

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221218001

# UHPC增强短搭接RC构件承载力可靠度分析与加固建议\*

马高<sup>1,2</sup>, 马忍<sup>1</sup>

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082)

**摘要:** 基于可靠度研究超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)增强钢筋短搭接RC构件的失效模式与承载力特征。首先阐述了UHPC加固机理,建立了包含活恒荷载效应比、搭接系数 $m$ 、UHPC强度、混凝土强度、钢筋型号、考虑水平地震作用的弯矩效应比和轴力效应比等关键参数的设计空间;确立分析RC构件承载力可靠度的功能函数,运用Monte Carlo法对设计空间中的关键参数组进行可靠指标计算,然后进行关键参数敏感性分析和计算结果拟合分区。结果表明:设计空间关键参数中,搭接系数、效应比、配筋率、钢筋型号和UHPC强度对可靠指标的影响均显著;UHPC不仅具有良好的承载力增强能力,还能改变失效模式,梁和柱屈服时可靠指标分别提高109.6%和12.9%,屈服时搭接系数分别为0.58和0.57;对于受弯RC梁(压弯柱), $m > 0.67(0.65)$ 时,钢筋基本能屈服,建议采用UHPC加固; $0.50(0.49) < m \leq 0.67(0.65)$ 时,存在钢筋屈服和粘结失效两种情况,建议谨慎加固; $m \leq 0.50(0.49)$ 时,容易发生粘结失效,不建议采用UHPC加固。

**关键词:** 短搭接; UHPC加固; 可靠度; Monte Carlo法; 承载力

**中图分类号:** TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0605-11

## Reliability Analysis of Load Capacity of UHPC-Reinforced Short Lap-Spliced RC Components and Strengthening Recommendation

MA Gao<sup>1,2</sup>, MA Ren<sup>1</sup>

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

2. Hunan Provincial Key Lab on Damage Diagnosis for Engineering Structures (Hunan University), Changsha 410082, China)

**Abstract:** This paper investigates the failure modes and load-bearing characteristics of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) reinforced short lap-spliced RC components. The reinforcement mechanism of UHPC was firstly demonstrated, and a design space was established, incorporating key parameters such as live-to-dead load ratio, lap-spliced coefficient  $m$ , UHPC strength, concrete strength, rebar type, and the bending moment effect ratio and axial force effect ratio considering horizontal seismic action. A performance function for analyzing the load-carrying reliability of RC components was established. The Monte Carlo method was applied to calculate reliability indices for critical parameter combinations within the design space, followed by a sensitivity analysis of key parameters

\* 收稿日期:2022-12-18;修回日期:2023-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52278498)、湖湘青年英才计划项目(2021RC3041)资助

作者简介:马高(1985—),男,副教授,博士。主要从事结构抗震、装配式结构等研究。E-mail:magao@hnu.edu.cn

and fitting of calculation results into zones. The results showed that among the key parameters in the design space, the lap-spliced coefficient, effect ratio, reinforcement ratio, rebar type and UHPC strength significantly influenced the reliability index. UHPC demonstrated excellent load-enhancing capabilities and the ability to alter failure modes. Reliability indices of beam and column yield increased by 109.6% and 12.9%, respectively, with lap-spliced coefficients at yield of 0.58 and 0.57 respectively. For flexural RC beams (compression bending columns), when  $m > 0.67(0.65)$ , the failure mode was steel reinforcement yielding, and UHPC reinforcement was recommended. When  $0.50(0.49) < m \leq 0.67(0.65)$ , the failure mode was either reinforcement yielding or bond failure, so UHPC reinforcement should be carefully employed. When  $m \leq 0.50(0.49)$ , bond failure was likely, thus UHPC reinforcement was not recommended.

**Keywords:** short lap-splice; UHPC reinforcement; reliability; Monte Carlo method; load-carrying capacity

## 0 引言

混凝土构件中钢筋的连接有搭接、机械连接、焊接等方式。其中,搭接方式因其方便布置、易设计、成本低等特点,在钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)结构的施工中应用最多。然而在实际地震作用下,因抗力需求大的位置出现钢筋搭接不足(短搭接)致使搭接区域发生破坏甚至引起结构倒塌,可能造成严重的人员伤亡和经济损失。而对这些短搭接构件进行局部增强加固是降低此类结构地震易损性的有效措施。

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)具有超高强、高韧性、高耐久性等优异的性能,在RC构件加固中逐渐得到应用。M. A. Dagenais等<sup>[1]</sup>用UHPC替换搭接钢筋周围的普通混凝土,加固具有搭接缺陷的RC桥墩,消除了搭接区混凝土劈裂破坏失效模式。此外,M. A. Dagenais等<sup>[2]</sup>还为评估UHPC加固缺陷搭接接头的有效性,进行了18个全尺寸梁构件试验。结果表明:由于UHPC具有较高的抗拉强度和开裂韧性,其与钢筋间的粘结应力是普通混凝土的两倍以上,完全消除了搭接区域开裂的问题。G. Metelli<sup>[3]</sup>等用UHPC对8个不同钢筋直径、全部或部分纵向钢筋在跨中搭接的足尺梁进行了试验。试验结果表明:UHPC的韧性可以增强薄弱搭接接头的性能,控制弯曲和劈裂裂缝的开口和扩展的能力可以提高搭接接头的强度,减少搭接长度。UHPC加固在于提升粘结性能、控制裂缝开展,加固后构件的性能除了受配筋率、UHPC强度、普通混凝土强度和搭接长度等因素影响外,还受活恒荷载效应比(梁)、考

虑水平地震作用的弯矩效应比和轴力效应比(柱)等因素影响,RC梁的可靠指标随着活恒荷载效应比的增大而减小,并且减幅越来越小<sup>[4]</sup>;考虑水平地震作用的弯矩效应比和轴力效应比对小偏压柱的可靠指标影响较小,但对大偏压柱的可靠指标影响较大<sup>[5]</sup>。

考虑设计变量离散影响,评估结构(构件)加固后完成预定功能的可靠性具有重要意义<sup>[6]</sup>。朱泽文等<sup>[7]</sup>基于JC法计算可靠指标,评估轨道交通梁加固后的服役寿命。杜斌等<sup>[8]</sup>采用一次二阶矩法计算粘钢加固柱的可靠指标,探究承载力是否满足可靠度标准。马士宾等<sup>[9]</sup>考虑体外预应力布筋的不确定性和变异性,提出基于目标可靠度的加固设计方法,同时采用响应面法分析各随机变量对可靠度的影响规律。周华强等<sup>[10]</sup>采用响应面法对体外施加预应力、外贴CFRP和钢板加固的结构进行时变可靠指标计算,预测加固桥梁剩余使用寿命。B. Yuan等<sup>[11]</sup>考虑荷载比、配筋率等因素,采用Monte Carlo法计算增大截面法加固梁的可靠性。本文首先阐述UHPC加固机理,用线性弯矩分布系数修正搭接钢筋应力,建立包含活恒荷载效应比、搭接系数、UHPC强度、混凝土强度、钢筋型号、考虑水平地震作用的弯矩效应比和轴力效应比等关键参数的设计空间;确立分析RC构件承载力可靠度的功能函数,运用生成模型较真实、适用于复杂结构系统和并行计算的Monte Carlo法对设计空间中的关键参数进行可靠指标计算;基于关键参数敏感性分析和计算结果拟合分区,给出UHPC加固建议,与文献试验结果吻合良好,可为实际新建和加固工程提供参考。

# 1 UHPC 加固介绍

## 1.1 UHPC 加固机理

钢筋搭接连接效果取决于钢筋与周围混凝土的力传递以及搭接钢筋的相对变形<sup>[12]</sup>。普通混凝土开裂应力小,搭接钢筋与混凝土接触面容易形成沿搭接方向的开裂,致使混凝土与钢筋之间的粘结应力传递能力降低甚至丧失。UHPC材料抗压、粘结等性能优异,可以有效提高与钢筋的粘结强度,控制搭接区域裂缝开展以及避免混凝土材料剥落,试件能维持较高的承载力持续受荷,最终在较大的延性下由于钢筋被拉断而破坏,承载力和耗能能力得到有效提升<sup>[1-3]</sup>。

## 1.2 UHPC 加固效果

影响UHPC加固效果的主要因素包括:加固高度、加固厚度、钢筋直径、配箍率、配筋率、UHPC材性、构造措施等。在既有搭接构件中,钢筋直径、配箍率、配筋率及加固高度 $l$ (受搭接长度影响)等参数均已明确。因此,加固厚度、UHPC材性、构造措施等成为影响UHPC加固效果的主要因素。在加固厚度方面,为了最大程度提高钢筋与UHPC材料的粘结性能,保证UHPC加固层不出现裂纹,提高抗劈裂能力,所需要的最小保护层厚度(图1中 $c_1$ )为 $1.5d$ ,达到 $2d$ 以上该因素的影响趋于稳定<sup>[13]</sup>,并且,搭接钢筋后侧(图1中 $c_2$ )需要 $1d$ 加固深度<sup>[1]</sup>;在UHPC材性方面,水胶比、粗骨料掺量、钢纤维掺量等均会影响UHPC的粘结性能,水胶比偏大或偏小、骨料掺量偏多或偏少,都会导致UHPC的强度降低,随着钢纤维掺量增加,粘结强度先随之增大,然后趋于稳定<sup>[13]</sup>;在构造措施方面,为确保UHPC能与原构件充分粘结,需对普通混凝土表面进行凿毛处理。

# 2 功能函数的确定

## 2.1 搭接钢筋应力

文献[14]基于包含800多个数据的试验数据库提出了搭接钢筋在普通混凝土中的强度模型,如式(1)所示,该模型具有较好的代表性。

$$f_s = \frac{54 \left( \frac{f_{cm}}{25} \right)^{0.25} \left( \frac{l}{d} \right)^{0.55} \left( \frac{25}{d} \right)^{0.2}}{\left[ \left( \frac{c_{min}}{d} \right)^{0.25} \left( \frac{c_{max}}{c_{min}} \right)^{0.1} + k_m K_{tr} \right]^{-1}}, K_{tr} = \frac{n_1 n_g A_{sv}}{l d n_b} \quad (1)$$

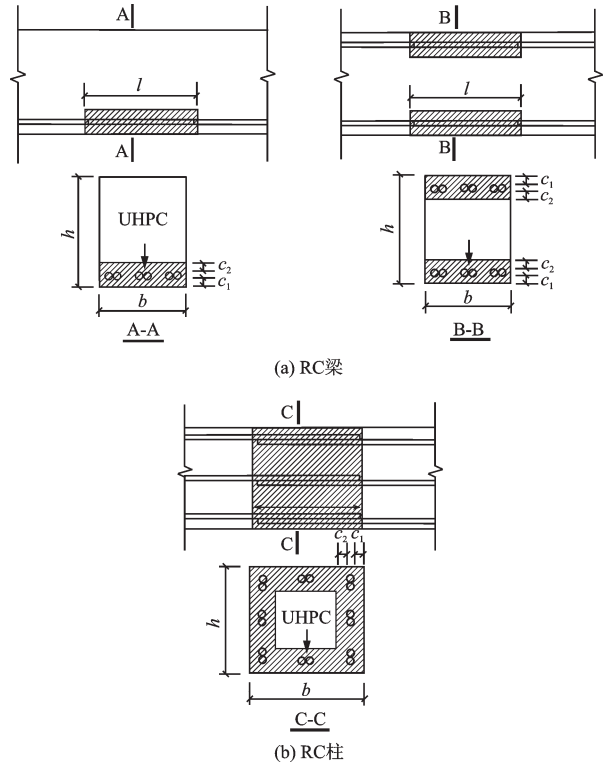


图1 UHPC加固短搭接RC构件示意

Fig.1 Schematic diagram of RC components reinforced with UHPC short lap-spliced

式中, $f_{cm}$ 为混凝土抗压强度; $d$ 为搭接钢筋的直径; $c_{min}$ 和 $c_{max}$ 分别为钢筋净间距一半以及两个方向保护层厚度中的较小者和较大者; $k_m$ 为箍筋约束效应系数; $n_1$ 为箍筋肢数; $n_g$ 为搭接长度内箍筋数; $A_{sv}$ 为单箍筋截面面积; $n_b$ 为搭接钢筋对的数量。

目前缺乏基于试验数据库探究搭接钢筋在UHPC中的强度模型,但基于试验数据库提出了不少粘结强度模型。马福栋等<sup>[15]</sup>在既有数据库的基础上丰富了试验数据,提出了钢筋-UHPC搭接粘结强度模型,如式(2)所示。

$$\tau = \frac{\left( 0.83 + 2\sqrt{\rho_{sv}} + 11.65V_f \right) \sqrt{f_{ch}}}{\left( 0.36 + 2.02 d/l \right)^{-1} \left( 0.86 + 0.57 c/d \right)^{-1}} \quad (2)$$

式中, $\rho_{sv}$ 为配箍率; $c/d$ 为相对保护层厚度; $V_f$ 为纤维体积掺量; $f_{ch}$ 为UHPC抗压强度。

G. Metelli等<sup>[16]</sup>基于钢筋应力与粘结强度关系(式(3))计算构件抗弯承载力。式中钢筋应力计算值的准确性取决于粘结强度模型的准确性,而粘结强度模型的准确性依赖于数据库数据的充足性,以及数据库对钢筋外形、受力形式等因素考虑的完整性。

$$A_{sl} f_s = \pi \tau d l \quad (3)$$

式中, $f_s$ 为钢筋应力; $A_{sl}$ 为搭接钢筋截面面积; $\tau$ 为粘

结强度。

目前用于粘结强度模型拟合分析的数据库包含较多的拉拔和纯弯曲试验数据,试件近乎只受到轴向应力的作用。然而在实际工程中构件普遍同时承受弯矩和剪力作用,公式(3)和现行规范<sup>[17]</sup>公式(4)均无法反映搭接钢筋的真实受力情况,计算得到的搭接钢筋应力结果普遍偏低。杨帆等<sup>[18]</sup>提出一种弯矩分布系数 $\alpha_s$ 对给定搭接长度下钢筋应力的计算公式进行修正,试验表明经修正后模型具有更好的预测精度。

$$l_{ab} = \alpha f_y d / f_t \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{柱: } \alpha_s &= (2a + 2l) / (2a + l) \\ \text{梁: } \alpha_s &= 2a / (2a - l) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, $l_{ab}$ 为基本锚固长度; $\alpha$ 为钢筋外形系数; $f_t$ 为混凝土轴心抗拉强度设计值; $a$ 在梁构件中为支座到钢筋搭接长度端部的长度,在柱构件中为零弯矩点到近搭接端距离,如图2和图3所示。

本文采用线性弯矩分布系数对粘结强度模型计算的钢筋应力进行修正,如式(6)所示。

$$f'_s = \alpha_s f_s \quad (6)$$

式中, $f'_s$ 为修正后的钢筋应力。

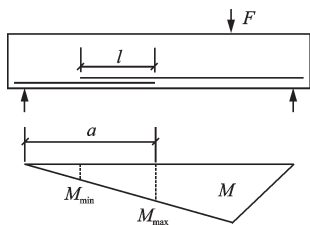


图2 RC梁搭接钢筋线性弯矩分布

Fig.2 Linear bending moment distribution of lap-spliced re-bars in RC beam

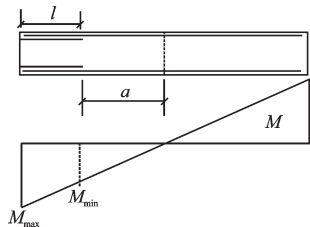


图3 RC柱搭接钢筋线性弯矩分布

Fig.3 Linear bending moment distribution of lap-spliced re-bars in RC column

## 2.2 受弯RC梁功能函数

短搭接受弯RC梁破坏模式为钢筋粘结失效破

坏,与充分搭接或受力筋连续情况下的区别在于受力筋不能达到屈服强度。本文基于单筋矩形截面梁,进行UHPC对其增强的承载力可靠度分析。通过修正搭接钢筋应力表示,抗弯承载力计算式为:

$$M = f'_s A_s (h_0 - x/2) \quad (7)$$

$$\alpha_1 f_c b x = f'_s A_s \quad (8)$$

式中, $x$ 为等效矩形受压区高度; $A_s$ 为受拉钢筋面积; $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度; $\alpha_1$ 为等效矩形受压区的应力换算系数; $h_0$ 为截面有效高度; $b$ 为截面宽度。

根据《建筑结构可靠性设计统一标准》<sup>[19]</sup>进行荷载效应组合,恒荷载分项系数取值为1.3,活荷载分项系数取值为1.5,抗弯承载力设计值计算式为:

$$M_d = 1.3M_G + 1.5M_Q \quad (9)$$

式中, $M_d$ 为抗弯承载力设计值; $M_G$ 为恒载产生的弯矩; $M_Q$ 为活载产生的弯矩。

于是,受弯RC梁承载力的功能函数为:

$$Z = R - S = f'_s A_s (h_0 - x/2) - M_G - M_Q \quad (10)$$

引入活恒荷载效应比、配筋率考虑不同案例之间的差异,如式(11)所示。于是,RC梁的可靠指标仅与活恒荷载效应比有关,而与活恒荷载效应的绝对值无关。

$$\rho = M_Q / M_G, \rho_s = A_s / (b h_0) \quad (11)$$

式中, $\rho$ 为活恒荷载效应比,根据《建筑结构可靠性设计统一标准》<sup>[19]</sup>,取值为0.2~1.5; $\rho_s$ 取值为0.5%~2.0%。

## 2.3 压弯RC柱功能函数

在大偏压状态下,破坏时远离轴向力一侧的钢筋先屈服,随后靠近轴向力一侧的混凝土被压碎;在小偏压状态下,达到极限状态时远离轴向力一侧的钢筋拉应力较小,靠近轴向力一侧的混凝土被压碎。由此可知,钢筋短搭接构件在大偏压状态下最为危险,本文基于大偏压RC柱,进行UHPC对其增强的承载力可靠度分析。

根据《混凝土结构设计规范》<sup>[17]</sup>,通过修正搭接钢筋应力表示,大偏压RC柱所能承受的 $M$ 、 $N$ 计算如下:

$$M = f_y A_s (h_0 - a_s) + \alpha_1 f_c b x (h/2 - x/2) \quad (12)$$

$$N = \alpha_1 f_c b x \quad (13)$$

根据《建筑抗震设计规范》<sup>[20]</sup>,水平地震作用下大偏压RC柱弯矩、轴力组合设计值的表达式分别为式(14)、(15)。

$$M_d = \eta (\gamma_g M_g + \gamma_q M_q), M_g = a_1 g_k, M_q = b_1 q_k \quad (14)$$

$$N_d = \gamma_g N_g + \gamma_q N_q, N_g = a_2 g_k, N_q = b_2 q_k \quad (15)$$

式中,  $M_g$  为重力荷载产生的弯矩;  $M_q$  为水平地震作用产生的弯矩,  $N_g$  为重力荷载产生的轴力,  $N_q$  为水平地震作用产生的轴力;  $\gamma_g$  和  $\gamma_q$  为荷载分项系数, 取值分别为 1.2 和 1.3;  $\eta$  为柱端弯矩增大系数;  $g_k$  和  $g_k$  分别为参与组合的水平地震作用和重力荷载标准值;  $a_1, b_1, a_2$  和  $b_2$  分别为对应的荷载效应系数。

于是, 水平地震作用下大偏压 RC 柱功能函数为:

$$\left. \begin{aligned} Z &= R - S \\ R &= f'_s A_s (h_0 - a_s) + (N_g + N_q) \left( \frac{h}{2} - \frac{N_g + N_q}{2\alpha_1 f_c b} \right) \\ S &= M_g + M_q \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

在《建筑抗震设计规范》<sup>[20]</sup> 中, 用承载力抗震调整系数来验算承载力, 如式(17)所示。

$$S_d \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (17)$$

式中,  $R_d$  为构件承载力设计值;  $S_d$  为构件内力设计值;  $\gamma_{RE}$  为承载力抗震调整系数, 取值为 0.8。

按式(17)进行承载力设计验算, 弯矩设计值需满足下式:

$$M_d = \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[ \gamma_{RE} N_d \left( \frac{h}{2} - \frac{\gamma_{RE} N_d}{2\alpha_1 f_c b} \right) + f_{yd} A_s (h_0 - a_s) \right] \quad (18)$$

引入考虑地震作用下的弯矩效应比和轴力效应比、随机偏心距和配筋率考虑不同案例之间的差异, 见式(19)。当两个荷载效应比值相等时, 则各荷载作用的偏心距相同, 组合后偏心距仍为定值。

$$\left. \begin{aligned} \rho_M &= M_q / M_g, \rho_N = N_q / N_g \\ \rho_s &= A_s / (bh_0), e_g = a_1 / a_2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中,  $\rho_M$  为考虑地震作用下的弯矩效应比;  $\rho_N$  为考虑地震作用下的轴力效应比;  $\rho_s$  为单侧配筋率。蒋友宝等<sup>[5]</sup>将  $\rho_M$  取值为 0.5~5.0;  $\rho_N$  取值为 -0.3~0.3, 本文  $\rho_M = \rho_N$ , 同抗震承载力可靠度校准时所考虑的情形<sup>[21]</sup>;  $\rho_s$  取值为 0.5%~2.0%。

### 3 设计空间

为了探究 UHPC 加固短搭接 RC 构件的承载力可靠性, 提出可供参考的加固建议, 需要覆盖不同混凝土强度、不同搭接长度、不同 UHPC 强度、不同型号钢筋、不同受荷等情况的既有短搭接 RC 构件。将表 1 所列明确取值或范围的混凝土强度等级、UHPC 强度等级、活恒荷载效应比等作为关键参数建立设计空间。在 4.3 节针对各关键参数展开讨论, 其中, 配筋率为 0.7%、1.1% 和 1.3% (对于 RC 梁, 对应配

置直径分别为 18、23、25 mm 的 3 根螺纹钢筋; 对于 RC 柱, 对应配置直径分别为 20、25、28 mm 的 3 根螺纹钢筋) 三种情形。由于截面尺寸对可靠度影响很小<sup>[22]</sup>, 本文不改变截面尺寸, 并基于截面尺寸为 450 mm × 450 mm 的钢筋搭接 RC 柱<sup>[23]</sup> 和截面尺寸为 250 mm × 500 mm 的钢筋搭接 RC 梁<sup>[24]</sup> 探究加固前后的承载力可靠度, 其中搭接系数为搭接长度与搭接钢筋在普通混凝土中的临界搭接长度之比。

表 1 关键参数的取值

Table 1 Values of key parameters

关键参数	取值	关键参数	取值
混凝土强度等级	C25; C30; C35; C40; C45	搭接系数 $m$	0.2~1.0
UHPC 强度等级	100 MPa; 120 MPa; 140 MPa	考虑地震作用下的弯矩效应比 $\rho_M$	0.5~5.0
活恒荷载效应比 $\rho$	0.2~1.5	考虑地震作用下的轴力效应比 $\rho_N$	0.5~5.0
配筋率 $\rho_s$	0.5%~2.0%	钢筋型号	HRB335; HRB400

## 4 可靠指标计算与讨论

### 4.1 设计参数统计特征

本文所涉及设计参数的统计特征和取值列于表 2 中。

表 2 设计参数的统计特征和取值

Table 2 Statistical characteristics and values of design parameters

随机变量	分布类型	均值系数	变异系数	文献
$M_g$	正态分布	1.080	0.100	[5]
$M_q$	极值 I 型分布	1.060	0.300	
$N_g$	正态分布	1.080	0.100	
$N_q$	极值 I 型分布	1.060	0.300	
$f'_c$ (C25)	正态分布	1.214	0.069	[25]
$f'_c$ (C30)	正态分布	1.391	0.106	
$f'_c$ (C35)	正态分布	1.245	0.046	
$f'_c$ (C40)	正态分布	1.180	0.055	
$f'_c$ (C45)	正态分布	1.142	0.034	
$\sigma_s$ (HRB335)	正态分布	1.135	0.057	[26]
$\sigma_s$ (HRB400)	正态分布	1.120	0.060	
$d$	正态分布	1.000	0.020	[27]
$h_0$	正态分布	1.000	0.020	
$c$	正态分布	1.000	0.020	
$b$	正态分布	1.000	0.020	
$M_G$	正态分布	1.060	0.070	[28]
$M_Q$	极值 I 型分布	0.859	0.233	

## 4.2 可靠度分析方法

采用 Monte Carlo 法计算 UHPC 增强短搭接 RC 构件承载力可靠指标。取设计空间关键参数形成关键参数组,利用 MATLAB 软件,依据 Monte Carlo 法的原理编制程序,对每组关键参数进行  $n$  次模拟,得到设计空间关键参数组的失效情况,统计构件失效次数并计算失效概率和可靠指标  $\beta$ 。

为保证 Monte Carlo 法的计算精度,由文献[29]可知,要求模拟次数  $n > 100/p_i$ ,其中  $p_i$  为失效概率。经试算,取模拟次数  $n$  为  $1 \times 10^7$ ,该模拟次数足够满足精度要求。

## 4.3 结果与讨论

基于 Monte Carlo 模拟结果,本节对设计空间关键参数组下的 RC 构件进行可靠指标的敏感性分析。鉴于篇幅,选取具有代表性的关键参数组展开讨论。

### 4.3.1 关键参数对受弯 RC 梁承载力可靠指标的影响

图 4 中试件命名规则为:C35-0.8-1.1% 表示混凝土强度等级-效应比(对于 RC 梁,为活恒荷载效应比;对于 RC 柱,为考虑水平地震作用下的弯矩和轴力效应比)-配筋率;C35-U120-0.8-1.1% 表示混凝土强度等级-UHPC 强度等级-效应

比-配筋率,其余同理。另外,通过屈服点(对于加固后,指搭接系数最小的屈服点)作基线,并取基线与曲线所交点的可靠指标计算增幅。对于 RC 试件,配筋率是影响承载力的关键因素,适筋梁承载力会随其增大而提升,图 4(a)表明,1.1% 和 1.3% 的配筋率相较于 0.7% 的配筋率,加固前可靠指标分别提高 15.8% 和 26.6%,加固后可靠指标分别提高 17.8% 和 24.9%。不同型号的钢筋受拉性能差异较大,由图 4(b)可知,在相同配筋率下,加固前后 HRB400 型比 HRB335 型的可靠指标分别高 201.5% 和 51.7%。活恒荷载效应比反映活荷载与恒荷载产生的弯矩效应比重,值越大,活荷载效应的影响越突出,由图 4(c)可知,屈服点处的可靠指标随着活恒荷载效应比增大而降低,加固前后的变化幅度相近,0.8 和 0.4 的活恒荷载效应比相较于 1.2 的活恒荷载效应比,分别提高 8.1% 和 18.9%。图 4(d)显示,混凝土强度越高可靠指标越低,主要原因为:混凝土强度影响粘结强度,从而影响钢筋临界搭接长度。当搭接系数一定时,混凝土强度越高,临界搭接长度越短,通过搭接系数计算出混凝土中的钢筋搭接长度就越短,影响锚固和加固性能,造成承载力和可靠指标降低的情况,也由此可见,搭接长度对可靠指标的影响比混凝土强度显著。对于 UHPC,其材料性能影响着粘结性能、搭接长度等,图 4(e)表明,100、120、140 MPa 的 UHPC 加固

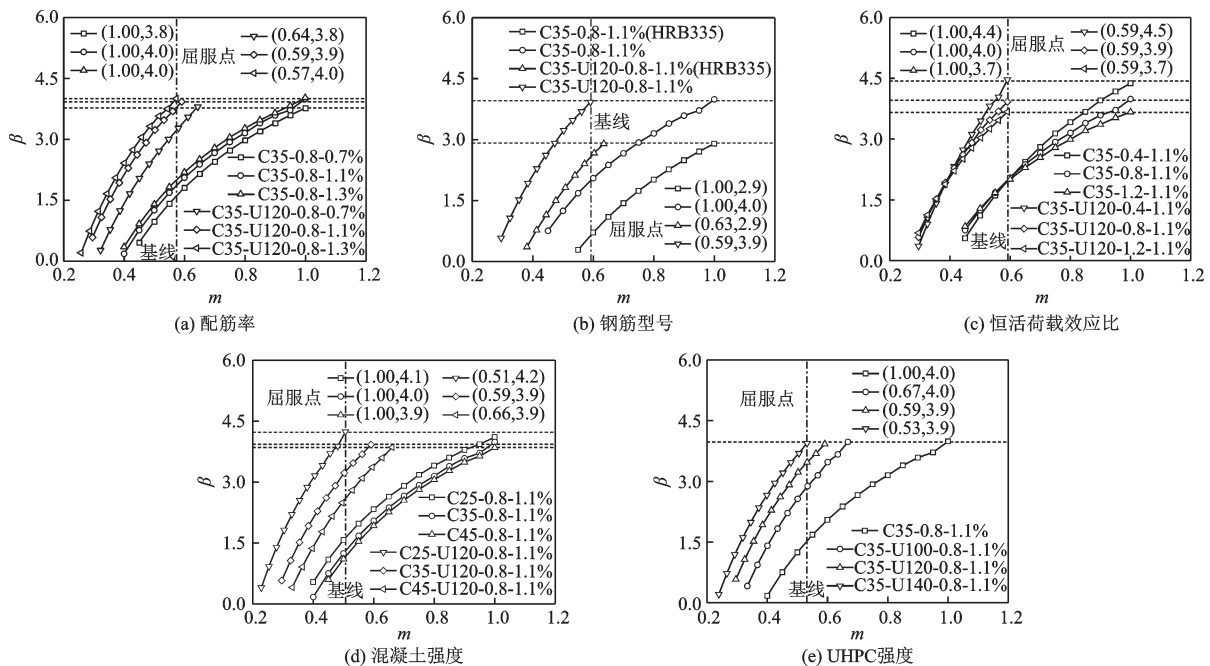


图 4 各关键参数下 UHPC 增强短搭接受弯 RC 梁的可靠指标

Fig.4 Reliability indices of UHPC reinforced short lap-spliced RC beam under various key parameters

原 C35 强度的受弯 RC 梁,可靠指标分别提高 87.5%、127.0% 和 160.0%,达到屈服点时搭接系数分别为 0.67、0.59 和 0.53。

#### 4.3.2 关键参数对压弯 RC 柱承载力可靠指标的影响

图 5(a)表明,1.1% 和 1.3% 的配筋率相较于 0.7% 的配筋率,压弯 RC 柱加固前可靠指标分别提高 3.6% 和 5.2%,加固后可靠指标分别提高 5.4% 和 9.3%。由图 5(b)还可知,在相同配筋率下,加固前后 HRB400 型比 HRB335 型的可靠指标分别高 6.0% 和 7.9%。考虑水平地震作用下的弯矩(轴力)效应比反映出水平地震作用产生的弯矩(轴力)效应与重力荷载产生的弯矩(轴力)效应占比情况,比值越大,地震作用产生的效应影响越明显,图 5(c)中,1.5 和 3.0 的效应比相较于 4.5 的效应比,屈服点

的可靠指标分别提高 24.2% 和 6.1%。由图 5(d)所示,考虑弯矩、剪切对粘结性能的影响,对钢筋应力修正后,屈服点的可靠指标提高 1.4%。对比图 5(e)与图 4(d)屈服点发现,混凝土强度对压弯 RC 柱可靠指标的影响规律与受弯 RC 梁基本一致,导致的原因二者相同。图 5(f)显示,100、120、140 MPa 的 UHPC 加固原 C35 强度的压弯 RC 柱,可靠指标分别提高 6.7%、10.5% 和 14.7%,达到屈服点时搭接系数分别为 0.65、0.57 和 0.51。结合受弯 RC 梁计算结果分析可知,压弯 RC 柱的可靠指标随搭接系数的变化没有受弯 RC 梁敏感,当搭接系数较小时,压弯 RC 柱仍然具有一定承载能力。原因是压弯 RC 柱在一定轴力作用下,其水平承载力提高,且弯矩承载力公式和功能函数均未考虑  $P-\Delta$  效应的影响。

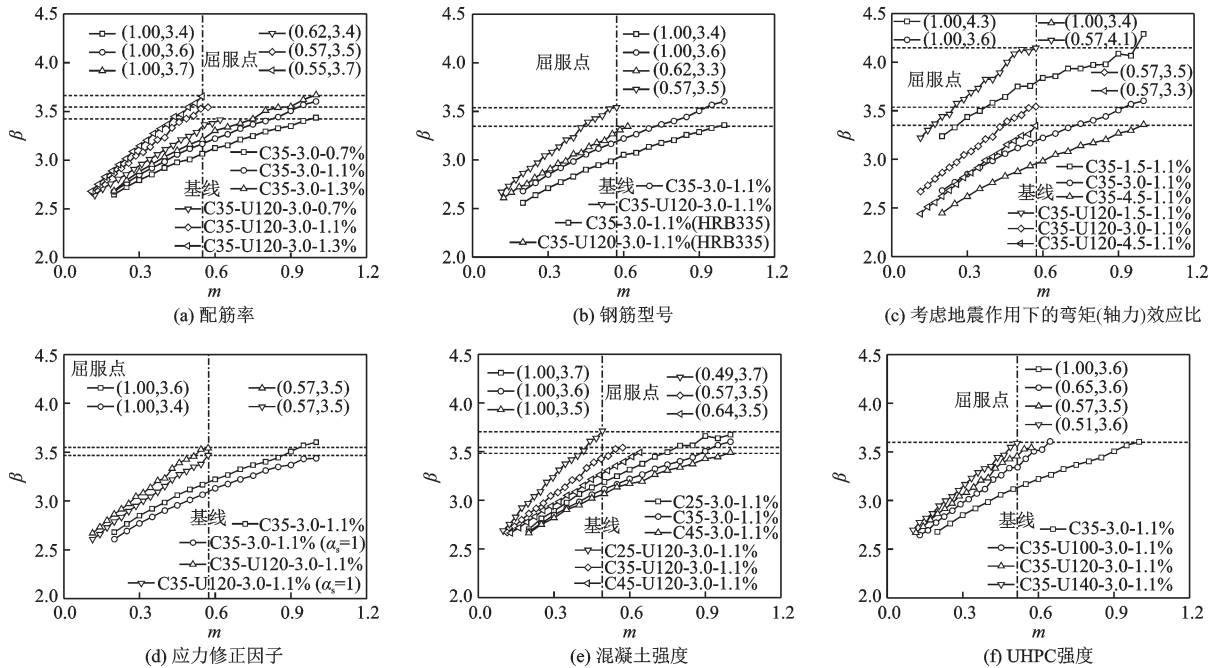


图 5 各关键参数下 UHPC 增强短搭接压弯 RC 柱的可靠指标

Fig.5 Reliability indices of UHPC reinforced short lap-spliced compression-bending RC column under various key parameters

## 5 UHPC 加固建议与验证

设计空间中的关键参数组计算结果如图 6、7 所示,根据散点分布规律可以将失效模式划分为 I 区、II 区和 III 区;为便于分析及指导实际应用,对散点进行曲线拟合。结合分区情况可将构件失效模式与 UHPC 加固建议汇总于表 3 中。该表可为实际加固工程中 UHPC 加固方案的合理选择提供参考。

为进一步探究表 3 中 UHPC 加固建议的合理性,本文对搭接系数和破坏模式进行验证。共收集了 40 组参考文献试验数据,其中:梁试件 29 组,柱试件 11 组;搜集的数据包含混凝土强度、UHPC 强度、钢筋直径及屈服强度、配筋率、配箍率、保护层厚度、搭接长度、破坏模式等。验证结果表明:在 40 组数据中,有 37 个试件的破坏模式与加固建议一致(占总数据的 92.5%),吻合良好,在这 37 个试件中,破坏模式包括钢筋拉断、钢筋屈服、钢筋粘结失效;

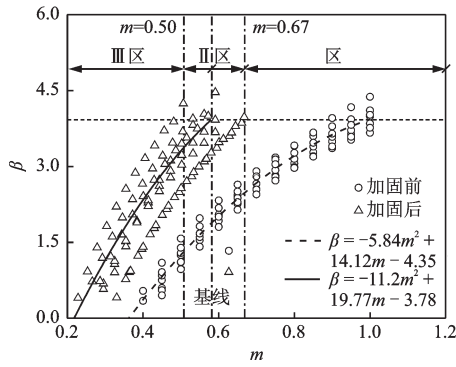


图6 设计空间中 UHPC 增强短搭接受弯 RC 梁的可靠指标  
Fig.6 Reliability indices of UHPC reinforced short lap-spliced RC beam in design space

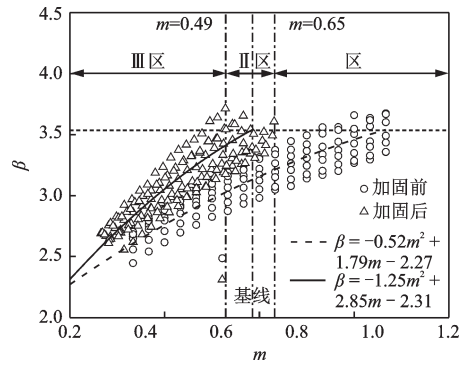


图7 设计空间中 UHPC 增强短搭接压弯 RC 柱的可靠指标  
Fig.7 Reliability indices of UHPC reinforced short lap-spliced compression-bending RC column in design space

表3 UHPC 加固建议

Table 3 UHPC reinforcement recommendations

构件	受弯 RC 梁			压弯 RC 柱		
加固前 $m$ - $\beta$ 关系	$\beta = -5.84m^2 + 14.12m - 4.35$			$\beta = -0.52m^2 + 1.79m + 2.27$		
加固后 $m$ - $\beta$ 关系	$\beta = -11.2m^2 + 19.77m - 3.78$			$\beta = -1.25m^2 + 2.85m + 2.31$		
加固分区	I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区
失效模式	钢筋屈服	钢筋屈服、粘结失效	粘结失效	钢筋屈服	钢筋屈服、粘结失效	粘结失效
搭接系数范围	$m > 0.67$	$0.50 < m \leq 0.67$	$m \leq 0.50$	$m > 0.65$	$0.49 < m \leq 0.65$	$m \leq 0.49$
解释说明	加固后,不易发生粘结失效破坏,钢筋基本能屈服。可参考搭接系数进行加固设计	当原构件普通混凝土强度高,但加固所用的 UHPC 强度低等情况时,会发生粘结失效;反之,钢筋能屈服。搭接系数处于该区间时,需要结合实际单独进行计算验证	加固后,容易发生粘结失效破坏。可参考搭接系数放弃 UHPC 加固	加固后,不易发生粘结失效破坏,钢筋基本能屈服。可参考搭接系数进行加固设计	当原构件普通混凝土强度高,但加固所用的 UHPC 强度低等情况时,会发生粘结失效;反之,钢筋能屈服。搭接系数处于该区间时,建议结合实际单独进行计算验证	加固后,容易发生粘结失效破坏。可参考搭接系数放弃 UHPC 加固
加固建议	UHPC 加固	谨慎加固	不建议采用 UHPC 加固	UHPC 加固	谨慎加固	不建议采用 UHPC 加固

其余3个试件的破坏模式与加固建议有所不同,这3个试件的破坏模式均为钢筋屈服,加固建议理论预测结果为粘结失效,表明本文所提的加固建议具有一定的安全富余。详细试验验证信息汇总于表4中。

## 6 结论

首先阐述了 UHPC 加固机理,建立了 UHPC 加固短搭接 RC 构件各关键参数的设计空间;确立分析 RC 构件承载力可靠度的功能函数,运用 Monte Carlo 法对设计空间中的关键参数组进行可靠指标计算,然后进行关键参数敏感性分析和计算结果拟

合分区。得出以下结论:

(1)设计空间关键参数对可靠指标均具有一定影响。其中,搭接系数、效应比(RC梁中的活恒荷载效应比,RC柱中考虑水平地震下的弯矩和轴力效应比)、配筋率、钢筋型号和 UHPC 强度的影响较显著。

(2)UHPC 不仅具有良好的承载力提升能力,还能改变短搭接构件的粘结失效破坏模式。RC 梁和柱屈服时可靠指标分别提高 109.6% 和 12.9%,屈服时对应的搭接系数分别为 0.58 和 0.57。

(3)对于受弯 RC 梁, $m > 0.67$ 时,建议采用 UHPC 加固; $0.50 < m \leq 0.67$ 时,建议谨慎加固; $m \leq 0.50$ 时,不建议采用 UHPC 加固。对于压弯 RC 柱,



表4 理论预测与试验结果对比

Table 4 Comparison between theoretical prediction and test results

序号	文献	构件类型	构件编号	理论预测		实际试验		验证结果	序号	文献	构件类型	构件编号	理论预测		实际试验		验证结果
				搭接系数	区间	破坏模式	区间						搭接系数	区间	破坏模式	区间	
1		柱	R	0.50	II	Y	II	吻合	21		梁	16L2/4-I-0.8lb-FRC	0.43	III	B	III	吻合
2		柱	S1	0.67	I	S	I	吻合	22	[3]	梁	16L2/4-E-0.8lb-FRC	0.43	III	B	III	吻合
3	[1]	柱	S2	0.97	I	S	I	吻合	23		梁	6L1/4-I-0.6lb-FRC	0.43	III	B	III	吻合
4		柱	S3	0.79	I	S	I	吻合	24		梁	L2-1	0.43	III	Y	II	富余
5		柱	S4	0.67	I	S	I	吻合	25		梁	L2-2	0.64	II	Y	II	吻合
6		梁	1-12-25-L	0.54	II	Y	II	吻合	26		梁	L2-3	0.85	I	Y	I	吻合
7		梁	2-12-25-L	0.54	II	Y	II	吻合	27	[30]	梁	L2-4	1.07	I	Y	I	吻合
8		梁	1-18-25-L	0.83	I	Y	I	吻合	28		梁	L2-5	1.28	I	Y	I	吻合
9		梁	1-12-35-L	0.50	III	B	III	吻合	29		梁	L2-6	1.50	I	Y	I	吻合
10		梁	1-18-35-L	0.70	I	Y	I	吻合	30		梁	U-1	1.36	I	Y	I	吻合
11		梁	1-6-25-L	0.25	III	B	III	吻合	31		梁	U-2	1.13	I	Y	I	吻合
12	[2]	梁	1-6-25-L1	0.25	III	B	III	吻合	32	[31]	梁	U-3	0.91	I	Y	I	吻合
13		梁	1-12-25-L1	0.57	II	Y	II	吻合	33		梁	U-4	0.68	I	Y	I	吻合
14		梁	1-6-35-L	0.25	III	B	III	吻合	34		梁	U-5	0.45	III	Y	II	富余
15		梁	1-6-35-R	0.23	III	B	III	吻合	35	[32]	柱	高墩	0.54	II	Y	II	吻合
16		梁	1-6-35-L $\frac{1}{2}$	0.33	III	B	III	吻合	36	[33]	柱	C2	0.78	I	S	I	吻合
17		梁	1-12-35-L $\frac{1}{2}$	0.66	II	Y	II	吻合	37	[34]	柱	-	0.81	I	S	I	吻合
18		梁	20L3/3-FRC	0.40	III	B	III	吻合	38	[35]	柱	-	0.52	II	Y	II	吻合
19	[3]	梁	20L1/3-I-0.8lb-FRC	0.40	III	B	III	吻合	39	[36]	柱	-	0.47	III	Y	II	富余
20		梁	16L4/4-FRC	0.43	III	B	III	吻合	40	[37]	柱	-	0.52	II	Y	II	吻合

注:S表示钢筋拉断;Y表示钢筋屈服;B表示钢筋粘结失效

$m > 0.65$  时,建议采用UHPC加固; $0.49 < m \leq 0.65$  时,建议谨慎加固; $m \leq 0.49$  时,不建议采用UHPC加固。

参考文献:

[1] Dagenais M A, Massicotte B, Boucher-Proulx G. Seismic retrofitting of rectangular bridge piers with deficient lap splices using ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23 (2): 04017129.

[2] Dagenais M A, Massicotte B. Tension lap splices strengthened with ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(7):04014206.

[3] Metelli G, Marchina E, Plizzari G A. Experimental

study on staggered lapped bars in fiber reinforced concrete beams [J]. Composite Structures, 2017, 179: 655-664.

[4] 何政,黄永春.FRP筋混凝土梁受弯正截面承载力可靠度评估[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(4): 650-655.

He Z, Huang Y C. Reliability assessment of FRP reinforced concrete beams with flexural positive section bearing capacity [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(4): 650-655. (in Chinese)

[5] 蒋友宝,杨毅,杨伟军.基于弯矩和轴力随机相关特性的RC偏压构件可靠度分析[J].建筑结构学报,2011, 32(8):106-112.

Jiang Y B, Yang Y, Yang W J. Reliability analysis of RC biased members based on random correlation properties of bending moment and axial force [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(8): 106-112. (in Chinese)

- [6] 唐义军,李耀庄,蒋春艳.多因素机制作用下在役钢筋混凝土结构构件的可靠度分析[J].防灾减灾工程学报,2005,25(2):135-139.  
Tang Y J, Li Y Z, Jiang C Y. Reliability analysis of in-service reinforced concrete structural members under the action of multi-factor mechanism[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(2):135-139. (in Chinese)
- [7] 朱泽文,代力,毛琳.疲劳作用下CFRP加固混凝土梁抗弯可靠度分析[J].建筑结构,2023,53(6):143-149.  
Zhu Z W, Dai L, Mao L. Analysis of flexural reliability of CFRP-reinforced concrete beams under fatigue action[J]. Building Structures, 2023, 53(6):143-149. (in Chinese)
- [8] 杜斌,赵人达,向天宇.粘钢加固轴心受压钢筋混凝土柱的利用率及可靠度分析[J].建筑结构,2010,40(5):26-28.  
Du B, Zhao R D, Xiang T Y. Analysis of utilization rate and reliability of axially compressed reinforced concrete columns strengthened by adhesive steel[J]. Building Structures, 2010, 40(5):26-28. (in Chinese)
- [9] 马士宾,刘月钊,汲港升,等.基于可靠度的简支梁体外预应力加固设计与优化方法[J].工业建筑,2022,52(10):168-175,145.  
Ma S B, Liu Y Z, Ji G S, et al. Reliability-based design and optimization of in-body prestressing reinforcement for simply supported beams[J]. Industrial Construction, 2022, 52(10):168-175,145. (in Chinese)
- [10] 周华强,段成晓,常立新,等.基于响应面法的既有桥梁加固后时变可靠指标分析[J].建筑结构,2010,40(增1):369-371.  
Zhou H Q, Duan C X, Chang L X, et al. Analysis of time-varying reliability indicators of existing bridges after strengthening based on response surface method[J]. Building Structures, 2010, 40(Sup1):369-371. (in Chinese)
- [11] Yuan B, Zheng H, Huang Y, et al. Reliability analysis of beams strengthening with augmented section[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(8):3278-3282.
- [12] Priestley M J N, Seible F, Chai Y H. Seismic retrofit of bridge columns using steel jackets[C]//Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: A A Balkema, 1992, 9: 5285-5290.
- [13] 侍刚,邵旭东,高立强,等.HRB400钢筋与超高性能混凝土粘结性能试验研究[J].桥梁建设,2021,51(6):61-67.  
Shi G, Shao X D, Gao L Q, et al. Experimental study on the bond performance of HRB400 reinforcement and ultra-high performance concrete [J]. Bridge Construction, 2021, 51(6):61-67. (in Chinese)
- [14] Cairns J. Bond and anchorage of embedded steel reinforcement in fib Model Code 2010[J]. Structural Concrete, 2015, 16(1):45-55.
- [15] 马福栋,邓明科,孙宏哲,等.变形钢筋/超高性能混凝土搭接黏结性能[J].复合材料学报,2021,38(11):3912-3924.  
Ma F D, Deng M K, Sun H Z, et al. Lap bonding performance of deformed reinforcement/ultra high performance concrete [J]. Journal of Composite Materials, 2021, 38(11):3912-3924. (in Chinese)
- [16] Metelli G, Cairns J, Plizzari G. The influence of percentage of bars lapped on performance of splices[J]. Materials and Structures, 2015, 48(9):2983-2996.
- [17] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [18] 杨帆,马高,Hwang Hyeon Jong.线性弯矩分布下的搭接钢筋应力计算方法试验研究[J].公路工程,2021,46(5):31-37,73.  
Yang F, Ma G, Hwang H J. Experimental study on stress calculation method of lap reinforcement under linear bending moment distribution[J]. Highway Engineering, 2021, 46(5):31-37,73. (in Chinese)
- [19] 建筑结构可靠性设计统一标准:GB 50068—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [20] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [21] 高小旺,魏琰,韦承基.现行抗震规范可靠度水平的校准[J].土木工程学报,1987,20(2):10-20.  
Gao X W, Wei L, Wei C J. Calibration of reliability level in current seismic code[J]. Journal of Civil Engineering, 1987, 20(2):10-20. (in Chinese)
- [22] 彭飞,薛伟辰.基于可靠度的GFRP筋混凝土梁抗弯承载力设计方法[J].土木工程学报,2018,51(5):60-67.  
Peng F, Xue W C. Design method of flexural capacity of GFRP reinforced concrete beams based on reliability [J]. Journal of Civil Engineering, 2018, 51(5):60-67. (in Chinese)
- [23] Lee C S, Han S W. Cyclic behaviour of lightly-reinforced concrete columns with short lap splices subjected to unidirectional and bidirectional loadings[J]. Engineering Structures, 2019, 189:373-384.
- [24] Rezansoff T, Zacaruk J A, Afseth J G. High cycle (fatigue) resistance of reinforced concrete beams with lap splices [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1993, 20(4):642-649.

- [25] 赵欣欣. 铁路桥梁常用材料抗力参数特征值分析[J]. 桥梁建设, 2018, 48(4): 33-38.  
Zhao X X. Analysis of characteristic values of commonly used material resistance parameters for railroad bridges [J]. Bridge Construction, 2018, 48(4): 33-38. (in Chinese)
- [26] 常乐, 王淑丽, 王紫轩. 钢筋强度标准值及其分项系数的校准研究[J]. 工程质量, 2012, 30(4): 61-64, 72.  
Chang L, Wang S L, Wang Z X. Study on the calibration of standard values of steel strength and its subfactors [J]. Engineering Quality, 2012, 30(4): 61-64, 72. (in Chinese)
- [27] 李国强, 黄宏伟, 吴迅, 等. 工程结构荷载与可靠度设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
Li G Q, Huang H W, Wu X, et al. Load and reliability of engineering structures design principles [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese)
- [28] 黄靛, 鲁懿虬, 徐紫鹏. 钢筋混凝土剪扭构件承载力可靠度分析[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 185-191.  
Huang L, Lu Y Q, Xu Z P. Reliability analysis of bearing capacity of reinforced concrete shear torsion members [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 185-191. (in Chinese)
- [29] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 79-80.  
Zhao G F, Jin W L, Gong J X. Structural reliability theory [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2000: 79-80. (in Chinese)
- [30] 冯军骁, 郑七振, 龙莉波, 等. UHPC材料连接的预制梁受弯性能试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 189-196.  
Feng J X, Zheng Q Z, Long L B, et al. Experimental study on flexural behavior of prefabricated beams connected by UHPC materials [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(2): 189-196. (in Chinese)
- [31] 彭超凡, 郑七振, 龙莉波, 等. 以UHPC材料连接的预制柱抗震性能试验研究[J]. 建筑施工, 2016, 38(12): 1711-1713.  
Peng C F, Zheng Q Z, Long L B, et al. By the UHPC material connection of precast column seismic performance experimental research [J]. Journal of Construction, 2016, 38(12): 1711-1713. (in Chinese)
- [32] 徐文靖, 邵晓东, 马焜, 等. 采用UHPC连接的预制拼装桥墩构造及试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(12): 105-116.  
Xu W J, Shao X D, Ma B, et al. Using prestressed assembly structure and experimental study on the piers of UHPC connections [J]. Journal of Civil Engineering, 2022, 55(12): 105-116. (in Chinese)
- [33] 刘康. 近表面植筋与UHPC复合加固RC柱抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.  
Liu K. Study on seismic performance of RC column reinforced with near-surface embedded bars and UHPC composite [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [34] Toutlemonde F, Resplendino J. Designing and building with UHPFRC [M]. London: Wiley-ISTE, 2010: 531-540.
- [35] Xu W, Ma B, Duan X, et al. Experimental investigation of seismic behavior of UHPC connection between precast columns and footings in bridges [J]. Engineering Structures, 2021, 239: 112344.
- [36] Wang Z, Wang J, Liu J, et al. Large-scale quasi-static testing of precast bridge column with pocket connections using noncontact lap-spliced bars and UHPC grout [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17(9): 5021-5044.
- [37] Geng J, Wang F, Liu C, et al. Parametric study on seismic performance of prefabricated bridge piers connected by ultra-high performance concrete grout [J]. Structural Concrete, 2022, 23(3): 1469-1491.

(本文编辑: 池营营)