

TRC与老混凝土界面黏结力破坏模型*

尹世平^{1,2,3†}, 赵璐^{1,2,3}, 李鹏昊^{2,3}

(1.中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221008;
2.中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室,江苏 徐州 221116;
3.中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:采用双面剪切的试验方式研究了纤维编织网增强混凝土(Textile Reinforced Concrete, TRC)与老混凝土界面性能.依据塑性力学极限分析理论以及新老混凝土界面模型,修正了TRC与老混凝土界面模型,推导了常规环境下二者界面最大黏结力的理论计算公式.在此基础上,根据不同氯盐干湿循环次数影响下二者界面黏结力的试验值,拟合得到环境影响系数.据此推导了氯盐干湿循环下TRC与老混凝土界面黏结力的理论计算公式.通过对比理论计算值与试验值的相对误差,检验了理论模型及计算公式的正确性.

关键词:纤维编织网增强混凝土(TRC);界面性能;界面模型;氯盐干湿循环;劣化;环境影响系数

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

Failure Model of Bond Force between TRC and Old Concrete

YIN Shiping^{1,2,3†}, ZHAO Lu^{1,2,3}, LI Penghao^{2,3}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The interfacial properties between textile reinforced concrete (TRC) and existing concrete were studied by double-side shear tests. Based on the plasticity limit analysis theory and the interface model between new and old concrete, the interface model of TRC and conventional concrete was modified, and the theoretical calculation formula of maximum cohesive force between their interfaces under the conventional environment was derived. Subsequently, according to the experimental results of the interfacial bond strength between their interfaces under the effect of different number of sodium chloride solution wet-dry cycles, the environmental impact coefficient was fitted. The theoretical calculation formula of the bond strength between the TRC and conventional concrete under wet-dry cycle was then derived. By comparing the relative error between theoretical and experimental results, the correctness of the theoretical model and calculation formula were verified.

Key words: textile reinforced concrete(TRC); interfacial properties; interface model; chloride wet-dry cycle; deterioration; environmental impact coefficient

* 收稿日期:2017-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478458), National Natural Science Foundation of China(51478458)

作者简介:尹世平(1978—),男,山东高密人,中国矿业大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: yinshiping2821@163.com

TRC材料是一种新型的混凝土加固材料,其与老混凝土加固界面主要由TRC、老混凝土及细粒混凝土界面剂组成,二者界面黏结力主要由TRC性能、老混凝土性能、界面粗糙度等因素决定。目前,关于TRC与老混凝土界面黏结-滑移模型和理论计算的研究较少^[1-2]。Ambrisi等^[1]通过试验研究了TRC与老混凝土的界面黏结-滑移关系,但是没有推导界面黏结力的计算公式;Ortlepp等^[2]提出了TRC与老混凝土界面剪切破坏模型以及最大黏结力的计算公式,但需要测量界面开裂长度以及对应的剪切强度,不便于实际应用。为方便计算TRC与老混凝土界面最大黏结力,本文依据塑性力学极限分析理论以及新老混凝土界面模型,推导了二者界面黏结力理论计算公式,利用双面剪切试验的数据拟合了氯盐干湿循环对二者界面黏结力的影响系数,并通过对比理论计算值与试验值的相对误差,检验了理论模型及计算公式的正确性。

1 试验概况

1.1 试验构件的设计与制作

本试验制作了6组TRC与老混凝土界面黏结性能的试件,编号为G1~G6,试件每组3个,共采用3种强度等级的混凝土。在300 mm×100 mm×100 mm标准试模中浇筑。C40混凝土采用42.5R级普通硅酸盐水泥,C30与C20两种型号混凝土采用32.5R级普通硅酸盐水泥;粗骨料采用粒径5~10 mm的碎石;细骨料采用细度模数为2.7的中砂;水为城市自来水;减水剂为聚羧酸高效引气减水剂。

浇筑好的混凝土在室温养护24 h后拆模,然后在标准养护室内养护27 d。混凝土的种类及实验室配合比见表1。

表1 混凝土配合比

Tab.1 Mix proportion of concrete

混凝土型号	配合比/(kg·m ⁻³)				
	水泥	水	细骨料	粗骨料	减水剂
C40	415	161	643	1 181	2.85
C30	459	188	542	1 206	—
C20	404	190	542	1 264	—

实测经28 d养护后的混凝土立方体抗压强度见表2。

纤维编织网的组成主要包括相互垂直的碳纤维束和玻璃纤维束:碳纤维束为增强纤维,应用于主要受力方向;玻璃纤维束为固定纤维,应用于非受力方向。表3为碳纤维与玻璃纤维的物理力学参

数。纤维编织网网格尺寸为10 mm×10 mm,厚度约为2 mm,以往研究^[3-4]表明,对纤维编织网进行环氧树脂浸渍-黏砂处理,可以增加纤维编织网表面粗糙度,提高纤维编织网与细粒混凝土间的黏结性能,还可以改善玻璃纤维的耐腐蚀性能。在本试验中,对纤维编织网进行环氧树脂浸渍-黏砂处理,选用粒径为0.6~1.2 mm的石英砂,黏砂前后的纤维编织网如图1所示。选用细粒混凝土作为TRC基质,细粒混凝土配料中水泥采用52.5R级普通硅酸盐水泥;粉煤灰为I级粉煤灰;硅灰密度180 kg/m³,SiO₂质量分数92%。粗砂与细砂分别为粒径0.6~1.2 mm与0~0.6 mm的普通石英砂;水为城市自来水;减水剂为聚羧酸高效引气减水剂;配合比见表4。

表2 混凝土立方体抗压强度

Tab.2 Compressive strength of concrete

混凝土型号	混凝土抗压强度/MPa			老混凝土抗压强度均值/MPa	标准差
	1	2	3		
C40	43.49	45.19	46.88	45.19	1.695
C30	35.13	34.54	34.43	34.54	0.539
C20	23.69	24.13	24.59	24.13	0.450

表3 纤维编织网力学性能

Tab.3 Mechanical properties of textile

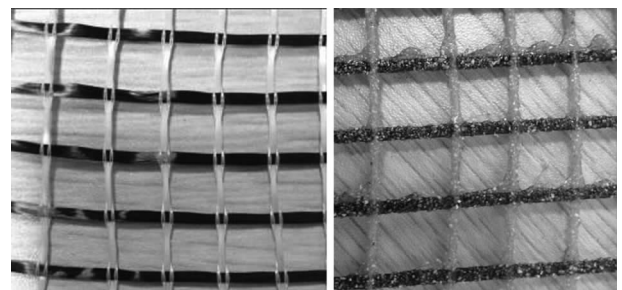
纤维类型	每束纤维根数	单丝纤维抗拉强度	单丝纤维弹性模量	单丝纤维断裂伸长率	纤维束线密度/ Tex	纤维束密度/(g·cm ⁻³)
		/MPa	/GPa	/%		
T700S	12k	4 660	231	2	801	1.78
E-glass	4k	3 200	65	4.5	600	2.58

注:1 Tex=1 g/km。

表4 细粒混凝土配合比

Tab.4 Mix proportion of fine-grained concrete kg/m³

水泥	粉煤灰	硅灰	水	细沙	粗砂	减水剂
475	168	35	262	460	920	9.1



(a)未处理的纤维编织网

(b)浸胶处理后的纤维编织网

图1 纤维编织网

Fig.1 Textile

实测28 d养护后细粒混凝土的立方体抗压强

度见表 5.

表 5 细粒混凝土立方体抗压强度

Tab.5 Compressive strength of fine-grained concrete

细粒混凝土强度/MPa			细粒混凝土强度均值/MPa	标准差
1	2	3		
51.36	52.79	53.04	52.40	0.906

TRC 加固层制作分为以下 3 个步骤:1)在 900 mm×450 mm 的木模板四周钉上 5 mm 厚木条,并在木模中浇筑厚度为 5 mm 的细粒混凝土并振捣密实;2)将纤维编织网给予一定的张力固定到模具四周木条上,木模四周再次钉上一层 5 mm 厚木条;3)再次浇筑 5 mm 厚的细粒混凝土并振捣密实. TRC 板在室温养护 24 h 后拆模,然后在标准养护室内养护 27 d. 养护后按试验设计,使用混凝土切割机将 TRC 板切出 100 mm×12 mm×200 mm 的截面尺寸.

在进行界面性能研究时,通常对老混凝土表面进行粗糙处理以增加其粗糙度^[5-6]. 目前常用的界面粗糙处理方式有钢刷刷洗、人工凿糙处理、高压水喷射处理等^[7-8]. 本试验对老混凝土表面进行人工凿糙处理,除去老混凝土表面的浮浆,露出粗骨料,增加粗糙度,并控制其灌沙深度 $\Delta h = 2 \sim 4$ mm.

TRC 加固老混凝土采用与 TRC 基体相同配合比的细粒混凝土作为界面黏结剂,加固过程分为以下 4 个步骤:1)清洗界面处理后的老混凝土及 TRC 板表面浮灰及污物;2)在老混凝土表面均匀铺设细粒混凝土 2~3 mm;3)把预制 TRC 板粘贴在已铺设细粒混凝土上,并保证 TRC 与老混凝土边缘对齐;4)在已粘贴并对齐的 TRC 板上放置重物,使 TRC 板与老混凝土黏结牢固.老混凝土一侧加固完成并室内养护 3 d 后,按步骤 1)~4)加固老混凝土另一侧. TRC 与老混凝土界面黏结性能试件的设计见表 6.

表 6 TRC 加固试件试验方案设计

Tab.6 Experiment design of TRC reinforcing specimens

编号	老混凝土等级	NaCl 溶液质量分数/%	干湿循环次数	循环频率
G1	C40	5	120	1 d/次
G2	C40	—	—	—
G3	C40	5	90	1 d/次
G4	C40	5	150	1 d/次
G5	C20	5	120	1 d/次
G6	C30	5	120	1 d/次

1.2 双面剪切试验设计

采用双面剪切试验研究 TRC 与老混凝土的界

面性能,即通过在老混凝土上方加载压力,得到在 TRC 与老混凝土构件同时或之一达到破坏时,最大压力值的大小.试验机采用位移控制模式正向单调加载,加荷速率为 0.5 mm/min,加载示意图如图 2 所示.在静力试验进行中,界面滑移变形由位移传感器测量,压力值由荷载传感器测量,每隔 10 s 通过由江苏东华测试技术股份有限公司生产的 GBD3816 静态应变测试分析系统采集位移和荷载传感器数据.双面剪切试验平均黏结强度按式(1)计算.

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

式中: σ 为界面平均黏结强度,MPa; Q 为界面最大黏结力,N; A 为界面面积, mm^2 ,取 $A = 2A_0$, A_0 为单侧界面面积.

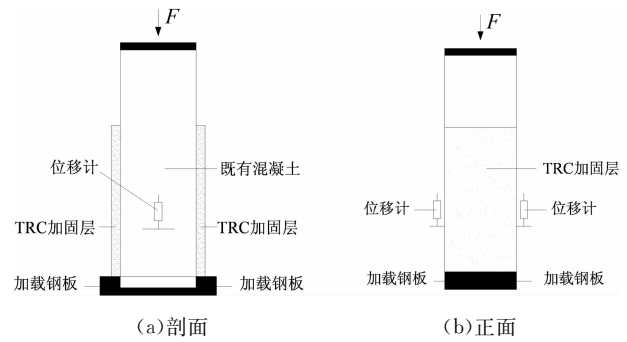


图 2 双面剪切加载示意图

Fig.2 Schematic diagram of double shear loading

2 试验结果与讨论

2.1 双面剪切试验结果

双面剪切试验结果列于表 7,分别从最大黏结力、最大界面变形滑移与平均黏结强度进行分析讨论.

表 7 双面剪切试验结果

Tab.7 Double sided shear test results

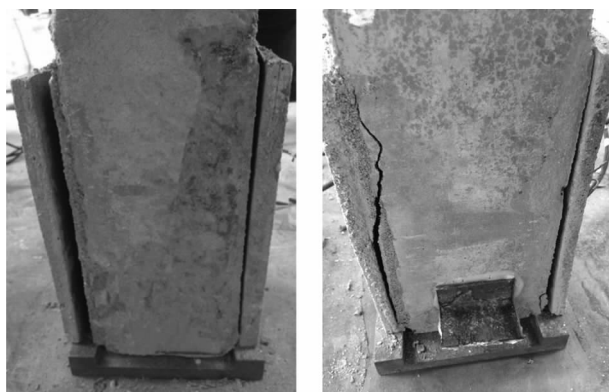
编号	最大黏结力 Q/kN	最大界面变形滑移 $\Delta C_r/\text{mm}$	平均黏结强度 σ/MPa	破坏形态
G1	61.10	0.480	1.526	双面剪切破坏
G2	106.30	0.555	2.657	双面剪切破坏
G3	74.58	0.530	1.864	双面剪切破坏
G4	51.10	0.305	1.278	双面剪切破坏
G5	60.95	0.400	1.524	双面剪切破坏
G6	63.40	0.440	1.585	双面剪切破坏

2.2 试件破坏形态分析

在双面剪切试验中,试件破坏过程及破坏特征

大致相同,破坏过程如下:在试验初始加载时,TRC与老混凝土界面受剪切力小,界面变形滑移较小,试件外观未发生明显变化,在竖向荷载接近极限荷载时,二者界面剪切力增加、界面竖向变形滑移增加,TRC出现横向变形,此时试件没有明显的破坏现象.继续加载,TRC与老混凝土界面下端出现裂缝,裂缝沿加固界面迅速自下而上延伸并贯穿整个加固界面,两侧TRC从老混凝土表面剥离,试件发生双面剪切破坏.破坏发生瞬间,界面内积聚的能量突然释放,发出较大声响.

G1~G6试件的破坏形式类似,均为双面剪切破坏,典型的双面剪切破坏形态如图3所示.破坏面多发生在TRC层与黏结剂之间,这主要是因为TRC层强度较高,但其光滑表面与黏结剂的黏合较弱,分离的TRC层上一般都附有剥离的界面黏结剂;有时黏结剂也会发生横断,少量的黏结破坏发生在黏结剂与老混凝土的界面上,破坏时黏结剂会带走少量的老混凝土,这主要是因为凿糙处理时老混凝土表面局部产生松动.



(a)TRC与黏结剂面 (b)部分老混凝土面

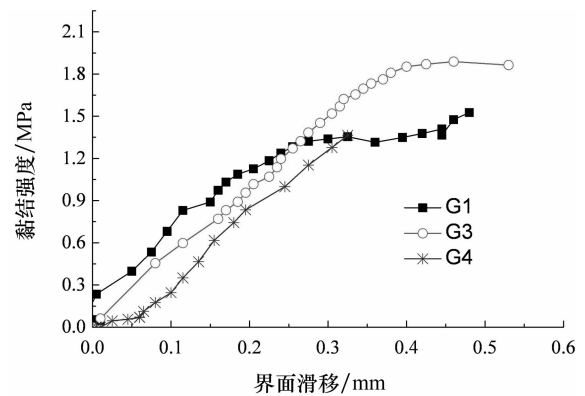
图3 双面剪切破坏形态

Fig. 3 Double side shear failure

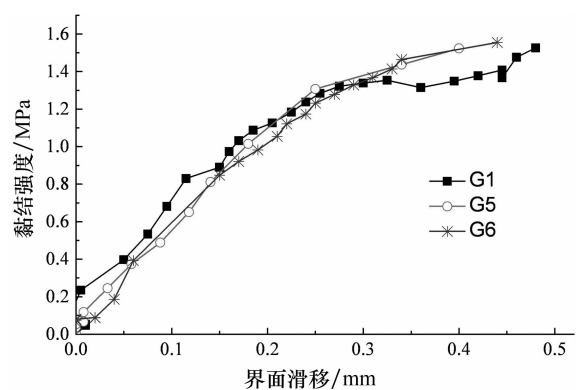
2.3 干湿循环次数的影响

不同氯盐干湿循环次数影响下,TRC与老混凝土的界面黏结强度-滑移曲线如图4(a)所示,在初始加载阶段,G4的界面初始滑移较大;若忽略初始界面滑移,3条曲线几乎重合.在加载过程中,G3曲线一直保持平稳上升;G1曲线在最大黏结强度附近发生界面滑动;G4在加载至51.10 kN时即发生破坏.破坏时,界面最大黏结强度随着氯盐干湿循环次数的增加而下降:由表7可知,G1的最大黏结强度为G3的81.9%,变形滑移为G3的90.6%;G4的最大黏结强度为G3的68.5%,变形滑移为G3的57.5%;氯盐干湿循环下TRC与老混凝土界面黏

结性能随着氯盐干湿循环次数的增加而下降.



(a) G1,G3,G4



(b) G1,G5,G6

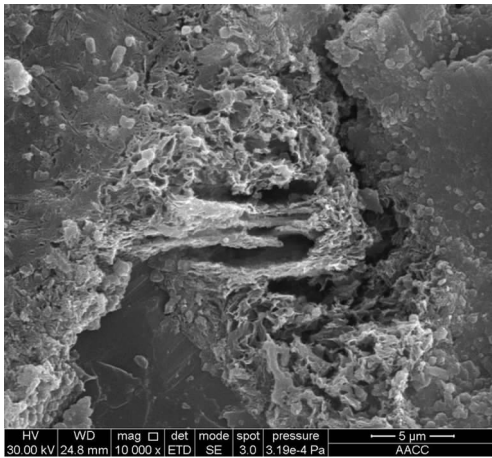
图4 界面黏结强度-滑移曲线

Fig.4 Interfacial bond strength-slip curves

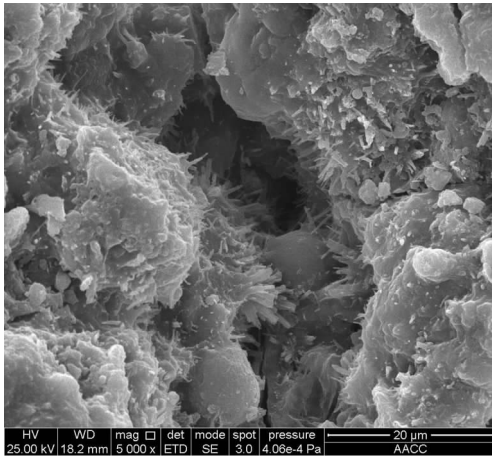
图5(a)(b)分别为G2与G4的SEM示意图,G2中的水化产物结构形式比较单一,以片网状为主,水化产物相互连接,基本填充骨料间孔隙.在微观结构中几乎不存在沿界面过渡区延伸的微裂缝,界面微观结构比较致密.G4骨料间孔隙中的水化产物以针簇状为主,G4的微观结构中未被水化产物填充的孔隙较多,在骨料间的裂缝比较明显.这表明,当氯盐干湿循环次数较多时,TRC与老混凝土界面微观结构会产生比较明显的劣化.主要原因是氯盐干湿循环次数增加使混凝土的干缩湿胀效应更显著,微观结构中骨料间的过渡区开裂,导致结构的整体性能下降.

2.4 老混凝土强度的影响

在氯盐干湿循环、不同老混凝土强度影响下,TRC与老混凝土界面黏结强度-滑移曲线,如图4(b)所示.在加载过程中,相同界面滑移下,G1、G5、G6的界面黏结强度差别较小.破坏时,G1、G5、G6的最大黏结强度基本相同,界面的最大变形滑移随着老混凝土强度等级的降低稍有下降,试验结果表



(a)G2



(b)G4

图 5 SEM 图

Fig.5 SEM diagrams

明,试件的黏结性能随着老混凝土强度的降低稍有下降。

分析认为有以下两个主要原因:一是因为老混凝土的水灰比发生变化,老混凝土强度越低,水灰比越高,微观结构越松散,孔隙越多,自由水及氯离子的渗透率越高,氯盐干湿循环对老混凝土及其与 TRC 界面的劣化作用更显著,二者界面性能越低;松散的微观结构会导致界面宏观粗糙度下降,机械啮合力降低,在界面剪切载荷作用下,老混凝土表面突出的细小颗粒物更容易被剪掉而发生滑移变形,TRC 与老混凝土界面黏结性能下降。二是老混凝土的强度下降对自身抗剪强度有明显的影响,但 TRC 与老混凝土的结合面的抗剪能力更为薄弱,破坏形态仍为双面剪切破坏。

3 常规环境下 TRC 与老混凝土界面黏结力计算

TRC 材料属于水泥基复合材料,TRC 与老混

凝土界面的性质与新老混凝土界面性质比较相似。因此,本节依据新老混凝土界面的理论计算模型,修正 TRC 与老混凝土界面的黏结-滑移模型,并据此推导常规环境下二者界面最大黏结力理论计算公式。

在新老混凝土界面模型中,赵志方等^[9]通过新老混凝土剪切试验提出的界面剪切破坏机构模型比较经典,并推导出了当新老混凝土界面发生剪切破坏时界面黏结力上限的计算公式,见式(2)。

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{6}hb(\sigma_{V1} + \sigma_{V4}) . \quad (2)$$

式中: σ_{V1} 、 σ_{V4} 分别为简单拉伸试验中老混凝土与新混凝土的轴心抗拉强度; h 、 b 分别为黏结面的高度和宽度。

在双面剪切试验中,G1~G6 试件的破坏形式,均为 TRC 与老混凝土界面发生双面剪切破坏。TRC 与老混凝土双面剪切破坏的特征与文献^[9]模型给出的新老混凝土界面剪切破坏的特征十分相似。因此,可以假设 TRC 与老混凝土界面的黏结-滑移模型属于新老混凝土界面剪切破坏模型的一种。

引用公式(2),将式中变量替换为 TRC 和老混凝土的轴心抗拉强度。又因为 TRC 由纤维编织网和细粒混凝土组成,纤维编织网的桥联作用可以提高细粒混凝土的拉伸性能^[10],因此可表示为:

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{6}hb(\sigma_{S1} + n \cdot \sigma_{S3}) . \quad (3)$$

式中: σ_{S1} 为简单拉伸试验中的老混凝土轴心抗拉强度; n 为纤维编织网对细粒混凝土轴心抗拉强度的增强系数; σ_{S3} 为细粒混凝土的轴心抗拉强度。

试验根据双面剪切试验中 G2 的最大界面黏结力,计算纤维编织网的增强系数 n ,结果见表 8。其中,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),混凝土轴心抗拉强度与立方体抗压强度可用式(4)换算。

$$f_{tk} = 0.395f_{cu,k}^{0.55} . \quad (4)$$

式中: f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度。

表 8 纤维编织网增强系数的计算

Tab.8 Calculation of textile enhancing coefficient

试件编号	老混凝土抗压强度 /MPa	细粒混凝土抗压强度 /MPa	试验值/kN	纤维编织网增强系数	平均值
G2-1	45.19	52.40	105.05	1.689	
G2-2	45.19	52.40	105.15	1.691	1.720
G2-3	45.19	52.40	108.70	1.779	

4 氯盐干湿循环下 TRC 与老混凝土界面黏结力计算

在氯盐干湿循环下,TRC 与老混凝土的性能均会发生损伤劣化^[11-13],但氯盐干湿循环对二者之间界面性能的影响规律尚不明确.本节利用常规环境下 TRC 与老混凝土之间最大界面黏结力的理论计算公式,结合氯盐干湿循环下各试件的 TRC 与老混凝土双面剪切试验的结果,探究氯盐干湿循环次数及老混凝土强度对二者最大界面黏结力的影响,并验证上面推导的计算模型及公式的准确性.

4.1 氯盐干湿循环下的环境影响系数

在氯盐干湿循环作用下,TRC 与老混凝土界面最大黏结力随循环次数增加而降低,为充分体现氯盐干湿循环对二者界面黏结力的影响,引入关于界面黏结力 Q 的环境影响系数 α , α 值与氯盐干湿循环次数有关.考虑氯盐干湿循环次数的界面黏结力 Q 可以表示为:

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{6} a h b (\sigma_{s1} + n \cdot \sigma_{s3}) . \quad (5)$$

分别选用常规环境,氯盐干湿循环 90 次、120 次、150 次的试件的黏结力确定环境影响系数 α .通过线性回归方式对不同循环次数试件的界面黏结力

进行拟合,拟合结果见图 6.

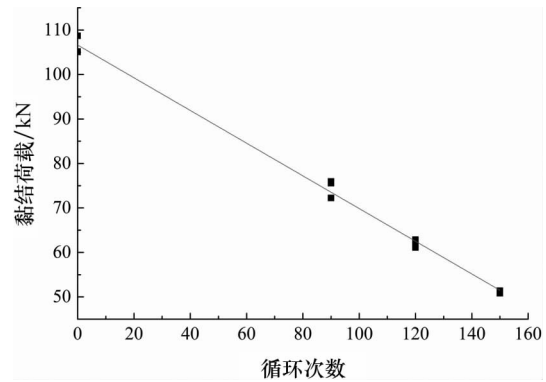


图 6 循环次数-界面黏结力的关系
Fig.6 The relationship between cycle times and interfacial bond force

根据拟合结果,界面黏结力 Q 的关系表达式为:

$$Q = 106.62 - 0.36755 N . \quad (6)$$

式中: N 为氯盐干湿循环次数.

据此,环境影响系数 α 可表示为:

$$\alpha = 1 - 0.003447 N . \quad (7)$$

4.2 理论计算值与试验值对比

根据公式(4)(5)(7),分别计算不同氯盐干湿循环次数、老混凝土强度等级试件的最大界面黏结力的理论值,并与各试件的试验值进行对比,结果见表 9.

表 9 氯盐干湿循环中 TRC 与老混凝土界面黏结力理论值与试验值

Tab.9 Theoretical and experimental values of interface bond force between TRC and old concrete under chloride wet-dry cycles

试件编号	老混凝土抗压强度/MPa	细粒混凝土抗压强度/MPa	氯盐干湿循环次数	黏结力理论值/kN	黏结力试验值/kN	相对误差/%
G1-1	45.19	52.40	120	62.34	60.05	3.67
G1-2	45.19	52.40	120	62.34	62.25	0.14
G1-3	45.19	52.40	120	62.34	60.85	2.39
G3-1	45.19	52.40	90	73.33	75.55	-3.03
G3-2	45.19	52.40	90	73.33	72.24	1.49
G3-3	45.19	52.40	90	73.33	75.95	3.57
G4-1	45.19	52.40	150	51.34	51.40	0.12
G4-2	45.19	52.40	150	51.34	50.80	1.05
G5-1	24.13	52.40	120	55.99	60.45	-7.97
G5-2	24.13	52.40	120	55.99	60.60	-8.23
G5-3	24.13	52.40	120	55.99	61.80	10.38
G6-1	34.54	52.40	120	59.34	64.25	-8.27
G6-2	34.54	52.40	120	59.34	61.00	-2.80
G6-3	34.54	52.40	120	59.34	64.95	-9.45

结果表明,理论值与试验值相对误差较小,该公式可较好地估算氯盐干湿循环下 TRC 与老混凝土界面的最大黏结力.

5 结论

1)根据新老混凝土界面的理论计算模型与常规环境下试件的试验数据,得到常规环境下 TRC

与老混凝土界面最大黏结力的理论计算公式.

2) 根据不同氯盐干湿循环次数影响下二者界面黏结力的试验值, 拟合得到环境影响系数, 继而建立了氯盐干湿循环与常规环境下 TRC 与老混凝土界面黏结力理论计算公式间的联系, 从而得到氯盐干湿循环下 TRC 与老混凝土界面黏结力理论计算公式.

3) 考虑氯盐干湿循环次数, 通过公式(5) 计算 TRC 与老混凝土界面最大黏结力, 理论值与试验值吻合良好.

参考文献

- [1] AMBRISI A, FEO L, FOCACCI F. Bond-slip relations for PBO-FRCM materials externally bonded to concrete [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(8): 2938—2949.
- [2] ORTLEPP R, HAMPEL U, CURBACH M. A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2006, 28: 589—597.
- [3] BUTLER M, MECHTCHERINE V, HEMPEL S. Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: effect of the matrix composition[J]. *Materials and Structures*, 2010, 43(10): 1351—1368.
- [4] SILVA F, BUTLER M, MECHTCHERINE V, *et al.* Strain rate effect on the tensile behaviour of textile-reinforced concrete under static and dynamic loading[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(3): 1727—1734.
- [5] 张勤. 织物增强混凝土(TRC)加固 RC 梁正截面抗弯性能试验研究[D]. 镇江: 江苏大学土木工程与力学学院, 2009: 67—68.
- ZHANG Q. Experimental study on flexural behavior of RC beams strengthened with fabric reinforced concrete (TRC) [D]. Zhenjiang: School of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, 2009: 67—68. (In Chinese)
- [6] 李鹏昊, 尹世平, 王玄玄, 等. 界面形式对纤维编织网增强混凝土与混凝土界面的影响[J]. *工业建筑*, 2015, 45(9): 117—120.
- LI P H, YIN S P, WANG X X, *et al.* The effect of interfacial pattern on textile reinforced concrete (TRC) and existing concrete interface[J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(9): 117—120. (In Chinese)
- [7] 李平先, 郭进军, 赵国藩, 等. 冻融时引气剂对新老混凝土黏结面劈裂抗拉性能影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(7): 886—892.
- LI P X, GUO J J, ZHAO G F, *et al.* Experimental study on influence of cyclic freeze-thaw on tensile strength of bonding interface between fresh and old concrete mixed with air-entraining agent [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(7): 886—892. (In Chinese)
- [8] 荀勇, 肖保辉, 张勤, 等. 织物增强混凝土与钢筋混凝土构件界面黏结性能试验研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2011, 37(4): 55—59.
- XUN Y, XIAO B H, ZHANG Q, *et al.* Experimental study on interfacial bond behavior of fabric reinforced concrete and reinforced concrete member[J]. *Sichuan Building Science Research*, 2011, 37(4): 55—59. (In Chinese)
- [9] 赵志方, 周厚贵, 袁群, 等. 新老混凝土黏结机理研究与工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 100—107.
- ZHAO Z F, ZHOU H G, YUAN Q, *et al.* Research and engineering application of new and old concrete bonding mechanism [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2003: 100—107. (In Chinese)
- [10] BARHUM R, MECHTCHERINE V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 92: 56—71.
- [11] 尹世平, 王波, 王玄玄, 等. 氯盐干湿循环下纤维编织网增强混凝土力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(4): 752—757.
- YIN S P, WANG B, WANG X X, *et al.* Mechanical performance of textile reinforced concrete under chloride salt dry-wet cycle[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(4): 752—757. (In Chinese)
- [12] 吴泽媚. 氯盐和冻融对混凝土破坏特征及机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2012: 19—22.
- WU Z M. Study on the damage characteristics and mechanism of concrete by chlorine salt and freezing thawing [D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012: 19—22. (In Chinese)
- [13] 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 混凝土在硫酸盐、氯盐溶液中的损伤过程[J]. *硅酸盐学报*, 2006, 34(5): 630—635.
- JIN Z Q, SUN W, ZHANG Y S, *et al.* The damage process of concrete in chlorine salt solution [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2006, 34(5): 630—635. (In Chinese)