

# UHPC 加固混凝土桥墩抗震性能研究

任亮<sup>1,2</sup>,刘青云<sup>1</sup>,廖延铸<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013;2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室,江西 南昌 330013)

**摘要** 目的 评估 UHPC 加固混凝土桥墩在拟静力荷载作用下的抗震性能。方法 基于 OPENSEES 软件,选用 Concrete02 模型拟合 UHPC 材料本构曲线,结合 Reinforcing Steel 材料本构、非线性染粒单元和零长度单元,通过修正约束增大系数  $K$  来综合考虑钢纤维和箍筋对材料的约束效应,构建并验证了 UHPC 加固混凝土桥墩滞回分析模型;在此基础上,分析了轴压比、UHPC 加固厚度和高度、UHPC 单轴抗压强度对加固桥墩位移延性系数的影响。**结果** 加固桥墩位移延性系数随轴压比的增加而减小,随 UHPC 加固厚度、加固高度和单轴抗压强度的增加均表现出先增大后减小的趋势。**结论** UHPC 加固厚度不宜过大,UHPC 加固高度不宜大于桥墩宽度,UHPC 单轴抗压强度不宜超过 130 MPa。

**关键词** UHPC;混凝土桥墩;抗震性能;OPENSEES;滞回分析模型

中图分类号 TU377;U443.22

文献标志码 A

## Seismic Performance of Concrete Piers Strengthened with UHPC

REN Liang<sup>1,2</sup>, LIU Qingyun<sup>1</sup>, LIAO Yanzhu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013)

**Abstract:** To evaluate the ductility seismic performance of concrete piers strengthened with UHPC under pseudo-static loading, a hysteresis analysis model of the concrete pier strengthened with UHPC was established and calibrated by the corresponding pseudo-static test, with the involving in Concrete02, reinforcing steel material constitutive, nonlinear beam-column element and zero-length element in OPENSEES software. Meanwhile, the restraining effect of steel fiber and stirrups for the material was taken into account by calibrating confined increase factor  $K$ , and the constitutive relation of UHPC was fitted by Concrete02 model in the analysis model. On the basis, the effects

收稿日期:2022-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目(52068024);江西省自然科学基金项目(20224BAB204055);江西省重点研发计划一般项目(20202BBG73035)

作者简介:任亮(1980—),男,博士,主要从事桥梁抗震等方面研究。

on the displacement ductility factor were analyzed by varying in the parameters such as the axial compression ratio, the reinforcement thickness, the reinforcement height and the axial compressive strength of UHPC. The results show that, the displacement ductility factors of reinforced piers decrease with the increase of axial compression ratio, and increase first and then decrease with the increase of the reinforcement thickness, the reinforcement height and uniaxial compressive strength of UHPC. So the reinforcement thickness of UHPC should not be too large, the reinforcement height of UHPC is recommended less than pier width, and the uniaxial compressive strength value of UHPC is suggested less than 130 MPa.

**Key words:** ultra-high performance concrete; concrete pier; seismic performance; open system for earthquake engineering simulation; hysteresis analysis model

钢筋混凝土桥墩因其良好的适用性和经济性被广泛应用于桥梁结构中。部分既有钢筋混凝土桥墩因早期设计不合理、长期服役下损伤和老化等原因,导致其在地震荷载作用下易于受损破坏,所以,对既有钢筋混凝土桥墩开展抗震加固一直成为人们关注的研究热点<sup>[1-2]</sup>。

超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)作为一种集高强、高韧与低孔隙率于一体的新型水泥基材料,在耐久性、断裂韧性和损伤容限方面具备良好的优势,使其在结构抗震领域具有广泛应用前景<sup>[3-6]</sup>。目前已有学者将 UHPC 应用于桥墩抗震加固,并开展了相应的试验研究,结果表明,应用 UHPC 加固混凝土桥墩不仅能有效改善桥墩的延性,提升其耗能能力,降低塑性铰区域的损坏程度,而且能提升加固区域的抗裂性能和耐久性能<sup>[7-11]</sup>。考虑到试验研究的局限性,有学者尝试对 UHPC 加固混凝土桥墩抗震性能开展数值分析,郑仁亮等<sup>[12]</sup>采用 ABAQUS 软件分析了轴压比、UHPC 加固厚度、高度和强度等对桥墩延性的影响;李帅等<sup>[13]</sup>应用 OPENSEES 软件分析了模型,分析了 UHPC 抗压强度、抗拉强度、模壳厚度和高度对桥墩滞回延性的影响。虽然,应用 UHPC 对混凝土桥墩进行加固已经取得一定的研究成果,由于试验研究数据相对有限,而数值分析时采用材料本构模型并未考虑钢纤维和箍筋的双重约束效应,因此,如何

基于有限的试验数据,通过选取合适的材料本构模型,建立精细化的数值分析模型来探讨 UHPC 加固混凝土桥墩抗震性能具有重要的现实意义。

基于此,笔者依托 OPENSEES 软件,选取 Concrete02、Reinforcing Steel 材料本构关系、非线性梁柱单元和零长度单元,通过修正约束增大系数  $K$  综合考虑钢纤维和箍筋对材料的约束效应,构建了 UHPC 加固混凝土桥墩滞回分析模型;在试验验证的基础上,进一步探讨了轴压比、UHPC 加固厚度、加固高度和单轴抗压强度等敏感参数对加固桥墩位移延性系数的影响,并给出了最佳设计参数。

## 1 材料本构关系

### 1.1 Concrete02 本构关系

选用 OPENSEES 材料库中 Concrete02 材料本构模型模拟未加固区域普通混凝土在低周反复荷载作用下的非线性行为,其中受压骨架曲线表达式如下:

$$\sigma_c = \begin{cases} Kf_c [2\varepsilon_c/\varepsilon_0 - (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^2], & \varepsilon_0 > \varepsilon_c; \\ Kf_c [1 - Z_1(\varepsilon_c - \varepsilon_0)], & \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_u; \\ 0.2Kf_c, & \varepsilon_u < \varepsilon_c. \end{cases} \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = 0.002K. \quad (2)$$

$$K = 1 + \rho_s f_{yh}/f_c. \quad (3)$$

$$Z_1 = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f_c}{145f_c - 1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{h'}{S_h}} - 0.002K}. \quad (4)$$

式中: $\sigma_c$  为混凝土压应力; $\varepsilon_c$  为混凝土压应

变;  $f_c$  为混凝土立方体抗压强度;  $\varepsilon_0$  为混凝土峰值点压应变;  $K$  为约束效应增大系数;  $Z_i$  为受压骨架曲线下降段斜率;  $\varepsilon_u$  为混凝土极限压应变;  $\rho_s$  为体积配箍率;  $f_{yh}$  为箍筋屈服强度;  $h'$  为箍筋约束的核心混凝土宽度;  $S_h$  为相邻箍筋间距。

Concrete02 材料受拉骨架曲线表达式如下:

$$\sigma_t = \begin{cases} E_0 \varepsilon_t, & 0 < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{t0}; \\ f_t - E_{ts}(\varepsilon_t - \varepsilon_{t0}), & \varepsilon_{t0} < \varepsilon_t. \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_t$  为混凝土拉应力;  $f_t$  为混凝土抗拉强度;  $\varepsilon_t$  为混凝土拉应变;  $\varepsilon_{t0}$  为混凝土峰值点拉应变;  $E_0$  为初始受拉弹性模量;  $E_{ts}$  为受拉骨架曲线下降段弹性模量。

## 1.2 UHPC 材料本构关系及其拟合

### 1.2.1 UHPC 本构关系

UHPC 本构关系考虑受压时钢纤维掺量影响和受拉时钢纤维阻裂作用, 其中 UHPC 受压本构曲线选用文献[14]的模型, 表达式如下:

$$y = \begin{cases} cx + (2 - 1.5c)x^2 + (0.5c - 1)x^4, & 0 \leq x \leq 1; \\ Ax/[1 + (A - 2)x + x^2], & x > 1. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $x$  为压应变  $\varepsilon$  与峰值  $\varepsilon_0$  的比值;  $y$  为压应力  $\sigma_c$  与立方体抗压强度  $f_c$  的比值;  $c$  和  $A$  与钢纤维体积掺量  $V_s$  相关, 其表达式如下:

$$c = 155.6V_s^3 - 7.778V_s^2 + 2.14V_s + 1.318. \quad (7)$$

$$A = -344.4V_s^3 - 317.2V_s^2 - 4.106V_s + 0.1128. \quad (8)$$

UHPC 受拉本构曲线选用文献[15]中模型, 表达式如下:

$$\sigma_t = \begin{cases} E_0 \varepsilon_t, & 0 \leq \varepsilon_t < \varepsilon_{t0}; \\ f_t, & \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu}; \\ f_t(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_t)/(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{t0}), & \varepsilon_{tu} < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu}. \end{cases} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{t0} = f_t/E_0. \quad (10)$$

$$\varepsilon_{tu} = 0.3/l_c + f_t/E_0. \quad (11)$$

$$\varepsilon_{tu} = 0.25l_f/l_c. \quad (12)$$

$$E_0 = 1000/(0.0172 + 0.8364/f_c). \quad (13)$$

式中:  $\sigma_t$  和  $\varepsilon_t$  分别为拉应力和拉应变;  $E_0$  为抗拉弹性模量;  $f_t$  为极限抗拉强度;  $\varepsilon_{t0}$  为峰值点拉应变;  $\varepsilon_{tu}$  为裂缝宽度 0.3 mm 时对应拉应变;  $\varepsilon_{uu}$  为极限拉应变;  $l_f$  为钢纤维长度;  $l_c$  为特征长度, 矩形截面取其短边长度的 2/3。

### 1.2.2 UHPC 本构关系在 OPENSEES 中的拟合

选用 Concrete02 材料本构关系拟合 UHPC 非线性力学行为, 由于 UHPC 外包加固层不再配置箍筋, 为此, Concrete02 受压骨架曲线计算表达式中  $K$  值取 1。考虑到 Concrete02 中  $Z_i$  为输入项, 可通过调整  $Z_i$  值拟合 UHPC 受压本构曲线下降段, 但峰值点压应变和极限压应变间本构曲线的拟合程度不应低于 95% [16]。

以文献[17]中 UHPC 为例, 取  $\varepsilon_0 = 0.0035$ ,  $\varepsilon_u = 0.0045$ ,  $\varepsilon_{tu} = 3.1 \times 10^{-4}$ ,  $\varepsilon_{t0} = 5 \times 10^{-4}$ ,  $\varepsilon_{uu} = 8.5 \times 10^{-4}$ ,  $f_c = 129.7$  MPa,  $f_t = 5.5$  MPa,  $E_0 = 42.3$  GPa,  $V_s = 1.5\%$ , 通过调整  $Z_i$  对 UHPC 本构曲线进行拟合, 图 1 为 UHPC 本构曲线与 Concrete02 拟合本构曲线对比。

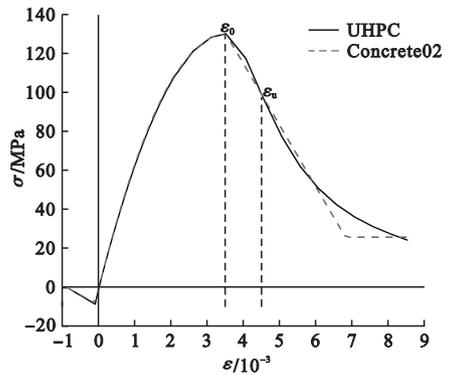


图1 UHPC 和 Concrete02 本构拟合曲线对比

Fig. 1 Constitutive fitting curve comparison between UHPC and Concrete02

从图 1 中可以看出, Concrete02 与 UHPC 受拉骨架曲线基本吻合; 两者受压骨架曲线上上升段吻合较好, 下降段 Concrete02 模型经过峰值点压应变 0.0035 后曲线表现为线性下降, 而 UHPC 本构拟合曲线下降段

表现为快速下降后逐渐放缓,在达到极限压应变 0.004 5 之前,两者总体拟合程度较好。因此在 OPENSEES 中通过选取合适的参数,采用 Concrete02 模型可对 UHPC 本构模型进行较好地拟合。

### 1.3 加固区域混凝土本构关系

UHPC 外包加固会对加固区域混凝土产生约束效应,其中保护层混凝土仅受 UHPC 约束效应,核心混凝土受 UHPC 和箍筋共同约束效应。UHPC 对核心混凝土的约束效应主要是由于钢纤维的掺入,为此引入文献[18]中纤维约束力的概念来计入 UHPC 中钢纤维对混凝土横向膨胀力的约束效应,相应纤维约束力  $f_{if}$  表达式:

$$f_{if} = N_f F_{if} = \mu V_s l_f \tau_{bond} / d_f \quad (14)$$

$$\tau_{bond} = 0.6 f_{c0}^{2/3} \quad (15)$$

式中:  $N_f$  为单位面积内钢纤维的数量;  $F_{if}$  为钢纤维的平均拉应力;  $\mu$  为钢纤维影响系数;  $V_s, l_f$  分别为钢纤维体积掺量和长度;  $d_f$  为钢纤维直径;  $\tau_{bond}$  为黏结强度,其中  $f_{c0}$  为 UHPC 立方体抗压强度。

Concrete02 材料本构关系采用经典的 Park 模型<sup>[19]</sup>,其中材料的约束效应应用约束效应增大系数  $K$  值来计入,从式(3)中可以看出,  $K$  值定义为箍筋有效侧向约束力与混凝土立方体抗压强度的比值。为此,笔者提出采用纤维约束力与 UHPC 立方体抗压强度的比值来修正  $K$  值,从而计入 UHPC 对核心混凝土的约束效应。

相应的修正后  $K$  值表达式:

$$K = \begin{cases} 1 + f_{if}/f_c, & (\text{保护层混凝土}); \\ 1 + f_{if}/f_c + \rho_s f_{yh}/f_c, & (\text{核心混凝土}). \end{cases} \quad (16)$$

### 1.4 钢筋本构关系

OPENSEES 材料库中 Reinforcing Steel 材料模型能较好地反映钢筋包辛格效应以及反复加载作用下强度和刚度的退化等现象,笔者选用其对钢筋非线性滞回特性进行模拟,相应的骨架曲线表达式如下<sup>[20]</sup>:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y; \\ f_y, & \varepsilon_y < \varepsilon_s < \varepsilon_{sh}; \\ f_{su} + (f_y - f_{su}) |(\varepsilon_s - \varepsilon_s) / (\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh})|^p, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}. \end{cases} \quad (17)$$

$$p = E_{sh} (\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}) / (f_{su} - f_y). \quad (18)$$

式中:  $\sigma_s$  为钢筋拉应力;  $\varepsilon_s$  为钢筋拉应变;  $E_s$  为钢筋初始弹性模量;  $f_y$  为钢筋屈服强度;  $\varepsilon_y$  为钢筋屈服应变;  $E_{sh}$  为钢筋初始硬化弹性模量;  $\varepsilon_{sh}$  为钢筋硬化阶段初始应变;  $f_{su}$  为钢筋峰值点强度;  $\varepsilon_{su}$  为钢筋峰值点拉应变。

## 2 UHPC 加固混凝土桥墩滞回分析模型

应用 OPENSEES 中 Concrete02 材料本构关系模拟未加固区域普通混凝土,用上述修正后的 Concrete02 材料本构关系模拟加固区域的 UHPC 和普通混凝土,用 Reinforcing Steel 材料模型模拟纵向钢筋,结合非线性梁柱单元和零长度单元,构建 UHPC 加固混凝土桥墩滞回分析模型,如图 2 所示。

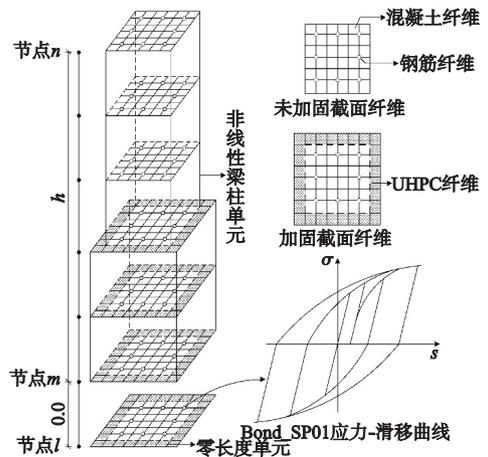


图2 UHPC 加固混凝土桥墩滞回分析模型

Fig. 2 Hysteresis analysis model of concrete pier strengthened with UHPC

图 2 中非线性梁柱单元采用截面纤维模型,分为混凝土纤维和钢筋纤维,其中加固区域混凝土纤维包含普通混凝土纤维和 UHPC

纤维。零长度单元采用同一个位置2个节点(节点*l*和节点*m*)来表示,其纤维划分与墩底非线性梁柱单元一致。在滞回分析模型中考虑墩底纵筋的黏结-滑移效应,钢筋纤维的本构关系采用 BondSP01 模型<sup>[21]</sup> 替换 Reinforcing Steel 本构模型。

Bond - SP01 模型应力-滑移曲线有6个控制参数:钢筋屈服强度  $f_y$ 、极限强度  $f_u$ 、纵筋屈服滑移值  $S_y$ 、纵筋极限滑移值  $S_u$ 、纵筋屈服时切线刚度与初始刚度的比值  $b$  和钢筋应力-滑移循环响应的“捏拢”因子  $R$ 。其中  $S_y$  可由经验公式(19)得到,并结合 OPENSEES 材料库中 Bond SP01 模型的建议取值,  $S_u = 40S_y, b = 0.4, R = 0.75$ 。

$$S_y = 2.54 \left[ \frac{d_b f_y}{8437 \sqrt{f_c}} (2\theta + 1) \right]^{1/\theta} + 0.34. \quad (19)$$

式中:  $d_b$  为钢筋直径;  $f_c$  为墩底连接处混凝土抗压强度;  $\theta$  为钢筋局部粘结应力-滑移参数。

### 3 试验验证

#### 3.1 试验

采用文献[17]中不同 UHPC 加固高度的钢筋混凝土桥墩拟静力试验,对建立的滞回分析模型进行验证。图3和表1分别给出了试件的相关参数以及截面尺寸和配筋,其中普通混凝土标号为 C40,实测立方体抗压强度为 44.6 MPa;加固层 UHPC 实测立方体抗压强度为 129.7 MPa,抗拉强度为 5.52 MPa,弹性模量为 40.1 GPa;试件纵筋和箍筋抗拉强度分别为 611 MPa 和 526 MPa。

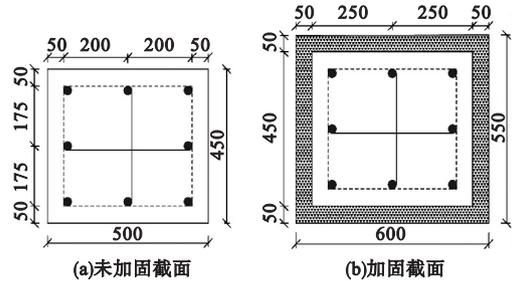


图3 试件尺寸和配筋

Fig. 3 Specimen size and reinforcement

表1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

编号	截面		试件高/ mm	$H/mm$	纵筋		箍筋		轴压比
	长/mm	宽/mm			直径/mm	纵筋率/%	直径/mm	配箍率/%	
J-H0	500	450	2 300	0	16	0.71	8	1.01	0.08
J-H400	600	550	2 300	400	16	0.71	8	1.01	0.08
J-H850	600	550	2 300	850	16	0.71	8	1.01	0.08

注:编号中J表示加固桥墩; $H$ 为UHPC加固高度。

图4为试验加载制度,试验详见文献[17],其中加载力由下式确定:

$$P = u f_c^0 A. \quad (20)$$

式中:  $u$  为轴压比;  $f_c^0$  取混凝土实测立方体抗压强度的 0.76 倍;  $A$  为墩柱截面面积。

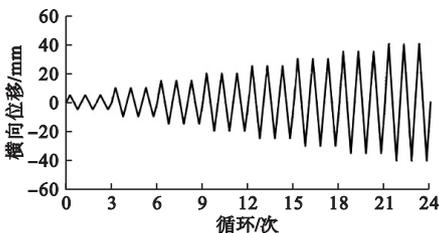


图4 试验加载制度

Fig. 4 Test loading system

#### 3.2 数值模拟

基于上述建立的 UHPC 加固混凝土桥墩滞回分析模型,对表1中3个试件开展拟静力数值模拟。图5和图6分别为3个试件滞回曲线和骨架曲线试验值与计算值对比。

从图5中可以看出,建立的滞回分析模型能较好地模拟3个试件的峰值荷载、卸载刚度、残余位移、滞回耗能等特性,但数值模拟的3个试件在破坏时均存在一定程度的捏缩效应。这是由于 Concrete02 材料在经过峰值荷载后快速线性下降,而真实的 UHPC 本

构曲线在经过峰值荷载后虽然也出现快速下降,但在下降到一定程度后逐渐放缓。

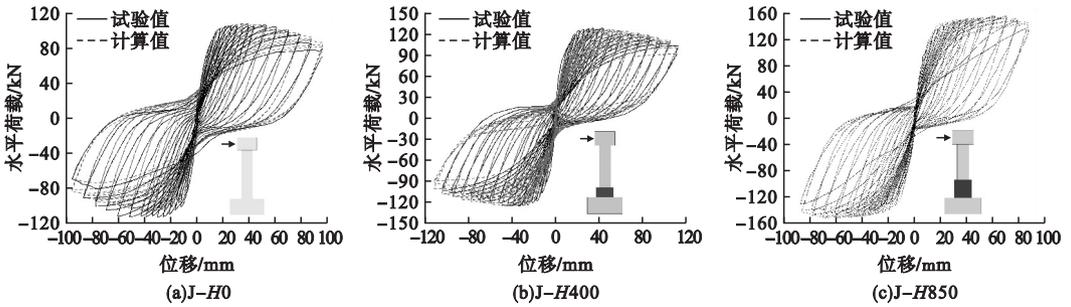


图5 滞回曲线对比

Fig. 5 Comparison of hysteresis curves

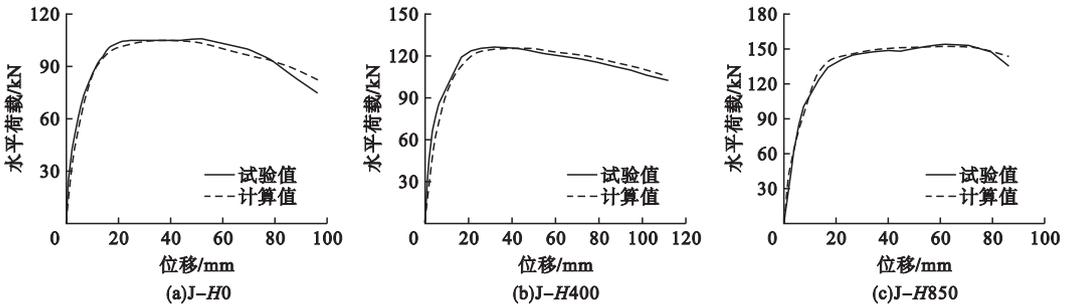


图6 骨架曲线对比

Fig. 6 Comparison of skeleton curves

从图6中可以看出,3个试件骨架曲线上上升段和下降段试验值和计算值吻合程度较好,但在临近破坏时,试验值略小于计算值。这是由于试验过程中试件在反复荷载作用下存在损伤积累,而数值分析中并未考虑,导致计算值大于试验值。

表2中给出屈服位移、极限位移和位移

延性系数试验值和计算值对比,其中屈服位移取75%峰值荷载对应上升段位移的4/3倍<sup>[22]</sup>;极限位移取试件承载低于峰值荷载80%时的位移,试件J-H850由于破坏荷载未降低至峰值荷载的80%,则以纵筋断裂时对应的侧向位移为极限荷载。

表2 试验与计算结果对比

Table 2 Comparison of test and calculation results

试件编号	屈服位移/mm		极限位移/mm		位移延性系数	
	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值
J-H0	11.5	11.7	87.6	87.3	75.9	74.7
J-H400	12.8	13.0	111.1	110.9	86.6	85.3
J-H850	15.2	15.5	86.7	86.5	57.0	55.8

从表2中可以看出,位移延性系数的计算值比试验值偏小,这是由于试验加载方式为循环加载,加载过程中对试件产生了损伤累积使得钢筋首先屈服,造成屈服位移计算

值略大于试验值;而在桥墩进入破坏阶段时,数值模拟以纵筋断裂或混凝土达到极限应变时终止计算,试验过程中试件在此时仍具有一定的承载能力,因此极限位移计算值略小

于试验值,进而导致位移延性系数计算值小于试验值。

## 4 参数分析

基于上述建立的 UHPC 加固混凝土桥墩滞回分析模型,分析轴压比、UHPC 加固厚度、加固高度和单轴抗压强度等敏感参数对加固桥墩位移延性系数的影响。桥墩高度、截面尺寸和配筋与前述验证试验相同。轴压比、UHPC 加固厚度的选取参照前述试件参数进行调整。加固高度取《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231—01—2020)第 7.4.4 条计算的等效塑性较长度的 4/3 倍。

### 4.1 轴压比

图 7 为 UHPC 不同加固厚度下位移延性系数随轴压比变化的曲线。

由图 7 可知,当轴压比小于 0.32 时,试件的位移延性系数随轴压比的增加快速下降,这是由于轴压比的增加使试件的屈服位移增大,而在极限位移基本保持不变的情况下降低了试件延性;当轴压比大于 0.32 后,试件的位移延性系数下降趋势随轴压比的增加逐渐放缓,并逐步向 1 靠近,表明轴压比增加到一定程度,试件屈服与破坏几乎同步发生。

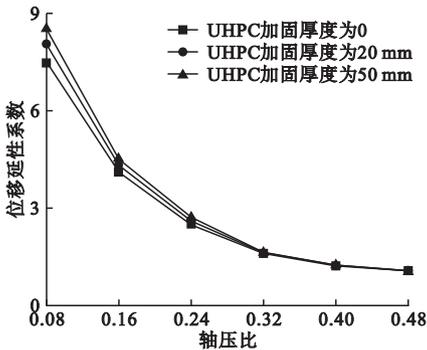


图 7 位移延性系数随轴压比变化

Fig. 7 Variation of displacement ductility factor with axial compression ratio

### 4.2 UHPC 加固厚度

图 8 为不同轴压比下位移延性系数随

UHPC 加固厚度变化的曲线。

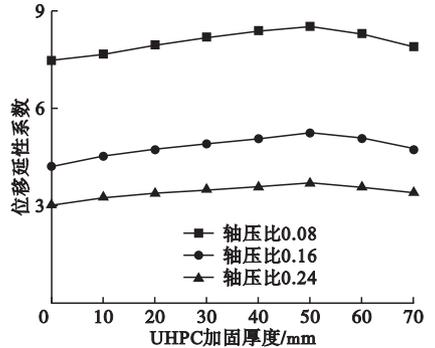


图 8 位移延性系数随 UHPC 加固厚度变化

Fig. 8 Variation of displacement ductility factor with UHPC reinforcement thickness

由图 8 可知,在不同轴压比下,试件的位移延性系数随 UHPC 加固厚度增加表现出先增大后减小的趋势,试件加固厚度为 50 mm 时延性最大。这是由于 UHPC 材料优越的断裂韧性在一定程度上提高了试件的延性性能,但随着加固厚度的增加试件截面刚度逐渐增大,当截面刚度增大效应(截面抗弯刚度增大)大于材料韧性提高效应(UHPC 材料加固后构件断裂韧性提高)后,试件延性出现下降。因此,采用 UHPC 进行加固时宜选取合适的加固厚度,不宜过大。

### 4.3 UHPC 加固高度

图 9 为不同轴压比下位移延性系数随 UHPC 加固高度变化的曲线,其中 UHPC 加固厚度取 50 mm。

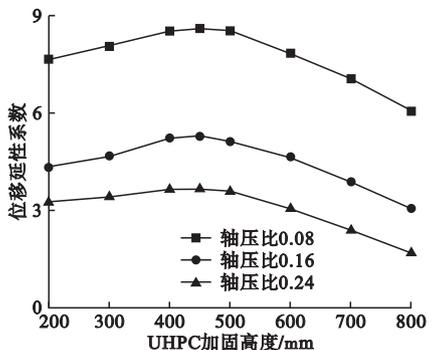


图 9 位移延性系数随 UHPC 加固高度变化

Fig. 9 Variation of displacement ductility factor with UHPC reinforcement height

由图 9 可知,在不同轴压比下,试件的位移延性系数随 UHPC 加固高度增加表现出

先增大后迅速减小的趋势,试件加固高度在450 mm左右(约为桥墩宽度)时延性最大。这是由于UHPC材料对桥墩塑性铰区域产生的约束效应在一定程度上提升了试件的延性,但随着加固高度的增加,桥墩整体刚度提升,对试件延性产生一定程度的削弱作用,当两者出现平衡时,加固试件延性达到峰值。因此,建议UHPC加固高度不宜大于桥墩宽度。

#### 4.4 UHPC 单轴抗压强度

图10为不同轴压比下位移延性系数随UHPC单轴抗压强度变化的曲线,其中UHPC加固厚度和高度分别为50 mm和450 mm。

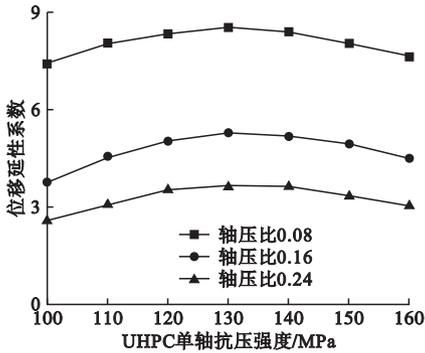


图10 位移延性系数随UHPC单轴抗压强度变化

Fig. 10 Variation of displacement ductility factor with UHPC uniaxial compressive strength

由图10可知,在不同轴压比下,试件的位移延性系数随UHPC单轴抗压强度增加表现出先增大后减小的趋势,在达到130 MPa后加固构件延性开始出现缓慢下降。这是由于UHPC材料优越的韧性延缓了试件开裂从而提高了试件延性,但随着UHPC单轴抗压强度的增大加固层脆性逐渐增加,当UHPC材料脆性增加平衡了材料自身延性后,加固试件延性开始出现下降。因此,建议UHPC单轴抗压强度不宜超过130 MPa。

## 5 结论

(1) 基于合适的参数选取,应用OPENSEES系统中Concrete02本构关系能较好拟合UHPC材料受压和受拉本构关系。

(2) 应用Concrete02、Reinforcing Steel材料本构模型、非线性梁柱单元和零长度单元,综合考虑钢纤维和箍筋对材料的约束效应,构建的UHPC加固混凝土桥墩滞回分析模型,能较好地反映加固桥墩的滞回耗能和延性特征。

(3) 加固桥墩位移延性系数随轴压比的增加而减小,随UHPC加固厚度、加固高度和单轴抗压强度的增加均表现出先增大后减小的趋势。为取得截面应力分布、延性和经济性的统一,UHPC加固厚度不宜过大,UHPC加固高度不宜大于桥墩宽度,UHPC单轴抗压强度不宜超过130 MPa。

## 参考文献

- [1] 孙治国,管璐,赵泰儀,等. CFRP修复震后RC桥墩分析模型与抗震性能[J]. 应用基础与工程科学学报,2020,28(4):878-889. (SUN Zhiguo, GUAN Lu, ZHAO Taiyi, et al. Analysis model and seismic behavior of repaired RC bridge piers after earthquakes by using CFRP [J]. Journal of basic science and engineering, 2020, 28(4): 878-889.)
- [2] 郭晓云,程晓阳,巴文辉. 玻璃纤维和碳纤维加固钢筋混凝土框架柱伪静力试验研究[J]. 建筑结构,2019,49(增刊2):728-733. (GUO Xiaoyun, CHENG Xiaoyang, BA Wenhui. Pseudo-static test of reinforced concrete frame columns strengthened by glass fibre reinforced polymer and carbon reinforced polymer [J]. Building structure, 2019, 49(S2): 728-733.)
- [3] 王景全,王震,高玉峰,等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展:新材料、新理念、新应用[J]. 工程力学,2019,36(3):1-23. (WANG Jingquan, WANG Zhen, GAO Yufeng, et al. Review on aseismic behavior of precast piers: new material, new concept and new application [J]. Engineering mechanics, 2019, 36(3): 1-23.)
- [4] 王钧,李行,陈旭,等. 配钢纤维RPC永久柱模的RC框架抗震性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(2):220-226. (WANG Jun, LI Xing, CHEN Xu, et al. Experimental study on the seismic performance of RC frame with the steel fiber RPC permanent pillar [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(2): 220-226.)
- [5] 梁兴文,史纪从,于婧,等. 免拆超高性能混凝土模板钢筋混凝土柱抗震性能研究[J]. 地震工程学报,2020,42(3):579-606.

- (LIANG Xingwen, SHI Jicong, YU Jing, et al. Seismic behavior of reinforced concrete columns with permanent template of ultra-high-performance concrete [J]. China earthquake engineering journal, 2020, 42(3): 579-588.)
- [6] 郑七振, 李会炎, 龙莉波, 等. 基于超高性能混凝土连接的装配式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(9): 82-89.  
(ZHENG Qizhen, LI Huiyan, LONG Libo, et al. Experimental research on seismic performances of prefabricated shear wall connected by UHPC [J]. Building structure, 2021, 51(9): 82-89.)
- [7] YAMANOE E S, SAITO K, ICHINOMIYA T, et al. Bilateral loading experiment on and analysis of concrete piers using mortar-jointed ultra-high-strength fibre-reinforced concrete precast formwork [J]. Structural concrete, 2013, 14(3): 278-290.
- [8] MOHEBBI A, SAIIDI M S, ITANI A M. Shake table studies and analysis of a precast two-column bent with advanced materials and pocket connections [J]. Journal of bridge engineering, 2018, 23(7): 04018046.
- [9] REGGIA A, MORBI A, PLIZZARI G A. Experimental study of a reinforced concrete bridge pier strengthened with HPFRC jacketing [J]. Engineering structures, 2020(210): 110355.
- [10] TONG T, LEI H P, YUAN S Q, et al. Experimental investigation and seismic vulnerability assessment of low flexural strength rectangular bridge piers retrofitted with ultrahigh-performance concrete jackets [J]. Engineering structures, 2020, 206: 110132.
- [11] MEDA A, MOSTOSI S, RINALDI Z, et al. Corroded RC columns repair and strengthening with high performance fiber reinforced concrete jacket [J]. Materials and structures, 2016, 49(5): 1967-1978.
- [12] 郑仁亮, 黄晶晶, 张仁巍, 等. 超高性能混凝土加固 RC 桥墩拟静力数值分析[J]. 兰州工业学院学报, 2020, 27(6): 22-27.  
(ZHENG Renliang, HUANG Jingjing, ZHANG Renwei, et al. Quasi-static numerical analysis of RC bridge piers reinforced with ultra-high performance concrete [J]. Journal of Lanzhou institute of technology, 2020, 27(6): 22-27.)
- [13] 李帅, 张凡, 储长青, 等. 预制 UHPC 模壳增强 RC 桥墩设计方法与抗震性能分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 168-180.  
(LI Shuai, ZHANG Fan, CHU Changqing, et al. Design method and seismic performance analyses of reinforced concrete bridge piers confined with precast UHPC permanent formwork [J]. China journal of highway and transport, 2021, 34(8): 168-180.)
- [14] 鞠彦忠, 王德弘, 李秋晨, 等. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响[J]. 实验力学, 2011, 26(3): 254-260.  
(JU Yanzhong, WANG Dehong, LI Qiuchen, et al. On the influence of steel fiber volume fraction on mechanical properties of reactive powder concrete [J]. Journal of experimental mechanics, 2011, 26(3): 254-260.)
- [15] 徐海滨, 邓宗才. 新型 UHPC 应力-应变关系研究[J]. 混凝土, 2015(6): 66-68.  
(XU Haibin, DENG Zongcai. Stress-strain constitutive law of a new kind of UHPC [J]. Concrete, 2015(6): 66-68.)
- [16] 任亮, 方志, 王诚. 基于 OpenSees 的 RPC 桥墩拟静力数值模拟与参数分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(10): 92-99.  
(REN Liang, FANG Zhi, WANG Cheng. Numerical simulation and parameter analysis of RPC piers under pseudo-static loading based on OpenSees [J]. Journal of the China railway society, 2015, 37(10): 92-99.)
- [17] TONG T, YUAN S Q, ZHUO W D, et al. Seismic retrofitting of rectangular bridge piers using ultra-high performance fiber reinforced concrete jackets [J]. Composite structures, 2019, 228: 111367.
- [18] HOSINIEH M M, AOUDE H, COOK W D, et al. Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under pure axial loading [J]. Engineering structures, 2015, 99: 388-401.
- [19] 周连绪, 叶爱君, 陈方有. 镀锌铁丝约束混凝土应力-应变本构研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(8): 111-119.  
(ZHOU Lianxu, YE Aijun, CHEN Fangyou. Research on stress-strain constitutive model of concrete confined by galvanized iron wires [J]. Chinese journal of civil engineering, 2021, 54(8): 111-119.)
- [20] KUNNATH S K, HEO Y, MOHLE J F. Nonlinear uniaxial material model for reinforcing steel bars [J]. Journal of structural engineering, 2019, 135(4): 335-343.
- [21] ZHAO J, SRITHARAN S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures [J]. ACI structural journal, 2007, 104(2): 133-141.
- [22] REN L, FANG Z, ZHONG R, et al. Experimental and numerical investigations of the seismic performance of UHPC box piers [J]. KSCE journal of civil engineering, 2019, 23(2): 597-607.  
(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)