC-既有混凝土斜剪试件存在一个临界界面黏 结角度,在该临界界面黏结角度下发生黏结破坏所 需的破坏应力最小,越粗糙的界面具有越大的临界 界面黏结角度.

#### 参考文献:

- [1] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35(2): 429-441.
- [2] 张大旺,王栋民.地质聚合物混凝土研究现状[J].材料导报,2018, 32(9):1519-1527,1540.
  ZHANG Dawang, WANG Dongmin. Research status of geopolymer concrete [J]. Materials Reports, 2018, 32(9): 1519-1527,1540. (in Chinese)
- [3] 王存停,杨傅甜.地质聚合物混凝土力学性能研究综述[J].施工 技术,2019,48(21):20-23.
   WANG Cunting, YANG Futian. Research summary on mechanical properties of geopolymer concrete[J]. Construction Technology, 2019, 48(21): 20-23. (in Chinese)
- [4] 彭小芹,杨涛,王开宇,等.地聚合物混凝土及其在水泥混凝土
   路面快速修补中的应用[J].西南交通大学学报,2011,46(2):
   205-210.

PENG Xiaoqin, YANG Tao, WANG Kaiyu, et al. Preparation of geopolymer concrete and its application to rapid repair of cement concrete pavement [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(2): 205-210. (in Chinese)

- [5] FRANCA F C C, DIAS D P, GARCIA S L G, et al. Concrete beams repaired with geopolymer mortar [J]. Materia (Rio de Janeiro), 2018, 23(3): 0528.
- [6] LASKAR S M, TALUKDAR S. A study on the performance of damaged RC members repaired using ultra-fine slag based geopolymer mortar [J]. Construction and Building Materials, 2019, 217: 216-225.
- [7] 沙建芳,徐海源,刘建忠,等.新旧混凝土界面粘结性能研究[J]. 新型建筑材料,2019,46(10):133-135,151.
  SHA Jianfang, XU Haiyuan, LIU Jianzhong, et al. Study on interfacial bonding behavior of new and old concrete[J]. New Building Materials, 2019,46(10):133-151,151. (in Chinese)
- [8] 闫东明,陈士堃,徐世烺.钢筋-地聚合物混凝土黏结性能研究
   [J].水利学报, 2016, 47(9): 1167-1176.
   YAN Dongming, CHEN Shikun, XU Shilang. Bond behavior between rebar and geopolymer concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(9): 1167-1176. (in Chinese)
- [9] ROMANAZZI V, LEONE M, AIELLO M A, et al. Bond behavior of geopolymer concrete with steel and GFRP bars[J]. Composite Structures, 2022, 300: 116150.
- [10] 李克亮,马毅,陈爱玖,等.地聚合物混凝土界面过渡区粘结强

度研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(9): 139-142.

LI Keliang, MA Yi, CHEN Aijiu, et al. Study on ITZ bond strength of geopolymer concrete[J]. New Building Materials, 2020, 47(9): 139-142. (in Chinese)

- [11] ASTM International .Standard test method for bond strength of epoxy-resin systems used with concrete by slant shear: ASTM C882/C882M-13a[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- [12] ABU-TAIR A I, RIGDEN S R, BURLEY E. Testing the bond between repair materials and concrete substrate[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(6): 553-558.
- [13] 丁祖德,文锦诚,李晓琴,等.PVA-ECC与既有混凝土黏结面抗 渗及劈裂抗拉试验[J].建筑材料学报,2019,22(3):356-362.
  DING Zude, WEN Jincheng, LI Xiaoqin, et al. Impermeability and splitting tensile tests of PVA-ECC and existing concrete bonding interface[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 356-362. (in Chinese)
- [14] 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 Zhifang, ZHAO Guofan, LIU Jian, el al. Experimental study on adhesive tensile performance of young on old concrete
  [J]. Journal of Building Structure, 2001, 22(2):51-56. (in Chinese)
- [15] DIAB A M, ELMOATY A E M A, ELDIN M R T. Slant shear bond strength between self-compacting concrete and old concrete
   [J]. Construction and Building Materials, 2017, 130: 73-82.
- [16] SALDANHA R, JÚLIO E, DIAS-DA-COSTA D, et al. A modified slant shear test designed to enforce adhesive failure[J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 673-680.
- [17] 张鹏,亢洛宜,魏华,等. PVA 纤维和纳米 SiO<sub>2</sub> 对地聚合物 砂浆断裂性能的影响[J].建筑材料学报,2019,22(6): 986-992.

ZHANG Peng, KANG Luoyi, WEI Hua, et al. Effect of PVA fiber and nano-SiO<sub>2</sub> on fracture properties of geopolymer mortar [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6): 986-992. (in Chinese)

- [18] AUSTIN S, ROBINS P, PAN Y G. Shear bond testing of concrete repairs[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29 (7): 1067-1076.
- [19] LI F P, YANG Z M, CHEN D F, et al. Research on mechanical properties and micro-mechanism of engineering geopolymers composites(EGCs) incorporated with modified MWCNTs[J]. Construction and Building Materials, 2021, 303: 124516.