

FRP 筋超高性能海水海砂混凝土梁抗剪性能研究

周芬¹, 陈亚曼², 朱德举^{1,2†}

[1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082;

2. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082]

摘要:为研究纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)筋超高性能海水海砂混凝土(Ultra-high Performance Seawater Sea-sand Concrete, UHPSSC)梁的抗剪性能,采用三点弯曲试验,探究剪跨比、箍筋间距和筋材类型(CFRP、BFRP、HFRP)对 FRP-UHPSSC 梁抗剪性能的影响规律.试验结果表明:FRP-UHPSSC 梁在加载时裂缝发展迅速,破坏时具有明显的脆性特征;跨中荷载-挠度曲线在首条裂缝出现前后均呈现出双线性变化,裂缝出现后梁的荷载-挠度关系曲线斜率变小,挠度增长加快;FRP-UHPSSC 梁的抗剪承载力随剪跨比和箍筋间距的增大而减小,剪跨比相同的试验梁,其开裂荷载基本相同;筋材的弹性模量越大,梁的抗剪承载力越高,同时也越能抑制梁的竖向变形;最后采用 4 部规范中的抗剪公式对试验工况进行分析,规范公式对 BFRP-UHPSSC 梁和 HFRP-UHPSSC 梁抗剪承载力计算的最小误差分别超过 40% 和 30%,筋材类型不同的试验工况抗剪承载力计算结果差异较大.

关键词:海水海砂混凝土;FRP 筋;抗剪性能;超高性能混凝土;试验

中图分类号:TU377.9

文献标志码:A

Study on Shear Behavior of Ultra-high Performance Seawater Sea-sand Concrete Beams with FRP Bars

ZHOU Fen¹, CHEN Yaman², ZHU Deju^{1,2†}

[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China]

Abstract: To study the shear behavior of Ultra-high Performance Seawater Sea-sand Concrete (UHPSSC) beams reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) bars, the three-point bending loading test was used to explore the influence of shear span ratio, stirrup spacing and reinforcement type (CFRP, BFRP, HFRP) on the shear performance of FRP-UHPSSC beams. The test results showed that the cracks of FRP-UHPSSC beams developed rapidly during loading, and the beams had marked brittle failure characteristics. The mid-span load-deflection curves showed bilinear change before and after the first crack appeared. After the crack appeared, the slope of load-deflection curves became smaller, and the deflection growth speed increased. The shear capacity of FRP-UHPSSC

* 收稿日期:2023-02-17

基金项目:国家自然科学基金山东联合基金项目(U1806225), National Natural Science Foundation of China-Shandong Joint Fund (U1806225);国家自然科学基金资助项目(52178206), National Natural Science Foundation of China (52178206)

作者简介:周芬(1973—),女,湖北武汉人,湖南大学副教授

† 通信联系人, E-mail: dzhu@hnu.edu.cn

beams decreased with the increase in shear span ratio and stirrup spacing. The cracking loads of test beams with the same shear span ratio were basically the same. The larger the elastic modulus of the reinforcement, the higher the shear capacity of test beams and the more vertical deformation is inhibited. Finally, the shear formulas of four codes are used for analyzing the test results. The minimum errors of the formulas for calculating the shear capacity of BFRP-UHPSSC beams and HFRP-UHPSSC beams are over 40% and 30%, respectively. The difference in the calculated shear capacity under the testing conditions of different reinforcement types varies greatly.

Key words: seawater sea-sand concrete; FRP bars; shear behavior; ultra-high performance concrete; experiments

在沿海及海岛建设中,不仅要考虑淡水、河沙资源的来源,还要考虑钢筋混凝土结构的耐久性问题.采用海水和海砂制备混凝土是解决淡水、河沙资源短缺问题的有效措施.目前不少学者认为,海水和海砂对混凝土的工作性能影响较小^[1-2];氯离子可以增强海水海砂混凝土的早期抗压强度,且长期性能与普通淡水河沙制备的混凝土相比无明显差别,这意味着海水海砂混凝土具有代替普通混凝土的可能.由于海水海砂中富含的氯离子会加速钢筋的锈蚀、并减弱混凝土与钢筋界面黏结性能^[3]及降低构件的耐久性^[4],因而,一些学者采用纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)筋代替钢筋来避免氯离子对筋材的影响.已有研究将FRP筋海水海砂混凝土应用于板^[5]、墙^[6]、柱^[7]和梁^[8-9]等构件中.然而随着时间推移,FRP筋在盐碱复合环境中的力学性能会逐渐退化^[10],因此考虑用海水海砂制备内部结构密实、抗渗性和耐久性优异^[11]的超高性能海水海砂混凝土(Ultra-high Performance Seawater Sea-sand Concrete, UHPSSC)来增强结构的耐久性能.在胶凝材料中掺入如粉煤灰、硅灰等活性粉末可制备具有超高强度和耐久性能的UHPSSC. Teng等^[12]成功研制出28 d立方体抗压强度超过180 MPa的UHPSSC,并表明海水、海砂能使UHPSSC的弹性模量略有下降;朱德举等^[13]通过正交试验得到未掺短切纤维时UHPSSC的最优配合比,制备的UHPSSC抗压强度超过130 MPa,抗折强度超过16 MPa.由此可知,UHPSSC短期力学性能与超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)无明显差异.

目前,文献对FRP筋UHPC梁已有一定报道,但大多集中在抗弯性能方面^[14-16],仅少数文献报道了其抗剪性能^[17-18]. Cao等^[17]在不同配箍率、剪跨比和

纵筋配筋率下,对8根以玻璃纤维增强复合材料(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)筋为纵筋、钢筋为箍筋的UHPC梁开展抗剪性能研究,并验证现有9种抗剪计算公式的适用性.曹天^[18]设计了6根碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)筋纤维增强水泥基复合梁,并研究其受力特点,基于试验结果验证各国FRP筋混凝土梁抗剪设计规范,结果显示,试验值要远高于规范计算值,用修正压力场理论计算的抗剪承载力与试验值较吻合.然而,对于全FRP筋加固UHPSSC梁抗剪性能的研究目前暂无相关文献支撑,FRP筋与UHPSSC相互作用的受力机理尚未可知.为了使FRP-UHPSSC结构在沿海和海洋工程建设中更好地应用,本文以剪跨比、筋材类型和箍筋间距作为主要设计因素来研究FRP-UHPSSC梁的抗剪性能,记录FRP-UHPSSC梁的裂缝发展过程、荷载-挠度关系、破坏模式和抗剪承载力,并根据试验结果验证现有抗剪规范公式对FRP-UHPSSC梁的适用性.

1 试验概况

1.1 试验材料和材料性能

UHPSSC的配合比参考朱德举等^[13]的研究,具体配合比见表1.选用P.O 42.5的普通硅酸盐水泥、普通I级粉煤灰和硅灰作为胶凝材料;拌和水为人工海水,化学成分如表2所示;减水剂使用聚羧酸型高效减水剂;消泡剂,pH值为6~8、黏度为800~1 000 mPa·s;骨料是山东青岛原状海砂;减水剂和消泡剂的掺量分别为胶凝材料(水泥、硅灰和粉煤灰)质量的2%和0.8%.由于钢纤维在海水海砂混凝土这种含大量氯离子的环境中易锈蚀,故UHPSSC中不掺钢纤维.

将搅拌好的混凝土浇筑到支好的模具中,养护 2 d 后拆模,随后进行高温蒸养(90 °C 养护 48 h),蒸养结束后再自然养护至试验正式开始.浇筑过程中预留小试块,与试验梁在同等条件下进行养护.试块尺寸和测试方法参照《超高性能混凝土基本性能与试验方法》(T/CBMF 37—2018)^[19],测得的 UHPSSC 立方体抗压强度 f_{cu} 、轴心抗压强度 f_c 、弹性模量 E_c 、抗折强度 f_t 和抗拉强度 f_t 见表 3. CFRP 筋、玄武岩纤维增强复合材料(Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP)筋和混杂纤维增强复合材料(Hybrid Fiber Reinforced Polymer, HFRP)筋表面均为深螺纹, HFRP 筋由玄武岩纤维和碳纤维混杂而成. You 等^[20]发现 CFRP 在芯部时, HFRP 筋的抗拉强度最大. FRP 筋截面图见图 1. BFRP 筋和 HFRP 筋来自江苏绿材谷新材料科技发展有限公司, CFRP 筋来自海宁安捷复合材料有限责任公司,筋材的直径 d 、极限抗拉强度 f_m 、弹性模量 E_f 以及延伸率 δ 见表 4.

表 1 UHPSSC 配合比

Tab.1 Mixture ratio of UHPSSC

| $\rho_{\text{水泥}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | $\rho_{\text{海水}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | $\rho_{\text{海砂}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | $\rho_{\text{硅灰}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | $\rho_{\text{粉煤灰}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | $w_{\text{减水剂}}/$ % | $w_{\text{消泡剂}}/$ % |
|--|--|--|--|---|------------------------|------------------------|
| 736.5 | 168 | 946.6 | 210 | 105 | 2 | 0.8 |

表 2 人工海水化学成分

Tab.2 Chemical composition of artificial seawater

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

表 3 UHPSSC 力学性能

Tab.3 Mechanical properties of UHPSSC

| f_{cu}/MPa | f_c/MPa | E_c/GPa | f_t/MPa | f_t/MPa |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 128.15 | 102.77 | 45.68 | 11 | 6.94 |



(a) CFRP 筋 (b) BFRP 筋 (c) HFRP 筋

图 1 FRP 筋截面图

Fig.1 Section of FRP bars

1.2 试验设计

以剪跨比(1.88、2.70、3.54)、筋材类型(CFRP、BFRP、HFRP)、箍筋间距(100 mm、150 mm、200 mm)为试验参数设计了 7 根 UHPSSC 梁,截面尺寸为 150 mm×

表 4 FRP 筋力学性能

Tab.4 Mechanical properties of FRP bars

| 筋材类型 | d/mm | f_m/MPa | E_f/GPa | $\delta/\%$ |
|------|---------------|------------------|------------------|-------------|
| CFRP | 8 | 1 246.89 | 129.34 | 1.20 |
| CFRP | 16 | 1 238.15 | 115.18 | 1.08 |
| HFRP | 8 | 2 438.64 | 146.87 | 1.66 |
| HFRP | 16 | 2 438.67 | 137.81 | 1.78 |
| BFRP | 8 | 1 331.61 | 59.13 | 2.25 |
| BFRP | 16 | 1 351.49 | 54.32 | 2.49 |

300 mm,保护层厚度为 30 mm,试验工况的具体参数见表 5.表中梁编号的含义为:C、B 和 H 分别代表 CFRP 筋、BFRP 筋和 HFRP 筋;前 3 个数字代表箍筋间距,末尾的小数代表试验梁的剪跨比,例如 C150-1.88 的含义为箍筋间距为 150 mm、剪跨比为 1.88 的 CFRP-UHPSSC 试验梁.为研究剪跨比的影响,FRP-UHPSSC 梁长采用 3 种长度(1 300 mm、1 700 mm 和 2 100 mm),梁的加载装置和截面配筋见图 2.本试验所有梁均为超筋配筋以避免发生受弯破坏.采用 1 000 kN 液压千斤顶对试验梁进行分级加载,试验梁破坏时停止加载,其中顶部加载块和底部支撑垫块的宽度均为 70 mm.

表 5 试验梁参数设计

Tab.5 Parameters design of test beams

| 梁编号 | 箍筋间距/mm | 剪跨比 | 梁长/mm |
|-----------|---------|------|-------|
| C100-1.88 | 100 | 1.88 | 1 300 |
| C150-1.88 | 150 | 1.88 | 1 300 |
| C200-1.88 | 200 | 1.88 | 1 300 |
| B150-1.88 | 150 | 1.88 | 1 300 |
| H150-1.88 | 150 | 1.88 | 1 300 |
| C150-2.70 | 150 | 2.70 | 1 700 |
| C150-3.54 | 150 | 3.54 | 2 100 |

2 试验结果和分析

FRP-UHPSSC 梁试验结果如表 6 所示,表中包含每种工况下出现跨中弯曲裂缝的开裂荷载 P_{cr} 以及对应的跨中挠度 Δ_{cr} 、首条斜裂缝的开裂荷载 $P_{x,cr}$ 、极限荷载 P_u 以及其对应的跨中挠度值 Δ_u 和破坏模式.

2.1 荷载-挠度曲线

图 3 为跨中荷载-挠度曲线.由图 3 可知,试验梁的跨中荷载-挠度曲线分为 2 个阶段.第 1 阶段为 UHPSSC 预开裂阶段,剪跨比相同的试验梁,其荷载-挠度曲线几乎完全重合且呈线性变化,这是因为

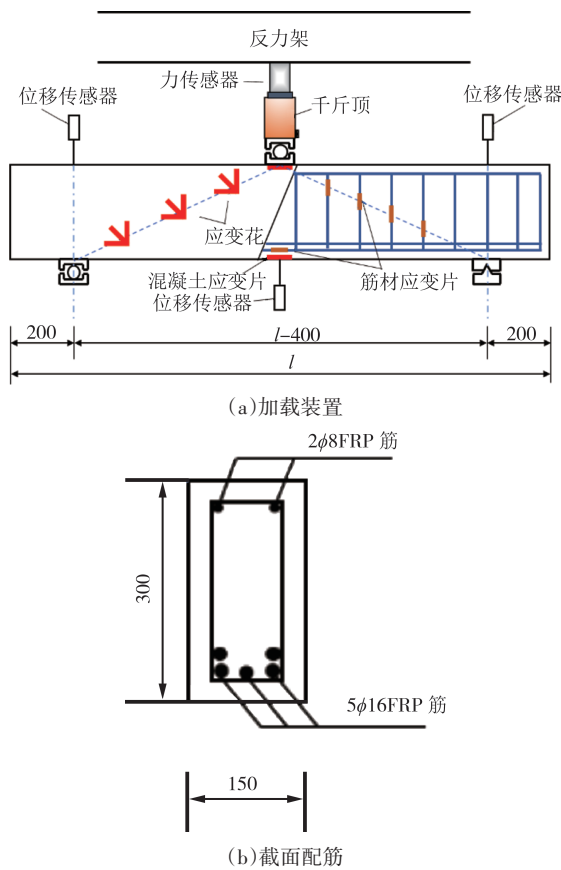


图2 加载装置和截面配筋图(单位:mm)

Fig.2 Loading device and sectional reinforcement drawing(unit:mm)

开裂前截面惯性矩相同,所以抗弯刚度基本相同;当出现首条裂缝后,荷载会发生突降,曲线小幅度下降,此后到试验梁破坏为第2阶段.第2阶段曲线的斜率相较于开裂前的曲线斜率会偏小,这是由于连续的剪切裂缝和弯曲裂缝会降低梁的惯性矩,因此刚度明显降低,跨中挠度增加.此后,因为FRP筋线

表6 FRP-UHPSSC梁试验结果

Tab.6 Test results of FRP-UHPSSC beams

| 梁编号 | P_{cr}/kN | Δ_{cr}/mm | $P_{s,cr}/kN$ | P_u/kN | Δ_u/mm | 破坏模式 |
|-----------|-------------|------------------|---------------|----------|---------------|------|
| C100-1.88 | 56.55 | 0.60 | 113.10 | 380.95 | 8.67 | 剪压 |
| C150-1.88 | 53.57 | 0.55 | 92.30 | 330.35 | 7.68 | 剪压 |
| C200-1.88 | 53.57 | 0.50 | 83.30 | 270.83 | 6.65 | 剪压 |
| B150-1.88 | 56.55 | 0.58 | 92.30 | 303.90 | 7.86 | 剪压 |
| H150-1.88 | 59.52 | 0.63 | 92.30 | 497.02 | 9.78 | 剪压 |
| C150-2.70 | 26.80 | 0.70 | 80.40 | 280.00 | 13.77 | 剪压 |
| C150-3.54 | 11.90 | 0.48 | 68.50 | 250.00 | 17.29 | 斜拉 |

弹性的特征以及裂缝较快延伸到接近受压区混凝土边缘位置后便不再继续发展,试件梁在第2阶段的刚度会比较稳定,表现为第2阶段荷载-挠度曲线基本呈现线性变化.

跨中挠度随着剪跨比的增大而增大,极限状态下,C150-2.70和C150-3.54相较于C150-1.88,跨中挠度分别提升79.3%和125.1%.剪跨比越大意味着力臂越长,跨中截面在相同荷载下承受的力矩更大,即产生更大的拉伸应力,该拉伸应力会造成梁跨中底部裂缝更快地开展,增加试验梁的挠度;剪跨比越小,荷载-挠度曲线越陡峭,表明梁的刚度越大. C100-1.88、C150-1.88和C200-1.88在跨中首条裂缝出现后直到试件破坏,曲线变化趋势几乎相同,可见箍筋间距对FRP-UHPSSC梁截面抗弯刚度影响有限. H150-1.88的荷载-挠度曲线相较于其他两种筋材的UHPSSC梁更加陡峭,这是因为开裂后试验梁的刚度取决于纵筋的轴向刚度($E_s A_s$)^[21],根据表4可知HFRP筋的弹性模量更大,所以开裂后HFRP筋试验梁的刚度更大.

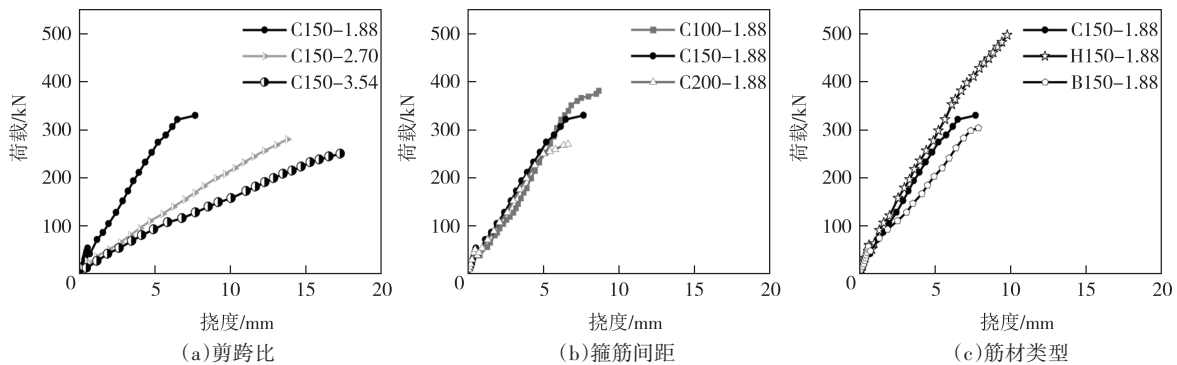


图3 跨中荷载-挠度曲线

Fig.3 Load-deflection curves at mid-span

2.2 破坏过程与破坏模式

图4为试验梁裂缝分布和破坏模式.剪跨比相

同的试验梁,其裂缝发展的过程基本一致.以C100-1.88为例,当加载至开裂荷载时,梁跨中底部会突然

出现一条竖向的弯曲裂缝,此裂缝一经开裂便已延伸至超过梁高 1/2 的位置,表现出明显的脆性.随着荷载继续施加,跨中裂缝继续向上发展,受压区混凝土高度不断减小,剪跨区梁腹中位置开始出现斜裂缝,斜裂缝一旦出现便会迅速向加载点和支座端延伸,并逐渐形成临界斜裂缝,此阶段斜裂缝的宽度增量大于跨中弯曲裂缝的宽度增量.C150-2.70 和 C150-3.54 除了在跨中位置出现弯曲裂缝,在剪跨区底部也会产生弯曲裂缝,向上发展至梁高 1/3 处时开始向加载点方向倾斜.几乎所有试验梁到加载后期,即施加的荷载在极限荷载的 80% 左右时,跨中弯曲裂缝和斜裂缝的数量均不再增加,破坏时试验梁会被一条主斜裂缝贯穿,由于混凝土内部没有粗骨料以及短切纤维的“桥联”作用,试验梁在破坏过程中会出现混凝土块崩出飞溅的现象.

由表 6 可知,剪跨比为 1.88 和 2.70 的梁均表现

为剪压破坏.C200-1.88、C150-1.88 和 C100-1.88 剪跨区斜裂缝的数量依次增多,这可能是因为箍筋间距越小,FRP 筋笼和 UHPSSC 的整体性越好,对核心混凝土的约束作用越强,使斜裂缝的发展更加充分.C150-3.54 发生斜拉破坏,此工况的首条斜裂缝出现在剪压区梁腹中位置,在向下发展时并未完全到底部,而是发展至纵筋位置后向两端水平延伸,FRP 纵筋与 UHPSSC 界面黏结力减小,接触面发生滑移,最终在梁底形成裂缝网格,导致混凝土整块剥落,如图 5 所示.C150-1.88、B150-1.88 和 H150-1.88 的裂缝发展情况和破坏形态无明显差别,说明筋材类型并不会改变最终的破坏模式.此外试验过程中还发现,几乎所有工况的 FRP 箍筋会发生如图 6 所示的弯曲处的断裂,这是由于 FRP 箍筋弯曲处的抗拉强度仅为单轴拉伸时抗拉强度的 30%~80%^[22],因此箍筋会先在弯曲薄弱处被拉断.

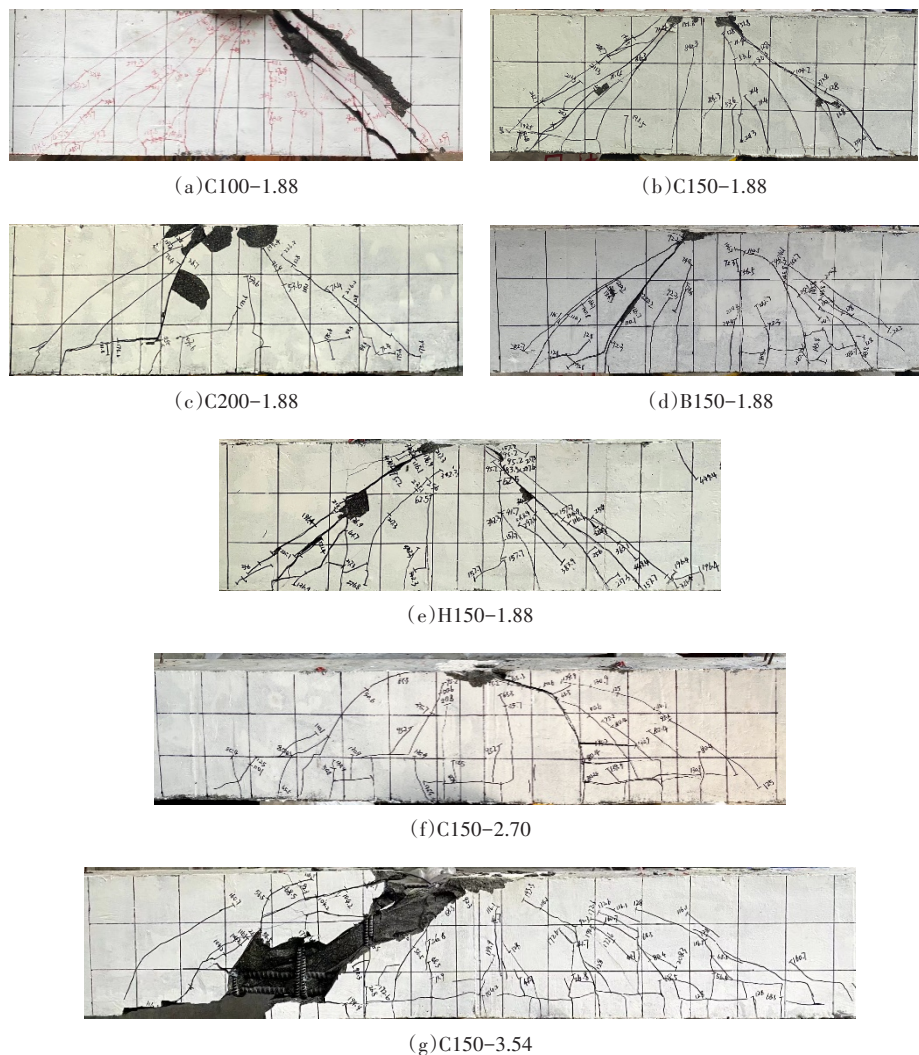


图 4 试验梁裂缝分布和破坏模式

Fig.4 Crack distribution and failure mode of test beams



图5 工况 C150-3.54的混凝土块剥落
Fig.5 Concrete block spalling of C150-3.54



图6 箍筋的弯曲处断裂
Fig.6 Broken at the bend of stirrup

2.3 箍筋应变

取每根试验梁破坏时临界斜裂缝经过的箍筋进行分析.箍筋应变曲线如图7所示.加载初期荷载较小时,试验梁的箍筋应变出现了正值和负值,说明箍筋在此阶段受拉或受压可能与UHPSSC内部开展微裂缝有关,但应变值都非常小,这意味着UHPSSC承担绝大部分剪力,箍筋在此阶段基本不受力.一旦剪跨区出现斜裂缝,箍筋应变值发生突增,曲线有明显转折,一部分剪力由UHPSSC转移到箍筋上.当形成临界斜裂缝后,由于斜裂缝宽度的增长不断加快,箍

筋的应变增速明显提升.

图7(a)显示,在荷载相同时,剪跨比越大的工况,其箍筋应变越大,这意味着首条斜裂缝出现后,箍筋在较大的剪跨比下会承担更大的应力,对抗剪承载力的贡献更高.从表6可知,仅箍筋间距改变的情况下,首条斜裂缝的开裂荷载随着箍筋间距的增大而减小,且箍筋间距越大,在加载过程中产生的应变越大[图7(b)],这意味着单根箍筋要承担更大的剪力.筋材弹性模量越大的试验梁在受力相同时箍筋产生的应变越小,如图7(c)所示,在加载过程中受力一致时,HFRP箍筋应变最小,CFRP箍筋次之,BFRP箍筋应变最大;但在试验梁极限状态下,BFRP箍筋应变、CFRP箍筋应变和HFRP箍筋应变依次增加,说明弹性模量较大的箍筋较难变形,产生的应变更小,在受力过程中拥有更大的变形储备.

鉴于FRP筋的低弹性模量的特性,为防止裂缝宽度过大,许多国家在抗剪设计中限制了FRP箍筋的应力和应变.如在ACI 440.1R—2015^[23]中,规定的抗剪FRP筋拉伸应变值为0.004,且将FRP箍筋的极限应力控制在 $0.004E_f \leq f_{fb}$,而本试验的FRP箍筋应变值主要为5 500~11 000 $\mu\epsilon$,可见规范的应变限制非常保守.Said等^[24]通过回归修正得到新的限制FRP箍筋极限应变预估方程为:

$$\epsilon_{fv} = 0.000\ 396 \sqrt{f'_c \left(\frac{\rho_f E_f}{\rho_v E_{fv}} \right)} \quad (1)$$

式中: ρ_f 为纵筋配筋率; ρ_v 为配箍率; E_{fv} 为FRP箍筋弹性模量.基于式(1),计算得CFRP箍筋、BFRP箍筋和HFRP箍筋的应变值为6 000 $\mu\epsilon$ ~11 000 $\mu\epsilon$,故能较好地预测箍筋应变值.

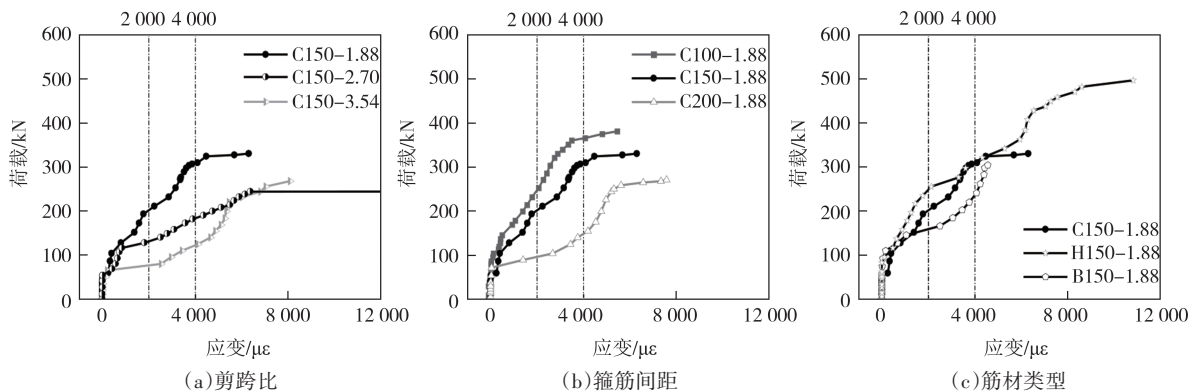


图7 箍筋应变曲线

Fig.7 Stirrup strain curves

3 抗剪承载力分析

FRP-UHPSSC 梁的抗剪承载力受力分析复杂,影响因素多,本节主要分析剪跨比、箍筋间距和筋材类型对 FRP-UHPSSC 梁抗剪承载力的影响。

3.1 剪跨比的影响

图 8(a)显示了剪跨比对首条裂缝出现时对应的开裂荷载以及破坏时的极限荷载的影响。C150-1.88 和 C150-2.70 相较于 C150-3.54,开裂荷载分别增加了 350% 和 125%,极限荷载分别提升了 32.14% 和 12.00%,可见剪跨比对承载力有显著的影响,开裂荷载和极限荷载随着剪跨比的减小而增大。剪跨比减小意味着加载点到支座的距离缩短,从而通过对角压缩将大部分荷载传递至支座处,提高了“拱作用”的有效性,使梁的抗剪承载力提高;当剪跨比变大时,传力机制由“拱作用”向“梁作用”转变,UHPSSC 承担的剪力减小,箍筋对抗剪承载力的贡献变大。

3.2 箍筋间距的影响

由表 6 和图 8(b)可知,箍筋间距不同对开裂荷载影响不大,说明在预开裂阶段箍筋对抗剪承载力贡献较小,但箍筋间距对极限荷载产生了较为明显的影响,C100-1.88、C150-1.88 相较于 C200-1.88,极限荷载分别提升了 40.66% 和 21.98%。箍筋配置越密,斜裂缝能经过的箍筋数量越多,箍筋能承担的剪切应力和拉伸应力的合力越大,箍筋在抗剪承载力中的贡献就越大。在出现较为明显的斜裂缝时,密集

的箍筋也能有效抑制斜裂缝的宽度,协助混凝土继续承担剪力,同时还能增强对内部混凝土的约束,使混凝土骨料咬合作用增强,防止梁过早破坏或荷载突增时突然破坏。

3.3 筋材类型的影响

所有试验梁的纵筋均没有被拉断,说明 CFRP 纵筋、BFRP 纵筋和 HFRP 纵筋的抗拉性能没有得到完全发挥。图 8(c)显示,H150-1.88、C150-1.88 与 B150-1.88 相比,开裂荷载相差不大,但极限荷载分别提升了 63.55% 和 8.70%。弹性模量和抗拉强度最大的 HFRP 筋对试验梁极限荷载的提升最明显,这是由于筋材的弹性模量和强度增大会增加试验梁的轴向刚度以及纵筋在梁中的销栓作用,进而抑制临界斜裂缝的发展,同时也能提升裂缝间的骨料咬合力。秦卫红等^[25]提出纵筋种类不同的试验梁,其抗剪承载力的差异主要源自骨料间的咬合作用和纵筋的销栓作用,且骨料间的咬合作用会随着低弹性模量的筋材对斜裂缝发展的限制作用变小而降低。再者,对于 FRP 筋混凝土梁,FRP 纵筋提供的销栓作用较小,可忽略不计^[22],因此筋材的轴向刚度能对 UHPSSC 梁的极限抗剪承载力产生明显影响:当纵筋配筋数量相同时, E_t 越大,梁的抗剪承载力越高,这一点与文献^[26]一致。通过单轴拉伸试验测得的 HFRP 筋和 CFRP 筋的弹性模量比 BFRP 筋分别高出 154% 和 112%,这说明在试验梁受剪过程中,BFRP 纵筋的力学性能发挥更加充分。

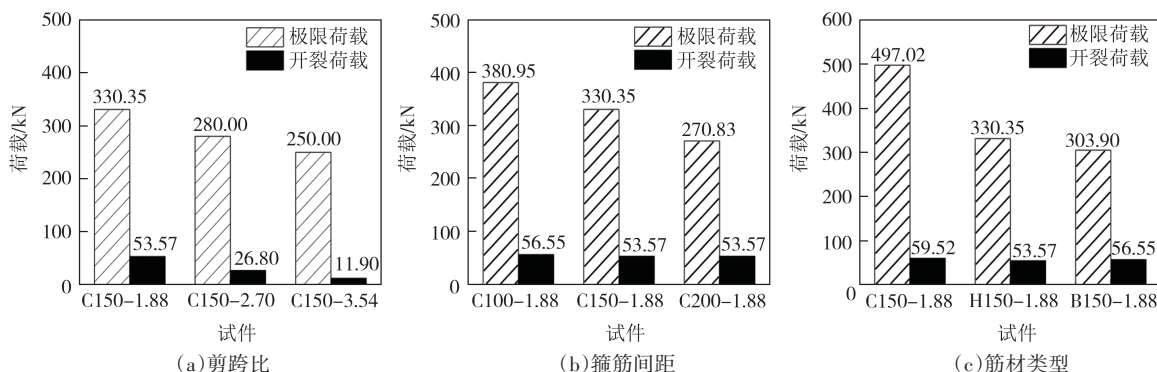


图 8 不同因素对极限荷载和开裂荷载的影响

Fig.8 Effect of different factors on ultimate load and cracking load

4 抗剪承载力计算

随着 FRP 筋混凝土构件的发展和应用,各国相

继推出相应设计规范供参考,规范大多规定,FRP 筋混凝土构件斜截面承载力计算公式 V_u 由两部分组成,分别是混凝土的抗剪承载力 V_c 和 FRP 箍筋的抗剪承载力 V_f ,可写成:

$$V_u = V_c + V_f \quad (2)$$

4.1 各国规范计算公式

4.1.1 中国规范(GB 50608—2020)^[27]

$$V_c = 0.86f_t b_w k h_0 \quad (3)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f \alpha + (\rho_f \alpha)^2} - \rho_f \alpha \quad (4)$$

$$V_f = A_{fv} f_{fv} h_0 / s \quad (5)$$

$$f_{fv} = \min \left\{ 0.004E_{fv}, \left(0.3 + \frac{0.05r_v}{d_v} \right) f_{fu} \right\} \quad (6)$$

式中: f_t 为混凝土抗拉强度; b_w 为截面宽度; k 为截面中和轴到受压区边缘的距离与有效高度之比; h_0 为截面有效高度; ρ_f 为纵筋配筋率; α 为FRP筋弹性模量与混凝土弹性模量之比,即 E_f/E_c ; A_{fv} 为截面内配置箍筋各肢总面积; f_{fv} 为FRP筋抗拉强度设计值; s 为箍筋间距; E_{fv} 为FRP箍筋弹性模量; r_v/d_v 为弯曲半径与直径之比; f_{fu} 为FRP筋极限抗拉强度.

4.1.2 美国规范(ACI 440.1R—2015)^[23]

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w k h_0 \quad (7)$$

式中: f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度.

箍筋抗剪承载力 V_f 计算公式与GB 50608—2020相同,可参考式(5)、式(6).

4.1.3 英国规范(BISE 1999)^[28]

$$V_c = 0.79 \left(100\rho_f \frac{E_f}{E_s} \right)^{1/3} \left(\frac{400}{h_0} \right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25} \right)^{1/3} b_w h_0 \quad (8)$$

$$V_f = 0.0025 E_{fv} A_{fv} h_0 / s \quad (9)$$

式中: E_s 为钢筋弹性模量; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度.

4.1.4 加拿大规范(ISIS Manual 03—07)^[29]

对于 $h_0 \leq 300$ mm的矩形梁:

$$V_c = 0.2\lambda_c \varphi_c \sqrt{f'_c} b_w h_0 \sqrt{E_f/E_s} \quad (10)$$

$$V_f = 0.9A_{fv} f_{fv} h_0 \cot \theta / s \quad (11)$$

$$f_{fv} = \min \left\{ \varepsilon_{fv} E_{fv}, \frac{(0.3 + 0.05r_v/d_v) f_{fu}}{1.5} \right\} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{fv} = 0.0001 \left[f'_c \rho_f E_f / (\rho_{fv} E_{fv}) \right]^{1/2} \quad (13)$$

式中: λ_c 为混凝土密度系数,取值1; φ_c 为混凝土抵抗系数,取值0.65; θ 为主压应力倾角; ε_{fv} 为箍筋的极限应变.

4.2 计算结果汇总和分析

对比抗剪公式可发现,不同规范的箍筋抗剪承载力计算公式 V_f 的形式大体一致,但混凝土提供的抗剪承载力计算公式 V_c 却有较大的差别,梁的抗剪承载力与混凝土的抗压强度之间并非线性关系,而

是与 f_t 、 $(f'_c)^{1/2}$ 或 $(f_{cu})^{1/3}$ 呈线性关系.另外,在评估FRP筋混凝土梁的抗剪承载力时,规范BISE 1999和ISIS 2007中 V_c 的计算式考虑了FRP筋作为受力钢筋时与普通钢筋的差异,Wegian等^[30]通过试验和计算也提出普通钢筋加固混凝土构件的抗剪承载力乘以系数 $(E_f/E_s)^{1/3}$ 后得到FRP筋混凝土构件的抗剪承载力, E_s 为钢筋弹性模量,一般取200 GPa,说明同等条件下,FRP筋混凝土梁中混凝土对剪力的贡献值相较于钢筋混凝土梁更小.表7为规范公式计算结果.表中的试验值(V_{exp})为 $P_u/2$.将计算值(V_{cal})与试验值(V_{exp})进行比较.结果表明,规范ACI 440.1R—2015、BISE 1999和ISIS Manual 03—07得到的计算值与试验值之比(V_{cal}/V_{exp})的平均值分别为0.78、0.72和0.49,意味着这3种规范对FRP-UHPSSC梁的抗剪承载力计算较保守.ISIS 2007的计算最为保守,因为在计算箍筋提供的抗剪承载力时,箍筋的极限应变见式(13),与2.3节中FRP箍筋应变方程(1)相比,式(13)的计算结果约为式(1)的1/4,因此ISIS Manual 03—07的计算值偏小.4种规范的变异系数相差小,其中ISIS Manual 03—07的变异系数为25%,在计算混凝土提供的剪切强度时,公式中未直接考虑纵筋配筋率的影响.此外GB 50608—2020计算得到的 V_{cal}/V_{exp} 的平均值为0.91,对大部分CFRP筋试验梁的抗剪预测较好,但由于BFRP筋和HFRP筋试验梁的试验结果偏离较大,因此GB 50608—2020的标准差最大.

BFRP筋试验梁与HFRP筋试验梁的计算结果相比于CFRP筋试验梁偏离性更大,BFRP-UHPSSC梁和HFRP-UHPSSC梁的 V_{cal}/V_{exp} 计算得到的最大值

表7 规范公式计算结果

Tab.7 Calculation result of standard formula

| 梁编号 | $V_{exp}/$ MPa | V_{cal}/V_{exp} | | | |
|-----------|-------------------|-------------------|---------------------|--------------|-------------------------|
| | | GB 50608 —2020 | ACI 440.1R —2015 | BISE 1999 | ISIS Manual 03—07 |
| C100—1.88 | 190.48 | 1.01 | 0.90 | 0.75 | 0.48 |
| C150—1.88 | 165.18 | 0.91 | 0.78 | 0.71 | 0.49 |
| C200—1.88 | 135.42 | 0.96 | 0.80 | 0.77 | 0.55 |
| B150—1.88 | 151.95 | 0.57 | 0.47 | 0.49 | 0.30 |
| H150—1.88 | 248.51 | 0.67 | 0.58 | 0.52 | 0.37 |
| C150—2.70 | 140.00 | 1.07 | 0.92 | 0.84 | 0.58 |
| C150—3.54 | 125.00 | 1.20 | 1.03 | 0.94 | 0.65 |
| 平均值 | | 0.91 | 0.78 | 0.72 | 0.49 |
| 标准差 | | 0.22 | 0.19 | 0.16 | 0.12 |
| 变异系数 | | 0.24 | 0.24 | 0.23 | 0.25 |

分别为0.57和0.67,最小误差分别超过40%和30%,抗剪承载力被低估,整体计算结果偏差较大.这是因为目前关于FRP筋混凝土构件的规范主要针对CFRP筋、GFRP筋和芳纶纤维增强复合材料(Aramid Fiber Reinforced Polymer,AFRP)筋加固的混凝土构件,而FRP的筋种类不同,力学性能也有很大差距,因此还需更多研究来提出适用于BFRP-UHPSSC梁和HFRP-UHPSSC梁的抗剪公式.从表8可得,4种抗剪公式中均未考虑剪跨比的作用,导致以剪跨比作为试验因素的工况用不同规范公式计算得到的 V_{cal}/V_{exp} 误差超过15%,而试验证明,剪跨比对试验梁的抗剪承载力有着不可忽略的影响.ACI 440.1R—2015与BISE 1999对剪跨比较大的试验梁有更好的预测效果,而GB 50608—2020对剪跨比为3.54的试验梁的计算结果偏大.

表8 抗剪公式中考虑的影响因素

Tab.8 Influence factors considered in shear formula

| 公式来源 | 影响因素 | | | | |
|-------------------|-------|------|-----|-----|--------|
| | 纵筋配筋率 | 尺寸效应 | 剪跨比 | 配箍率 | 筋材弹性模量 |
| GB 50608—2020 | √ | — | — | √ | √ |
| ACI 440.1R—2015 | √ | — | — | √ | √ |
| BISE 1999 | √ | √ | — | √ | √ |
| ISIS Manual 03—07 | — | √ | — | √ | √ |

注:—表示未包含;√表示包含.

5 结论

1)剪跨比对FRP-UHPSSC梁的抗剪性能有显著的影响.剪跨比增大,开裂荷载和极限荷载会逐渐减小,跨中挠度增大,破坏模式由剪压破坏转变为斜拉破坏.由于混凝土内部没有粗骨料以及纤维的“桥联”作用,试验梁在破坏时会出现混凝土块崩出飞溅的情况.

2)减小箍筋间距能提高梁的抗剪承载力.箍筋间距越小的试验梁最终形成的斜裂缝数量越多,剪跨区斜裂缝发展更加充分,但箍筋间距对跨中挠度无明显影响.

3)FRP-UHPSSC梁开裂后的刚度和极限抗剪承载力均与筋材的弹性模量有关.弹性模量越大,梁开

裂后的荷载-挠度曲线越陡峭,极限抗剪承载力越高.但同等条件下,BFRP-UHPSSC梁中筋材的力学性能发挥更充分.

4)比较现有FRP筋混凝土设计规范对FRP-UHPSSC梁的适用性,结果表明:现有4部FRP筋混凝土构件规范中的抗剪公式均未考虑剪跨比的影响,且筋材类型不同的FRP-UHPSSC梁抗剪承载力计算结果差异较大.

参考文献

- [1] 朱德举,周琳林,耿健智,等.不同地域海砂取代率对混凝土力学性能的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(11):237-244.
ZHU D J,ZHOU L L,GENG J Z,et al. Effect of replacement rate of sea sand from different regions on mechanical properties of concrete[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022,49(11):237-244. (in Chinese)
- [2] 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):155-160.
HUANG L,XIE J H,LU Z Y. Research progress and prospects on seawater sea-sand concrete[J]. Concrete, 2020(9):155-160. (in Chinese)
- [3] 马亚飞,李晶,苏小超,等.锚固区钢绞线锈断PC梁黏结性能退化试验研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(4):966-975.
MA Y F,LI J,SU X C,et al. Experimental investigation on bond behavior of PC beams with strand corrosion in anchorage zone[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021,18(4):966-975. (in Chinese)
- [4] 漆贵海,王玉麟,李硕,等.海砂混凝土国内研究综述[J].混凝土,2013(5):57-61.
QI G H,WANG Y L,LI S,et al. Review on sea sand concrete research in China[J]. Concrete, 2013(5):57-61. (in Chinese)
- [5] GAO Y J,ZHOU Y Z,ZHOU J N,et al. Blast responses of one-way sea-sand seawater concrete slabs reinforced with BFRP bars[J]. Construction and Building Materials, 2020, 232: 117254.
- [6] ZHANG Q T,XIAO J Z,LIAO Q X,et al. Structural behavior of seawater sea-sand concrete shear wall reinforced with GFRP bars[J]. Engineering Structures, 2019, 189:458-470.
- [7] LI Y L,ZHAO X L,SINGH-RAMAN R K. Mechanical properties of seawater and sea sand concrete-filled FRP tubes in artificial seawater[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191:977-993.
- [8] LI L J,LU J K,FANG S,et al. Flexural study of concrete beams with basalt fibre polymer bars[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 2018, 171(7): 505-516.
- [9] 李树旺. BFRP筋海砂混凝土梁受剪性能试验研究[D].广州:

- 广东工业大学, 2014.
- LI S W. Experiment studies on the shear performance of sea sand concrete beam with BFRP tendons [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [10] SU C, WANG X, DING L N, et al. Durability of seawater sea sand concrete beams reinforced with carbon nanotube-modified BFRP bars in a marine environment [J]. *Composite Structures*, 2022, 292: 115642.
- [11] 叶庆阳, 薛聪聪, 余敏, 等. 超高性能混凝土配合比设计与抗压强度试验研究 [J]. *工业建筑*, 2020, 50(3): 124-130.
- YE Q Y, XUE C C, YU M, et al. Mix proportion design and compressive strength test of ultra-high performance concrete [J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(3): 124-130. (in Chinese)
- [12] TENG J G, XIANG Y, YU T, et al. Development and mechanical behaviour of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(14): 3100-3120.
- [13] 朱德举, 李龙飞, 郭帅成. 超高性能海水海砂混凝土性能的影响因素试验研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(3): 187-195.
- ZHU D J, LI L F, GUO S C. Research on influence factors of performance of ultra-high performance seawater sea-sand concrete [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(3): 187-195. (in Chinese)
- [14] 薛文远, 胡翔, 薛伟辰. FRP筋UHPC梁受弯承载力计算方法 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11): 5109-5121.
- XUE W Y, HU X, XUE W C. Calculation method of flexural capacity of ultra-high performance concrete beams reinforced with FRP rebars [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(11): 5109-5121. (in Chinese)
- [15] YOO D Y, BANTHIA N, YOON Y S. Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars [J]. *Engineering Structures*, 2016, 111: 246-262.
- [16] FERRIER E, MICHEL L, ZUBER B, et al. Mechanical behaviour of ultra-high-performance short-fibre-reinforced concrete beams with internal fibre reinforced polymer bars [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 68: 246-258.
- [17] CAO X A, HE D B, QIAN K, et al. Shear behavior of glass FRP bars-reinforced ultra-high performance concrete I-shaped beams [J]. *Structural Concrete*, 2023, 24(1): 1503-1520.
- [18] 曹天. CFRP筋增强FRCC受弯构件抗剪性能的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- CAO T. Experimental study on shear behaviours of CFPR tendons reinforced FRCC flexural components [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [19] 超高性能混凝土基本性能与试验方法: T/CBMF 37—2018、T/CCPA 7—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Fundamental characteristics and test methods of ultra-high performance concrete: T/CBMF 37—2018, T/CCPA 7—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [20] YOU Y J, PARK Y H, KIM H Y, et al. Hybrid effect on tensile properties of FRP rods with various material compositions [J]. *Composite Structures*, 2007, 80(1): 117-122.
- [21] EL-SAYED A K, EL-SALAKAWY E F, BENMOKRANE B. Shear strength of fibre-reinforced polymer reinforced concrete deep beams without web reinforcement [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2012, 39(5): 546-555.
- [22] 刘宗全, 岳清瑞, 李荣, 等. 全FRP钢筋混凝土斜截面承载力研究进展 [J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017(1): 109-115.
- LIU Z Q, YUE Q R, LI R, et al. Research progress on shear strength of concrete beams reinforced with frp rebars and stirrups [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2017(1): 109-115. (in Chinese)
- [23] Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars: ACI 440.1R—2015 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.
- [24] SAID M, ADAM M A, MAHMOUD A A, et al. Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102: 574-591.
- [25] 秦卫红, 惠卓, 张普, 等. 钢-纤维复合纵筋和玄武岩纤维复合纵筋混凝土梁受剪承载力试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(11): 209-220.
- QIN W H, HUI Z, ZHANG P, et al. Experimental study on shearing capacity of concrete beams longitudinal reinforced with steel fiber composite bars and BFRP bars [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(11): 209-220. (in Chinese)
- [26] EL-SAYED A, EL-SALAKAWY E, BENMOKRANE B. Shear strength of one-way concrete slabs reinforced with fiber-reinforced polymer composite bars [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(2): 147-157.
- [27] 纤维增强复合材料建设工程应用技术标准: GB 50608—2020 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- Technical code for infrastructure application of FRP composites: GB 50608—2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2020. (in Chinese)
- [28] Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fiber composite reinforcement: BISE 1999 [S]. London: British Institution of Structural Engineers, 1999.
- [29] Design manual No. 3: reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers: ISIS Manual 03—07 [S]. Manitoba: Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, 2007.
- [30] WEGIAN F M, ABDALLA H A. Shear capacity of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymers [J]. *Composite Structures*, 2005, 71(1): 130-138.