

海水海砂再生混凝土与玻璃纤维增强塑料筋黏结性能

肖建庄^{1,2}, 廖清香¹, 张青天¹, 强成兵¹, 柳 猷¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 工程结构服役性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用标准立方体中心拔出试验, 测试了不同组分及不同强度混凝土与玻璃纤维增强塑料(GFRP)带肋筋之间的黏结滑-移性能. 结果表明: 再生粗骨料的使用降低了混凝土与 GFRP 筋之间的黏结强度, 海水、海砂的使用对混凝土的黏结强度基本没有影响; 不同组分混凝土与 GFRP 筋的黏结-滑移曲线相似, 无明显差别; 与普通混凝土相似, 海水海砂再生混凝土与 GFRP 筋的黏结强度随着混凝土的立方体抗压强度增加而增加. 采用 4 种不同适用于 GFRP 筋的黏结-滑移本构模型对试验数据进行了拟合, 结果表明: 4 种模型均能较好地拟合本次试验曲线, 其中, Malvar 模型拟合程度最高.

关键词: 海水海砂再生混凝土; 玻璃纤维增强塑料(GFRP)筋; 黏结性能; 拔出试验

中图分类号: TU377.9

文献标志码: A

Bond Behavior Between Seawater Sea-sand Recycled Aggregate Concrete and Glass-Fiber-Reinforced Polymer Bars

XIAO Jianzhuang^{1,2}, LIAO Qingxiang¹, ZHANG Qingtian¹, QIANG Chengbing¹, LIU Xian¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The standard cube pull-out tests were conducted to study the bond behavior between the ribbed glass-fiber-reinforced polymer (GFRP) bars and concrete made with different raw materials and different strengths. The results showed that the use of recycled coarse aggregate (RCA) decreased the bond strength while seawater sea-sand (SS) had nominal effect on that of concrete. Different concretes shared similar bond stress-slip curve. Similar with natural aggregate concrete (NAC), the bond strength between seawater sea-sand recycled aggregate concrete (SSRAC) and the ribbed GFRP bars improved with the increase of compressive

strength of concrete. Furthermore, four bond stress-slip models were selected to fit the experimental curves and the results showed that all the four models fitted the experimental curves well and the model proposed by Malvar had the highest coefficient of determination.

Key words: seawater sea-sand recycled aggregate concrete (SSRAC); glass-fiber-reinforced polymer (GFRP) bars; bond behavior; pull-out test

混凝土是建筑结构的主要材料, 制备混凝土的原材料包括砂石骨料、淡水以及胶凝材料, 而在其生产制作和施工过程中消耗了大量的自然资源和能源, 并排放了大量的 CO₂, 对环境造成了严重影响. 目前我国河砂、淡水资源缺乏, 且原材料的获取很大程度上受限于地理位置, 在我国经济较为发达的东部沿海地区, 有大量工程建设, 但大多比较缺乏原材料. 考虑到沿海地区以及海岛有丰富的海水、海砂资源储备, 合理有效地利用海水、海砂资源制备混凝土无论是在环境还是经济方面都有很大效益. 同时, 将再生粗骨料作为生产原料加入到混凝土的制作中, 可以实现资源的最大化有效利用. 由于海水、海砂中存在着大量氯盐, 钢筋不宜用于海水海砂混凝土中, 而采用纤维增强塑料(FRP)可以有效解决这个问题.

海砂相较于河砂主要不同之处在于海砂中含有较高的贝壳含量, 使混凝土的工作性能, 强度有所下降, 对收缩徐变亦有影响^[1-4]. 海水中含有较多的 Cl⁻ 以及 SO₄²⁻ 对混凝土的强度也有一定的影响^[5-6]. 因此, 采用海水海砂将影响混凝土的基本性能. FRP 对混凝土可以起到约束作用^[7] 以及加筋作用^[8], 其中采用 FRP 筋作为加筋材料时, FRP 与混凝土间的黏结性能是两者共同工作的基础, 也是影响 FRP 筋混凝土构件破坏形态、受力性能和变形能力等的重要因素. 目前 FRP 与普通混凝土间的黏结

收稿日期: 2017-09-21

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51325802), 上海市高峰学科专项基金

第一作者: 肖建庄(1968-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为再生混凝土结构. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

性能已有较为系统的研究,这些研究表明 FRP 黏结应力的组成和传递机理与钢筋相似^[9],影响 FRP 黏结性能包括^[10]:混凝土的强度等级、保护层厚度、锚固长度、FRP 外形以及构造方式等。由于海水、海砂、再生粗骨料的使用,会对混凝土的性能有一定影响^[11],且对于 FRP 筋与海水海砂再生混凝土黏结性能的研究尚属空白。因此,本文基于一系列的试验对玻璃纤维增强塑料(glass-fiber-reinforced polymer, GFRP)筋与海水海砂再生混凝土的黏结性能进行了研究与分析。

1 试验材料

试验材料如下:①海砂:福建海砂,基本性能见表 1。②海水:依据美国材料实验协会关于海水制备规程^[12]中所给的化学成分配而得,其中含量在 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下化学物质忽略不计,具体化学物含量见表 2。③天然粗骨料:4.75~31.5 mm 天然石子;④再生粗骨料:4.75~31.5 mm 再生粗骨料,为上海再生粗骨料厂提供,基本性能见表 3;⑤水泥:海螺牌,等级为 42.5;⑥减水剂:聚羧酸高效减水剂;⑦ GFRP 筋:南京锋晖复合材料有限公司提供的带肋 GFRP 筋,肋高为 3 mm,肋间距 14 mm,基本性能见表 4。

表 1 海砂基本性能

Tab.1 Basic properties of sea sand

| 表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 细度 模数 | Cl ⁻ 含量/% | 贝壳含 量/% |
|--|--|----------|-------------------------|------------|
| 2 630 | 1 470 | 2.24 | 0.057 | 2.31 |

表 5 不同种类 C30 混凝土配合比

Tab.5 Mix proportion of different C30 concrete

| 编号 | 水泥等级 | 水灰比 | 自由水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 附加水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 总用水量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 砂率 | 细骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 粗骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 减水剂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |
|---------|------|------|---|---|--|--|------|---|---|---|
| NAC30 | 42.5 | 0.47 | 150 | 0 | 150 | 319.15 | 0.43 | 829.03 | 1 098.95 | 3.19 |
| RAC30 | 42.5 | 0.47 | 150 | 11.15 | 161.15 | 319.15 | 0.43 | 829.03 | 1 098.95 | 3.19 |
| SSNAC30 | 42.5 | 0.47 | 150 | 0 | 150.00 | 319.15 | 0.43 | 829.03 | 1 098.95 | 3.19 |
| SSRAC30 | 42.5 | 0.47 | 150 | 11.15 | 161.15 | 319.15 | 0.43 | 829.03 | 1 098.95 | 3.19 |

混凝土强度等级为:C20、C30、C40、C50)。立方体试件:150 mm×150 mm×150 mm,每组制作 6 个,其中 3

表 6 不同强度混凝土配合比

Tab.6 Mix proportion of concrete with different strength grades

| 编号 | 水泥等级 | 水灰比 | 自由水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 附加水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 总用水量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 砂率 | 细骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 粗骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 减水剂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |
|---------|------|------|---|---|--|--|------|---|---|---|
| SSRAC20 | 42.5 | 0.52 | 150 | 11.15 | 161.15 | 288.46 | 0.43 | 843.46 | 1 118.08 | 2.31 |
| SSRAC30 | 42.5 | 0.47 | 150 | 11.15 | 161.15 | 319.15 | 0.43 | 829.03 | 1 098.95 | 3.19 |
| SSRAC40 | 42.5 | 0.40 | 150 | 11.15 | 161.15 | 375.00 | 0.40 | 748.50 | 1 112.75 | 4.50 |
| SSRAC50 | 42.5 | 0.37 | 150 | 11.15 | 161.15 | 405.38 | 0.38 | 699.23 | 1 133.85 | 5.27 |

表 2 海水中化学物质含量

Tab.2 Chemicals in seawater

| | 化学物 | | | | | | |
|---|-------|-------------------|---------------------------------|-------------------|-------|--------------------|-------|
| | NaCl | MgCl ₂ | Na ₂ SO ₄ | CaCl ₂ | KCl | NaHCO ₃ | KBr |
| 质量浓度/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) | 24.53 | 5.20 | 4.09 | 1.16 | 0.695 | 0.201 | 0.101 |

表 3 再生粗骨料基本性能

Tab.3 Basic properties of recycle coarse aggregate

| 表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 吸水率/% | 含水率/% | 品质等级 |
|--|-------|-------|------|
| 2 536 | 5.8 | 3.3 | III类 |

表 4 GFRP 筋材料性能

Tab.4 Material properties of GFRP bars

| 规范和 试验 | 参数要求 | | | |
|--------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | 强度标准值 f_k/MPa | 剪切强度 f_t/MPa | 极限拉应 变 $\epsilon/\%$ | 弹性模量 E_f/GPa |
| JG/T406—2013 | ≥ 600 | ≥ 110 | ≥ 1.2 | ≥ 4.0 |
| 试验材料 | 758 | 150 | | 46 |

2 试验方案

本次拔出试验共分为 2 组:

(1)研究不同种类的混凝土与 GFRP 筋之间的黏结性能,水灰比固定为 0.47(对应普通混凝土强度等级为 C30)。立方体试件:150 mm×150 mm×150 mm,每组制作 6 个,其中 3 个用于中心拔出试验,3 个用于测量混凝土的立方体抗压强度,其配合比见表 5。表中,NAC 表示天然混凝土,RAC 表示再生混凝土,SSNAC 表示海水海砂天然混凝土,SSRAC 表示海水海砂再生混凝土(下同)。

(2)研究不同强度等级的海水海砂再生混凝土与 GFRP 筋之间的黏结-滑移本构关系,其中变化水灰比为 0.52,0.47,0.4 以及 0.37(分别对应普通混

凝土强度等级为:C20、C30、C40、C50)。立方体试件:150 mm×150 mm×150 mm,每组制作 6 个,其中 3 个用于中心拔出试验,3 个用于测量混凝土的立方体抗压强度,其配合比见表 6。

混凝土采用小搅拌机拌制,搅拌均匀后浇筑到木模内振捣密实.不同强度的海水海砂混凝土实测塌落度为:SSRAC20:35 mm、SSRAC30:110 mm、SSRAC40:130 mm、SSRAC50:120 mm.塌落度实测结果表明,减水剂仍可以明显调控海水海砂混凝土的工作性能.混凝土的黏聚性和保水性良好.养护 28 d,每天上下午分别洒水、覆盖湿薄膜来进行养护.

试验均采用短锚中心拔出试验,试件依据 JC/T 406—2013^[13]进行设计,其中 GFRP 筋直径均为 14 mm,黏结长度为 5 倍的 GFRP 筋直径:70 mm,试件尺寸如图 1 所示,实验装置如图 2 所示.图中, N 为拔力.

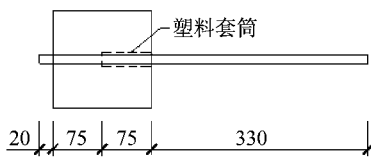


图 1 标准立方体拔出试验试件 (单位:mm)
Fig.1 Specimens of standard cube pull-out tests (unit: mm)

3 试验结果

3.1 破坏模式与分析

试验过程中 GFRP 筋未出现明显滑移,所有试

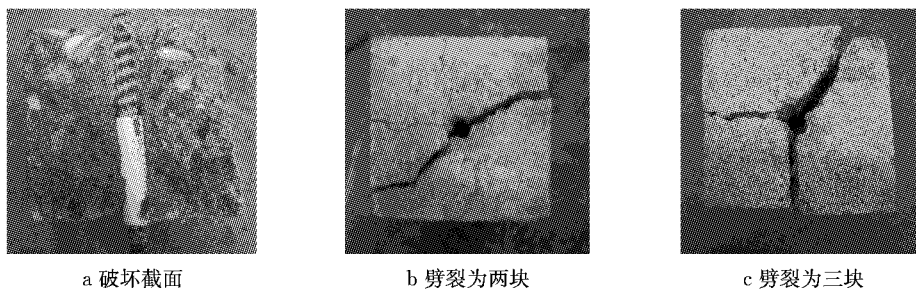


图 3 试件破坏模式
Fig.3 Failure mode of specimens

摩擦力;随着荷载的增加,肋前由于纵向挤压作用形成楔形块,一个肋间距范围内的混凝土受到的作用力有:钢筋对混凝土的挤压应力 P ,滑移面上的摩擦应力 μP , μ 为摩擦系数,如图 4 所示.图中, θ 为滑移面切向与钢筋纵向的夹角, d 为钢筋直径, c 混凝土外表面到筋中心距离.将 P 和 μP 分别沿纵向和径向分解,二者的纵向分量之和形成黏结应力 τ_v ,径向分力即为环向拉力 σ_p .当环向拉力达到抗拉强度时,混凝土中产生环向裂缝,裂缝发展到混凝土表面时,则形成试验中所看到的劈裂裂缝,进而破坏^[15-16].

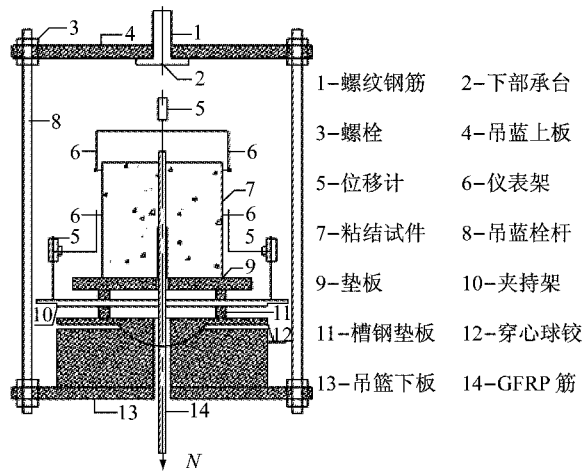


图 2 标准立方体拔出试验装置
Fig.2 Set-up of standard cube pull-out tests

件均为混凝土突然发生劈裂破坏.由于在达到最大黏结强度时,混凝土突然劈裂,此时固定在 GFRP 筋端部的位移计由于震动而掉落,因此黏结-滑移曲线只有上升段,而没有下降段,部分混凝土试件劈裂为三块,部分劈裂为两块,如图 3 所示.

GFRP 筋与混凝土的黏结作用主要由三部分组成,即 GFRP 筋与混凝土之间的化学胶着力、接触面上的摩擦力以及 GFRP 筋通过表面变形处理与混凝土产生的机械咬合力^[14].

对于本试验而言,采用的是带肋 GFRP 筋,试验刚开始施加荷载时,起主要作用的是化学胶着力和

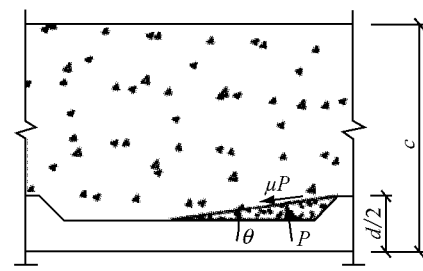


图 4 混凝土受力分析模型^[15]
Fig.4 Stress analysis model of concrete^[15]

根据高等混凝土结构理论^[17],肋前楔形块的产生与筋材的肋高 h 和间距 m 比值有关.其机理如图 5 所示:

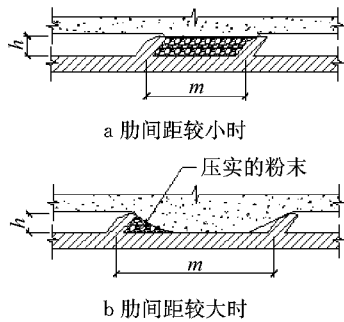


图 5 变形筋材在肋条处的破坏机理

Fig.5 Failure mechanism of the reinforced material in the ribs

当肋过高和间距过小时(图 5a),剪应力会控制黏结性能,筋材被拔出;当肋的间距大于肋高时(图 5b),局部压碎的混凝土就可能在肋前形成一个楔形块,进而使周围混凝土产生劈裂破坏.与以上机理相似,肋间距和高度的比值是控制 GFRP 筋与混凝土的黏结劈坏模式的重要因素,本次试验用 GFRP 筋材肋间距和高度的比值为 4.76.

3.2 主要试验结果

试验数据包括预留混凝土试块的立方体抗压强度、混凝土与 GFRP 筋的最大黏结强度,见表 7.

表 7 混凝土试件基本力学性能

Tab.7 Basic mechanical properties of concrete specimens

| 编号 | 抗压强度 f_{cu}/MPa | 极限黏结强度 τ_u/MPa | 相对黏结强度 τ_u/f_{cu} |
|---------|--------------------------|----------------------------|------------------------|
| NAC30 | 43.2 | 21.8 | 0.50 |
| RAC30 | 31.8 | 18.2 | 0.57 |
| SSNAC30 | 43.5 | 21.9 | 0.50 |
| SSRAC30 | 36.8 | 18.1 | 0.49 |
| SSRAC20 | 33.2 | 17.1 | 0.52 |
| SSRAC40 | 42.9 | 21.9 | 0.51 |
| SSRAC50 | 46.7 | 24.7 | 0.53 |

由表 7 可知,第一组实验,对于相同水灰比,再生粗骨料的使用降低了混凝土与 GFRP 筋之间的黏结强度,比普通混凝土与 GFRP 筋的黏结强度低 17%;海水海砂混凝土与普通混凝土的黏结强度相近,海水海砂对于混凝土黏结性能的影响不明显.同样地,海水海砂再生混凝土的黏结强度较普通混凝土也有较大的降低,为普通混凝土的 83%.另外,相对黏结强度均在 0.5 左右,而再生混凝土与 GFRP 筋之间的相对黏结强度高于普通混凝土与 GFRP 筋的相对黏结强度,可能是因为再生粗骨料表面包裹

着水泥砂浆,使再生粗骨料与新的水泥砂浆之间弹性模量相差较小,界面结合可能得到加强.同时,再生粗骨料表面的许多微裂缝会吸入新的水泥颗粒使接触区的水化更加完全,形成致密的界面结构^[18].

第二组实验,对于海水海砂再生混凝土,其黏结强度随混凝土强度增加而增加,与普通混凝土规律类似.相对黏结强度均在 0.5 左右.

4 试验分析

4.1 混凝土组分对黏结-滑移曲线影响

对试验数据进行处理,可以得到每组混凝土的自由端黏-结滑移曲线,不同组分混凝土黏结应力-滑移曲线以及量纲一黏结-滑移曲线如图 6 和图 7 所示,其中 τ_u 、 s_u 为极限黏结强度和相对应的极限滑移.

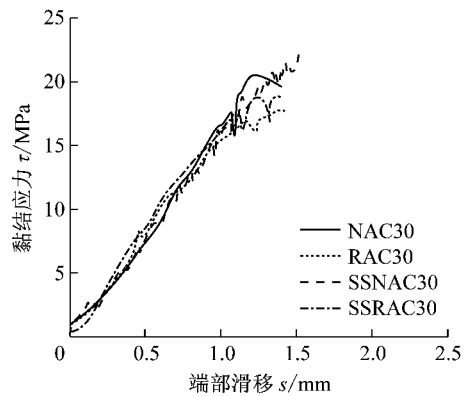


图 6 不同组分混凝土黏结应力-滑移曲线

Fig.6 Bond stress-slip curves of concrete with different concretes

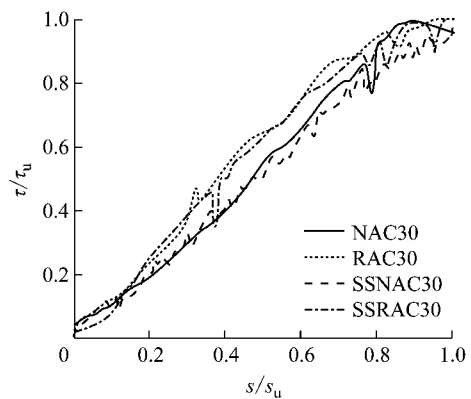


图 7 不同组分混凝土量纲一黏结-滑移曲线

Fig.7 Non-dimensional bond-slip curves of concrete with different concretes

由图 7 可知,普通混凝土与海水海砂混凝土的量纲一黏结-滑移曲线基本重合,再生混凝土与海水

海砂再生混凝土的量纲-黏结-滑移曲线基本重合。可得海水海砂的使用对混凝土与 GFRP 筋的黏结-滑移本构关系影响不大,因此对于海水海砂混凝土的黏结-滑移曲线的上升段可以采用与普通混凝土相同的本构关系模型。同时表明,海水海砂中的少量贝壳等杂质并不会影响混凝土与 GFRP 筋的黏结-滑移本构关系,对于海砂中贝壳含量变化对混凝土的黏结-滑移本构关系可能产生的影响需要进一步的研究。而再生混凝土的量纲-黏结-滑移曲线略高于普通混凝土量纲-黏结-滑移曲线,曲线与横轴所围成的面积较大,说明再生混凝土在黏结-滑移过程吸收的能量较大,这主要是由于再生粗骨料与新的水泥砂浆之间弹性模量相差较小,骨料对水泥石的变形约束较小,这种“弹性协调”延缓微裂缝的发展^[19]。

4.2 黏结强度与立方体强度关系

ACI 440.1R-06^[20]中给出黏结强度与混凝土圆柱体抗压强度的关系如下:

$$\frac{\tau_u}{0.083 \sqrt{f'_c}} = 4.0 + 0.3 \frac{c}{d_b} + 100 \frac{d_b}{l_c} \quad (1)$$

式中: f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; c 为混凝土外表面到筋中心距离; d_b 为筋直径; l_c 为黏结长度。

在本试验中,GFRP 筋直径保持不变,为 14 mm,混凝土外表面到 GFRP 筋中心距离为 75 mm,黏结长度为 70 mm,因此,

$$\frac{\tau_u}{0.083 \sqrt{f'_c}} = 4.0 + 0.3 \frac{75}{14} + 100 \frac{14}{70} = 25.6 \quad (2)$$

即:

$$\tau_u = 2.13 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

对于 C60 以下的混凝土,圆柱体抗压强度 f'_c 和立方体抗压强度 f_{cu} 关系如下:

$$f'_c = 0.79 f_{cu} \quad (4)$$

因此黏结强度与混凝土立方体抗压强度的关系可表示为

$$\tau_u = 1.89 \sqrt{f_{cu}} \quad (5)$$

本文中,不同强度等级海水海砂再生混凝土的黏结强度见表 7。

对 ACI 440.1R-06^[20]给出的黏结强度与混凝土立方体抗压强度的公式添加修正系数 a ,可表示为

$$\tau_u = a \sqrt{f_{cu}} \quad (6)$$

也有研究表明,混凝土的黏结强度与混凝土的劈裂抗拉强度成正比,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[21]中,普通混凝土的劈裂抗拉强度 f_{sp}

与抗压强度 f_{cu} 的关系表述为: $f_{sp} = 0.19 f_{cu}^{0.75}$ 。因此,可以将黏结强度与混凝土立方体抗压强度的公式表示为

$$\tau_u = c f_{cu}^{0.75} \quad (7)$$

同时,给出另一种黏结强度与混凝土立方体抗压强度的公式,表示为

$$\tau_u = k f_{cu}^b \quad (8)$$

式中: b 为指数。

图 8 显示了使用不同公式对混凝土的黏结强度与混凝土的抗压强度关系的拟合结果。

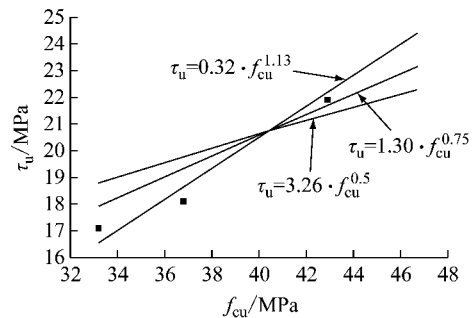


图 8 海水海砂再生混凝土黏结强度与混凝土立方体抗压强度关系

Fig. 8 Relationship between bond strength and compressive strength of SSRAC

表 8 给出了不同的拟合方程的相关系数,可以看出相对使用 ACI 推荐的公式,使用相关劈裂抗拉强度公式进行拟合,有着更好的决定系数。

表 8 黏结强度与抗压强度关系各拟合方程的决定系数

Tab. 8 Coefficient of determination of the fitted equations for the relationship between bond strength and compressive strength

| 拟合方程 | $\tau_u = 3.26 \sqrt{f_{cu}}$ | $\tau_u = 1.30 f_{cu}^{0.75}$ | $\tau_u = 0.32 f_{cu}^{1.13}$ |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 决定系数 R^2 | 0.68 | 0.87 | 0.97 |

4.3 黏结-滑移本构关系

对于不同强度等级(水灰比)海水海砂再生混凝土的 GFRP 筋自由端的黏结-滑移曲线进行处理,不同强度的海水海砂再生混凝土的黏结应力-滑移曲线与量纲-黏结-滑移曲线如图 9 和图 10 所示。

由图 9 可以看出,在加载早期,随着混凝土的强度等级增大,相同的滑移量对应的黏结应力越小,随着端部滑移的逐渐增加,相同滑移条件下,强度较高的混凝土的黏结应力逐渐增大,增长速率超过强度较低的混凝土。与其他混凝土类似,海水海砂再生混凝土的黏结强度随着混凝土的抗压强度增大而提高。

由图 10 可知,4 种不同立方体抗压强度的混凝

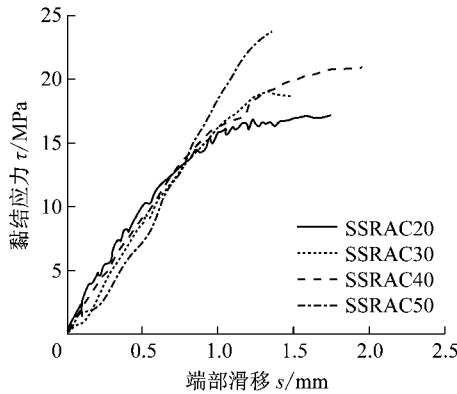


图 9 海水海砂再生混凝土黏结应力-滑移曲线
Fig.9 Bond stress-slip curves of SSRAC

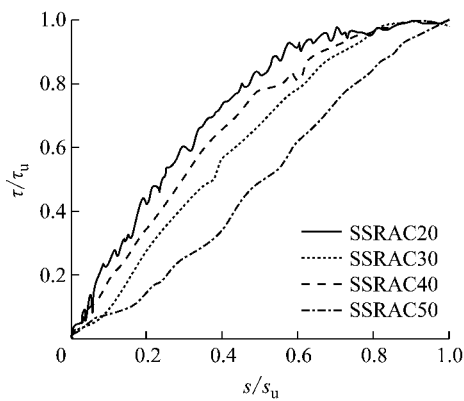


图 10 海水海砂再生混凝土量纲一黏结-滑移曲线
Fig.10 Non-dimensional bond slip curves of SSRAC

土的量纲一黏结-滑移曲线有较大的差异,表明海水海砂再生混凝土的量纲一黏结-滑移曲线与混凝土的抗压强度有关.当混凝土强度等级小于 C50 时,海水海砂再生混凝土的量纲一黏结-滑移曲线整体趋势较为一致,呈凸形;而混凝土强度等级为 C50 时,量纲一黏结-滑移曲线呈凹形,黏结-滑移曲线与横轴所围成的面积明显减小,说明黏结滑移过程吸收的能量减小.这是由于与普通混凝土类似,当混凝土强度等级为 C50 及以上时,混凝土的脆性性能更为明显.

对于 GFRP 筋与混凝土之间的黏结本构关系,已有学者提出 4 种较为成熟的被认可的模型.本试验中所有试件均为达到最大黏结强度时,突然发生混凝土劈裂破坏,此时固定在 GFRP 筋端部的位移计由于震动而掉落,因此黏结-滑移曲线只有上升段,而没有下降段.对于不同模型给出的黏结-滑移曲线的上升段,分别如下:

(1)BPE(Bertero- Popov- Eligehausen)模型^[22]

$$\frac{\tau}{\tau_1} = (s/s_1)^\alpha \quad (9)$$

式中:τ₁ 为最大黏结强度; s₁ 为对应于 τ₁ 相应的滑

移;α 为不大于 1 的曲线修正参数.

(2)Malvar 模型^[23]

$$\frac{\tau}{\tau_m} = \frac{F(\frac{s}{s_m}) + (G-1)(s/s_m)^2}{1 + (F-2)(\frac{s}{s_m}) + G(s/s_m)^2} \quad (10)$$

式中:τ_m、s_m 为峰值黏结应力和相应的滑移; F、G 是根据各种类型筋试验拟合 τ-s 曲线得到的经验常数.

(3)CMR(Cosenza-Manfredi-Realfonzo)模型^[24]

$$\frac{\tau}{\tau_m} = (1 - e^{-s/s_r})^\beta \quad (11)$$

式中:τ_m 为峰值黏结应力; s_r 和 β 是根据试验拟合得到的参数.

(4)连续曲线模型^[25]

$$\frac{\tau}{\tau_1} = 2\sqrt{\frac{s}{s_1} - \frac{s}{s_1}} \quad (12)$$

式中:τ₁、s₁ 为峰值点的黏结应力和相对应的滑移.

表 9 给出了不同模型与不同强度的海水海砂再生混凝土的量纲一黏结-滑移试验数据直接拟合的决定系数.由表 9 可得,不同学者提出的本构模型均有较高的拟合度,相对而言, Malver 模型有更好的拟合度.

表 9 黏结本构关系各拟合方程的决定系数

Tab.9 R² of the fitted equations for bond constitutive relation

| | 决定系数 R ² | | | |
|-----------|---------------------|---------|---------|---------|
| | SSRAC20 | SSRAC30 | SSRAC40 | SSRAC50 |
| BPE 模型 | 0.909 2 | 0.970 3 | 0.944 4 | 0.986 9 |
| Malver 模型 | 0.997 2 | 0.992 2 | 0.998 8 | 0.998 3 |
| CMR 模型 | 0.992 2 | 0.984 2 | 0.990 8 | 0.978 4 |
| 连续曲线模型 | 0.972 6 | 0.981 9 | 0.980 3 | 0.994 2 |

在 Malvar 试验中,保持相同的混凝土抗压强度,根据不同外形的 GFRP 筋与混凝土的黏结试验拟合 τ-s 曲线得到的 F、G 经验常数.而在本试验中,筋材相同,混凝土强度不同,拟合得到 F、G 值见表 10.对于经验常数 F、G 与混凝土的抗压强度关系并不十分明确,还需要进一步的研究.

表 10 不同强度海水海砂再生混凝土经验常数 F、G 取值

Tab.10 F、G value of SRAC with different strength

| | SSRAC20 | SSRAC30 | SSRAC40 | SSRAC50 |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| f _{cu} | 33.2 | 36.8 | 42.9 | 46.7 |
| F | 2.385 | 1.192 | 1.876 | 0.697 |
| G | 1.320 | 0.192 | 0.425 | 0.515 |

5 结语

完成了不同组分的混凝土以及不同强度等级的

海水海砂再生混凝土与 GFRP 筋之间的标准立方体中心拔出试验,分析了混凝土的破坏特征,混凝土组分对 GFRP 筋黏结强度的影响以及峰值黏结应力、峰值位移与混凝土立方体抗压强度之间的关系,同时对比分析给出适用于海水海砂再生混凝土与 GFRP 筋的黏结-滑移本构模型. 主要得到以下结论:

(1)再生粗骨料的使用降低了混凝土与 GFRP 筋之间的黏结强度,海水海砂的使用对混凝土的黏结强度基本没有影响,再生混凝土的相对黏结强度要高于普通混凝土,海水海砂混凝土以及海水海砂再生混凝土与 GFRP 筋之间的相对黏结强度与普通混凝土相似,影响可以忽略不计.

(2)由不同组分的混凝土与 GFRP 筋的量纲一的黏结-滑移曲线可知,再生粗骨料的影响较大,海水海砂几乎没有影响. 普通混凝土与海水海砂普通混凝土有着相近量纲一的黏结-滑移曲线,同样,再生混凝土与海水海砂再生混凝土的量纲一的黏结-滑移曲线相似.

(3)与普通混凝土相似,海水海砂再生混凝土与 GFRP 筋的黏结强度随着混凝土抗压强度增加而增加,使用相关劈裂抗拉强度公式进行拟合,得出了黏结强度与抗压强度的关系.

(4)使用了 4 种不同的学者提出的较为成熟的适用于 GFRP 筋的黏结-滑移本构关系进行拟合,与试验结果对比表明:4 种模型均能较好地拟合本次试验曲线,相对而言, Malvar 模型拟合程度最高. Malvar 模型中的经验常数 F、G 与混凝土的立方体抗压强度的关系需要进一步的研究.

海水海砂再生混凝土与 GFRP 筋之间的黏结性能受多种因素影响. 因此,需要进一步研究其他因素,如筋材直径、筋材的肋高和间距、海水海砂的贝壳含量以及服役时间等对海水海砂再生混凝土与 GFRP 筋之间的黏结性能的影响,以给出适用度更广的黏结-滑移本构模型.

参考文献:

- [1] NEWMAN K. Sea-dredged aggregates for concrete [J]. *Cement Lime & Gravel*, 1969, 45(10): 290.
- [2] LIMEIRA J, ETXEBERRIA M, AGULLÓ L, *et al.* Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand [J]. *Construction & Building Materials*, 2011, 25(11): 4165.
- [3] YANG E I, YI S T, LEEM Y M, *et al.* Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics; part I. fundamental properties [J]. *Cement & Concrete Research*, 2005, 35(11): 2175.
- [4] YANG E I, KIM M Y, PARK H G, *et al.* Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete [J]. *Construction & Building Materials*, 2010, 24(5): 758.
- [5] ABRAMS D A. Tests of impure waters for mixing concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 1924, 20(2): 442.
- [6] NARVER D L. Good concrete made with coral and water [J]. *Civil Engineering*, 1964, 24: 654.
- [7] LAM L, TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. *Construction & Building Materials*, 2003, 17(6-7): 471.
- [8] 滕锦光,余涛,戴建国,等. FRP 在新建结构中应用的现状及机遇[C/CD]//第七届全国建设工程 FRP 应用学术交流会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 64.
- TENG Jinguang, YU Tao, DAI Jianguo, *et al.* The present situation and opportunity of the application of FRP in the new structure [C/CD]// *Proceedings of the 7th National Symposium on FRP Application of Construction Projects*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 64.
- [9] TIGHIOUART B, BENMOKRANE B, GAO D. Investigation of bond in concrete member with fiber reinforced polymer (FRP) bars [J]. *Construction & Building Materials*, 1998, 12(8): 453.
- [10] 郝庆多,王勃,欧进萍. FRP 筋与混凝土的粘结性能 [J]. *建筑技术*, 2007, 38(1): 15.
- HAO Qingduo, WANG Bo, OU Jinping. Bonding performance of FRP steel bar with concrete [J]. *Architecture Technology*, 2007, 38(1): 15.
- [11] XIAO J Z, QIANG C B, ATONIO N, *et al.* Use of sea-sand and seawater in concrete construction: current status and future opportunities [J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 155: 1101.
- [12] American Society for Testing and Materials. Standard practice for the preparation of substitute ocean water: ASTM D1411—1998(2013) [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土木工程用玻璃纤维增强筋: JG/T 406—2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Glass fiber reinforced polymer rebar for civil engineering: JG/T 406—2013 [S]. Beijing: China Standards Press, 2013.
- [14] 潘宇. FRP 筋与混凝土粘结性能研究综述 [C]//第十六届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 1241-1254.
- PAN Yu. The overview of bonding performance of FRP rebars and concrete [C]// *Proceedings of the 16th National Symposium on Modern Structural Engineering*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 1241-1254.
- [15] 赵卫平,肖建庄. 带肋钢筋与混凝土间粘结滑移本构模型 [J]. *工程力学*, 2011, 28(4): 164.
- ZHAO Weiping, XIAO Jianzhuang. The constitutive models for bond slip relation between ribbed steel bars and concrete [J]. *Engineering mechanics*, 2011, 28(4): 164.