

负弯矩作用下 UHPC 湿接缝桥面板裂后性能研究

戚家南^{1,2,3†},程杭¹,邹伟豪¹,王景全^{1,2,3}

- (1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室,江苏 南京 211189;
2. 东南大学 东南大学桥梁研究中心,江苏 南京 211189;
3. 东南大学 国家预应力工程技术研究中心,江苏 南京 211189)

摘要:针对预制拼装桥面板接缝处受力复杂、易开裂等问题,提出了一种新型超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)燕尾榫接缝.通过负弯矩作用下荷载模型试验,研究了不同接缝材料和预应力水平对 UHPC 湿接缝桥面板极限承载力、破坏形式及裂缝分布等的影响规律.基于试验验证的数值仿真模型,对比分析了不同接缝位置、接缝形式、纵筋率、材料强度及板件厚度等参数对湿接缝受弯性能的影响.研究表明:预应力由 0 MPa 提高到 5 MPa,板件开裂应力和极限承载力分别提升 40.0% 和 5.5%;燕尾榫接缝较直角榫接缝与平接缝的开裂应力分别提高 7.5% 和 16.0%,承载力分别提高 5.4% 和 16.0%.燕尾榫接缝整体性好,改变接缝位置对湿接缝受弯性能影响较小;板件开裂应力和极限承载力随材料强度增大而提高,材料强度超过 120 MPa 时增幅减小;UHPC 接缝初裂刚度约为初始刚度的 90%,剩余刚度约为初始刚度的 25%;初裂后,结构刚度迅速下降,纵筋屈服后,结构刚度退化速度明显减缓,最终刚度保持在剩余刚度;提出了用极限荷载对应位移与开裂荷载对应位移之比为表达形式的 UHPC 湿接缝桥面板裂后延性系数,本文板件裂后延性系数为 10.0~20.0,表明 UHPC 湿接缝桥面板具有较好的裂后变形能力.

关键词:抗弯强度;超高性能混凝土;有限元分析;湿接缝桥面板;负弯矩作用
中图分类号:TU444 **文献标志码:**A

Research on Post-cracking Behavior of UHPC Wet Joint Bridge Panels under Negative Bending Moment

QI Jianan^{1,2,3†}, CHENG Hang¹, ZOU Weihao¹, WANG Jingquan^{1,2,3}

- (1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China;
2. Bridge Engineering Research Center of Southeast University, Southeast University, Nanjing 211189, China;
3. National Prestress Engineering Research Center, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex force and easy cracking at the joints of prefabricated assembled

* 收稿日期:2022-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51908122, U1934205), National Natural Science Foundation of China(51908122, U1934205);江苏省自然科学基金资助项目(BK20200377), Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20200377);东南大学桥梁研究中心创新资助项目(BERC-1-1), Southeast University Bridge Research Center Innovation Funding Project(BERC-1-1);中交集团院士专项项目(YSZX-01-2022-02-B), China Communications Group Academician Special Project(YSZX-01-2022-02-B);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2242022k30031, 2242022k3003), Central Universities Basic Research Funds Special Funds Project(2242022k30031, 2242022k3003)

作者简介:戚家南(1988—),男,江苏宿迁人,东南大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: qijianan723@126.com

bridge decks, a new type of ultra-high performance concrete (UHPC) dovetail joints was proposed. Through the load model test under the action of negative bending moment, the influence of different joint materials and prestress levels on the ultimate bearing capacity, failure form and crack distribution of UHPC wet joint bridge panels were studied. Based on the numerical simulation model verified by the experiment, the influence of different joint positions, joint forms, longitudinal reinforcement ratio, material strength, and thickness of the specimens on the bending performance of wet joints were compared and analyzed. The results showed that when the prestress was increased from 0 MPa to 5 MPa, the cracking stress and ultimate bearing capacity of the specimen were increased by 40.0% and 5.5%, respectively; The cracking stress of the dovetail joints was increased by 7.5% and 16.0%, respectively, and the bearing capacity was increased by 5.4% and 16.0%, respectively, when compared with the right angle joints and flat joints. Integrity of dovetail joints was good, and changing the joint position had little impact on the bending performance of the wet joint; The cracking stress and ultimate bearing capacity of the specimen increased with the increase of material strength, and the growth rate decreased when the material strength exceeds 120 MPa; The initial cracking stiffness of UHPC joints was about 90% of the initial stiffness, and the residual stiffness was about 25%; After the appearance of the first crack, the structural stiffness decreased rapidly, and after the longitudinal reinforcement yielded, the structural stiffness degradation rate was significantly slowed down, and the final stiffness remained at the residual stiffness; The ratio of the corresponding displacement of the ultimate load to the displacement of the cracking load was proposed as the expression form of UHPC wet joint bridge panels cracking ductility coefficient, and the results of crack ductility coefficient was 10.0~20.0, indicating that the post-cracking deformation ability of UHPC wet joint bridge panels was better.

Key words: bending strength; ultra-high performance concrete; finite element analysis; wet joint bridge deck; negative moment effect

桥梁快速施工(Accelerated Bridge Construction, ABC)可显著缩短工期且机械化程度高、施工质量高,在桥梁工程领域得到了广泛应用^[1-2].接缝的连接性能是保证ABC施工质量的关键.普通混凝土湿接缝开裂、渗水和老化等问题严重,是结构受力的薄弱环节^[3-5].近些年,超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)被应用于桥梁湿接缝,由于其高强度、高韧性、高耐久性等优异力学性能^[6-8],有望改善湿接缝桥面板开裂严重、承载力不足的问题.

针对UHPC接缝受力性能,国内外开展了一些试验和有限元模拟研究.冯峥等^[9]通过狗骨板件试验研究了UHPC湿接缝的界面破坏特性、拉伸强度以及拉伸强度比.张阳等^[10]通过抗剪推出试验,研究了界面表观状况对抗剪强度和破坏模式的影响.Haber等^[11]通过直接拉拔试验和预制板连接试验,研究了配纤率对UHPC-钢筋黏结性能、开裂模式和极限承载力的影响.Pan等^[12]通过受拉试验和受弯试验,研究了湿接缝形式对桥面板的初裂荷载、极限承载力及裂缝宽度等力学性能的影响.Looney等^[13]开

发了一种用于桥面板湿接缝的非专有UHPC混合料,并在改性MOR抗弯试验中测试了其在干燥条件下的黏结强度.Arafa等^[14]通过8组预制板受弯试验,研究UHPC接缝的受力性能.Varga等^[15]采用标准化收缩和黏结强度测试方法对湿接缝进行了材料层面的评估,探究提高桥面板湿接缝性能的措施.Zhao等^[16]通过试验研究了RPC燕尾榫湿接缝的力学性能,并通过有限元模拟提出了接缝的设计参数.Qiu等^[17]通过UHPC板件足尺试验,对比分析了不同接缝形状、钢筋直径等对应的力学性能.可以发现,已有研究主要聚焦于桥面板承载力、破坏模式等,对裂后性能分析较少,裂后刚度退化情况与延性发展规律不明晰.因此,作者团队提出了一种钢丝网格处理后的燕尾榫形状的UHPC湿接缝桥面板,但这种接缝开裂与裂后行为尚不明确,亟须进一步研究.

本文进行了4片UHPC接缝桥面板负弯矩作用下模型试验,研究参数包括:预应力水平、材料类型.建立了试验验证的UHPC桥面板燕尾榫湿接缝精细化三维有限元模型,基于数值模型,进一步研究了接缝位置、形式、纵筋率、混凝土强度和板件厚度等参

数对UHPC湿接缝桥面板受弯性能的影响规律,提出了UHPC湿接缝桥面板裂后延性评价新指标,分析了裂后刚度和延性.

1 试验研究

1.1 板件设计与加载方式

试验通过4个UHPC板负弯矩加载,研究预应力

水平和材料类型对UHPC湿接缝受弯性能的影响.两种UHPC的配合比见图1,粗骨料粒径为6~8 mm.板内纵向配筋为9 ϕ 20,横向配筋为31 ϕ 16.板件参数及试验结果见表1和图2.板件E-A-0为标准组,湿接缝处UHPC无粗骨料,钢筋采用“U”形搭接^[18-19],搭接长度为150 mm,无预应力.

测量荷载大小、板端位移和纵向钢筋应变,观察裂缝发展.采用两点加载,板件两端荷载相同.测点

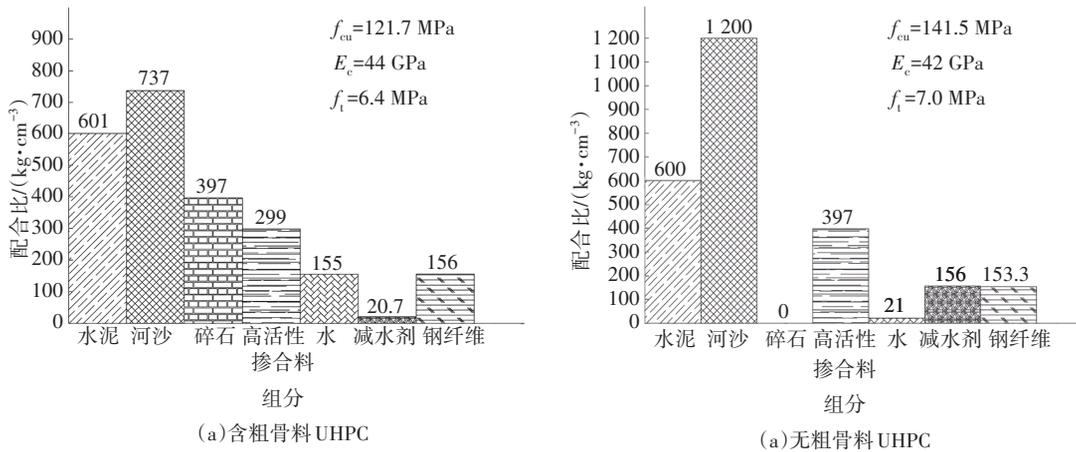


图 1 UHPC 配合比

Fig.1 Mixture proportion of UHPC.

表 1 板件主要参数及试验结果

Tab. 1 Main parameters and test results of plate

板件编号	UHPC 种类	预应力水平/MPa	P_{cr} /kN	P_u /kN	f_u /mm	研究参数
E-A-0	含粗骨料	0	50	310	250	—
E-A-3	含粗骨料	3	45	360	240	预应力水平
E-A-5	含粗骨料	5	75	380	280	预应力水平
E-B-0	无粗骨料	0	36	310	180	材料性能

注: P_{cr} 为板件初裂荷载; P_u 为板件极限承载力; f_u 为板件两端最大挠度值.

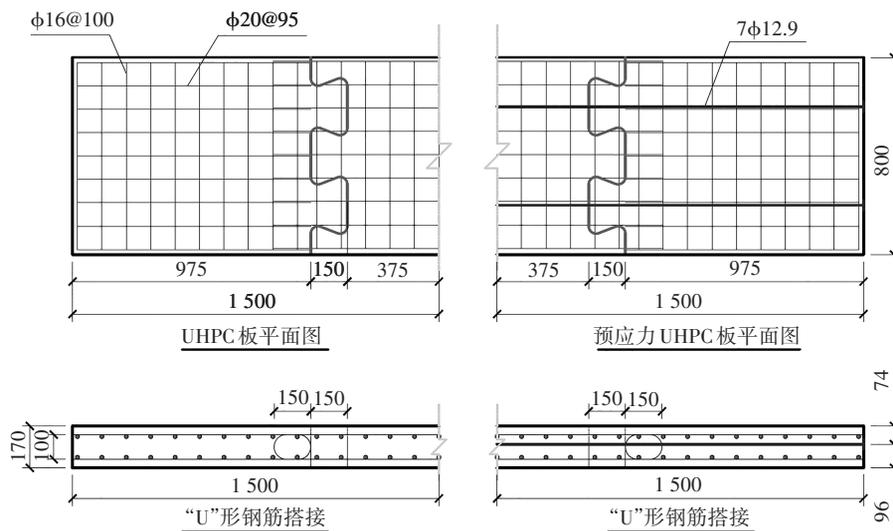


图 2 板件几何尺寸(单位:mm)

Fig.2 Dimensions of specimens (unit: mm)

及加载点详见图3. 分级加载, 预加载 10 kN 持荷 5 min, 第一阶段按 5 kN/min 的速率加载, 至出现可见裂缝; 第二阶段, 纵向钢筋屈服前按 10 kN/min 的速率加载; 第三阶段按 5 kN/min 的速率加载, 至板件破坏.

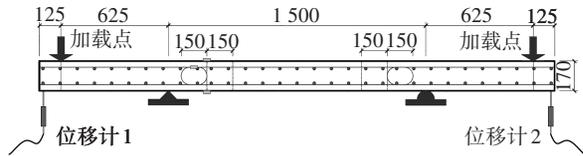


图3 测点及加载点布置(单位:mm)

Fig.3 Test setup (unit:mm)

1.2 试验结果

各组板件破坏模式相似, 加载到 10%~20% 峰值荷载时, 接缝处出现裂缝, 本文将 0.02 mm (裂缝观测仪最小刻度) 裂缝宽度对应的荷载称为开裂荷载, 但高度与宽度较小且发展缓慢. 荷载增加至约 30% 峰值荷载时, 板端挠度急剧增大, 纯弯段出现微裂缝且逐渐加密, 接缝处裂缝高度与宽度迅速发展, 形成横向通缝. 荷载接近峰值荷载时, 纤维拔出声剧烈, 板端挠度达到约 20 cm, 侧面主裂缝高度超过板件厚度的 70%, 宽度超过 1 mm. 板件完全破坏时, 裂缝分布在接缝两侧, 开裂形式详见图 4.

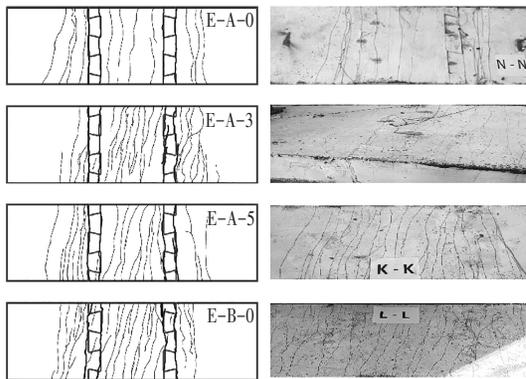


图4 板件开裂形式

Fig.4 Crack patterns

各组荷载挠度曲线形态相同, 试验主要结果见表 1 和图 5. 可以看出:

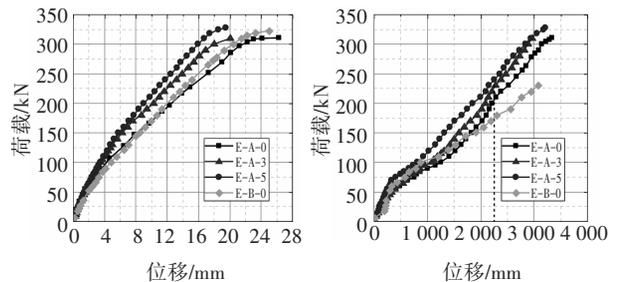
1) 预应力水平对 UHPC 湿接缝桥面板受弯性能影响显著, 预应力水平增加, 板件开裂荷载与极限承载力提高. 预应力提高 5 MPa, 板件开裂荷载与极限承载力相应提高 50.0% 和 22.6%.

2) 改变现浇板 UHPC 配合比对开裂应力与极限承载力影响较小. UHPC 中加入粗骨料后, UHPC 抗

压强度与抗拉强度变化小, 板件受弯性能影响较小.

3) 板件开裂前, 钢筋纵向应变随荷载线性增长. 开裂后, 应变非线性增长且增速加快. 纵筋屈服后, 应变持续增加, 曲线斜率变化不明显.

4) 预应力板件刚度更大, 钢筋的纵向应变小于非预应力板件. 无粗骨料 UHPC, 板件开裂前钢筋应变与标准板件差异较小. 开裂后, 无粗骨料 UHPC 密度更高, 裂后剩余刚度更大, 纵筋应变低于标准板件.



(a) 荷载-位移图

(b) 荷载-钢筋应变图

图5 荷载-位移图与荷载-钢筋应变图

Fig.5 Load versus deflection and load versus longitudinal reinforcement strain

2 数值模型建立与试验验证

2.1 材料本构

混凝土应力-应变曲线是确定 CDP 模型的依据, UHPC 本构曲线对有限元计算精度至关重要, 是分析结构拉、压力学行为的前提^[20].

钢筋为双折线本构模型, 钢筋与 UHPC 应力-应变曲线见图 6.

作者团队研究 UHPC 受拉本构, 证明双折线受拉本构关系式模拟效果更优^[21], 其忽略了受拉过程中材料硬化, 但其收敛性更优, 且在 UHPC 材料有限元模拟中应用广泛. 其表达式为:

$$\sigma_t = \begin{cases} \frac{f_t}{\varepsilon_{t0}} \varepsilon_t, & 0 < \varepsilon_t < \varepsilon_{t0} \\ f_t, & \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_t 和 f_t 分别为 UHPC 的拉应力和抗拉强度; ε_t 、 ε_{t0} 、 ε_{tu} 分别为 UHPC 拉应变、初裂拉应变和极限拉应变.

对 UHPC 受压本构关系, 根据破坏模式选取了 3 种常用应力-应变曲线.

1) 受压本构 1^[22]:

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad (2)$$

式中: σ_c 和 f_c 分别为混凝土的压应力和轴心抗压强度; $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{cu}$, ε_c 和 ε_{cu} 分别为 UHPC 压应变和峰值压应变; $k = 1.05E_c \times \varepsilon_{cu} / f_c$, E_c 为 UHPC 弹性模量.

2) 受压本构 2^[23]:

$$y = \begin{cases} \alpha\eta + (6 - 5\alpha)\eta^5 + (4\alpha - 5)\eta^6, & 0 \leq \eta \leq 1 \\ \frac{\eta}{\alpha(\eta - 1)^2 + \eta}, & \eta > 1 \end{cases} \quad (3)$$

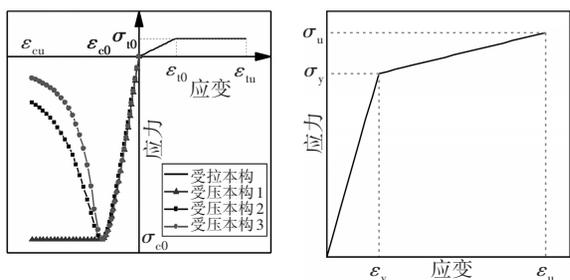
式中: $y = \sigma_c / f_c$; α 为修正系数, 根据试验数据, 选取上升段 $\alpha = 1.2$, 下降段 $\alpha = 2.41$.

3) 受压本构 3^[24]:

$$\sigma = (1 - d_c)E_c\varepsilon \quad (4)$$

$$\text{式中: } d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + \eta^n}, & \eta \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c(x - 1)^2 + \eta}, & \eta > 1 \end{cases}, \text{ 其中, } \rho_c =$$

$\frac{f_c}{E_c \varepsilon_{cu}}$, $n = \frac{E_c \varepsilon_{cu}}{E_c \varepsilon_{cu} - f_c}$, $\eta = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{cu}}$, α_c 为受压应力-应变曲线下降段参数值; d_c 为 UHPC 受压损伤演化参数.



(a) UHPC 应力-应变曲线 (b) 钢筋应力-应变曲线

图 6 UHPC 和钢筋应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain relationship of UHPC and reinforcing bars

2.2 模型建立

利用 Abaqus 进行数值分析. 模型见图 7. 模型由钢筋网格、现浇板和预制板组成. 板件尺寸、钢筋种类与布置见图 2 和图 3.

UHPC 板件网格属性为 C3D8R, 钢筋为 T3D2. 远离湿接缝的板件受力对接缝处的内力分布影响较小, 湿接缝网格尺寸取 20 mm, 其余位置网格尺寸为 50 mm. 钢筋每 100 mm 划分 4 个单元.

板件之间为面-面接触, 法向硬接触, 切向定义摩擦系数, 根据 AASHTO 规范^[25]和 ACI 318 - 19^[26]建议, 若无试验结果, 静摩擦系数取为 0.6, 同时, Fu 等^[27]和潘仁胜等^[28]推荐采用摩擦系数 0.6 进行 UHPC 板界面接触模拟. 作者团队前期试验结果表

明, 钢丝网格处理后的 UHPC 接缝板, 其开裂荷载与初裂应力均可提高约 30%. 因此, 本文的数值模拟中, 考虑钢丝网格处理对受力性能的提高效应, 在 0.6 的基础上对摩擦系数进行提高, 即本文有限元模拟接缝切向行为摩擦系数为 0.8. 钢筋与混凝土为嵌入约束.

模型建立时采用位移加载, 加载类型为“Displacement/Rotation”, 在加载点施加 50 mm 位移, 施加方式为“Smooth Step”. 支座与加载点设置耦合约束, 通过控制点输出约束区域内的力和力矩. 选取静力通用分析步模拟 UHPC 湿接缝桥面板的单元畸变和失效模式.

模型边界条件为简支支承, 一端为活动铰支座, 另一端为固定铰支座. 在板件两端施加对称的均布荷载.

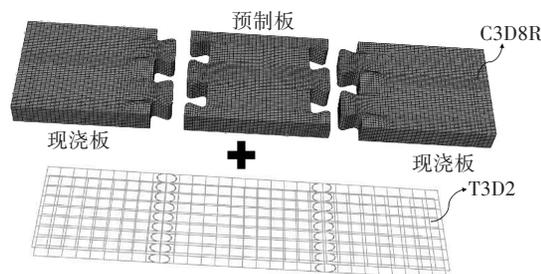
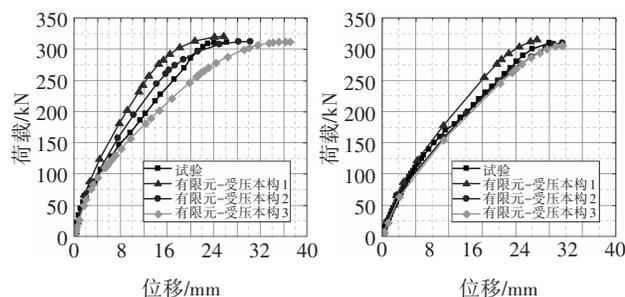


图 7 有限元模型

Fig.7 Finite Element model

2.3 试验验证

荷载-板端位移试验曲线与有限元计算结果对比如图 8 所示. 可以看出, 受压本构 1 忽略了 UHPC 材料的软化特性, 其刚度和极限承载力大于试验曲线和其他计算曲线. 受压本构 3 中 UHPC 强度折减大于实际情况, 其刚度和极限承载力最低. 受压本构 2 曲线形态与试验结果最接近, 其考虑了 UHPC 应变硬化特性, 且刚度折减适中. 因此本文选用受压材料本构 2 进行后续分析.



(a) 板件 E-A-0

(b) 板件 E-A-3

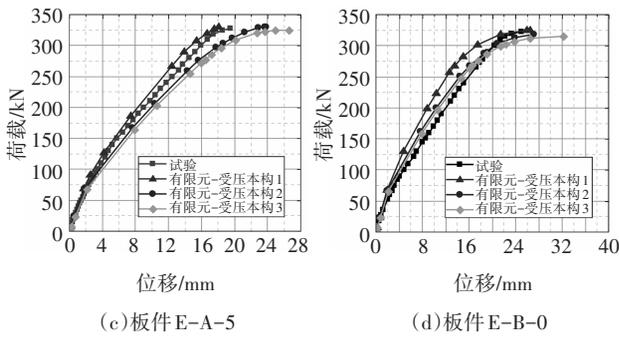


图8 荷载-位移试验曲线与有限元计算结果对比图

Fig.8 Comparison of load versus deflection and finite element calculation results

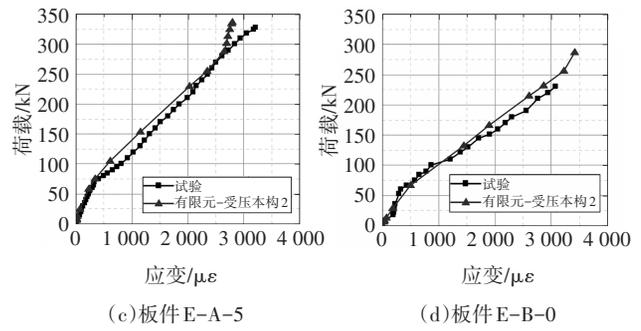


图9 荷载-钢筋应变试验曲线与有限元计算结果对比图

Fig.9 Comparison of load versus longitudinal reinforcement strain and finite element calculation results

图9为受压本构2荷载-钢筋应变试验曲线与有限元计算结果对比图.可以发现,总体拟合效果较好.试件开裂前,计算曲线与试验曲线重合.开裂后,曲线的斜率显著折减.达到极限承载力前,曲线存在斜率增大趋势.

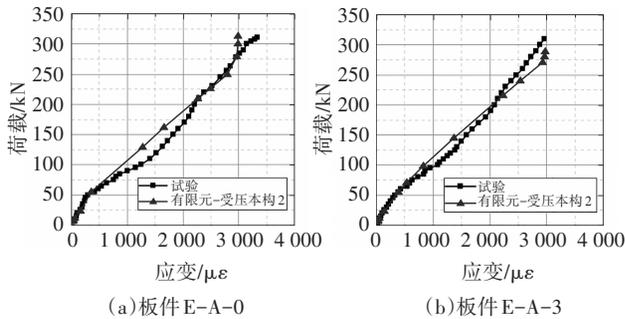


表2 板件编号及主要计算结果

Tab.2 Number and main calculation results of plate

编号	接缝位置	接缝形式	$\rho/\%$	f_c/MPa	H/mm	P_{cr}/kN	σ_{cr}/MPa	P_y/kN	P_u/kN	Δ_u/Δ_{cr}	Δ_u/Δ_y
F-0	标准	燕尾榫	2	120	170	64.7	10.5	212.0	312.3	16.8	2.6
F-L-M	跨中	燕尾榫	2	120	170	64.7	10.5	212.0	312.3	17.1	2.6
F-L-RF	支点	燕尾榫	2	120	170	67.4	10.9	220.1	320.6	17.2	2.7
F-S-R	标准	直角榫	2	120	170	61.4	9.9	209.2	290.5	18.2	2.7
F-S-C	标准	平接缝	2	120	170	55.8	9.0	207.8	269.2	20.6	2.7
F- ρ -1.0%	标准	燕尾榫	1	120	170	55.4	9.0	130.3	202.1	16.6	3.6
F- ρ -3.0%	标准	燕尾榫	3	120	170	87.2	14.1	290.7	420.4	13.6	2.4
F- ρ -4.0%	标准	燕尾榫	4	120	170	108.3	17.6	370.6	522.7	11.2	2.1
F- f -60	标准	燕尾榫	2	60	170	56.4	9.2	193.5	272.7	12.7	2.2
F- f -90	标准	燕尾榫	2	90	170	60.6	9.8	201.4	291.2	15.0	2.4
F- f -150	标准	燕尾榫	2	150	170	67.2	10.9	216.4	324.3	17.2	2.8
F- f -180	标准	燕尾榫	2	180	170	70.3	11.4	223.7	339.4	17.1	2.9
F- f -210	标准	燕尾榫	2	210	170	73.2	11.9	230.6	353.2	16.7	3.2
F- H -150	标准	燕尾榫	2	120	150	45.8	9.6	164.8	221.3	16.2	2.1
F- H -190	标准	燕尾榫	2	120	180	87.1	11.3	288.8	420.5	16.0	2.5
F- H -210	标准	燕尾榫	2	120	210	102.5	10.9	363.3	494.8	13.5	2.0

注:L为板件位置;M为板件跨中;RF为板件支承点;S为接缝形状;R为直角榫;C为平接缝; ρ 为板件纵向受拉侧配筋率; f 与 f_c 为UHPC抗压强度; H 为板件厚度; P_{cr} 为板件初裂荷载; P_y 为纵向钢筋屈服荷载; P_u 为板件极限承载力; σ_{cr} 为板件初裂应力; Δ_{cr} 为初裂荷载对应的板端位移; Δ_y 为纵向钢筋屈服荷载对应的板端位移; Δ_u 为极限承载力对应的板端位移.

3 主要影响因素参数分析及讨论

3.1 参数选取

以接缝位置(试验位置、跨中和支点)、接缝形式(燕尾榫、直角榫和平接缝)、纵向配筋率(1%、2%、3%和4%)、混凝土强度(60 MPa、90 MPa、120 MPa、150 MPa、180 MPa和210 MPa)和板件厚度(150 mm、170 mm、190 mm和210 mm)等为变化参数.建立16个UHPC简支板有限元模型,编号和主要计算结果如表2所示.

3.2 荷载-位移曲线

图 10 为不同参数对应的板件荷载-位移曲线, 可以发现:

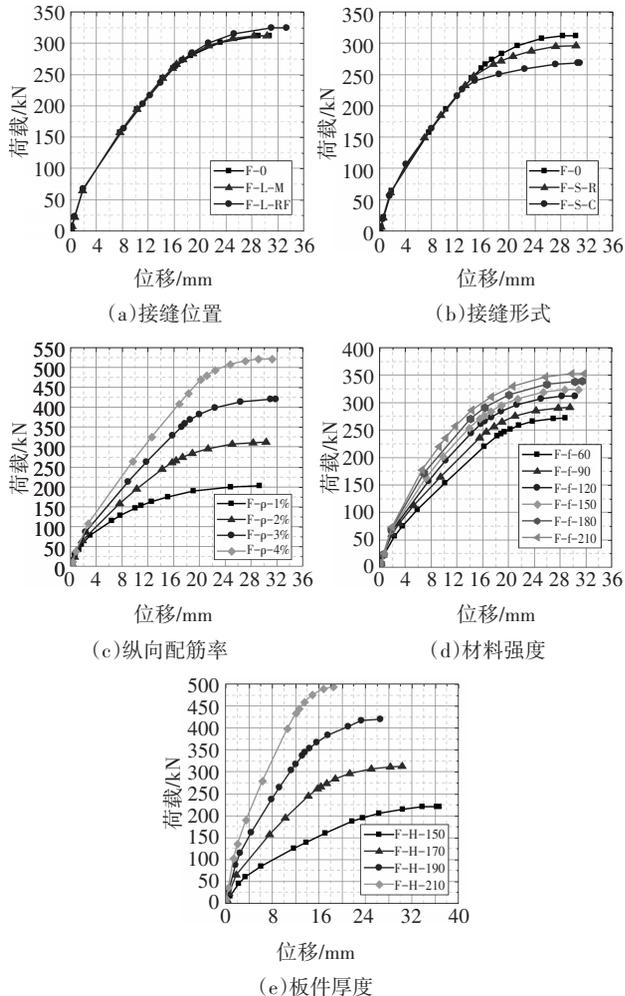


图 10 不同参数对荷载-位移曲线的影响

Fig.10 Effect of different paraments on load versus deflection.

除配筋率 1% 的板件外, 曲线形态均相似, 板件开裂点和钢筋屈服点将曲线划分为三个阶段. 板件开裂前, 荷载-位移曲线线性增长, 曲线斜率象征板件初始刚度. 板件开裂后至纵向钢筋屈服, 曲线斜率减小, 板件刚度减小, 荷载随板件位移持续呈线性增长. 钢筋屈服后, 板件位移急剧增长, 荷载增幅减小, 板件逐渐破坏, 达到极限承载力. 配筋率为 1% 时, 板件为少筋梁, 其没有明显的钢筋屈服点.

3.3 开裂应力与极限承载力

图 11 为不同参数对开裂应力和极限承载力的影响规律, 具体分析如下:

1) 接缝位置: 由图 11(a) 可以发现, 改变接缝位置对板件影响较小, 曲线接近水平. 接缝在试验位置与跨中时, 承受最大负弯矩, 而接缝处于支点位置

时, 整个接缝处弯矩略小, 其开裂和破坏时加载更大. 表明燕尾榫整体性较好, 荷载相同时, 改变接缝位置, 其受弯性能不受影响.

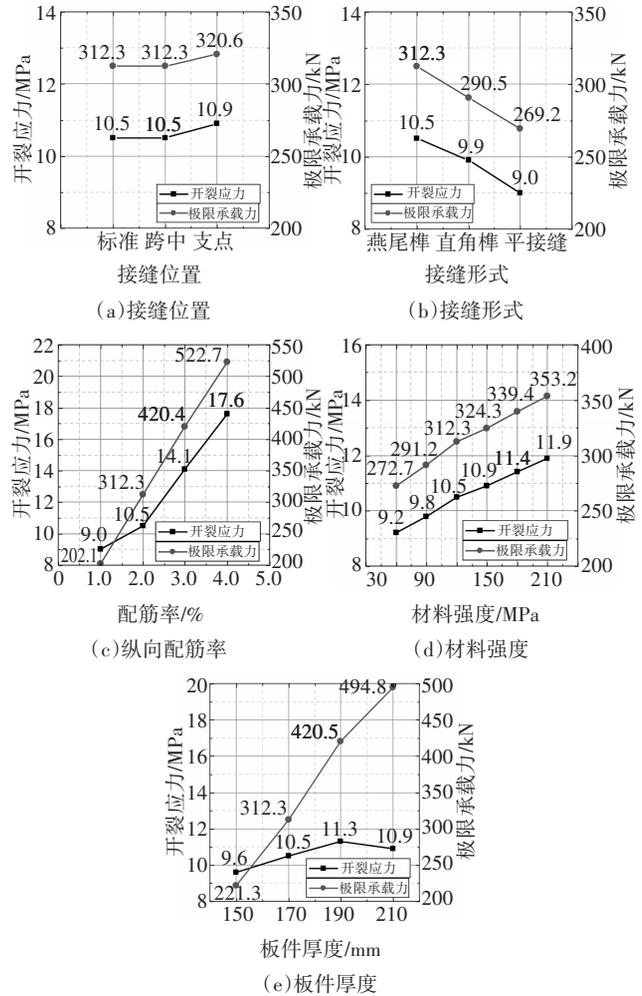


图 11 不同参数对开裂应力和极限承载力的影响

Fig.11 Effect of different paraments on cracking stress and ultimate bearing capacity

2) 接缝形式: 从图 11(b) 可以看出, 对于初裂应力, 燕尾榫接缝 > 直角榫接缝 > 平接缝, 燕尾榫接缝初裂应力较直角榫和平接缝分别提高 7.5% 和 16.0%. 燕尾榫板件开裂时多条主裂缝同时开展, 如图 4 所示, 而平接缝和直角榫破坏过程中主裂缝数量少. 由于燕尾榫间存在摩擦力与机械咬合力, 使得燕尾榫接缝的极限承载力较直角榫与平接缝可分别提高 5.4% 和 16.0%.

3) 配筋率: 由表 2 和图 11(c) 可以发现, 板件初裂应力与极限承载力随配筋率增大而提高. 配筋率由 2% 增加到 4% 时, 初裂应力与极限承载力相应提升 67.6% 和 67.3%. 配筋率大于 2% 时, 曲线线性增长. 配筋率为 1% 时为少筋梁, 曲线增长斜率较小.

4)材料强度:从表2和图11(d)可以看出,材料强度180 MPa较120 MPa,初裂应力与极限承载力相应提升13.3%和13.1%.初裂应力与极限承载力随材料强度线性增长,材料强度大于120 MPa时斜率减小.可见提升材料强度时初裂应力与极限承载力增幅较小.

5)板件厚度:由图11(e)可以发现,板件厚度增加,初裂应力变化较小,均介于9.5~11.5.极限承载力随板件厚度线性增长,板件厚度由150 mm增加到210 mm时,极限承载力提高122.6%.板件刚度随尺寸增加而提高,从而承载力相应提高.

3.4 裂后延性

结构裂后延性可用延性系数表征,常以挠度、曲率和转动角度建立延性系数.以挠度为基础的延性系数因形式简单、计算方便被广泛采用^[29-31],即

$$\mu_u = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (5)$$

式中: Δ_y 为纵向钢筋屈服对应位移; Δ_u 为极限承载力对应位移.以上延性系数无法对裂后性能进行有效评价,因此,本文提出了裂后延性系数,表达式为

$$\mu_{cr} = \frac{\Delta_u}{\Delta_{cr}} \quad (6)$$

式中: Δ_{cr} 为结构弯曲开裂对应的位移.

利用式(5)与式(6)计算的延性系数见表2,板件裂后延性系数为10.0~20.0,表明结构开裂后有较好的变形能力.接缝位置对裂后延性无显著影响.燕尾榫接缝的裂后延性小于其他两种接缝.纵向配筋率对板件裂后延性影响最大,随配筋率增加,结构延性减小,配筋率4%比配筋率1%延性减小约70%.在材料强度水平小于120 MPa时,材料强度增加,板件裂后延性提高,而混凝土强度大于120 MPa时,材料强度增加,裂后延性增幅较小.板件尺寸变化较小时,结构延性变化不显著.

3.5 裂后刚度退化规律

不同参数对应的刚度退化曲线如图12所示,图中空心点为弯曲开裂点,半空心点为极限承载力点.采用割线刚度进行分析.可以看出板件刚度弯曲开裂后迅速下降,至纵向钢筋屈服.紧接着刚度退化速度明显减缓,板件破坏时刚度约为初始刚度的25%.

接缝位置和接缝形式的刚度退化曲线较为集中,另外三组的刚度退化曲线则比较分散.板件初始

刚度与配筋率、材料强度和板件尺寸关系密切,以初裂刚度为例,相对于配筋率1%而言,配筋率为4%时提高23.9%;对抗压强度120 MPa而言,抗压强度为60 MPa时,初裂刚度降低33.0%,抗压强度为210 MPa时,初裂刚度提高7.1%;板件厚度为210 mm时较板件厚度150 mm,初裂刚度提高268.3%.材料强度对初始刚度与剩余刚度影响较小,对加载过程中刚度影响较大.

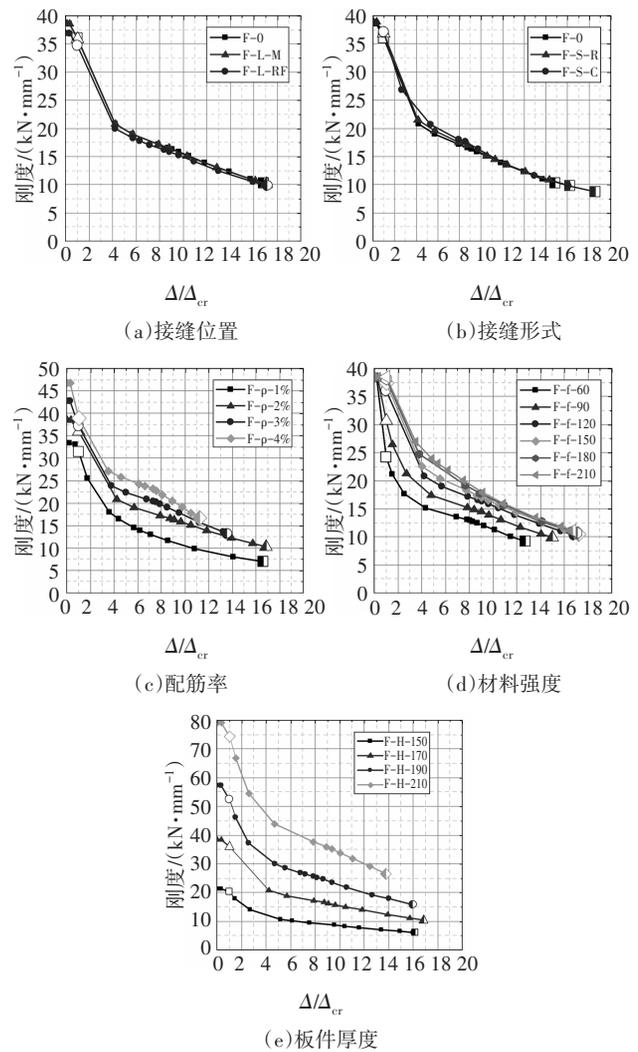


图12 刚度退化分析

Fig.12 Stiffness degradation analysis

4 结论

通过4组模型试验与16个有限元模型仿真分析,研究了预应力水平、接缝位置、接缝形式、纵向配筋率、材料强度和板件厚度等参数对UHPC湿接缝桥面板受弯性能影响规律,分析了荷载位移曲线、裂后变形能力和刚度退化规律,主要结论如下:

1) 基于试验发现, UHPC 湿接缝桥面板破坏具备延性特征, 裂缝呈多而密的分布; 提高预应力水平可显著提升板件开裂荷载与极限承载力, 预应力水平 5 MPa 的板件开裂荷载与极限承载力较无预应力板件分别提升 50.0% 和 22.6%。

2) 建立了 UHPC 简支板精细化数值模型, 并用试验结果进行验证. 基于验证后的有限元模型参数分析发现, 燕尾榫接缝整体性能好, 改变接缝位置对湿接缝受弯性能影响较小. 燕尾榫接缝较直角榫接缝和平接缝受弯性能更好, 开裂荷载分别提高 7.5% 和 16.0%, 极限承载力分别提高 5.4% 和 16.0%

3) 板件开裂应力和极限承载力随材料强度线性增长, 且材料强度大于 120 MPa 时增长变缓. 板件极限承载力随配筋率和板件厚度线性增长. 板件厚度改变时, 板件开裂应力保持在 9.5~11.5 MPa.

4) 提出了一种 UHPC 湿接缝桥面板裂后新延性系数, 其表达式为极限荷载对应位移与开裂荷载对应位移之比. UHPC 湿接缝桥面板板件的延性系数介于 10.0~20.0, 表明 UHPC 燕尾榫湿接缝桥面板裂后变形能力较好.

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 1-49.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's engineering research·2021 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 1-49. (In Chinese)
- [2] 项贻强, 竺盛, 赵阳. 快速施工桥梁的研究进展 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 1-27.
XIANG Y Q, ZHU S, ZHAO Y. Research and development on accelerated bridge construction technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 1-27. (In Chinese)
- [3] JANG H O, LEE H S, CHO K, *et al.* Experimental study on shear performance of plain construction joints integrated with ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 16-23.
- [4] 张策, 邵旭东, 张阳. 超大跨径 UHPC 连续箱梁桥接缝设计及模型试验 [J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 52-58.
ZHANG C, SHAO X D, ZHANG Y. Joint design and model tests of extra-long-span continuous box girder bridge composed of UHPC [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(4): 52-58. (In Chinese)
- [5] LI G P, Y D H, L Y. Combined shear and bending behavior of joints in precast concrete segmental beams with external tendons [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 18(10): 1042-1052.
- [6] QI J N, MA Z J, WANG J Q. Shear strength of UHPFRC beams: mesoscale fiber-matrix discrete model [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(4): 04016209.
- [7] 王景全, 戚家南, 刘加平. 基于细观本构模型的 UHPC 梁受弯全过程分析 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(9): 137-144.
WANG J Q, QI J N, LIU J P. Flexural analysis of UHPC beams based on a mesoscale constitutive model [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(9): 137-144. (In Chinese)
- [8] 戚家南, 王景全, 周凯, 等. UHPC 梁受剪性能试验与抗剪承载力计算方法 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 95-103.
QI J N, WANG J Q, ZHOU K, *et al.* Experimental and theoretical investigations on shear strength of UHPC beams [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 95-103. (In Chinese)
- [9] 冯峥, 李传习, 李海春, 等. 超高性能混凝土湿接缝界面粘结性能 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2393-2404.
FENG Z, LI C X, LI H C, *et al.* Interfacial bond performance of ultrahigh performance concrete wet joints [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(11): 2393-2404. (In Chinese)
- [10] 张阳, 吴洁, 邵旭东, 等. 超高性能混凝土-普通混凝土界面抗剪性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(7): 81-89.
ZHANG Y, WU J, SHAO X D, *et al.* Experiment on interfacial shear properties between ultra-high performance concrete and normal strength concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(7): 81-89. (In Chinese)
- [11] HABER Z B, GRAYBEAL B A. Lap-spliced rebar connections with UHPC closures [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(6): 0418028.
- [12] PAN W, FAN J S, NIE J, *et al.* Experimental study on tensile behavior of wet joints in a prefabricated composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin reactive-powder concrete layer [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21: 04016064.
- [13] LOONEY T, COLEMAN R, FUNDERBURG C, *et al.* Concrete bond and behavior of nonproprietary ultrahigh-performance concrete bridge slab joints [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(2): 04020128.
- [14] ARAFA A, FARGHALY A, AHMED E A, *et al.* Laboratory testing of GFRP-RC panels with UHPFRC joints of the nipigon river cable-stayed bridge in northwest Ontario, Canada [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21: 05016006.
- [15] VARGA I D L, HABER Z, GRAYBEAL B. Enhancing shrinkage properties and bond performance of prefabricated bridge deck connection grouts: material and component testing [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30: 04018053.
- [16] ZHAO C H, WANG K K, ZHOU Q F, *et al.* Full-scale test and simulation on flexural behavior of dovetail-shaped reactive

- powder-concrete wet joint in a composite deck system[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(8):04018051.
- [17] QIU M H, SHAO X D, YAN B F, *et al.* Flexural behavior of UHPC joints for precast UHPC deck slabs[J]. *Engineering Structures*, 2022, 251: 113422.
- [18] 苏庆田, 胡一鸣, 田乐, 等. 用于组合梁桥面板湿接缝的弧形钢筋连接构造[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(9): 86-92.
SU Q T, HU Y M, TIAN L, *et al.* Curved bar connection configuration used for wet joints of deck of composite girder[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(9): 86-92. (In Chinese)
- [19] 张菊辉, 黄帅, 管仲国. 预制小箱梁纵向U筋交错搭接接缝静载试验[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(12): 115-123.
ZHANG J H, HUANG S, GUAN Z G. Static loading test of longitudinal joint details using staggered U-bars in precast multibeam girder bridges[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(12): 115-123. (In Chinese)
- [20] 刘欣益, 张清华, 程震宇, 等. UHPC构件受拉性能的细观力学解析方法[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(8): 45-54.
LIU X Y, ZHANG Q H, CHENG Z Y, *et al.* Micro-mechanics research on tensile mechanical behavior of UHPC specimen[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(8): 45-54. (In Chinese)
- [21] CHEN L F, GRAYBEAL B A. Finite element analysis of ultra-high performance concrete: modeling structural performance of an AASHTO type II girder and a 2nd generation pi-girder [R]. McLean, VA: Federal Highway Administration, 2010.
- [22] QI J N, TANG Y Q, CHENG Z, *et al.* Static behavior of stud shear connectors with initial damage in steel-UHPC composite bridges[J]. *Advances in Concrete Construction*, 2020, 9: 413-421.
- [23] 吴有明. 活性粉末混凝土(RPC)受压应力-应变全曲线研究[D]. 广州: 广州大学, 2012: 53-54.
WU Y M. Study of the reactive powder concrete (RPC) about compressive stress-strain curve [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012: 53-54. (In Chinese)
- [24] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (In Chinese)
- [25] Standard specification for manufacture of precast reinforced concrete three-sided structures for culverts and storm drains: ASTM C1504—2016 [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2016: 110-113.
- [26] Building code requirements for structural concrete: ACI 318-19 [S]. Berkeley: American Concrete Institute, 2019.
- [27] FU C, PAN Z F, AHMED M. Transverse posttensioning design of adjacent precast solid multibeam bridges[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2011, 25: 223-230.
- [28] 潘仁胜, 何伟伟, 程云霄, 等. UHPC大键齿干接缝直剪性能及尺寸参数分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(7): 129-137.
PAN R S, HE W W, CHENG L X, *et al.* Direct shear behavior and dimensional parameter analysis of UHPC dry joint with big shear key[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(7): 129-137. (In Chinese)
- [29] SHIN S, GHOSH S, MORENO J. Flexural ductility of ultra-high-strength concrete members[J]. *Aci Structural Journal*, 1989, 86: 394-400.
- [30] HADI M N S, ELBASHA N. Effects of tensile reinforcement ratio and compressive strength on the behaviour of over-reinforced helically confined HSC beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(2): 269-276.
- [31] YOO D Y, YOON Y S. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers[J]. *Engineering Structures*, 2015, 102: 409-423.