

文章编号:1007-9629(2021)06-1208-08

锈蚀钢绞线与混凝土的黏结性能

刘云雁, 范颖芳, 李秋超

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:基于湿盐砂环境下锈蚀钢绞线混凝土试件中心拔出试验,分析了钢绞线锈蚀率、黏结长度、箍筋及碳纤维增强聚合物(CFRP)条带加固对锈蚀钢绞线混凝土黏结-滑移曲线、黏结强度及失稳模式等黏结性能的影响.结果表明:CFRP条带及箍筋减少了混凝土劈裂破坏的发生;随着钢绞线锈蚀率的增大,黏结-滑移曲线由微上升滑移、微下降、强化及平稳下降四阶段转变为微上升滑移及快速下降两阶段;以锈蚀率1.50%为界,混凝土初始黏结强度及黏结强度随锈蚀率增大呈先增大后降低趋势,随黏结长度增大,初始黏结强度分布范围及最大黏结强度明显下降;建立了锈蚀钢绞线混凝土的归一化黏结强度计算式,计算值与试验值较吻合.

关键词:湿盐砂环境;钢绞线混凝土;拉拔试验;黏结性能;黏结强度

中图分类号:TB302

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.012

Bonding Properties between Corroded Steel Strand and Concrete

LIU Yunyan, FAN Yingfang, LI Qiuchao

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Based on the central pull-out test of corroded steel strand concrete samples under wet salt sand condition, the influences of corrosion ratio of steel strand, bonding length, steel stirrups and carbon fiber reinforced plastics (CFRP) strips to the bonding properties of bond-slip curves, bonding strength and failure modes were analyzed. The results indicate that occurrence of concrete spitting failure is reduced by CFRP strips and steel stirrups. With the increase of corrosion ratio of steel strand, the bond-slip curves of steel strand change from four stages of slight upward slip, slight downward, strengthening and steady downward to two stages of slight upward and rapid downward. With the corrosion ratio of 1.50% as a dividing, the initial bonding strength and bonding strength increases firstly and then decreases with the corrosion ratio. With the increase of the bonding length, the distribution range of initial bonding strength and maximum bonding strength decrease significantly. A formula of normalized bonding strength of corroded steel strand concrete under chloride environment is established, the calculated values are in good agreement with the test values.

Key words: wet salt sand condition; steel strand concrete; pull-out test; bonding property; bonding strength

242起预应力混凝土结构力筋失效事件中,环境侵蚀造成的锈蚀事件达23%^[1].预应力混凝土结构因其复杂的力学特性,极易遭受外界环境的侵蚀影响,诱发钢筋腐蚀.中国海岸线绵长,盐碱地分布广泛,冬季除冰盐大量使用,氯盐环境侵蚀十分普遍.

目前,国内外学者对钢绞线与混凝土间的黏结性能开展了试验研究^[2-5],提高混凝土强度、增大保护层厚度、降低相对锚固长度、掺加不同特性纤维复合材料均有利于提高黏结强度,且钢绞线的根数^[6]、表面粗糙度^[7]、养护龄期^[8]及温度^[9]等同样对其性能有

收稿日期:2020-08-18; 修订日期:2020-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578099)

第一作者:刘云雁(1987—),女,山西大同人,大连海事大学博士生.E-mail:liuyunyan925@126.com

通讯作者:范颖芳(1972—),女,河南开封人,大连海事大学教授,博士生导师,博士.E-mail:fanyf72@aliyun.com

一定影响.此外,黏结性能对预应力混凝土结构的有效预应力传递等影响较关键.Vázquez-Herrero等^[10-12]研究了有效预应力在轻质混凝土及不同强度混凝土中的传递长度、钢绞线的滑移程度及黏结强度.在此基础上,部分学者开展了氯盐环境下钢绞线混凝土的黏结性能研究.Li等^[13]建立了锈蚀钢绞线极限黏结强度退化系数与锈胀裂缝宽度的关系,未分析锈蚀率的劣化影响.Wang等^[14]建立了长黏结钢绞线混凝土黏结强度随锈蚀率的衰减规律.刘云雁等^[15]、Wang等^[16]研究了弯曲荷载作用下锈蚀钢绞线的黏结滑移行为.目前,氯盐环境下普通钢筋与混凝土的黏结性能研究较全面^[17],锈蚀钢绞线与混凝土黏结性能的劣化研究仍然有限,亟须深入开展.

本文对54个钢绞线混凝土试件开展了湿盐砂加速腐蚀及中心拔出试验,研究了锈蚀率(ρ)、黏结长度(L_i)、箍筋及碳纤维增强聚合物(CFRP)条带加固等因素对钢绞线混凝土黏结性能的影响,进而分析了氯盐环境下钢绞线混凝土的黏结破坏机制.

1 试验

1.1 原材料

小野田P·O 42.5R级普通硅酸盐水泥;大沙河

C40,其配合比见表1.钢绞线为 $\phi 15.2$ 有黏结预应力钢绞线;箍筋为HPB300级 $\phi 8.0$ 光圆钢筋;CFRP布厚0.167 mm.钢绞线、箍筋、CFRP布的抗拉强度分别为1 860、270、3 494 MPa,弹性模量分别为195、210、240 GPa.

表1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of concrete

Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water	Water reducer	Fly ash
450.0	638.0	1040.0	159.0	12.8	60.0

1.2 试件制备

试件浇筑前,在模具两端安装聚氯乙烯(PVC)套管设置无黏结区,以减小拉拔试验中混凝土的局部挤压现象.浇筑尺寸分别为150 mm×150 mm×200 mm、150 mm×150 mm×280 mm、150 mm×150 mm×360 mm的钢绞线混凝土试件各18个,其相应的黏结长度 L_i 分别为80、160、240 mm.同尺寸18个试件中包括无箍筋(M)组、配箍筋(MSS)组、CFRP条带加固(MCS)组各6个.试件命名制度为:M80-X,M表示无箍筋组,80表示黏结长度80 mm,X=0、1、2、3、4、5(X=0的试件为对照组试件,其余分别对应腐蚀时间12、21、33、62、85 d);其他类推.钢绞线混凝土试件构造见图1.

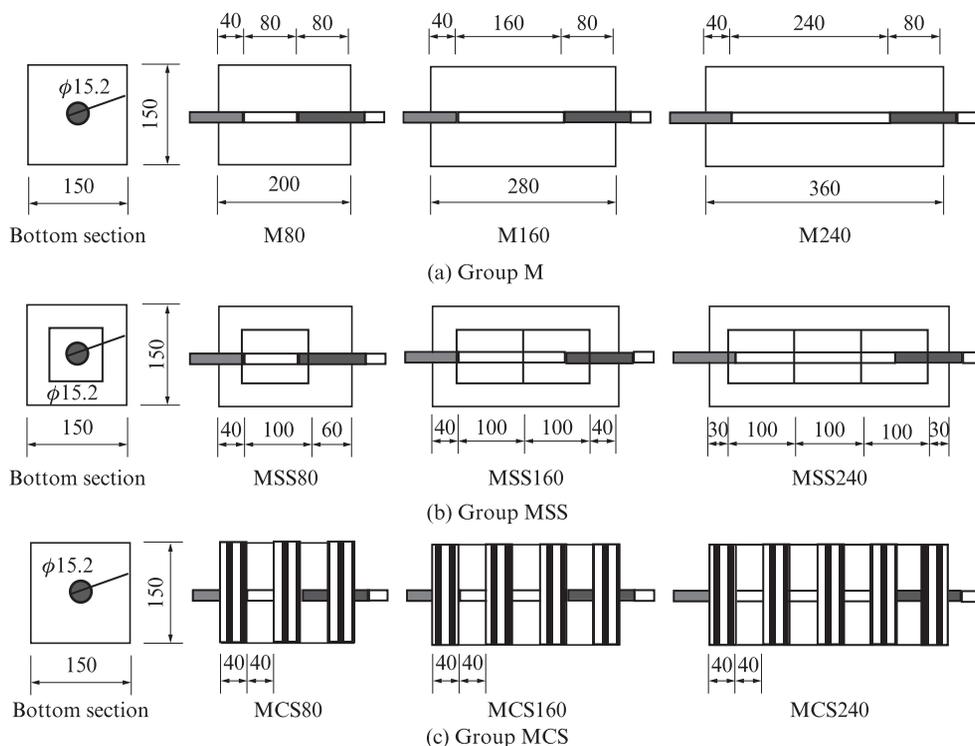


图1 钢绞线混凝土试件构造

Fig. 1 Structural diagrams of steel strand concrete samples (size: mm)

1.3 试验方法

1.3.1 加速腐蚀试验

用质量分数为5%的氯化钠溶液拌制含水率(质量分数)约20%的湿盐砂,将待腐蚀试件竖直埋置其中,钢绞线接直流电源阳极,试件四周环绕不锈钢网片接电源阴极,连通电源后进行电化学加速腐蚀.最大电压小于30 V,初始电流密度为 0.3 mA/cm^2 ,并实时记录.试件腐蚀时间为12、21、33、62、85 d,加速腐蚀试验示意图见图2.

1.3.2 中心拔出试验

将钢绞线混凝土试件置于支座上,钢绞线依次穿过带孔钢箱、穿心式千斤顶、30 t压力传感器,并通过锚具锚固.钢绞线自由端安装位移传感器,钢箱内钢绞线上水平安装搭载位移传感器及角度传感器的PVC盘,分别用于测量钢绞线自由端滑移值、加载端滑移值及旋转角度,并连接信号采集系统DH3817.

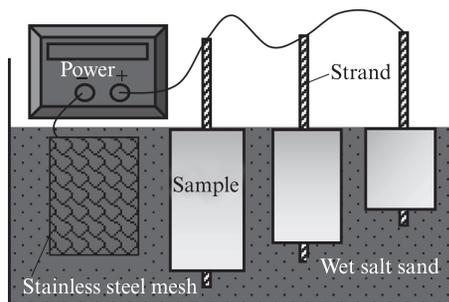


图2 加速腐蚀试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of accelerate corrosion test

中心拔出试验示意图见图3.其中位移传感器量程250 mm,精度0.002 mm;角度传感器量程 360° ,精度 0.005° .试验采用50 t锚杆拉力计对钢绞线进行分级拉拔,荷载等级10 kN,当钢绞线中心被拔出40 mm或混凝土劈裂破坏时,停止试验,并对有黏结区域钢绞线进行酸洗除锈并称重测长,根据钢绞线的线密度损失确定其实际质量损失率.

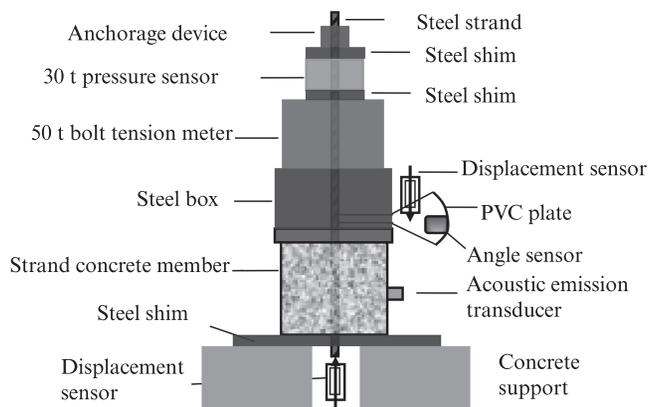


图3 中心拔出试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of central pull-out test

2 结果与讨论

2.1 钢绞线混凝土的锈蚀开裂特征

湿盐砂含水率低,使得钢筋表面湿润且流动性水溶液较少,避免了铁锈溢出,混凝土锈胀开裂明显,与钢筋锈蚀的自然进程较接近.图4为钢绞线的

典型锈蚀形态.由图4可见:随着锈蚀率 ρ 的增大,钢绞线表面首先出现微小的点蚀孔,随后发展为点蚀坑,再扩展为棱锥形、长椭球形及马鞍状蚀坑,并伴随显著的纤维状腐蚀条纹;当 $\rho > 8.00\%$ 时,钢绞线外表面腐蚀形态复杂,条状蚀坑达 $4 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$,钢丝截面积大幅减小.

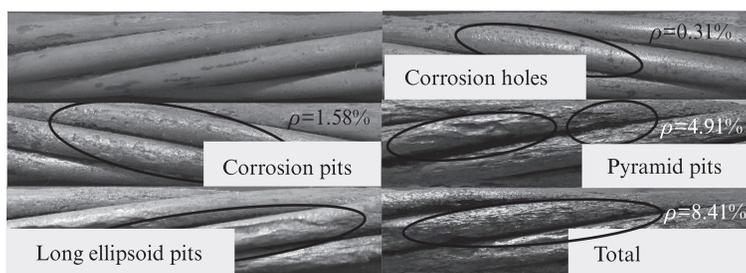


图4 钢绞线的典型锈蚀形态

Fig. 4 Typical corrosion morphologies of steel strand

图5为钢绞线混凝土典型的锈蚀开裂形态.由图5可见,腐蚀初期,混凝土表面出现红褐色锈斑,随后部分试件的混凝土保护层沿钢绞线走向均匀开裂,伴随少量红棕色铁锈析出.

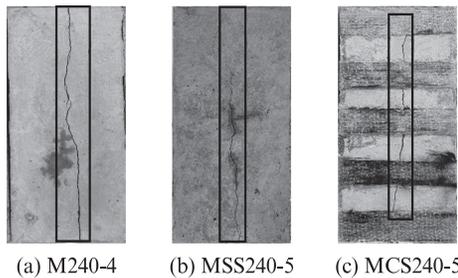


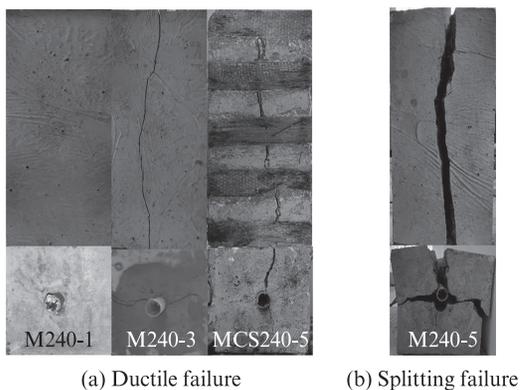
图5 钢绞线混凝土典型的锈蚀开裂形态

Fig. 5 Typical corrosion cracking morphologies of steel strand concrete

2.2 钢绞线混凝土的失稳模式

中心拔出试验中,钢绞线均出现正旋滑移现象,即“螺栓效应”.当锈蚀率 $\rho < 1.00\%$ 时,钢绞线拔出后,各试件混凝土均未开裂;随锈蚀率增大,M组试件新增开裂程度均高于MCS及MSS组;锈蚀率 $\rho > 4.66\%$ 时,仅M组试件出现劈裂破坏.由此可见,CFRP条带及箍筋提供了较强的横向约束力,有效抑制了混凝土劈裂破坏的发生.此外,本试验中不同黏结长度对钢绞线混凝土试件的失稳模式影响不明显.由于本试验数据有限,相关研究有待深入开展.

综上,本试验中钢绞线混凝土典型的失稳模式主要有2种:(1)钢绞线拔出,混凝土未出现开裂或出现新增微裂缝及锈胀裂缝二次扩张现象,发生延性破坏,见图6(a);(2)钢绞线拔出,发生劈裂破坏,见图6(b).



(a) Ductile failure (b) Splitting failure

图6 钢绞线混凝土典型的失稳模式

Fig. 6 Typical failure modes of steel strand concrete

2.3 钢绞线混凝土的黏结性能

2.3.1 黏结-滑移曲线

中心拔出试验中,钢绞线黏结应力 τ 沿黏结长度

L_f 变化,其计算公式见式(1).

$$\tau = \frac{F}{\pi d L_f} \quad (1)$$

式中: F 为拉拔力,N; d 为钢绞线直径,mm.

钢绞线混凝土加载端的黏结-滑移(τ - s)曲线见图7.由图7可见:加载初期,对照组试件的黏结应力逐渐由加载端向自由端传递,黏结-滑移曲线出现局部峰值后进入强化段,与徐有邻等^[18]得到的多段线式荷载滑移曲线较相似;与对照组试件相比,轻微锈蚀试件的黏结应力显著提高,黏结-滑移曲线相似,且更为饱满;锈蚀程度较高试件的黏结-滑移曲线达到局部应力峰值后骤然降低,并出现脆性破坏特征,与Li等^[13]得到的锈胀开裂钢绞线混凝土黏结-滑移曲线较相似.

钢绞线的锈蚀程度显著影响了钢绞线混凝土黏结-滑移曲线的发展模式,根据钢绞线锈蚀程度可将其黏结-滑移曲线分为两大类:四阶段曲线(无锈蚀及轻微锈蚀)和两阶段曲线(锈蚀程度较高),其典型曲线见图8.由图8(a)可见,钢绞线黏结-滑移曲线的四阶段为:(1)微上升滑移段(OA段),加载初期钢绞线滑移较小,达到初始黏结强度 $\tau_{0.25}$ (滑移0.25 mm时对应的黏结应力为初始黏结强度^[19])时,钢绞线与混凝土间化学胶着力完全丧失;当滑移值为0.50~1.00 mm时达到局部应力峰值 τ_f ;(2)微下降段(AB段),达到局部应力峰值后,钢绞线钢丝缝间的少量混凝土咬合齿断裂,黏结-滑移曲线出现微下降特征;(3)强化段(BC段),该阶段黏结应力增长缓慢,由于钢绞线钢丝缝间的混凝土咬合齿螺旋且连续,提供的机械咬合力使得黏结应力缓慢增长并趋于稳定,达到极限黏结应力 τ_u ,咬合齿断裂;(4)平稳下降段(CD段),锈蚀程度较低时,钢绞线混凝土滑移舱壁较完整(见图9(a)),仍可持续提供摩擦力,使得黏结滑移曲线缓慢下降并趋于稳定.由图8(b)可见,黏结-滑移曲线的两阶段为:(1)微上升滑移段(OA'段),该阶段与无锈蚀试件相似;(2)快速下降段(A'C'段),达到局部应力峰值 τ_f 后,混凝土咬合齿被切断并磨碎(见图9(b)),由于锈蚀裂缝贯通混凝土保护层,混凝土提供的横向约束能力及摩擦阻力降低,使得黏结应力持续下降.

2.3.2 初始黏结强度 $\tau_{0.25}$

钢绞线混凝土初始黏结强度与锈蚀率的关系见图10.由图10可见:少量锈蚀产物的填充提高了化学胶着力的强度,初始黏结强度随之提高;随着锈蚀率的增大,锈蚀产物的大量沉积瓦解了水泥石与钢绞线表面的有效黏接,导致初始黏结强度降低;随着黏结长度的增大,初始黏结强度分布范围

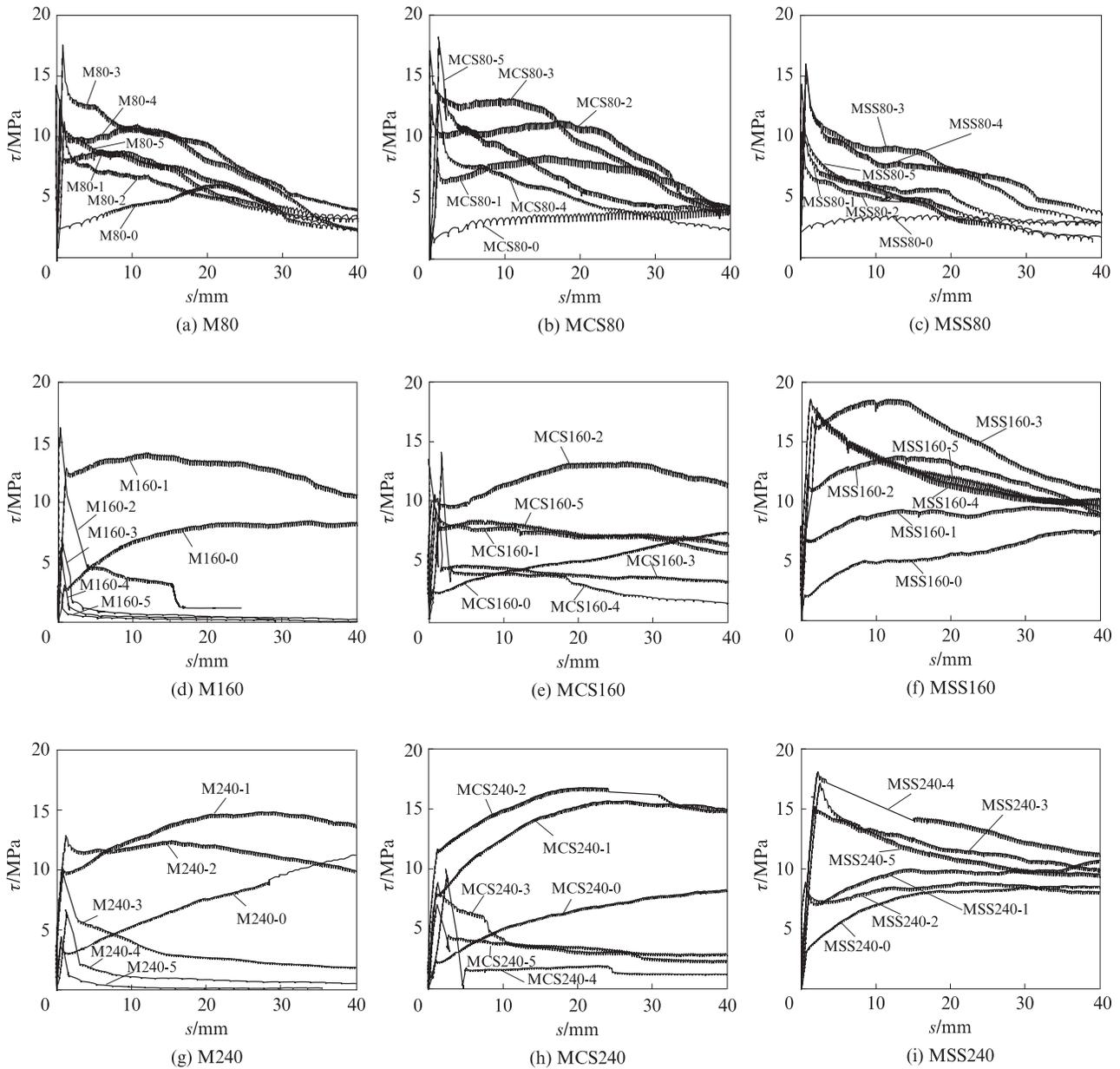


图7 钢绞线混凝土加载端的黏结-滑移曲线

Fig. 7 τ - s curves of corroded steel strand concrete on loaded end

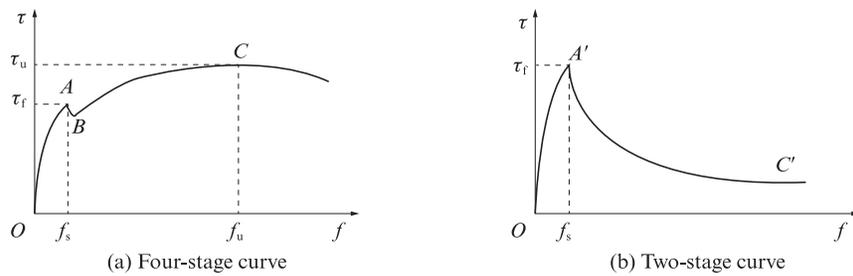
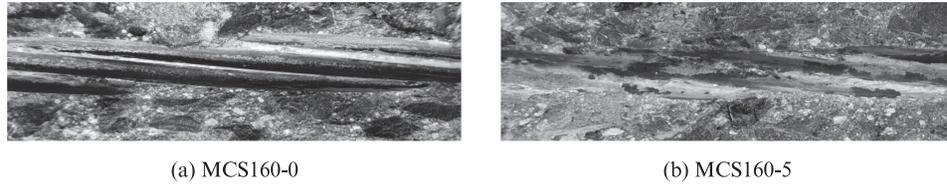


图8 典型钢绞线混凝土黏结-滑移曲线

Fig. 8 Typical bond-slip curves of steel strand concrete

由 1.17 ~ 13.67 MPa ($L_i=80$ mm) 降低至 0.68 ~ 9.42 MPa ($L_i=160$ mm) 及 0.60 ~ 7.71 MPa ($L_i=240$ mm), 这是因为随黏结长度增加, 钢绞线与混凝土

间化学胶着力分布的不均匀性进一步增大, 导致其初始黏结强度分布范围随之下降; 箍筋及 CFRP 条带对钢绞线混凝土初始黏结强度的影响不显著。



(a) MCS160-0

(b) MCS160-5

图9 钢绞线混凝土滑移舱

Fig. 9 Slip chamber of steel strand concrete

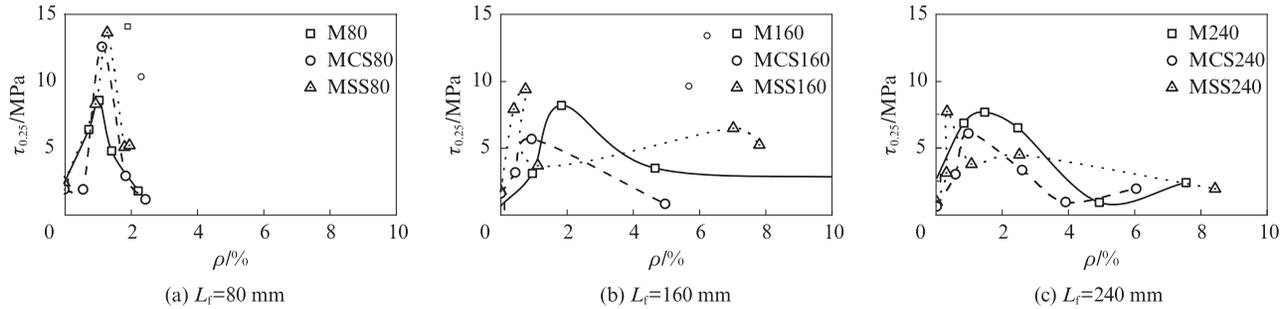


图10 钢绞线混凝土初始黏结强度与锈蚀率的关系

Fig. 10 Relationship between $\tau_{0.25}$ and corrosion ratio of steel strand concrete

本试验中约42.6%的试件初始黏结强度 $\tau_{0.25}$ 均达到局部黏结应力峰值的60%及以上,随后钢绞线发生快速滑移.因此,研究锈蚀率与初始黏结强度之间的关系,有助于对恶劣环境下预应力混凝土结构的耐久性问题进行预警,具有一定工程实际意义.

2.3.3 黏结强度 τ_s

部分学者采用钢绞线特征滑移为1.00 mm^[2, 18]或2.50 mm^[19-20]时对应的黏结应力作为黏结强度,用以评价钢绞线混凝土的黏结性能.本文认为该方法容易出现误差,故采用黏结-滑移曲线局部应力峰值 τ_i 作为黏结强度 τ_s .国内外学者通过试验研究表明,钢筋与混凝土的黏结强度会随着锈蚀率的增加呈先增大后降低的趋势,并将该转折点所对应的锈蚀率定义为关键锈蚀率^[17].锈蚀率-黏结强度曲线见图11.由图11可见,黏结强度 τ_s 的变化规律与初始黏结强度 $\tau_{0.25}$ 较相似:锈蚀率小于1.50%时(关键

锈蚀率),混凝土机械咬合齿较完整,有效提供了机械咬合力,少量锈蚀物质的填充使得钢绞线与混凝土间挤压力增大,摩擦力增强,黏结强度随之提高;随锈蚀程度增加,混凝土开裂,其所提供的环向约束力减小,大量疏松锈渍的填充不仅降低了混凝土与钢绞线间的摩擦力,且促进了混凝土机械咬合齿的断裂,使得黏结强度大幅衰减;黏结长度由80 mm增大至160、240 mm时,M组试件的最大黏结强度分别降低7.5%、26.6%,MCS组的最大黏结强度分别降低22.7%、36.0%,MSS组的最大黏结强度分别增大16.2%、13.1%;黏结长度为160、240 mm时,MSS组试件的黏结强度明显高于M组及MCS组.由此可见,随黏结长度增加,无箍筋组及CFRP条带加固组的黏结性能受到显著削弱;配置箍筋有效改善了混凝土对钢绞线的“握裹力”,促使黏结强度提高.

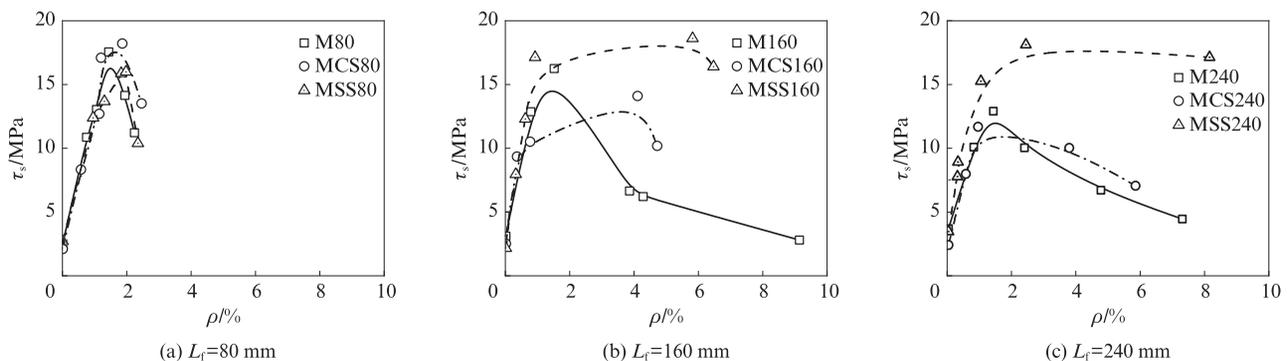


图11 锈蚀率-黏结强度曲线

Fig. 11 Curves of corrosion ratio versus bonding strength

2.3.4 归一化黏结强度 R

本文采用归一化黏结强度 $R^{[17]}$, 即各锈蚀试件黏结强度 $\tau_{s,i}$ 与相应对照组试件黏结强度 $\tau_{s,0}$ 之比, 来评价湿盐砂腐蚀对钢绞线与混凝土间黏结性能的劣化影响.

通过试验数据拟合分析可得 R 与箍筋间距 S_w 、黏结长度 L_f 及锈蚀率 ρ 间的关系, 见式(2)~(5):

$$R = \begin{cases} 1 + A\rho, & \rho \leq 1.50\% \\ 0.74 + Be^{-\rho/C}, & \rho > 1.50\% \end{cases} \quad (2)$$

$$A = 17 \times \frac{d}{S_w} - 0.27 \times \frac{L_f}{d} + 5.9 \quad (3)$$

$$B = 147.9 \times \frac{d}{L_f} + 28.79 \times \frac{d}{S_w} - 5.27 \quad (4)$$

$$C = 0.23 \times \frac{L_f}{d} + 18.06 \times \frac{d}{S_w} \quad (5)$$

式中: A 、 B 、 C 表示箍筋间距 S_w 及黏结长度 L_f 对 R 值的影响; 常数项 0.74 表示其他因素对 R 值的影响; 通过截面等效法将 CFRP 条带近似等效为间距 155 mm 的 $\phi 8$ 光圆箍筋, 无箍筋试件可认为箍筋间距无限大.

归一化黏结强度的试验值及计算值见图 12. 由图 12 可见: R 的试验值与箍筋间距近似负相关, 与黏结长度近似正相关; M 组试件 R 的试验值与计算值误差小于 10%, 吻合较好; MSS 组及 MCS 组中约 73% 的试验值与计算值误差小于 15%, 基本吻合; 锈蚀率较高时, 试验数据较离散, 不予考虑.

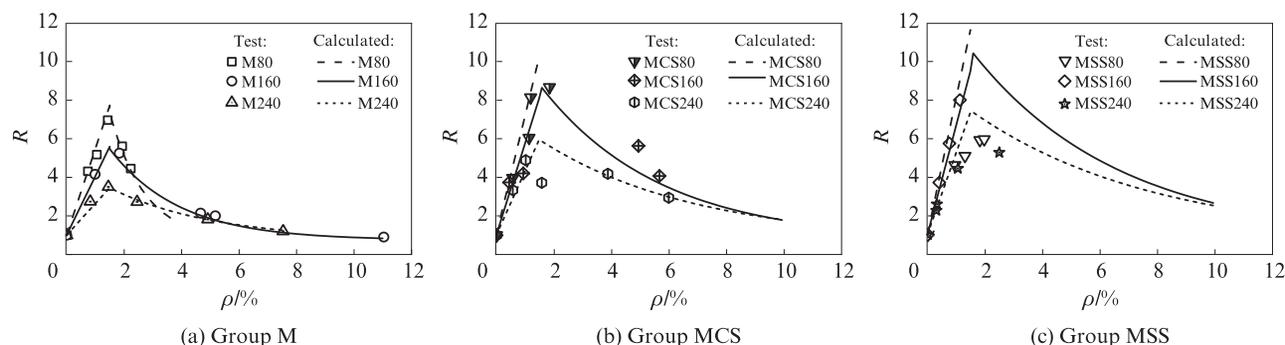


图 12 归一化黏结强度的试验值及计算值

Fig. 12 Test values and calculated values of normalized bond strength R

由前文可知, 本试验黏结强度随湿盐砂腐蚀程度变化的关键锈蚀率约为 1.50%, 对应的锈蚀裂缝宽度小于 0.14 mm, 钢绞线黏结长度及相对箍筋间距对其影响不明显. Wang 等^[14] 基于长黏结钢绞线的拉拔试验得到的关键锈蚀率约为 6.00%, 且裂缝宽度较大, 与本文结果相差较大; Li 等^[13] 对锈蚀短黏结钢绞线进行偏心拉拔试验, 得到关键锈蚀率所对应的裂缝宽度约为 0.10 mm, 与本文结果较相近. 关键锈蚀率表征黏结性能开始出现退化的趋势, 试验方法、试件尺寸、混凝土力学性能、钢筋直径、腐蚀工况等因素均会对其产生影响, 相关研究表明, 普通带肋钢筋所对应的关键锈蚀率约为 0.50%~2.50%^[17], 而锈蚀钢绞线的相关研究仍未达成统一定论, 亟须深入开展.

3 结论

(1) 湿盐砂腐蚀显著影响了钢绞线混凝土的黏结-滑移曲线发展规律. 钢绞线锈蚀率较小时, 其黏结-滑移曲线主要经历微上升滑移、微下降、强化及平稳下降四阶段; 随锈蚀率增大, 黏结滑移曲线转变

为微上升滑移及快速下降两阶段.

(2) 以关键锈蚀率 1.50% 为转折点, 初始黏结强度及黏结强度随锈蚀率增大呈先增大后降低趋势. 黏结长度由 80 mm 增大至 160、240 mm 时, 初始黏结强度由 1.17~13.67 MPa 分别下降至 0.68~9.42、0.60~7.71 MPa, 配箍筋组最大黏结强度分别增大了 16.2%、13.1%, 无箍筋组及 CFRP 条带加固组均明显下降. 配置箍筋有效提高了钢绞线混凝土黏结强度, CFRP 条带及箍筋对初始黏结强度影响较小, 但显著抑制了混凝土的劈裂破坏.

(3) 建立了与箍筋间距、黏结长度及钢绞线锈蚀率有关的钢绞线混凝土归一化黏结强度计算式, 各组试件的计算值与试验值误差均小于 15%, 吻合较好.

参考文献:

- [1] PODOLNY W. Corrosion of prestressing steels and its mitigation[J]. PCI Journal, 1992, 37: 34-55.
- [2] 徐有邻, 宇秉训, 朱龙, 等. 钢绞线基本性能与锚固长度的试验研究[J]. 建筑结构, 1996(3): 34-38, 53.

- XU Youlin, YU Bingxun, ZHU Long, et al. Experimental study of essential properties of strand and development lengths [J]. *Building Structure*, 1996(3):34-38, 53. (in Chinese)
- [3] 谢新莹,周威,王宇扬. 钢绞线混凝土黏结性能试验与锚固长度分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(12):81-88.
XIE Xinying, ZHOU Wei, WANG Yuyang. Experimental analysis of bond property and anchorage length for strands[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(12):81-88. (in Chinese)
- [4] CHAO S H, NAAMAN A E, PARRA-MONTESINOS G J. Bond behavior of strand embedded in fiber reinforced cementitious composites[J]. *PCI Journal*, 2006, 51(6):56-71.
- [5] BARAN E, AKIS T, YESILMEN S. Pull-out behavior of prestressing strands in steel fiber reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28(1):362-371.
- [6] 杜毛毛,苏小卒,赵勇. 带肋钢筋和钢绞线黏结性能试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(2):175-181.
DU Maomao, SU Xiaozu, ZHAO Yong. Experimental study on bond behavior of ribbed bar and strand[J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(2):175-181. (in Chinese)
- [7] GUSTAVSON R. Experimental studies of the bond response of three-wire strands and some influencing parameters[J]. *Materials and Structures*, 2004, 37(2):96-106.
- [8] LEE C D, SHIN S M, LEE S H, et al. Modeling of bond stress-slip relationships of a strand in concrete during steam curing [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2017, 11(3):477-487.
- [9] XIE J, SIMIYU E S, LEI G C, et al. Experimental study on bonding properties between steel strand and concrete at cryogenic temperatures [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2016, 22(4):308-316.
- [10] VÁZQUEZ-HERRERO C, MARTÍNEZ-LAGE I, AGUILAR G, et al. Evaluation of strand bond properties along the transfer length of prestressed lightweight concrete members [J]. *Engineering Structures*, 2013, 49:1048-1058.
- [11] LI S P, SONG C. Experimental research on bond anchorage performance of 1860-grade high-strength steel strands and lightweight aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235:117482.
- [12] MARTÍ-VARGAS JR, HALE W M, GARCÍA-TAENGUA E, et al. Slip distribution model along the anchorage length of prestressing strands [J]. *Engineering Structures*, 2014, 59:674-685.
- [13] LI F M, YUAN Y S. Effects of corrosion on bond behavior between steel strand and concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38:413-422.
- [14] WANG L, ZHANG X H, ZHANG J R, et al. Simplified model for corrosion-induced bond degradation between steel strand and concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(4):04016257.
- [15] 刘云雁,范颖芳,喻建,等. 氯盐环境下锈蚀预应力混凝土梁抗弯性能试验[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(3):707-715.
LIU Yunyan, FAN Yingfang, YU Jian, et al. Flexural behavior test of corrode prestressed concrete beams under chloride environment [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(3):707-715. (in Chinese)
- [16] WANG L, YI J, ZHANG J R, et al. Bond behavior of corroded strand in pretensioned prestressed concrete beams [J]. *ACI Structural Journal*, 2018, 115(6):1803-1812.
- [17] 孙杨,乔国富. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能研究综述[J]. *材料导报*, 2020, 34(3):122-131.
SUN Yang, QIAO Guofu. Research on the bond properties between corroded reinforcing steel bar and concrete: A review [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(3):122-131. (in Chinese)
- [18] 徐有邻,宇秉训,姜红,等. 三股钢绞线基本性能的试验研究. *工业建筑* [J]. 1998, 28(9):31-36.
XU Youlin, YU Bingxun, JIANG Hong, et al. An experimental study on three-ply stranded wire for engineering application [J]. *Industrial Construction*, 1998, 28(9):31-36. (in Chinese)
- [19] DANG C N, MURRAY C D, FLOYD R W, et al. Analysis of bond stress distribution for prestressing strand by standard test for strand bond [J]. *Engineering Structures*, 2014, 72:152-159.
- [20] ASTM Subcommittee A01.05. Standard test method for evaluating bond of seven-wire steel prestressing strand [S]. West Conshohocken:ASTM International, 2012.