

不锈钢筋混凝土梁受弯性能试验研究*

Experimental Study on the Flexural Performance of Stainless Steel Reinforced Concrete Beams

赵 晶¹, 李海云², 刘志坚³, 管忠正², 王为鑫³

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510000; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 3. 中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘 要: 对不锈钢筋混凝土 (HSS-RC) 梁、不锈钢筋超高性能混凝土 (HSS-UHPC) 梁进行抗弯性能试验研究, 得到不锈钢筋超高性能混凝土 (HSS-UHPC) 梁的受弯性能。结果表明: 不锈钢筋与 UHPC 共同工作时, 承载能力、抗裂性能均显著提高; 配筋率和截面积与试件承载能力呈正相关, 与裂缝宽度呈负相关; 平截面假定仍适用于 HSS-PC 梁与 HSS-UHPC 梁; GB 5010—2010《混凝土结构设计规范》中普通钢筋混凝土受弯承载力公式及裂缝宽度计算公式仍适用于 HSS-RC 梁; 考虑受拉区 UHPC 的抗拉性能, 提出了适用于 HSS-UHPC 梁的受弯承载力公式和裂缝宽度计算公式。为不锈钢筋混凝土梁的设计及工程应用提供试验依据与理论基础。

关键词: 不锈钢筋; 超高性能混凝土; 配筋率; 受弯承载力; 裂缝宽度

中图分类号: TU37

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0081-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.015

ZHAO Jing¹, LI Haiyun², LIU Zhijian³, GUAN Zhongzheng², WANG Weixin³

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. China Railway 14th Bureau Group Corporation Limited, Ji'nan 250101, China)

Abstract: Conducting bending performance tests on stainless steel reinforced concrete (HSS-RC) beams and stainless steel reinforced Ultra-High Performance Concrete (HSS-UHPC) beams has yielded the flexural behavior of HSS-UHPC beams. The results demonstrate that when stainless steel bars are used in conjunction with UHPC, there is a significant enhancement in both load-bearing capacity and crack resistance. The reinforcement ratio and cross-sectional area are positively correlated with the specimen's load-bearing capacity, while they are negatively correlated with crack width. The assumption of a flat cross-section remains valid for both HSS-RC and HSS-UHPC beams. The formulas for calculating the bending capacity and crack width of ordinary reinforced concrete in the "Code for Design of Concrete Structures" GB 5010-2010 are still applicable to HSS-RC beams. By considering the tensile properties of UHPC in the tensile zone, formulas for calculating the bending capacity and crack width of HSS-UHPC beams have been proposed. This study provides an experimental basis and theoretical foundation for

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (52308272)。

作者简介: 赵 晶 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 不锈钢筋混凝土力学性能研究。

通信作者: 刘志坚 (1986—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地下工程建设与管理。

收稿日期: 2024-05-07

建筑结构

the design and engineering application of stainless steel reinforced concrete beams.

Keywords: stainless steel reinforcing bars; ultra-high performance concrete; reinforcement ratio; bending capacity; crack width

0 引言

钢筋混凝土结构综合了钢筋和混凝土的优点，造价低，取材方便，是土木工程结构中最常用的形式之一。在钢筋混凝土结构应用于土木工程的170年间，因钢筋锈蚀引起的钢筋混凝土结构失效问题，已成为各国学者们关注的焦点^[1-2]。钢筋锈蚀的原因有自然电化学腐蚀、氯离子侵蚀等，而不锈钢筋中具有镍、铬、碳等元素，能在氧化介质中形成钝化膜，防止钢筋氧化^[3-4]。混凝土方面，由于普通混凝土在凝结时水泥石收缩、骨料下沉等原因，导致混凝土内部存在缺陷，而超高性能混凝土（Ultra-High Performance Concrete，UHPC）具有高强度、高韧性、高抗冲击性能等优点^[5-7]，能有效地提高梁受弯性能以及延性性能。

目前为止，国内外对不锈钢筋和 UHPC 的研究主要集中于材料，而对不锈钢筋 - UHPC 构件的研究相对较少。常跃等^[8]对 UHPC 加固的钢筋混凝土梁进行受弯性能试验研究，结果表明，UHPC 加固厚度会显著提高钢筋混凝土梁的抗弯承载力；Rabi 等^[9]研究发现，采用不锈钢筋的构件可以减少由于钢筋腐蚀和混凝土碳化带来的损害，进而提高混凝土构件的预期寿命；高迪等^[10]对比研究了不锈钢筋梁和普通钢筋梁的受弯性能，研究表明，相同配筋率下，不锈钢筋梁受弯承载力与普通钢筋梁相当；赵毅等^[11]研究不锈钢筋对受弯构件裂缝宽度的影响，建议将不锈钢筋梁的最大裂缝宽度限值调整为 0.4 mm；张国学等^[12]对不锈钢筋梁抗震性能进行了试验研究，发现不锈钢筋构件具有更加优越的延性性能；王照耀等^[13]对 UHPC 梁进行了受剪性能试验，发现钢纤维接桥作用可以显著提高 UHPC 梁受剪承载力并限制裂缝发展；徐明雪等^[14]通过 12 根 UHPC 梁试验，提出了 UHPC 梁截面开裂弯矩计算式；徐海滨等^[15]通过 8 根 T 型 UHPC 梁受弯试验，发现预应力对开裂荷载影响明显，并给出了 UHPC 梁开裂弯矩和最大裂缝宽度的建议公式；杨剑等^[16]通过 9 根 T 型简支梁试验，得到梁截面塑性影响因数为 1.53，并据此

建立了 UHPC 受弯构件开裂弯矩计算公式和极限承载力公式。

综上所述，学者们对不锈钢筋混凝土梁和钢筋 UHPC 梁开展了大量的研究，但对于不锈钢筋 UHPC 受弯构件的力学性能却鲜有研究，基于此，对不锈钢筋和 UHPC 结合组成的受弯构件进行受弯性能研究，提出适用于不锈钢筋 - UHPC 梁的受弯承载力及裂缝宽度计算公式，为构件设计理论及工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验考虑钢筋直径、混凝土强度、截面尺寸等参数对梁受弯性能的影响，设计制作了 6 根不锈钢筋混凝土（HSS-RC）梁、4 根不锈钢筋 UHPC（HSS-UHPC）梁。试件长 1 500 mm，高 200 mm，跨高比 7.5，具体参数见表 1。梁跨中 400 mm 为纯弯段，纯弯段内不设箍筋，纯弯段到支座间的箍筋间距为 100 mm，混凝土保护层厚度为 25 mm，试件具体构造如图 1 所示。

表 1 试件分组及设计参数					
Table 1 Sample grouping and design parameters					
试件编号	钢筋直径 /mm	混凝土 强度	配筋率/%	配箍率	截面尺寸 /mm
HSS-1	10	C30	0.53	φ8@100	150×200
HSS-2	16	C30	1.34	φ12@100	150×200
HSS-3	12	C30	0.75	φ12@100	150×200
HSS-4	16	C40	1.34	φ12@100	150×200
HSS-5	16	C50	1.34	φ12@100	150×200
HSS-6	16	C30	1.01	φ12@100	200×200
HC-HSS-1	10	UHPC	0.53	φ8@100	150×200
HC-HSS-2	16	UHPC	1.34	φ12@100	150×200
HC-HSS-3	12	UHPC	0.75	φ12@100	150×200
HC-HSS-4	16	UHPC	1.01	φ12@100	200×200

注：HC 为超高性能混凝土；HSS 为不锈钢筋。

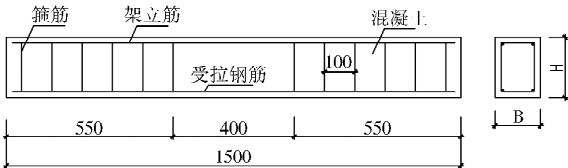


图 1 混凝土梁构造图

Fig. 1 Structural drawing of concrete beam

1.2 材料性能

为获得不同强度混凝土的抗压强度，与试验梁同时浇筑混凝土立方体试块，尺寸为100×100×100 mm。采用微机屏显式液压压力试验机进行加载，测得混凝土抗压强度见表2。

表2 混凝土立方体抗压强度			
Table 2 Cube compressive strength of concrete /MPa			
C30	C40	C50	UHPC
29.6	44.1	50.6	120.2

根据GB/T 228.1—2021《金属材料试验拉伸第1部分：室温试验方法》^[17]对不锈钢筋进行取样，采用SHT4106-G微机控制电液伺服万能试验机，以10 MPa/s的加载速度测定不锈钢筋的力学性能，见表3。

表3 钢筋力学性能				
Table 3 Mechanical properties of steel bars				
钢筋直径 /mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	屈强比	弹性模量 E /MPa
10	611	836	0.73	190 423
12	688	835	0.82	187 050
16	704	862	0.82	186 948

1.3 测点布置及加载方式

为测定加载过程中受拉钢筋及混凝土的应变分布情况，每根受拉钢筋中点分别粘贴1个应变片，梁跨中前后面各粘贴3个应变片，梁跨中顶面和底面各粘贴2个应变片。在梁底部跨中以及加载点正下方安装3个位移计用于测量梁的竖向位移；在距离梁端150 mm的支座正上方安放2个位移计，用于测量支座处的竖向位移。钢筋应变片粘贴位置如图2所示。



图2 钢筋应变片粘贴位置
Fig. 2 Location of steel strain gauge pasting

为保证试件中部加载点处荷载等大、同步，在试件上方布置分配梁，通过50 t的手摇千斤顶对分配梁跨中施加集中荷载，并通过传感器测定。加载过程中，用精度为0.02 mm的刻度放大镜观测裂缝的发展，其余数据通过电脑自动采集。试验梁加载装置如图3所示。

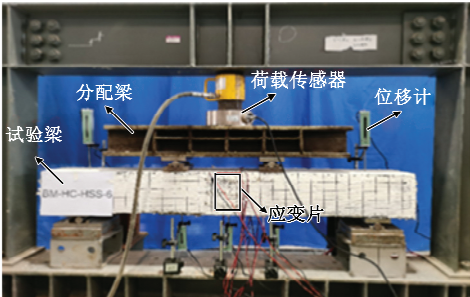
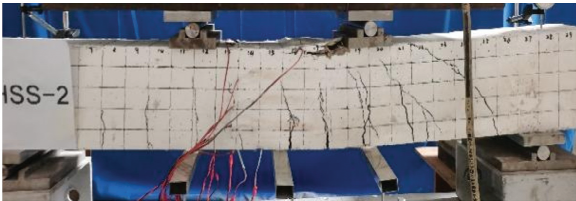


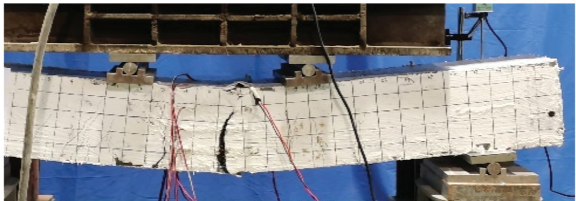
图3 试件加载装置
Fig. 3 Specimen loading device

2 试验分析

HSS-RC梁破坏时梁底产生大量受拉裂缝，随着荷载的增大，挠度不断增大，直至梁顶混凝土压溃破坏；与HSS-RC梁相比，HSS-UHPC试件最终破坏时只在跨中出现1条主裂缝以及少量细小裂缝，且结构基本完整。HSS-RC梁、HSS-UHPC梁的典型破坏形态及裂缝分布情况如图4所示。



(a) HSS-RC 梁



(b) HSS-UHPC 梁

图4 梁破坏形态及裂缝分布情况
Fig. 4 Beam failure mode and crack distribution

2.1 承载力对比分析

表4为HSS-RC梁与HSS-UHPC梁3种配筋率下受弯承载力实测值。相同配筋率下，HSS-UHPC梁受弯承载力明显高于HSS-RC梁，且随着配筋率增加，不锈钢筋与UHPC结合后二者的高抗拉性能得到了充分的发挥，承载力可提高至HSS-RC梁的2.06倍。

建筑结构

表 4 承载力实测值对比表

Table 4 Comparison of measured bearing capacity values				
编号	M_u / (kN · m)	编号	M_t / (kN · m)	M_t/M_u
HSS-1	18.43	HC-HSS-1	27.9	1.51
HSS-2	28.22	HC-HSS-2	58.26	2.06
HSS-3	22.80	HC-HSS-3	41.88	1.83

2.2 裂缝发展与对比分析

梁的裂缝发展可划分为 4 个阶段：第一阶段为开裂前阶段；第二阶段为初裂阶段；第三阶段为裂缝发展阶段；第四阶段为破坏阶段。

试验过程中，所有试件均从梁底部开始出现裂缝，并且随着荷载的增加，梁底裂缝数量逐渐增多，裂缝宽度逐渐增大。与 HSS-RC 梁相比，在加载前期，HSS-UHPC 梁裂缝发展缓慢，由于钢纤维的存在，梁受拉区开裂后，受拉区混凝土依旧与钢筋共同工作，表现出比 HSS-RC 梁更高的承载力；随着加载的进行，HSS-UHPC 梁的裂缝向上延伸，在达到梁高的 3/5 后便基本稳定，不会再有较大幅度的发展，且裂缝较多集中在两个加载点之间；试验加载后期，HSS-RC 梁受压区出现横向裂缝，进而受压区混凝土被压碎，HSS-UHPC 梁则在跨中出现 1 道主裂缝，其余裂缝在此阶段基本稳定；继续加载，试件挠度增长变快，HSS-UHPC 梁横向裂缝增多，并开始出现小部分剥落和凸起。

裂缝宽度对比数据见表 5，由于 HSS-UHPC 梁中钢纤维的桥接作用，使得裂缝宽度明显小于 HSS-RC 梁。

表 5 裂缝宽度实测值对比表

Table 5 Comparison of calculated crack width values				
编号	ω_{maxj}/mm	编号	ω_{maxs}/mm	$\omega_{maxj}/\omega_{maxs}$
HSS-1	0.35	HC-HSS-1	0.14	2.50
HSS-2	0.40	HC-HSS-2	0.20	2.00
HSS-3	0.39	HC-HSS-3	0.20	1.95

3 影响因素分析

3.1 配筋率的影响

图 5 为不同配筋率试验梁的荷载-挠度曲线。随着配筋率增大，HSS-RC 梁和 HSS-UHPC 梁抗弯承载力均有所提高，其中 HSS-UHPC 梁提高的幅度更加明显，由于 UHPC 中钢纤维的存在，HSS-UHPC 梁受拉区 UHPC 开裂后仍承担一部分拉力，使得其具有更高的承载力和更好的延性性能。

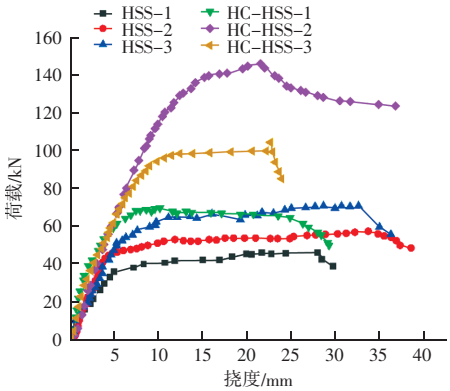


图 5 不同配筋率的影响
Fig. 5 The influence of reinforcement ratios

3.2 混凝土强度的影响

图 6 为 4 个强度混凝土梁的荷载-挠度曲线。两种试验梁试件受弯承载力均随混凝土强度的提高而提高。与 HSS-RC 梁相比，HSS-UHPC 梁在弹性阶段的斜率更大；随着加载的进行，荷载增长速度较快，且在弹性阶段持续时间更长；HSS-UHPC 梁由弹性阶段转变为弹塑性阶段时，试件的挠度和荷载均大于 HSS-RC 梁，表现出更高的承载能力。

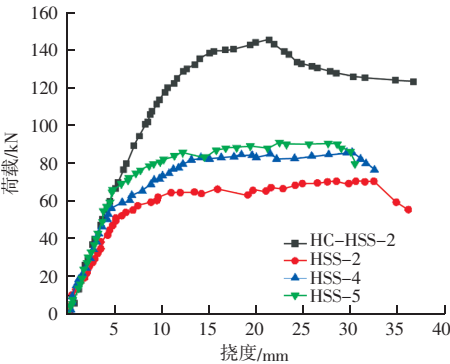


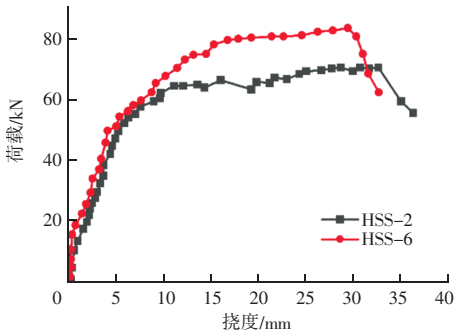
图 6 混凝土强度等级的影响
Fig. 6 The influence of concrete strength

3.3 截面尺寸的影响

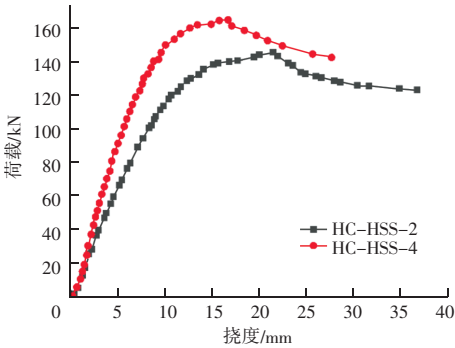
图 7 为不同截面尺寸对两种试验梁受弯性能的影响。当 HSS-RC 梁截面宽度由 150 mm 增加到 200 mm 时，极限荷载增加了约 18%，挠度减少了约 6%。当 HSS-UHPC 梁截面宽度增加后，极限荷载增加了约 21%，挠度减少了约 27%。结果表明，随着截面尺寸的增加，可显著提高受弯构件的受弯承载力。

4 试验梁承载力及裂缝宽度分析

图 8 为 HSS-RC 梁和 HSS-UHPC 梁应变随截面高度的变化情况。沿截面高度，两种试验梁应变呈线



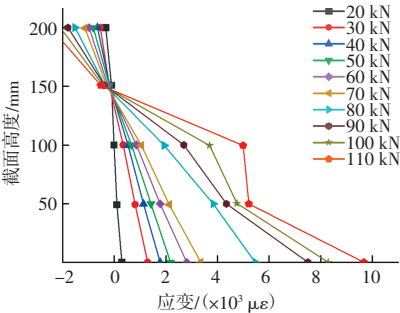
(a) 普通混凝土



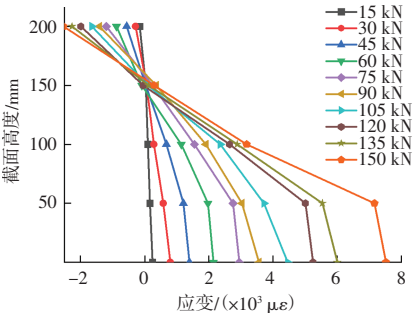
(b) UHPC

图7 截面尺寸的影响

Fig.7 The influence of cross-sectional dimensions



(a) HSS-1



(b) HC-HSS-1

图8 试验构件应变分布

Fig.8 Strain distribution of test components

性变化，基本符合平截面假定，说明平截面假定同样适用于 HSS- RC 梁和 HSS- UHPC 梁。并且在相同荷载条件下，HSS- UHPC 梁应变明显小于 HSS- RC 梁。

4.1 受弯承载力计算表达式

HSS- RC 试件中不锈钢筋具有与普通钢筋相近的力学性能，仍采用 GB 5010—2010《混凝土结构设计规范》^[18]（下文中简称“规范”）中梁的受弯承载力公式对其承载力进行计算，公式为：

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s \tag{1}$$

$$M = \alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2) \tag{2}$$

式中： α_1 取 1； f_c 为实测混凝土强度； b 为梁截面宽度； x 为受压区高度； f_y 为实测钢筋强度； A_s 为受拉区纵向受力钢筋的截面面积； h_0 为截面有效高度。

由于 UHPC 具有较高的抗拉性能，考虑 HSS- UHPC 试件受拉区混凝土对承载力的贡献，参考现有规范中普通混凝土受弯承载力公式以及 UHPC 本构关系，得到 HSS- UHPC 梁的受弯承载力表达式^[19]：

$$\begin{cases} M = \frac{1}{18} f_c b x_{cl}^2 (9 - 2k) + f_y A_s (h_0 - x_{cl}) + \\ \quad 0.53 f_t b (h - x_{cl})^2 \\ x_{cl} = \frac{9 (f_y A_s + f_t b h)}{12 f_t b + 2 f_c b (4 - k)} \end{cases} \tag{3}$$

式中： x_{cl} 为混凝土受压区高度； $k = 0.4947 \ln f_{cu,k} - 1.5771$ 。

理论计算值与试验值的对比情况见表 6。HSS- RC 梁与 HSS- UHPC 梁受弯承载力计算值与实测值吻合良好，且与 HSS- RC 梁相比，实测值与计算值比值更小，结果更精确。

表6 承载力理论计算值与试验值对比

Table 6 Comparison of the theoretical calculated value of bearing capacity with the experimental value			
编号	实测值 / (kN · m)	计算值 / (kN · m)	实测值 / 计算值
HSS- 1	18. 43	16. 27	1. 13
HSS- 2	28. 22	25. 19	1. 12
HSS- 3	22. 80	20. 24	1. 12
HSS- 4	34. 31	29. 88	1. 14
HSS- 5	36. 27	32. 30	1. 12
HSS- 6	33. 44	29. 86	1. 12
HC- HSS- 1	27. 90	30. 94	0. 90
HC- HSS- 2	58. 26	54. 37	1. 07
HC- HSS- 3	41. 88	38. 71	1. 08
HC- HSS- 4	66. 16	60. 84	1. 08

建筑结构

4.2 试验梁裂缝分析对比

与受弯承载力计算相同，HSS- RC 梁的裂缝计算采用《规范》建议式：

$$\omega_{\max} = \alpha_{\text{cr}}\psi \frac{\sigma_{\text{sq}}}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}} \right) \tag{4}$$

式中： α_{cr} 为构件受力特征系数； ψ 为钢筋应变不均匀系数； σ_{sq} 为裂缝截面钢筋应力； E_s 为钢筋弹性模量； c_s 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离； d_{eq} 为受拉区纵向钢筋的等效直径； ρ_{te} 为截面有效配筋率。

由于 UHPC 中钢纤维良好的抗拉性能，使得 HSS- UHPC 梁具有比 HSS- RC 梁更加优越的抗裂性能，无法直接使用《规范》给出的裂缝宽度计算公式计算 HSS- UHPC 梁的裂缝宽度，需考虑裂缝发展时受拉区 UHPC 对裂缝发展的阻碍作用。

基于普通钢筋混凝土构件最大裂缝宽度计算公式，引入修正系数 k 对其进行修正，获得适用于 HSS- UHPC 梁的裂缝宽度计算表达式^[19]：

$$\omega_{\max} = k_1\alpha_{\text{cr}}\psi \frac{\sigma_{\text{sq}}}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}} \right) \tag{5}$$

式中： k_1 为修正系数。根据试验所得数据对最大裂缝宽度计算式进行回归分析，可得 k 取值范围为 0.26~0.57。建议 k 取平均值 0.36。

试件计算宽度与实测宽度对比情况见表 7。所有受弯构件计算宽度与实测宽度均吻合良好，本文提出的裂缝宽度公式可用于预测 HSS- UHPC 梁的裂缝宽度。

表 7 裂缝宽度理论计算值与试验值对比

Table 7 Comparison of the theoretical calculated value of crack width with the experimental value

编号	实测值/mm	计算值/mm	实测值/计算值
HSS-1	0.35	0.36	0.97
HSS-2	0.40	0.39	1.02
HSS-3	0.39	0.41	0.95
HSS-4	0.37	0.38	0.97
HSS-5	0.35	0.37	0.95
HSS-6	0.33	0.36	0.92
HC- HSS-1	0.14	0.18	0.78
HC- HSS-2	0.20	0.19	1.05
HC- HSS-3	0.20	0.22	0.90
HC- HSS-4	0.22	0.23	0.95

5 结论

通过对不锈钢钢筋混凝土梁（HSS- RC）、不锈钢筋超高性能混凝土（HSS- UHPC）梁的受弯性能，对两类受弯构件的受弯性能、裂缝发展、破坏模式等进行了对比分析，主要得到以下结论：

（1）相较于 HSS- RC 梁，HSS- UHPC 梁出现裂缝时间较晚，梁破坏前仅有 1 条主裂缝，除主裂缝外，其余裂缝的发展程度都小于 HSS- RC 梁。

（2）提高梁的配筋率和截面积均可提高梁受弯承载能力，且 HSS- UHPC 梁提高幅度更加明显；构件截面应变基本呈线性分布，平截面假定仍适用于 HSS- RC 梁与 HSS- UHPC 梁。

（3）《规范》中受弯构件承载力计算公式及裂缝宽度计算公式对于 HSS- RC 梁仍然适用；《规范》中受弯构件承载力计算公式及裂缝宽度计算公式对于 HSS- UHPC 梁不再适用，需考虑受拉区 UHPC 的抗拉性能。

（4）HSS- UHPC 梁中不锈钢筋与 UHPC 二者优势互补，使构件表现出更高的受弯承载能力和更好的抗裂性能。

参 考 文 献

[1] 曹文凯, 郑海兵, 王艳丽, 等. 海水拌和混凝土中不锈钢筋早期腐蚀电化学行为研究 [J]. 表面技术, 2024, 53 (6): 80-89.

[2] 王维忠. 对粉煤灰混凝土的碳化、钢筋锈蚀的调查研究 [J]. 粉煤灰, 2000 (2): 32-34.

[3] 李清富, 郭威, 匡一航. 基于连续强度法的不锈钢筋混凝土受弯构件承载力分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30 (3): 554-565.

[4] 李承昌, 穆明浩, 聂昌信, 等. 不锈钢筋的力学及工艺性能 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (12): 1-5.

[5] BAHMANI H, MOSTOFINEJAD D. Microstructure of ultra- high- performance concrete (UHPC) - a review study [J]. Journal of Building Engineering, 2022 (50): 104-118.

[6] 王会杰, 李红卫, 郝梅, 等. 超高性能混凝土研究与应用 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (增刊1): 672-674.

[7] YANG I H, JOH C, KIM B S. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending [J]. Engineering structures, 2010, 32 (11): 3478-3487.

[8] 常跃, 黄俊旗, 种迅, 等. 超高性能混凝土加固钢筋混凝土梁受弯性能研究 [J]. 振动与冲击, 2024, (下转第 107 页)

刚度折减和加载龄期。其中敏感性最大参数自重，当其增加 20% 时，下挠变化幅度达 55.2%，且与预应力损失相当。对于更大的不利扰动，在实际工程中难以复现，且不符合实际施工标准，不再过多讨论。综上可以看出，在有限扰动范围内，自重对于主梁跨中下挠影响最为明显，其次为预应力损失、刚度折减以及加载龄期。

3 结论

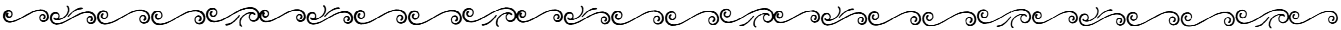
(1) 混凝土的超重增幅、初始加载龄期过短、成桥时间的增加、预应力损失以及刚度折减均会使桥梁长期下挠值增加，对线性产生不利影响。

(2) 在有限扰动范围内，自重对于主梁跨中下挠影响最为明显，其次为预应力损失、刚度折减以及加载龄期，为有效预防连续刚构桥长期下挠，可根据各参数敏感性程度采取相应控制措施。

参 考 文 献

[1] 贺秋敏. 某预应力混凝土连续桥设计研究 [J]. 科学技术创新, 2023 (8): 185–188.
[2] 韩朝辉. 预应力混凝土连续刚构桥长期下挠影响因素分析

[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
[3] 黄炜, 余健, 李晓猛, 等. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥跨中下挠原因分析 [J]. 科技和产业, 2023, 23 (4): 254–260.
[4] 黄荣贵. 某预应力混凝土连续刚构桥成桥线形影响因素分析 [J]. 西部交通科技, 2022 (12): 169–171.
[5] 林志平, 曾俊铨, 夏江泉, 等. 大跨径连续刚构桥长期下挠设计对策参数化分析 [J]. 福建交通科技, 2020 (2): 76–78, 98.
[6] 林兆新. 大跨径连续刚构桥长期下挠的施工影响因素参数化分析 [J]. 福建交通科技, 2019 (5): 96–98, 119.
[7] 李进权. 连续刚构桥施工 BIM 技术应用 [J]. 交通建设与管理, 2023 (6): 94–96.
[8] 陈瑛, 熊志朋. 连续刚构桥施工监测及参数敏感性分析 [J]. 交通科技, 2023 (3): 80–85.
[9] 陈瑛, 熊志朋. 连续刚构桥施工监测及参数敏感性分析 [J]. 交通科技, 2023 (3): 80–85.
[10] 黄安民. 连续刚构跨中下挠影响的研究 [J]. 交通世界, 2024 (Z2): 281–283.
[11] 秦军, 苗建宝, 张小亮. PC 连续刚构桥跨中长期下挠优化 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2020, 16 (10): 182–185.
[12] 李华, 王谦. 预应力损失及合龙措施对大跨径 PC 连续刚构桥跨中下挠的影响 [J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45 (4): 101–104.



(上接第 86 页)

43 (11): 288–296.
[9] RABI M, SHAMASS R, CASHELL K A. Experimental investigation on the flexural behaviour of stainless steel reinforced concrete beams [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2022, 19 (12): 1–13.
[10] 高迪, 张辉, 王晓峰, 等. 配置高强不锈钢筋混凝土梁受弯承载力试验研究 [J]. 建筑科学, 2018, 34 (5): 40–43.
[11] 赵毅, 王晓峰, 赵勇. 高强不锈钢筋混凝土梁短期受弯裂缝宽度和刚度计算方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (增刊 1): 268–276.
[12] 张国学, 赵峰, 张志浩, 等. 不锈钢筋混凝土梁抗震性能试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31 (5): 35–40.
[13] 王照耀, 邵珠山, 梁兴文, 等. 钢筋超高性能混凝土梁细观多机制抗剪模型研究 [J/OL]. 建筑结构学报, 1–14 [2024–09–25]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2022.0754>.
[14] 徐明雪, 梁兴文, 于婧, 等. UHPC 梁短期刚度理论与试验研究 [J]. 工程力学, 2019, 36 (1): 146–154, 164.
[15] 徐海滨, 邓宗才. UHPC 梁开裂弯矩和裂缝试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46 (4): 87–92.
[16] 杨剑, 方志. 超高性能混凝土梁正截面承载力 [J]. 中国铁道科学, 2009, 30 (20): 23–30.
[17] 中国钢铁工业协会. 金属材料拉伸试验第 1 部分室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
[18] 中国建筑科学研究院. 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.
[19] 李海云, 韩金良, 李然, 等. 高强不锈钢筋 UHPC 梁受弯性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (1): 93–100.