

DOI:10.11918/202109057

复合钢筋与早龄期海工混凝土黏结性能研究

杨整涛¹, 曹永红¹, 薛暄译^{1,2}, 黄乐鹏^{1,2}, 姚运航¹, 华建民^{1,2}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045)

摘要: 为研究复合钢筋与海水海砂混凝土的工程适用性,对海水海砂素混凝土以及含聚甲醛纤维(POM)的海水海砂混凝土进行同心拔出试验,考虑不同的混凝土龄期和混凝土保护层与钢筋直径比(c/d),研究这两个变量对黏结性能的影响,以量化黏结-滑移关系。试验结果表明:复合钢筋因其良好的性能适用于海水海砂混凝土加固;早龄期混凝土与钢筋之间的峰值黏结应力 τ_u 受龄期影响明显,加入POM纤维的海水海砂混凝土表现为更好的延性和黏结性能;混凝土龄期对峰值黏结应力对应的滑移值 s_u 和上升段形状参数 α 的影响整体表现为龄期越大,滑移值 s_u 越小,上升参数 α 越小;混凝土龄期越大,下降段形状参数 k 越大;基于试验结果提出了考虑混凝土龄期影响的复合钢筋海水海砂混凝土黏结-滑移模型,该模型与试验结果具有较好的一致性。研究表明复合钢筋和纯海水海砂混凝土可以进行工程应用,且加入聚甲醛(POM)纤维改善后的混凝土具有更好的性能。

关键词: 复合钢筋;海水海砂混凝土;黏结应力;滑移;黏结-滑移模型

中图分类号: TU375.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)10-0100-09

Bond properties between bimetallic steel bar and early-age marine concrete

YANG Zhengtao¹, CAO Yonghong¹, XUE Xuanyi^{1,2}, HUANG Lepeng^{1,2}, YAO Yunhang¹, HUA Jianmin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Lab of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: To investigate the engineering applicability of bimetallic steel bars and sea water sea sand concrete, concentric pull-out tests were carried out on sea water sea sand concrete and sea water sea sand concrete containing polyoxymethylene (POM) fibers. Considering different concrete ages and ratios of concrete cover c to bar diameter d (c/d), the influences of the two variables on bond performance were studied to quantify the bond-slip relationship. Test results show that bimetallic steel bar was suitable for the reinforcement of sea water sea sand concrete because of its good performance. The peak bond stress τ_u between the early-age concrete and the steel bar was significantly affected by the age, and the sea water sea sand concrete with POM fibers added had better ductility and bonding properties. The influence of concrete age on the slip value s_u corresponding to the peak bond stress and the shape parameter α of the ascending section was generally manifested as the larger the age was, the smaller the slip value s_u was, and the smaller the parameter α was. With increasing concrete age, the shape parameter k of the descending section was increased. Based on the test results, a bond-slip model of bimetallic steel bar and sea water sea sand concrete was proposed considering the effect of concrete age, and the model was in good agreement with the test results. The research indicates that bimetallic steel bar and pure sea water sea sand concrete can be used in engineering applications, and the concrete improved by adding POM fibers has better performance.

Keywords: bimetallic steel bar; sea water sea sand concrete; bond stress; slip; bond-slip model

随着建筑行业的快速发展,混凝土的各种材料的消耗量迅速增加,导致河砂和淡水的消耗量显著增加和大规模开采^[1],并且在混凝土制作和施工过程中会产生大量的温室气体和消耗大量的能量,从而对环境产生了严重影响^[2]。解决上述问题的一

个方式就是采用新型的绿色建材,海水和海砂的自然资源远远高于淡水和河砂^[3],是作为混凝土原料良好资源,现已经有研究成果表明海水海砂可以替代淡水河砂作为拌养水和细骨料^[4-6]。如果建筑工程处于岛屿或者沿海地区,减少了原材料的运输成本,工程成本将进一步降低,更加符合国家大力提倡的可持续发展战略^[3]。

然而,未经处理的海水和海砂存在大量氯化物,会破坏海水海砂混凝土(sea water sea sand concrete, SWSSC)中钢筋上的钝化膜,导致严重的腐蚀问题,混入贝壳后混凝土的强度也会降低,这些问题对钢

收稿日期: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51808071);

国家自然科学基金面上项目(51778087);

重庆市博士后特别资助项目(XmT20200011)

作者简介: 杨整涛(1996—),男,硕士研究生;

华建民(1974—),男,教授,博士生导师

通信作者: 华建民, hjm191@163.com

钢筋混凝土结构的耐久性具有严重影响^[6-7]。为此常采用如不锈钢钢筋、纤维增强聚合物(FRP)筋和复合钢筋(bimetallic steel bar, BSB)等耐腐蚀筋材作为海工混凝土结构的加固筋材。不锈钢钢筋高额的造价限制了其工程应用^[8]。相比于金属筋材,FRP筋材延性较差^[9],是制约其广泛使用的原因。根据文献[11-12]研究表明复合钢筋的力学性能与普通钢筋的力学性能相似,延性优于FRP筋,且具有良好的耐腐蚀性能,适合用于海水海砂混凝土,基础价格低于不锈钢钢筋。于是本文选用复合钢筋(不锈钢-碳钢复合钢筋)作为试验的材料,研究其与海水海砂混凝土之间的黏结性能。

黏结性能是钢筋混凝土结构的重要组成部分,是筋材与混凝土共同作用的基础,目前对于海水海砂混凝土黏结性能的研究较多。文献[5]研究发现海水海砂的使用对于混凝土的黏结性能基本没有影响。文献[6]研究发现海水海砂可以减少再生骨料对黏结性能的不利影响,并且发现环氧涂层钢筋与海水海砂再生混凝土的黏结性能与普通混凝土的相当。但对于早龄期的海水海砂混凝土黏结性能的关键性质研究很少,对BSB作为SWSSC的加固筋材的同样很少^[13]。另外BSB由外覆不锈钢和内部碳钢组成,复合钢筋有效承载的核心是不锈钢与碳钢之间良好的协同工作能力,要将BSB进行工程应用之前,有必要对BSB与SWSSC之间的黏结性能随龄期的变化规律进行试验研究,以保证以后在建筑服役阶段的BSB与SWSSC的良好承载。

近几年,纤维越来越多地用于混凝土中以改善劈裂、抗拉强度等力学性能^[14]。混凝土力学性能的变化则会导致黏结性能的改变。文献[15]研究发现混杂纤维增强了混凝土试件的延性,但降低了钢筋与混凝土之间的最大黏结应力。文献[16]发现高体积率微钢丝网纤维可发挥高强钢筋在混凝土的强度特性,使得黏结强度提高125.5%以上。聚甲醛(POM)纤维是一种新型聚合物纤维,具有优异的耐碱和拉伸性能^[17],加入POM纤维可以提高混

土抗裂性和机械性能,可加入适量POM纤维以改善SWSSC的性能。目前几乎没有关于加入POM纤维的SWSSC黏结性能的研究。

综上所述,目前缺乏关于混凝土龄期和POM纤维对SWSSC与BSB之间黏结性能的研究。本文通过同心拔出试验研究不同早龄期、不同混凝土保护层厚度、是否加入POM纤维对BSB与SWSSC的黏结性能的影响,证明未经处理后的海水海砂可直接浇筑混凝土并用于海工建筑,且耐腐蚀的BSB可以作为海工建筑的加固材料,加入POM纤维可以改善钢筋与混凝土之间黏结性能,以期望研究成果为中国海工建筑的发展应用提供试验参考。

1 试验材料

海水取自中国福建省泉州(E118.36°, N24.56°),海砂取自中国广东省广州(E113.17°, N23.79°),使用时海水和海砂均未经处理。由表1可知,海水中的Cl⁻质量浓度远高于淡水中的Cl⁻质量浓度,这对钢筋的耐久性存在显著的不利影响。未经处理的海砂要进行筛选以获得细度模数,通过式(1)计算细度模量 M_x ,其中 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 和 A_6 分别表示直径为4.75、2.36、1.18、0.6、0.3、0.15 mm的筛子的累计筛余百分率。根据表2中的测试结果, $M_x=2.41$,海砂符合中砂类别的要求,可用于试样生产。本文的海水海砂混凝土的配合比、坍落度和28 d的抗压强度见表3,设计等级为C50。

$$M_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1} \quad (1)$$

表1 化学成分

Tab.1 Chemical compositions

成分	自来水/(mg·L ⁻¹)	海水/(mg·L ⁻¹)	海砂/(mg·kg ⁻¹)
Cl ⁻	12.3	19 365.5	7.4
SO ₄ ²⁻	36.8	2 537.5	34.9
Na ⁺	8.7	11 208.7	14.2
K ⁺	2.8	389.9	4.0
Mg ²⁺	9.6	1 321.7	3.0
Ca ²⁺	53.1	395.8	13.8

表2 海砂的筛分试验结果

Tab.2 Screening test results of sea sand

筛孔尺寸	A_1 (4.75 mm)	A_2 (2.36 mm)	A_3 (1.18 mm)	A_4 (600 μ m)	A_5 (300 μ m)	A_6 (150 μ m)	<150 μ m
累计筛余百分比/%	4.0	14.0	29.4	49.0	68.6	90.6	99.4

表3 海水海砂混凝土配合比、工作性能和抗压强度

Tab.3 Mixture design, working performance, and compressive strength of sea water sea sand concrete

混凝土类型	水泥/(kg·m ⁻³)	粉煤灰/(kg·m ⁻³)	矿粉/(kg·m ⁻³)	海砂/(kg·m ⁻³)	粗骨料/(kg·m ⁻³)	海水/(kg·m ⁻³)	纤维/(kg·m ⁻³)	水灰比	坍落度/mm	抗压性能/MPa
NF	264	88	88	831	101 6	160	0	0.36	175.2	56.38
POM-0.6	264	88	88	831	101 6	160	8.41		32.1	66.39

注:NF表示不含POM纤维的SWSSC,POM-0.6表示加入体积分数0.6%POM纤维的SWSSC。

本文中使用的复合钢筋 (BSB) 由 S30408 不锈钢 (覆层) 和 HRB400 碳钢 (基体) 经过热轧工艺而得, BSB 的细节见图 1(a)。图 1(b) 是经过打磨后的钢筋截面, 并结合图 1(c) 拍摄的微观金相图像, 可以看出不锈钢覆层和碳钢基体之间存在冶金结合层, 冶金结合层状况良好, 不锈钢覆层与碳钢基底紧

密结合。根据文献 [11] 的研究发现当复合钢筋发生拉伸颈缩变形时, 不锈钢覆层和碳钢之间不会分离, 说明不锈钢覆层与碳钢基底连接性能优异, 复合钢筋可用于加固混凝土结构。钢筋试件直接从原长 2 m 的 BSB 上切割下, 未进行进一步的机械处理, BSB 试样的长度和直径分别为 250 mm 和 25 mm。

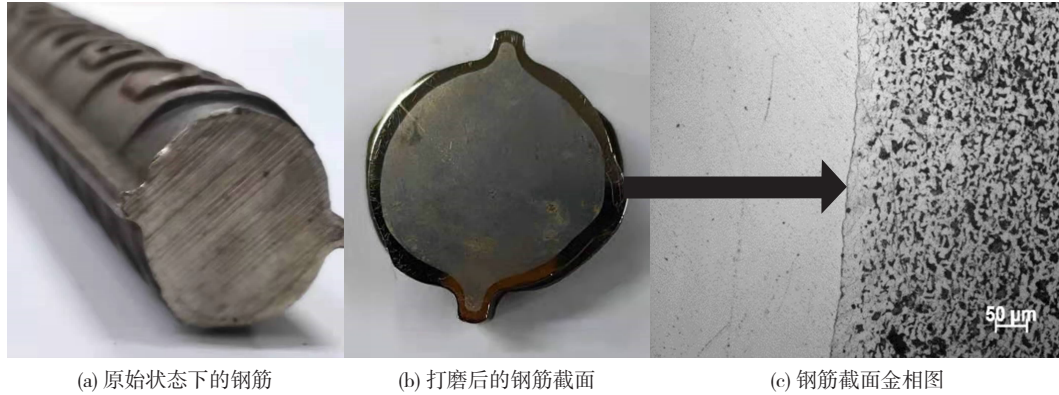


图 1 复合钢筋细节

Fig. 1 Details of bimetallic steel bar

本文所使用的聚甲醛纤维 (POM) 由云南云天化有限公司生产, 聚甲醛纤维的主要性能见表 4, 聚甲醛纤维的直径和长度分别为 0.2 mm 和 12 mm。此外, 本研究中使用的 POM 纤维丝, 对比其他种类纤维, 单位体积混凝土内可掺量更大, 且在搅拌混凝土过程中不会结团, 利于工程应用。表 4 展示了 POM 纤维、玄武岩纤维 (basalt) 和聚丙烯纤维 (PP) 主要性能方面的数据。玄武岩和聚丙烯纤维的具体性能介绍可见文献 [18]。聚甲醛纤维见图 2。

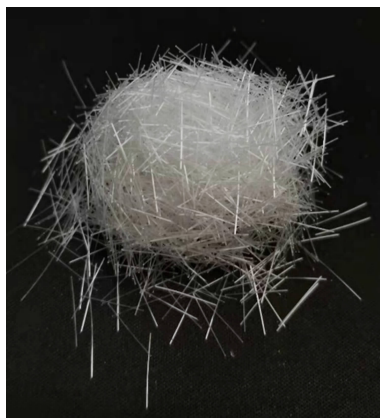


图 2 本文使用的聚甲醛纤维

Fig. 2 POM fibers used in this paper

表 4 聚甲醛、玄武岩和聚丙烯纤维的主要性能

Tab. 4 Main properties of POM, basalt, and PP fibers

类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗拉 强度/MPa	延伸率/ %	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	弹性模量/ GPa
聚甲醛	1 400	970	18.0	165	8.00
玄武岩	2 700	3 200	3.1	1 200	89.00
聚丙烯	910	400	30.0	180	3.85

2 拔出试验

2.1 试件设计和浇筑

试件设计参照 GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》^[19], 共制作了 30 组试件, 每组 3 个, 共制备了 90 个黏结试样, 混凝土试件尺寸 150 mm × 150 mm × 150 mm, 试件的具体尺寸见图 3。黏结区沿保护层厚度方向设置, 黏结长度均是钢筋直径的 5 倍 (即 $L_e = 125 \text{ mm}$), 并假设黏结应力在此较短的锚固长度下沿锚固长度均匀分布, 在加载端设置 25 mm 的无黏结区以减少混凝土压缩对黏结性能的影响。无黏结部分通过将 BSB 放置在聚氯乙烯 (PVC) 管内形成, 聚氯乙烯 (PVC) 管的直径和长度分别为 32 mm 和 55 mm。PVC 管套上 BSB 之后需在一侧填充玻璃胶, 以防止在浇注和振动过程中出现混凝土的泄漏。

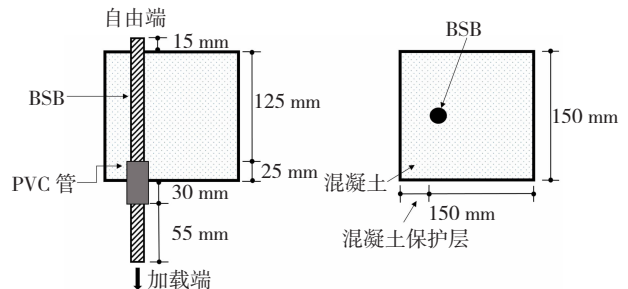


图 3 试件尺寸

Fig. 3 Dimensions of test specimen

试验变量设置为不同的混凝土龄期 t (1、3、7、14、28 d) 和混凝土保护层 c 与钢筋直径比 d ($c/d = 1、1.8、2.6$) (见表 5), 通过改变混凝土保护层厚度,

从而得到不同 c/d 的值。混凝土浇筑后,试件需覆膜养护 18 h 后再拆模取出,放置于标准养护室中养护,养护温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度为 95%。

表 5 拔出试件具体信息

Tab.5 Details of pull-out specimens

编号	混凝土龄期/d	混凝土保护层厚度与直径比 c/d	平行试件	纤维掺量/%
NF-t-c/d	1/3/7/14/28	1/1.8/2.6	3	0
POM-t-c/d	1/3/7/14/28	1/1.8/2.6	3	0.6

注:t 表示混凝土龄期,c/d 表示混凝土保护层厚度与直径比。

2.2 试验方法

同心拔出试验系统见图 4,采用 SHT-600 伺服控制试验机对试件进行单调拔出,仪器最大加载为 600 kN。加载采用位移控制,加载速率为 0.5 mm/min,直至试件失效。试验期间,使用引伸计自动记录自由端的钢筋滑移 s ,试验机自动记录荷载 F ,所有测试数据的采集频率均为 5 Hz。试验后,通过式(2)获得黏结应力:

$$\tau = F / (\pi d L_e) \quad (2)$$

式中: F 为施加荷载, d 为 BSB 直径, $L_e = 125$ mm。



(a) 试验装置

(b) 拔出装置

图 4 同心拔出系统

Fig.4 Concentric pull-out system

3 试验结果

3.1 破坏模型与分析

拔出试验后,观察到两种不同的破坏模式(图 5)。从表 6 的破坏模型总结看出,所有不含 POM 纤维的试件和含有 POM 纤维 28 d 的试件均表现为劈裂破坏模式,试件在破坏时伴随劈裂的响声,且试件表面出现较大、较宽的裂缝,有些混凝土试件直接损坏;当混凝土龄期小于 28 d 时,含 POM 纤维的试件表现为拔出破坏模式,试件表面裂缝较小或者几乎没有,钢筋被顺利拔出,试验结束。从试验结果可知当龄期小于 28 d 时,含 POM 纤维的试件表现出更好的黏结韧性和耗能能力,有利于施工期的结构安全。综上所述,在 28 d 之前,加入 POM 纤维的试件为拔出破坏,产生的原因为 POM 纤维作为混凝土内部的次增强材料,增强了混凝土吸收能量的能力,同时 POM 纤维对钢筋周围的混凝土产生了良好的约

束作用,提高了钢筋混凝土结构之间的延性,从而表现为拔出破坏;而 28 d 时的破坏模式均为劈裂破坏,说明加入的纤维掺量不足以消耗掉拔出试验过程中产生的能量,所以表现为劈裂破坏,具体加入多少含量的纤维还需要进一步研究。



(a) NF-1-1: 劈裂破坏



(b) POM-14-2.6: 拔出破坏

图 5 不同龄期混凝土拔出试件破坏模式

Fig.5 Failure modes of pull-out specimens with different concrete ages

表 6 不同混凝土、龄期和 c/d 的拔出试样的破坏模式

Tab.6 Failure modes of pull-out specimens with different mixtures, concrete ages, and c/d

编号	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d
NF-1	劈裂	劈裂	劈裂	劈裂	劈裂
NF-1.8	劈裂	劈裂	劈裂	劈裂	劈裂
NF-2.6	劈裂	劈裂	劈裂	劈裂	劈裂
POM-1	拔出	拔出	拔出	拔出	劈裂
POM-1.8	拔出	拔出	拔出	拔出	劈裂
POM-2.6	拔出	拔出	拔出	拔出	劈裂

另外从图 5 可清楚看到,拔出试验后,不锈钢覆层中没有出现裂纹和断裂,未观察到不锈钢覆层和碳钢之间有分离的现象。文献[20]研究了海水海砂混凝土与环氧涂层钢筋的黏结性能,拔出试验后,环氧涂层钢筋表面的环氧涂层有明显损坏。由于环氧涂层的破损,碳钢会直接接触到水、氯离子和空气等,从而导致钢筋腐蚀,影响结构耐久性。因此,环氧涂层上的损伤对环氧涂层钢筋混凝土结构的耐久性有不利影响。根据本文的试验结果,拔出试件的 BSB 上的不锈钢覆层表面无破损,碳钢芯筋不会与空气和海水直接接触,不会发生破损性腐蚀,这说明相比环氧涂层而言,BSB 的不锈钢覆层更稳定可靠。FRP 材料因其轻质、高强、耐腐蚀的特性使得在加固

或修复钢筋混凝土构件时被广泛的运用,然而现实生活中 FRP 筋材与混凝土常见的破坏方式是黏结界面间因强度不足引起的 FRP 筋材表面肋牙剥离破坏,这种剥离破坏形式会造成混凝土结构提前破坏,不能完全发挥钢筋混凝土结构之间的承载力,这样的缺点就使 FRP 在工程实践应用中受到了限制^[21]。

综上所述,BSB 在经历拔出试验后,不锈钢覆层与内部碳钢仍有良好的协同工作能力,未发生破损、脱离的现象,且不会与混凝土发生剥离破坏,说明 BSB 能有效地承受黏结应力,比起环氧涂层钢筋与

FRP 材料,更适合作为海工混凝土结构的加固筋材。

3.2 黏结滑移曲线

拔出试件的黏结 - 滑移曲线总结见图 6,为简洁起见,每个试验组仅提供一个曲线。由图可知,随着混凝土龄期的增加,黏结 - 滑移曲线显示出更大的黏结应力,存在下降段表现出更陡的下降趋势。由于劈裂破坏的峰值黏结应力后下降段极不规律,不具有参考意义,所以图 6 上并未呈现。另外,峰值应力对应的滑移和上升段的形状相对随机,没有明确的发展规律。

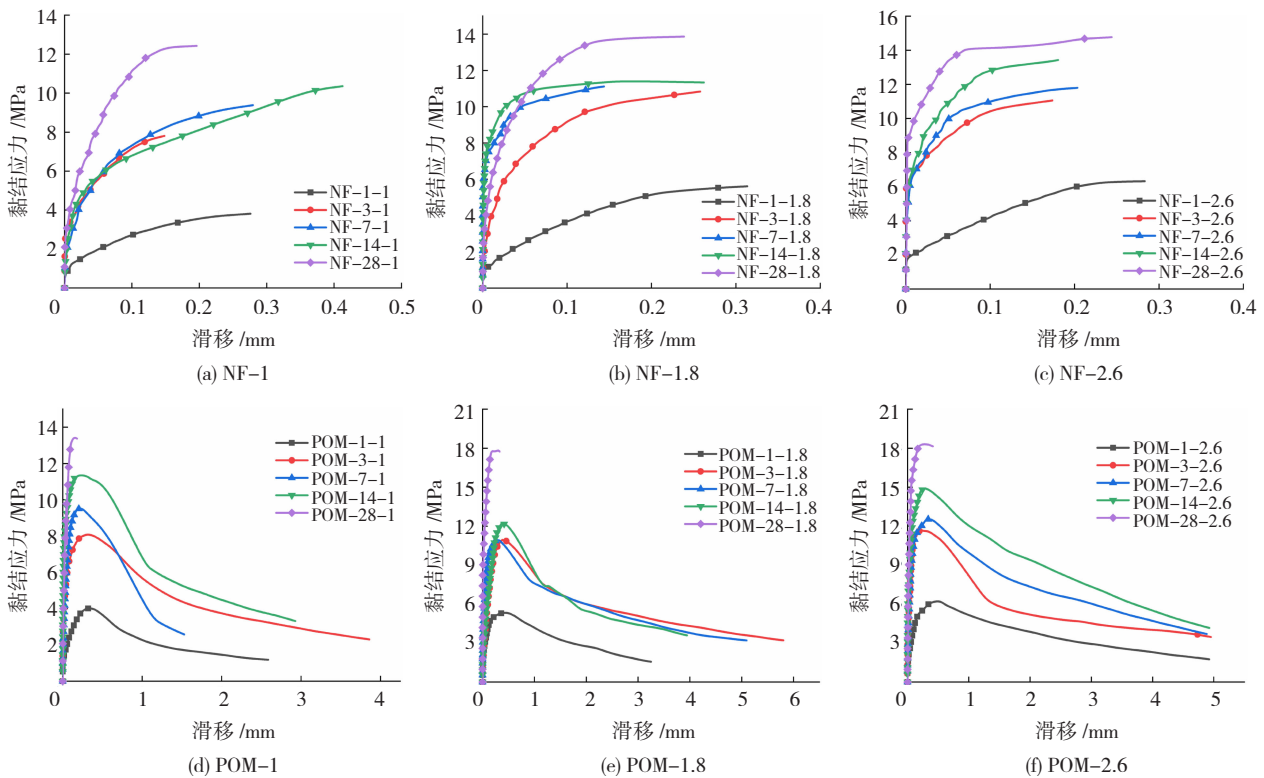


图 6 不同龄期混凝土拔出试件黏结 - 滑移曲线

Fig. 6 Bond-slip curves of pull-out specimens with different concrete ages

3.3 黏结滑移模型

文献[22]的黏结滑移模型是较为成熟和经典的黏结滑移模型,被国内外大多数学者使用,同时考虑到从试验中获得的黏结滑移曲线的形态,此模型可以较为准确的表达 BSB 与 SWSSC 之间的黏结行为,所以选择此模型,如式(3)所示,黏结滑移曲线示意图 7,用两个方程式来量化黏结滑移曲线。对于上升段采用指数函数,在到达峰值应力之后,下降段采用线性函数。根据第 3.2 节的试验结果,劈裂破坏模式的拔出试件的黏结滑移曲线没有有效下降段,所以该公式适用于劈裂破坏模式拔出试件的上升段,以及具有拔出破坏模式的拔出试件的上升段与下降段。峰值黏结应力 τ_u 和峰值黏结应力对应的滑移 s_u 由试验结果得出。上升段形状参数 α 是基于最小二乘法,在 Matlab 软件中进行非线性回归

分析得到。 k 表示下降段的斜率,选择峰值点和下降段上 80% 最大黏结应力的点的斜率来确定。根据上述定义和试验结果,获得了试件的 4 个关键参数,如表 7 所示,数据为 3 次试验组的平均值。

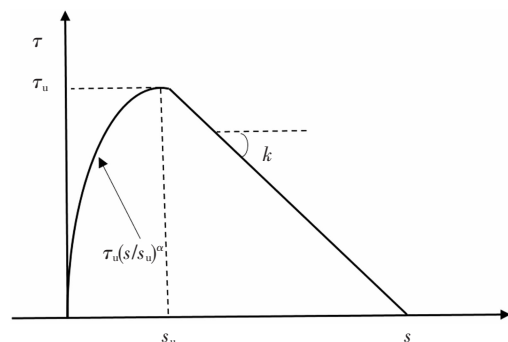


图 7 经典黏结 - 滑移模型

Fig. 7 Classic bond-slip model

表 7 测试结果得到的黏结-滑移模型的关键参数

Tab. 7 Key parameters of bond-slip model from test results

编号	τ_u/MPa	s_u/mm	α	$k/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-3})$
NF-1-1	4.17	0.35	0.449 1	—
NF-3-1	7.80	0.21	0.216 8	—
NF-7-1	8.94	0.25	0.311 6	—
NF-14-1	10.63	0.24	0.279 8	—
NF-28-1	12.15	0.19	0.320 8	—
NF-1-1.8	5.35	0.31	0.428 7	—
NF-3-1.8	10.81	0.31	0.353 2	—
NF-7-1.8	10.99	0.21	0.236 2	—
NF-14-1.8	11.48	0.20	0.200 7	—
NF-28-1.8	14.62	0.22	0.246 4	—
NF-1-2.6	5.81	0.28	0.261 9	—
NF-3-2.6	10.96	0.23	0.185 6	—
NF-7-2.6	11.53	0.20	0.222 9	—
NF-14-2.6	13.65	0.21	0.257 8	—
NF-28-2.6	14.97	0.22	0.256 9	—
POM-1-1	5.19	0.37	0.311 2	2.675 5
POM-3-1	8.18	0.27	0.261 0	3.710 6
POM-7-1	9.46	0.28	0.320 5	3.443 0
POM-14-1	12.42	0.23	0.306 9	5.471 9
POM-28-1	13.02	0.18	0.296 9	—
POM-1-1.8	5.78	0.32	0.376 4	1.689 1
POM-3-1.8	11.11	0.38	0.367 9	4.667 9
POM-7-1.8	11.86	0.35	0.283 5	3.867 6
POM-14-1.8	12.08	0.27	0.301 4	4.134 9
POM-28-1.8	17.88	0.30	0.210 5	—
POM-1-2.6	6.11	0.52	0.236 9	1.534 3
POM-3-2.6	11.14	0.33	0.257 5	4.181 2
POM-7-2.6	11.92	0.32	0.320 4	5.701 6
POM-14-2.6	14.85	0.30	0.259 9	7.649 7
POM-28-2.6	18.19	0.24	0.254 1	—

$$\tau = \begin{cases} \tau_u (s/s_u)^\alpha, & 0 \leq s \leq s_u \\ \tau_u - k(s - s_u), & s > s_u \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ 为黏结应力, τ_u 为峰值黏结应力, s 为滑移, s_u 为峰值黏结应力对应的滑移, α 和 k 分别为黏结滑移曲线上升段和下降段的形状参数。

3.4 混凝土龄期和 c/d 对关键参数的影响

由 3.3 节的试验数据可得,黏结强度会随着龄期的增加而增加,也会随着混凝土保护层的厚度的增加而增加。龄期本质上是影响混凝土的黏结强度,想要研究龄期与黏结强度之间的变化规律,本文采用的是 $\tau_{u,i}/\tau_{u,28}$ 参数作为无量纲化处理的方式,将每个龄期、每个保护层厚度的最大黏结应力与对应的 28 d 的黏结应力做比值,从而更加明显地观察到随龄期的变化规律。图 8 为试验结果,为简洁表示,取每组数据的均值。

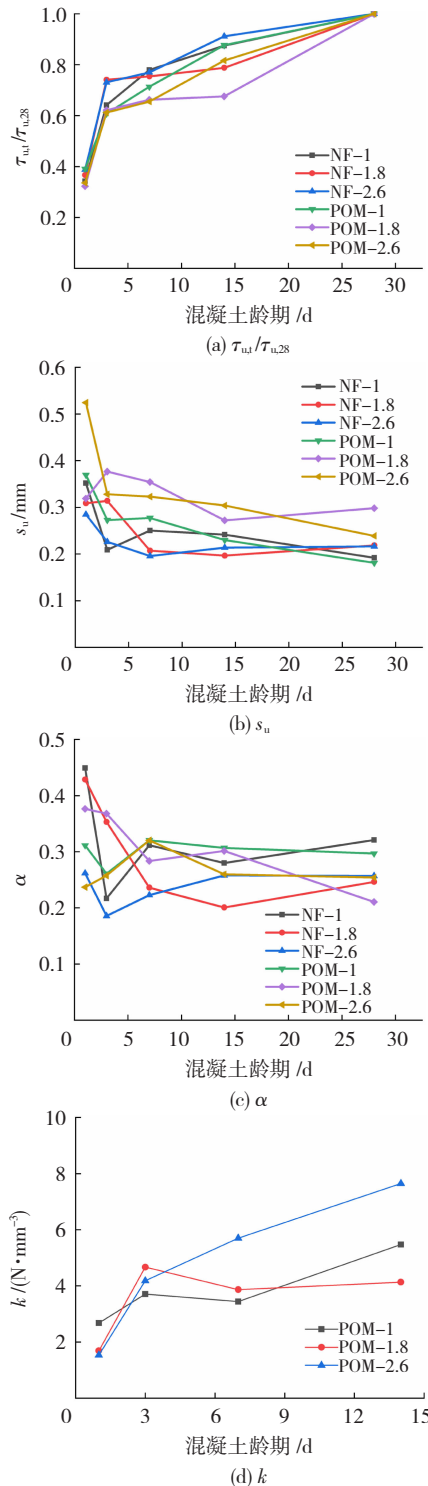


图 8 龄期对黏结-滑移曲线 4 个参数的影响

Fig. 8 Effects of concrete ages on four parameters of bond-slip curves

试验结果表明,含 POM 纤维与不含 POM 纤维的试件的黏结强度随龄期的发展趋势基本一致,都随着龄期的增长而增长,受到龄期的影响明显,整体呈现指数函数形式。另外根据 3.3 节的数据显示,相比较不含 POM 纤维的试件而言,加入体积分数 0.6% POM 纤维的试件在 28 d 龄期时的最大黏结应力,在 c/d 为 1.0、1.8、2.6 时,分别提升了 7.16%、22.30%、21.44%,这是由于加入 POM 纤维后,增加

了钢筋周围混凝土的环向约束力,从而增加了最大黏结应力。另外,峰值黏结应力对应的滑移 s_u 、上升段形状系数 α 、下降段形状系数 k 的分布有一定波动性,可能与多种因素有关,如浇筑方式、试验加载速率、养护方式等,但已超出本文的研究内容。从图 8(b) ~ (d) 可看出,峰值黏结应力对应的滑移 s_u 、上升段形状系数 α 、下降段形状系数 k 这 3 个参数随龄期变化都呈现较强的规律性,峰值黏结应力对应

的滑移 s_u 和形状系数 α 整体随龄期的增加而减小,形状系数 k 则是随着龄期的增加而增大,可根据这些数据提出相应模型用于量化参数随龄期的变化趋势。

图 9 的曲线表明,以上 4 个关键参数未随着 c/d 变化表现明显规律性,离散性较强,说明混凝土保护层厚度与直径比 c/d 对上述 4 个关键参数的影响并不明显,没有表现出明显的变化规律,无法用一个量化的指标来描述。

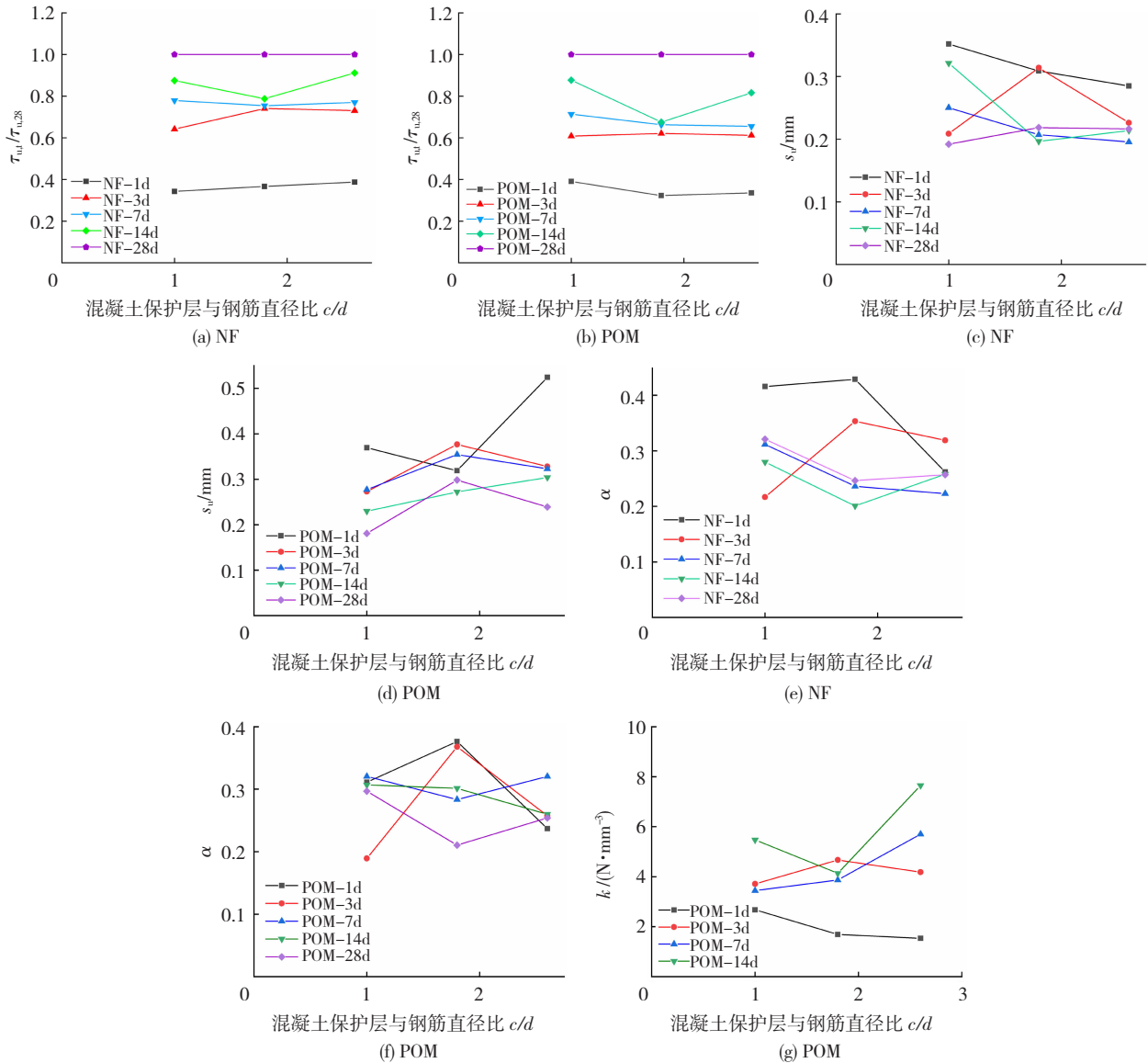


图 9 c/d 对黏结-滑移曲线 4 个参数的影响

Fig. 9 Effects of c/d on four parameters of bond-slip curves

4 时变黏结滑移模型

4.1 建议模型

基于上述讨论和数据,考虑混凝土龄期 $t(d)$, 得到以下 4 个预测公式:

$$\tau_{u,t}/\tau_{u,28} = \gamma e^{-at} + b, 0 \leq t \leq 28 \quad (4)$$

$$s_u = \lambda e^{-ft} + g, 0 \leq t \leq 28 \quad (5)$$

$$\alpha = \kappa e^{-ht} + i, 0 \leq t \leq 28 \quad (6)$$

$$k = mt + n, 0 \leq t < 28 \quad (7)$$

式中: $\gamma, a, b, \lambda, f, g, \kappa, h, i, m, n$ 均为模型系数, t 为混凝土龄期。可根据试验数据基于最小二乘法,在 Matlab 软件中进行非线性回归分析得到,具体结果见表 8,计算得到了每一个 c/d 下混凝土的模型系数。根据以上 4 个公式即可计算得到 28 d 龄期内的经典模型参数,并做出黏结滑移曲线,预测早龄期内黏结性能的变化情况。

表 8 预测模型的关键参数

Tab. 8 Key parameters of proposed model

系数	NF-1	NF-1.8	NF-2.6	POM-1	POM-1.8	POM-2.6
γ	-0.736	-0.904	-0.698	-0.664	-0.852	-0.692
a	0.230	0.620	0.278	0.126	0.040	0.098
b	0.954	0.858	0.949	1.008	1.253	1.025
λ	1.895	0.154	0.168	0.186	0.088	0.545
f	2.740	0.279	0.789	0.113	0.055	0.832
g	0.224	0.202	0.201	0.180	0.269	0.287
κ	6.389	0.296	15.680	6.139	0.235	-0.081
h	3.662	0.312	6.781	6.713	0.045	0.695
i	0.283	0.219	0.234	0.298	0.149	0.276
m	—	—	—	0.191	0.111	0.425
n	—	—	—	2.630	2.900	2.114

4.2 模型的验证

由式(4)~(7)计算所得经典模型的 4 个关键

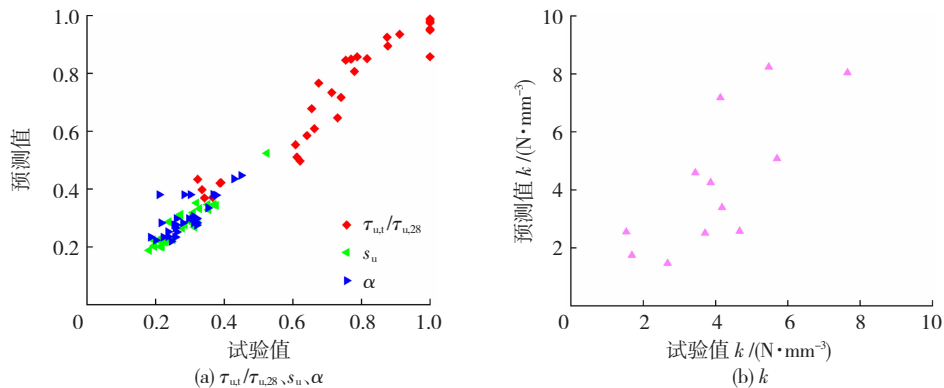


图 10 建议模型的关键参数的验证

Fig. 10 Validation of key parameters of proposed model

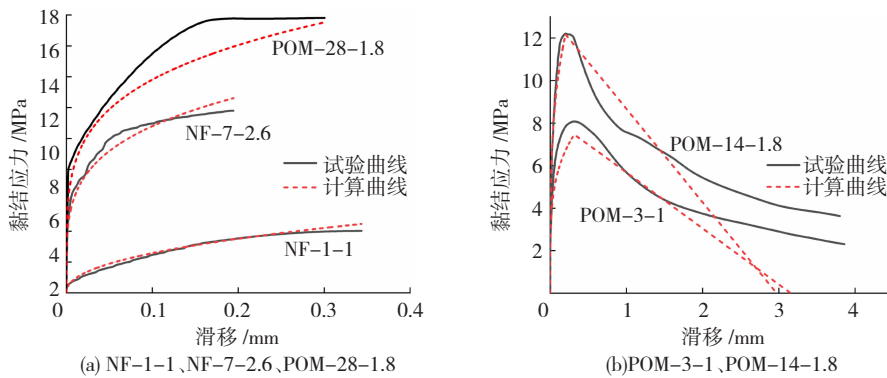


图 11 测试结果与建议的黏结-滑移模型计算结果的黏结-滑移曲线的比较

Fig. 11 Comparison of bond-slip curves between test results and results calculated by proposed bond-slip model

4.3 试验结果对比

将本文得到的试验数据与文献[22]的试验数据进行了对比,发现海水海砂混凝土黏结性能随龄期的发展变化规律与普通混凝土的规律相似,同时发现文献[22]的黏结滑移曲线的形态与本文的黏结滑移曲线也极其相似。另外文献[22]中 C50 强度的普通混凝土 28 d 的峰值黏结应力为 35.67 MPa,本文 28 d 的峰值黏结应力为 18.19 MPa,在黏结强度上与普通混凝土还有一定差距,后续可进一步深入研究改进海水海砂混凝土的黏结性能。

参数的值与表 7 的试验结果进行对比,图 10 给出了根据试验数据得到的参数的值,将其作为横坐标,另外经式(4)~(7)计算得到的预测值作为纵坐标,其中对角线以下的数据点意味着预测值低于试验结果,对角线以上的就是高于试验结果。从图 10 可看出大部分数据点集中在对角线附近,说明提出的时变黏结模型计算出的结果与试验结果的一致性是可接受的。另外选取了 5 个试件:NF-1-1、POM-3-1、NF-7-2.6、POM-14-1.8、POM-28-1.8,根据式(4)~(7)计算出来 4 个关键参数进行黏结滑移曲线的绘制,用于验证所提公式的适用性和准确性,也反映出了时变模型和参数评估的累计误差,结果见图 11,提出的时变黏结模型的拟合结果在上升段与试验得到的曲线一致性良好,峰值应力稍有偏差。

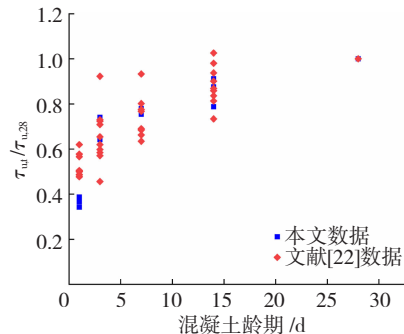


图 12 本文试验结果与文献[22]试验结果对比

Fig. 12 Comparison of test results of this paper and Ref. [22]

5 结论

本文开展了复合钢筋与早龄期海水海砂混凝土黏结性能的试验研究,主要考虑混凝土龄期、是否加入 POM 纤维和混凝土保护层厚度与钢筋直径比 c/d 对黏结性能的影响。讨论了混凝土龄期和 c/d 对黏结-滑移关键参数(峰值黏结应力、峰值黏结应力对应的滑移和两个形状参数)的影响,得到以下结论:

1) 复合钢筋因其特殊的冶金结合层使不锈钢覆层与碳钢有良好的协同工作能力,采用极薄不锈钢覆层,造价较低,在混凝土中不会发生表面剥离破坏,可用于海水海砂混凝土结构加固。

2) 早龄期混凝土与复合钢筋间的峰值黏结应力 τ_u 受龄期影响明显,龄期越大,峰值黏结应力 τ_u 越大, POM 纤维对峰值黏结应力增长速率的影响不显著;加入 POM 纤维的海水海砂混凝土表现为更好的延性和黏结性能,说明 POM 纤维可用于改善海水海砂混凝土的性能。

3) 混凝土的龄期对峰值黏结应力对应的滑移值 s_u 、上升段形状参数 α 、下降段形状参数 k 有明显影响,整体表现为龄期越大, s_u 越小, α 越小,曲线越陡峭;龄期越大, k 越大。

4) 基于试验结果提出了考虑混凝土龄期的复合钢筋海水海砂混凝土黏结-滑移模型,并与试验结果进行了对比,结果表明该模型与试验结果具有较好的一致性。

参考文献

- [1] XIAO Jianzhuang, QIANG Chengbing, NANNI A, et al. Use of sea-sand and seawater in concrete construction; current status and future opportunities [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 1101. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.130
- [2] YOUNIS A, EBEAD U, SURANENI P, et al. Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 190: 276. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.126
- [3] YOUNIS A, EBEAD U, JUDD S, et al. Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and FRP reinforcement [J]. Construction and Building Materials, 2018, 175: 152. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.183
- [4] SHI Zhiguang, SHUI Zhonghe, LI Qiu, et al. Combined effect of metakaolin and sea water on performance and microstructures of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 74: 57. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.023
- [5] 肖建庄,廖清香,张青天,等.海水海砂再生混凝土与玻璃纤维增强塑料筋黏结性能[J].同济大学学报,2018,46(7):884. XIAO Jianzhuang, LIAO Qingxiang, ZHANG Qingtian, et al. Bonding performance between seawater and sea sand recycled concrete and glass fiber reinforced plastic bars [J]. Journal of Tongji University, 2018, 46(7): 884. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2018.07.004
- [6] 黄一杰,张宜健,肖建庄,等.海水海砂再生混凝土与环氧涂层钢筋黏结性能[J].建筑结构学报,2020(增刊1):391. HUANG Yijie, ZHANG Yijian, XIAO Jianzhuang, et al. Bonding properties between seawater and sea sand recycled concrete and epoxy-coated steel bars [J]. Journal of Building Structures, 2020(S1): 391
- [7] XIAO Jianzhuang, ZHANG Qingtian, ZHANG Peng, et al. Mechanical behavior of concrete using seawater and sea-sand with recycled coarse aggregates [J]. Structural Concrete, 2019, 20: 1631. DOI:10.1002/suco.201900071
- [8] 武霄鹏.基于细观力学的不锈钢筋混凝土受压承载力分析[D].郑州:郑州大学,2019. WU Xiaopeng. Analysis of the compressive bearing capacity of stainless steel bar concrete based on mesomechanics [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019
- [9] 王磊,李威,陈爽,等.海水浸泡对 FRP 筋-珊瑚混凝土黏结性能的影响[J].复合材料学报,2018,35(12):3458. WANG Lei, LI Wei, CHEN Shuang, et al. Effects of seawater immersion on the bonding properties of FRP tendons and coral concrete [J]. Journal of Composite Materials, 2018, 35(12): 3458
- [10] 薛伟辰,索丽生,白明进.环氧涂层钢筋粘强度的试验研究[J].工业建筑,1999(7):46. XUE Weichen, SUO Lisheng, BAI Mingjin. Experimental study on bond strength of epoxy coated steel bars [J]. Industrial Construction, 1999(7): 46
- [11] HUA Jianmin, WANG Fei, HUANG Leping, et al. Experimental study on mechanical properties of corroded stainless-clad bimetallic steel bars [J]. Construction and Building Materials, 2021, 287: 123019. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123019
- [12] HUA Jianmin, WANG Fei, WANG Neng, et al. Experimental and numerical investigations on corroded stainless-clad bimetallic steel bar with artificial damage [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102779. DOI:10.1016/j.job.2021.102779
- [13] 黄亮,谢建和,陆中宇.海水海砂混凝土研究现状与应用前景[J].混凝土,2020(9):155. HUANG Liang, XIE Jianhe, LU Zhongyu. Research status and application prospects of seawater and sea sand concrete [J]. Concrete, 2020(9): 155
- [14] OKEOLA A, ABUDHA S, MWERO J. Mechanical investigation of the physical and mechanical properties sisal fiber-reinforced concrete [J]. Fiber, 2018, 53: 6
- [15] MELO F, CRUZ A, NETTO L, et al. Experimental study of bond between steel bars and hybrid fibers reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 275: 122176. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.122176
- [16] 何小兵,易铸,申强.高强钢筋与高体积率微钢丝钢纤维混凝土黏结性能试验研究[J].公路交通科技,2019,36(4):52. HE Xiaobing, YI Zhu, SHEN Qiang. Experimental study on the bonding performance of high-strength steel bars and high volumetric micro-steel steel fiber concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Science and Technology, 2019, 36(4): 52. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.04.008
- [17] ESPINACH F, GRANDA L. Mechanical and micromechanical tensile strength of eucalyptus bleached fibers reinforced polyoxymethylene composites [J]. Composites Part B-Engineering, 2017, 116: 333. DOI:10.1016/j.compositesb.2016.10.073
- [18] ZHOU Xianyu, ZENG Yusheng, CHEN Pang, et al. Mechanical properties of basalt and polypropylene fibre-reinforced alkali-activated slag concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 269: 124. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121284
- [19] 混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012[S].北京:中国标准出版社,2012. Standard for test method of concrete structures:GB/T 50152—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012
- [20] WANG Jizhong, YANG Liu, YANG Junlong. Bond behavior of epoxy-coated reinforcing bars with seawater sea-sand concrete [J]. ACI Structural Journal, 2020, 117: 195. DOI:10.14359/51723510
- [21] 刘海峰.新型 FRP 复合材料的性能研究[D].兰州:兰州大学,2019. LIU Haifeng. Research on the properties of new FRP composite materials [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019
- [22] SONG Xiaobin, WU Yajie, GU Xianglin, et al. Bond behaviour of reinforcing steel bars in early age concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 210. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.060

(编辑 赵丽莹)