

NC–UHPC 组合梁抗冲击性能的数值研究

伍 敏^{1,2)}, 黄于倩¹⁾, 潘仁胜¹⁾, 金 浏^{2)✉}, 杜修力²⁾

1) 长沙理工大学桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 长沙 410114 2) 北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124
✉通信作者, E-mail: kinglew2007@163.com

摘 要 超高性能混凝土 (UHPC) 材料已成为极具前景的高性能材料, 并在冲击和爆炸等防护工程领域中取得了良好的效果. 对于普通钢筋混凝土 (NC) 梁在受到冲击荷载时较易发生局部冲剪破坏, 而纯 UHPC 梁虽可改善其冲击性能, 但高昂的造价限制了其进一步的应用. 为了实现结构抗冲击性能和经济的平衡, 提出 UHPC 局部替换和包裹的方案改善钢筋混凝土梁的抗冲击性能. 本文设计了 NC 梁、UHPC 梁和 NC–UHPC 组合梁等不同的研究工况, 然后对比分析各个试件的抗冲击性能. 结果表明: 相比普通钢筋混凝土梁, UHPC 局部替换方案可以有效的避免梁的局部冲剪破坏, 而 UHPC 包裹在冲击荷载下梁的破坏模式由冲剪破坏转变为弯曲破坏, 两种方案均可有效的减少梁跨中的峰值位移和残余位移; UHPC 局部替换相较于包裹方案, 梁的跨中峰值位移和残余位移较小, 且具有更高的跨中承载能力, 在实际过程中建议 UHPC 局部替换长度取大于 2 倍梁高以避免局部冲剪破坏.

关键词 超高性能混凝土; 普通钢筋混凝土; 组合梁; 冲击荷载; 冲剪破坏; 弯曲破坏
分类号 TU375; TU312

Numerical study on impact resistance of NC–UHPC composite beam

WU Min^{1,2)}, HUANG Yuqian¹⁾, PAN Rensheng¹⁾, JIN Liu^{2)✉}, DU Xiuli²⁾

1) Key Laboratory of Safety Control of Bridge Engineering of Ministry of Education, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China
2) Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China
✉Corresponding author, E-mail: kinglew2007@163.com

ABSTRACT Ultrahigh-performance concrete (UHPC) has become the most promising high-performance material, and has achieved excellent application in the field of impact and explosion protection engineering. Normal reinforced concrete (NC) beams subjected to impact load are prone to local punching shear failure. However, although the impact performance can be improved using UHPC beams, their application is limited by high costs. To achieve impact resistance at a lower cost, this work proposes a design scheme for locally replacing and wrapping NC beams with UHPC, with the aim of improving the impact resistance of NC beams. In this study, differing research conditions were employed (NC, UHPC, and NC–UHPC composite beams), and the impact resistance of specimens was compared and analyzed. Numerical models of NC and UHPC beams under impact loads were first established to verify the reliability of the modeling method, which is contact method, load application, initial velocity, boundary conditions, etc. The NC, UHPC, and NC–UHPC composite beam models were then established, and the impact performances of different NC–UHPC beam combinations were analyzed. The results revealed that compared with NC beams, the UHPC local replacement scheme effectively avoided local punching shear failure of beams. Under impact load, bending and shear cracks occurred on both sides, and the damage degree on both sides decreased with the increase of the local replacement length. For the UHPC wrapping, the failure mode of the beam changed from

punching shear failure to bending failure. With an increase in UHPC thickness, the damage degree of the beam span increased, and it gradually reached that of the pure UHPC beam. Furthermore, both schemes effectively reduced peak displacement and residual displacement in the mid-span. Compared with the UHPC wrapping scheme, the peak displacement and residual displacement in the mid-span of the UHPC local replacement beam were reduced, and the mid-span bearing capacity was improved. Thus, we recommend that a local replacement length of more than twice the beam height should be selected to avoid the occurrence of local punching shear failure.

KEY WORDS ultrahigh-performance concrete; normal reinforced concrete; composite beam; impact load; punching shear; bending failure

钢筋混凝土结构在服役期间可能会承受各种横向冲击荷载,如车辆碰撞、落石冲击和浮冰冲击等,造成大量的人员伤亡和经济损失^[1-2]。目前大多数工程仍然采用普通混凝土(NC)导致结构在冲击荷载下极易发生脆性破坏,甚至导致结构整体坍塌。相比普通混凝土,超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete, UHPC)材料具有高强度、高韧性和高拉伸断裂能等优点,使结构具有更好的抗冲击性能,并逐渐成为极具前景的高性能材料^[3-4]。UHPC 具有较低的水胶比,极易形成非常致密的微观结构^[5],并且由于钢纤维的掺入,UHPC 的抗拉强度显著提高^[6-7]。为了评估 UHPC 结构在冲击荷载作用下的力学性能,学者们开展了一系列的研究,主要包括纯 UHPC 构件和 UHPC 的组合构件。

研究者们首先对纯 UHPC 构件的抗冲击性能进行了相关研究。Fujikake 等^[8]对纵向配筋率为 2.6% 简支 I 形截面 UHPC 梁进行落锤冲击试验,试验结果显示 UHPC 梁底部仅出现了部分弯曲裂缝。Yoo 等^[9-10]对不同纵向配筋率和钢纤维类型的固定支撑矩形截面 UHPC 梁进行落锤试验,结果表明提高配筋率和钢纤维可以有效地提高 UHPC 梁的抗冲击性能。Wei 等^[11]对 UHPC 和普通钢筋混凝土柱进行了落锤冲击试验,研究结果表明方形和圆形钢筋混凝土柱均为脆性剪切破坏,并且在冲击位置的大部分混凝土发生碎裂,而方形和圆形 UHPC 柱在冲击荷载下仅出现轻微的弯曲损伤。此外,Wei 等^[12]还研究了在冲击荷载下钢纤维质量分数为 1.5% 的 UHPC 空心构件和钢丝网增强构件,结果表明所有 UHPC 试件均为弯曲破坏,损伤最小。Jia 等^[13]对 11 个 UHPC 梁和两个普通钢筋混凝土梁进行了落锤冲击试验,研究结果表明 UHPC 构件具有出色的抗冲击性能。UHPC 构件在冲击荷载下表现出良好的动态性能。然而,较高的材料成本和缺乏设计指南阻碍了 UHPC 在民用建筑中的进一步推广与应用^[14-16]。因此, UHPC 材料对结构进行改造和加固是行之有效的方法。

UHPC 的改造和加固技术最早起源于北美和瑞士^[17-18]。高强度纤维的添加将改善构件的弯曲和剪切性能,从而提高其抗冲击性。Fan 等^[19]对采用不同组合方案的混凝土柱进行了对比试验,指出具有两端超高性能纤维增强混凝土(Ultra-high performance fiber reinforced concrete, UHPFRC)夹套的加固柱表现出优异的性能;当在接触区添加 UHPFRC 护套时,冲击强度可以提高,但冲击力会显著增大。Lee 等^[20]研究了使用 UHPFRC 护套进行改造的结构抗冲击性能,将 UHPFRC 护套与抗震设计结合使用,可以很好地控制位移,提高冲击荷载下的承载能力。Wu 等^[21]和 Wang 等^[22-23]分别对 UHPC 填充钢管(UHPC-FST)和双层钢管(UHPC-FDST)进行了一系列落锤试验,结果表明 UHPC 填充有效地限制了钢管的压痕和变形,冲击能量和外钢管的厚度比内钢管的厚度和轴向力对横向冲击行为的影响更大。Wei 等^[24]为了提高钢筋混凝土构件的抗冲击性能,提出了三种基于 UHPC 的加固设计方法。通过落锤冲击试验对比研究了钢筋混凝土梁和 UHPC 加固钢筋混凝土的动力响应和破坏模式,结果表明在冲击过程的早期阶段, UHPC 层可以吸收一部分冲击能量,这有效地抑制了剪切裂纹发展,并增强了抗冲击性能。综上所述,采用 UHPC 材料进行结构的改造和加固,有效的增强了构件的抗冲击能力。

为了改善钢筋混凝土梁的抗冲击性能,本文提出采用 UHPC 局部替换和整体包裹的方法。通过研究 NC 梁、UHPC 梁和 NC-UHPC 组合梁在冲击荷载下的破坏模式、冲击力、位移响应、内力和耗能等动态性能,并研究 UHPC 局部替换长度和 UHPC 包裹厚度等参数的影响机制,为其设计和应用提供参考。

1 数值模型验证及拓展

为了确保本文所采用有限元建模方法的正确性和合理性,分别建立了 NC 梁和 UHPC 梁在冲击荷载下的数值模型。通过与相应试验结果进行对

比, 确定材料属性、接触方法、网格尺寸和荷载施加方法等的合理性, 为建立在冲击荷载下 NC-UHPC 组合梁数值模型奠定基础.

1.1 数值模型验证

1.1.1 NC 梁模型验证

本文以 Pham 等^[25]开展的落锤试验为验证模型, 其具体尺寸及配筋如图 1 所示. 梁的纵向钢筋和箍筋的直径都采用 10 mm, 箍筋间距为 75 mm. 梁的截面尺寸为 150 mm × 250 mm, 总长度为 2200 mm, 净跨为 1900 mm. 梁的端部采用由钢板和滚轮组成的简支边界. 落锤的质量为 203.5 kg, 冲击速度为 6.26 m·s⁻¹.

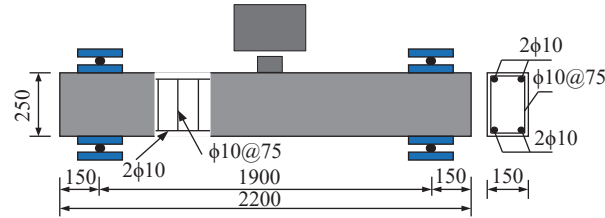


图 1 Beam2 尺寸及配筋 (单位:毫米)
Fig.1 Specific size and reinforcement of Beam2 (unit: mm)

冲击荷载下普通钢筋混凝土梁的具体建模过程详见文献 [26], 本文作者已对材料模型、接触算法、应变率效应和加载方法等进行了详细的报道. 由于网格尺寸敏感性的影响, 也分别对钢筋混凝土梁的网格尺寸为 5、10 和 20 mm 的工况进行了分析, 最终确定有限元模型的网格尺寸为 5 mm. 在冲击荷载下钢筋混凝土梁的数值模型与试验的结果如图 2 和 3 所示.

从图 2 可知, 试验和数值模型中都形成了明显的临界剪切裂缝, 跨中有大量的弯曲裂缝, 并由于试件的反弹形成了负弯矩裂缝. 从图 3 可知, 试验和模拟的最大冲击力分别为 1346 和 1384 kN, 两

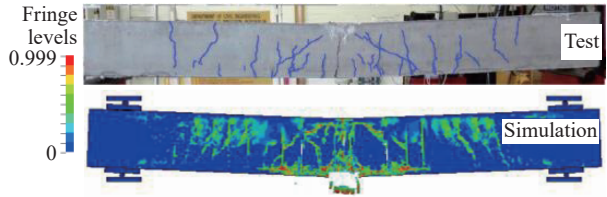


图 2 Beam2 试验与数值破坏模式
Fig.2 Failure modes of Beam2 in the test and simulation

者之间的差异为 2.8%; 试验和数值模型的最大峰值位移为 46.5 和 44.6 mm, 二者相差为 4%. 因此, 数值模型良好的模拟了在冲击荷载下 NC 梁的破坏模式、冲击力和峰值位移, 有效性得到了较好的验证.

1.1.2 UHPC 梁模型验证

本文以 Jia 等^[13]开展的 UHPC 梁落锤冲击试验作为验证模型, 其详细构造尺寸及配筋详见图 4. UHPC 梁的长度为 2200 mm, 净跨为 1800 mm, 截面尺寸采用 300 mm × 300 mm. 试件的纵向钢筋和箍筋的直径分别为 22 和 6 mm, 箍筋的间距为 150 mm. UHPC 梁的一侧采用固定边界条件, 另一侧采用滚轴支撑, 以便施加竖向轴向荷载. 以 U-3-AFO(参考文献中定义的具体试件名称) 为具体的参照工况, 落锤的质量为 850 kg, 冲击速度为 7.67 m·s⁻¹.

本文采用 *MAT-159(CSCM) 表示 UHPC 的本构模型, 该模型可以有效的预测钢筋混凝土在侧向冲击作用下的动力响应^[13,25-26]. 该模型包含两种参数输入方法, 分别是自动生成和全参数输入. 对于自动生成参数的方法, 仅适用于强度范围为 28 ~ 58 MPa 的普通混凝土. 而输入 45 个参数确定 CSCM 模型的方法, 已被广泛应用于 UHPC 材料本构模型的表征^[8-11,19,21-23]. 本文采用 Jia 等^[13]提供的关于 UHPC 材料的参数, 其主要参数如表 1 所示.

纵向钢筋和箍筋采用 *MAT_024 本构模型表

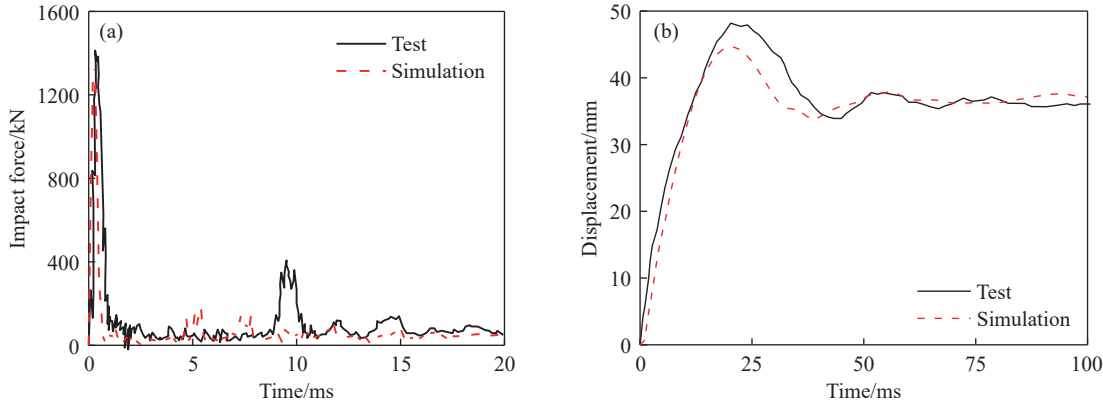


图 3 Beam2 试验与数值模型的冲击力和跨中位移. (a) 冲击力; (b) 位移
Fig.3 Impact force and mid-span displacement of Beam2 in the test and simulation: (a) impact force; (b) displacement

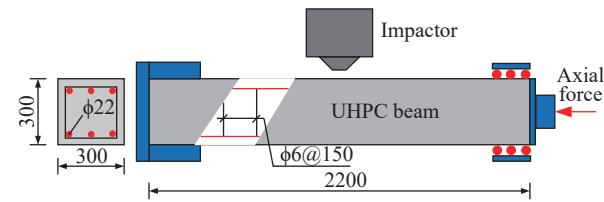


图 4 UHPC 梁尺寸及配筋 (单位:毫米)

Fig.4 Specific size and reinforcement of the UHPC Beam (unit: mm)

达, 即 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. 根据文献 [13] 可知, 纵向钢筋的屈服强度和极限强度分别为 368 和 456.6 MPa, 箍筋为 420.9 和 530 MPa. 为了提高计算效率, 本文不考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移, 即采用共节点方式协同受力, 这与文献 [8-11,19,21-23] 的研究方法保持一致. 通过网格收敛性测试, 选取钢筋和混凝土的网格尺寸为 5 mm.

表 1 UHPC 材料主要参数^[13]

Table 1 Parameters of UHPC materials

Mid	Ro/(mg·mm ⁻³)	Nplot	Incre	Irate	Erode	Recover	Iretrac
159	2.6×10 ⁻⁹	1	0.000	1	1.4	11	0
<i>G</i> /MPa	<i>k</i> /MPa	<i>α</i> /MPa	<i>θ</i>	<i>λ</i> /MPa	<i>β</i> /MPa ⁻¹	NH	CH
2.025×10 ⁴	2.7×10 ⁴	90	0.2257	75.67	4.88e×10 ⁻³	0.98	150
<i>α</i> ₁	<i>θ</i> ₁ /MPa ⁻¹	<i>λ</i> ₁	<i>β</i> ₁ /MPa ⁻¹	<i>α</i> ₂	<i>θ</i> ₂ /MPa ⁻¹	<i>λ</i> ₂	<i>β</i> ₂ /MPa ⁻¹
1	0	0.4226	1.38×10 ⁻³	1	0	0.5	1.08×10 ⁻³

Notes: Ro means mass density; Nplot means maximum of brittle and ductile damage; Incre means maximum strain increment for sub incrementation; Irate means rate effects model turned on; Erode means elements erode; Recover means that recovery is based upon the sign of both the pressure and volumetric strain; Iretrac means cap does not retract; *G* means shear modulus; *k* means Bulk modulus; *α* means tri-axial compression surface constant term; *θ* means torsion surface linear term; *λ* means tri-axial compression surface nonlinear term; *β* means tri-axial compression surface exponent; NH means hardening initiation; CH means hardening rate; *α*₁ means Torsion surface constant term; *θ*₁ means torsion surface linear term; *λ*₁ means torsion surface nonlinear term; *β*₁ means torsion surface exponent; *α*₂ means tri-axial extension surface constant term; *θ*₂ means tri-axial extension surface linear term; *λ*₂ means tri-axial extension surface nonlinear term; *β*₂ means Tri-axial extension surface exponent.

有限元模型的边界条件与试验保持一致, 采用关键词 *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFAC 模拟边界约束与 UHPC 梁之间的接触关系. 落锤与 UHPC 梁的接触关系则采用 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFAC_TO_SURFAC 表示. 采用关键词 *INITIAL_VELOCITY_GENERATION 施加落锤的初速度.

图 5 和图 6 分别为 UHPC 梁在冲击荷载下的试验和数值模拟结果. 从图 5 可知, 在冲击荷载下, UHPC 梁的跨中产生了部分弯曲裂缝, 数值模型较好的反应了其在冲击荷载下的破坏模式. 图 6 描绘了 UHPC 梁的冲击力和跨中位移时程曲线. 从图 6(a) 可知, 试验和数值模型的峰值冲击力分别为 1980 和 2041 kN, 二者相差 3.1%. 在 8.7 ms 时刻, 试验中 UHPC 梁最大跨中峰值位移达到 24.8 mm; 而数值模型结果为 9.5 ms 时达到最大峰值位移

25.6 mm. 二者峰值位移相差 3.2%, 如图 6(b) 所示. 综上分析可知, 数值模型可以较好的反映 UHPC 梁在冲击荷载下的破坏模式、冲击力和峰值位移等. 因此, 数值模型的可靠性得到了较好的验证.

1.2 研究方案设计

相比普通钢筋混凝土构件, 采用 UHPC 材料的构件在冲击荷载作用下表现出较好的性能, 但其高昂的造价成本, 限制了纯 UHPC 构件的进一步推广和应用. 因此, 在冲击位置进行 UHPC 材料局部替换和整体包裹的方法受到青睐. 该类方法的优点是不仅可以改善构件的抗冲击性能, 而且可以极大的减少建造成本.

UHPC 材料的局部替换方案的基本理念是强化冲击区域, 提高钢筋混凝土梁的抗冲击性能, 而 UHPC 整体包裹方案一方面可以改善冲击区域的强度, 另一方面可以提高梁的整体的刚度. 考虑到建模的便利性, 本文采用 Pham 等^[25] 试验模型的构造设计. 在试验中梁的两端采用简支边界, 其跨中位置进行落锤冲击. 由于在跨中位置进行冲击测试, 因而该位置采用 UHPC 材料进行局部替换或包裹提高局部抗冲击能力, 并用 UL-*x*-NC 表示跨中替换 UHPC 长度为 *x* mm, UW-*x*-NC 表示 UHPC 整体包裹的厚度为 *x* mm. 此外, 在数值模型中 UHPC

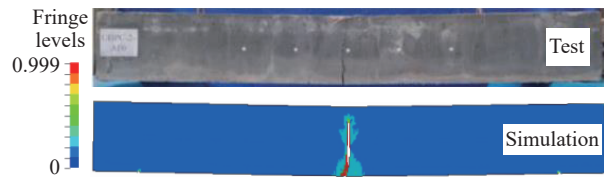


图 5 UHPC 梁试验与数值破坏模式

Fig.5 Failure modes of the UHPC beam in the test and simulation

与 NC 的接触表达方式采用了共节点的形式, 相关模型示意图如图 7 所示.

表 2 为设计的具体工况. 首先设计了 NC 梁和 UHPC 梁分别在不同冲击速度的工况. 其次, 考虑了 UHPC 材料局部替换和包裹参数的影响, 分别设计了替换长度为 300、500 和 700 mm, 以及包裹厚度分别为 10、20 和 30 mm 的工况.

2 结果分析

2.1 破坏模式

图 8 展示了在冲击荷载下钢筋混凝土梁的破坏模式. 从图 8(a)可知, NC 梁在冲击速度为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 跨中产生大量的弯曲裂缝, 两侧形成临界剪切裂缝; 而 UHPC 梁仅在跨中产生少量弯曲裂缝, 这也与文献^[12-13]一致. 当冲击速度为 $6.26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, NC 梁跨中混凝土剖落, 且梁的两侧由于反弹形成反向弯矩裂缝, NC 梁的破坏模式为冲剪破坏; UHPC

梁的跨中竖向弯曲裂缝贯通, 且靠近支座边缘形成竖向剪切裂缝. 为了合理利用 UHPC 材料的性能, 设计了 NC-UHPC 组合梁试件. 图 8(b) 显示采用 UHPC 替换提高了局部强度, 在冲击荷载下, 两侧产生弯剪裂缝, 并随着局部替换长度增加, 两侧损伤程度降低, 但跨中竖向弯曲裂缝更加明显. 这是由于在局部替换 UHPC 长度较低时, 普通混凝土结构将吸收更多的冲击能量转换为自身内能而产生破坏现象, 而 UHPC 替换长度增大时, 混凝土结构则主要是局部吸收冲击能量. 值得注意的是, UHPC 和 NC 接触界面由于二者材料强度差异较大, 在冲击荷载下易发生界面失效. 而采用 UHPC 包裹强化的方法则改变了冲击荷载下梁的破坏模式, 即弯曲破坏. 此外, 随着 UHPC 厚度的增大, 梁跨中的损伤程度增大, 逐步类似于纯 UHPC 梁.

在冲击荷载下各试件破坏模式对比示意图如图 9 所示. NC 梁形成明显的冲剪区域, 为局部冲

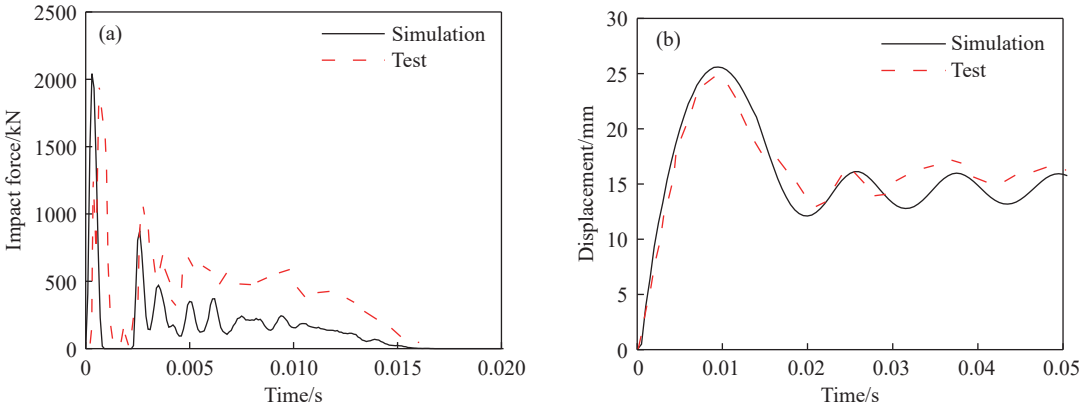


图 6 UHPC 梁的冲击力和跨中位移. (a) 冲击力; (b) 位移

Fig.6 Impact force and mid-span displacement of UHPC beams: (a) impact force; (b) displacement

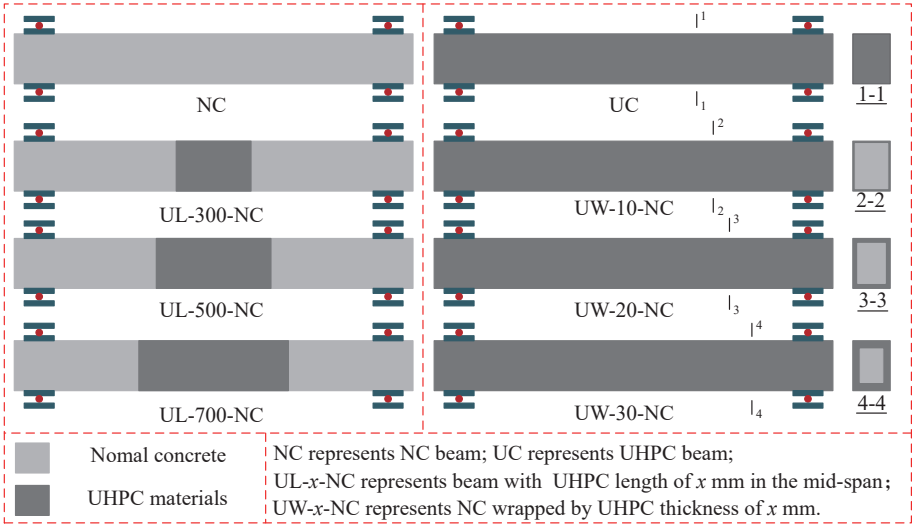


图 7 NC-UHPC 组合梁示意图

Fig.7 Schematic diagram of NC-UHPC composite beam

表 2 具体设计工况

Table 2 Specific design conditions

Case	Impact mass/kg	Impact velocity/(m·s ⁻¹)	Concrete materials	Combination method
NC-2-203	203.5	2	NC	—
NC-4-203	203.5	4	NC	—
NC-6-203	203.5	6.26	NC	—
UC-2-203	203.5	2	UHPC	—
UC-4-203	203.5	4	UHPC	—
UC-6-203	203.5	6.26	UHPC	—
UL-300-NC-6-203	203.5	6.26	NC-UHPC	UHPC local reinforcement
UL-500-NC-6-203	203.5	6.26	NC-UHPC	UHPC local reinforcement
UL-700-NC-6-203	203.5	6.26	NC-UHPC	UHPC local reinforcement
UW-10-NC-6-203	203.5	6.26	NC-UHPC	UHPC external enclosing
UW-20-NC-6-203	203.5	6.26	NC-UHPC	UHPC external enclosing
UW-30-NC-6-203	203.5	6.26	NC-UHPC	UHPC external enclosing

Notes: NC-2-203 represents the concrete beams use the hammer with a mass of 203 kg and an impact velocity of 2 m·s⁻¹.

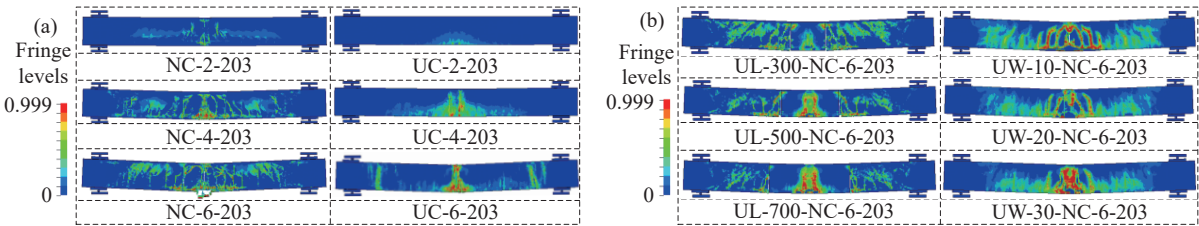


图 8 冲击荷载下钢筋混凝土梁的破坏模式. (a) NC 梁与 UHPC 梁; (b) NC-UHPC 组合梁
Fig.8 Failure modes of beams under impact loads: (a) NC and UHPC beams; (b) NC-UHPC composite beam

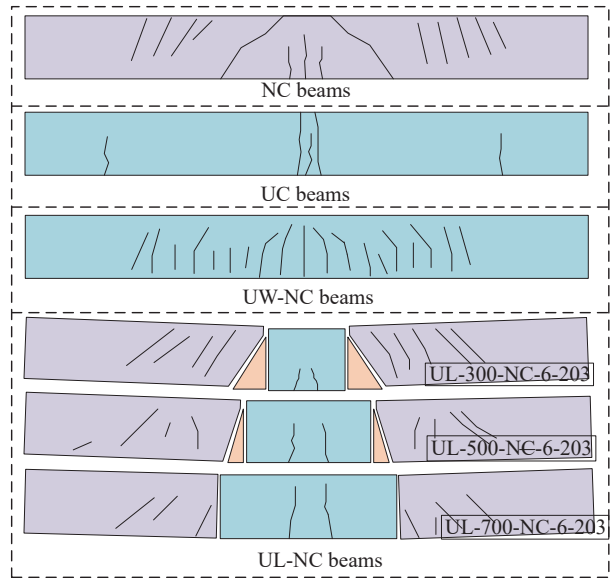


图 9 冲击荷载下钢筋混凝土梁的破坏模式对比示意图
Fig.9 Comparison between failure modes of reinforced concrete beams under impact load

剪破坏, UHPC 梁跨中竖向裂缝贯通, 并形成塑性铰. 相比 NC 和 UHPC 梁, NC-UHPC 组合梁展现出

优异的抗冲击性能. 根据文献^[25-27], 钢筋混凝土梁的局部冲剪切破坏的临界主裂缝一般为 45°, 则梁冲剪长度范围至少为 2 倍的梁高. 从图 9 中可知, 当 UHPC 的替换长度处于 500 mm 以内, 都发生了冲剪破坏. 当 UHPC 的替换长度为 700 mm 时, 为弯曲破坏. 本文中梁的冲剪实际影响范围为 2 倍的梁高和落锤冲击接触面长度之和, 而在实际情况中落锤的接触长度属于未知项. 因此, 建议选取大于 2 倍梁高的替换长度以避免局部冲剪破坏. 而 UHPC 包裹的方案改变了梁的破坏模式, 即由局部冲剪破坏转变为弯曲破坏.

2.2 冲击力与位移

一般而言, 遭受冲击荷载的钢筋混凝土梁的冲击力形式可以分为三类^[27]. 本文的冲击力时程曲线可将其归为第三类, 也就是包含了峰值、平台和衰减, 具体如图 10 所示. 冲击速度对冲击力影响最为显著, 梁的峰值冲击力随着速度增大逐渐提高. UHPC 局部替换组合梁的冲击力峰值与纯 UHPC 梁接近, 而 UHPC 包裹的方法, 其局部刚度

处于 NC 梁和 UHPC 梁之间. 因此, 其峰值冲击力大于 NC 梁, 小于 UHPC 梁和 UHPC 局部替换的组合梁. 此外, 在相同冲击速度下, 各个试件的冲量相差不大, 具体数值如表 3 所示. 在冲击速度为 2、

4 和 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, NC 和 UHPC 梁冲量的变化值分别约为 7%、4% 和 1%.

图 11 为钢筋混凝土梁跨中位移时程曲线. 从图中可知, 冲击速度对梁的跨中峰值位移和残余

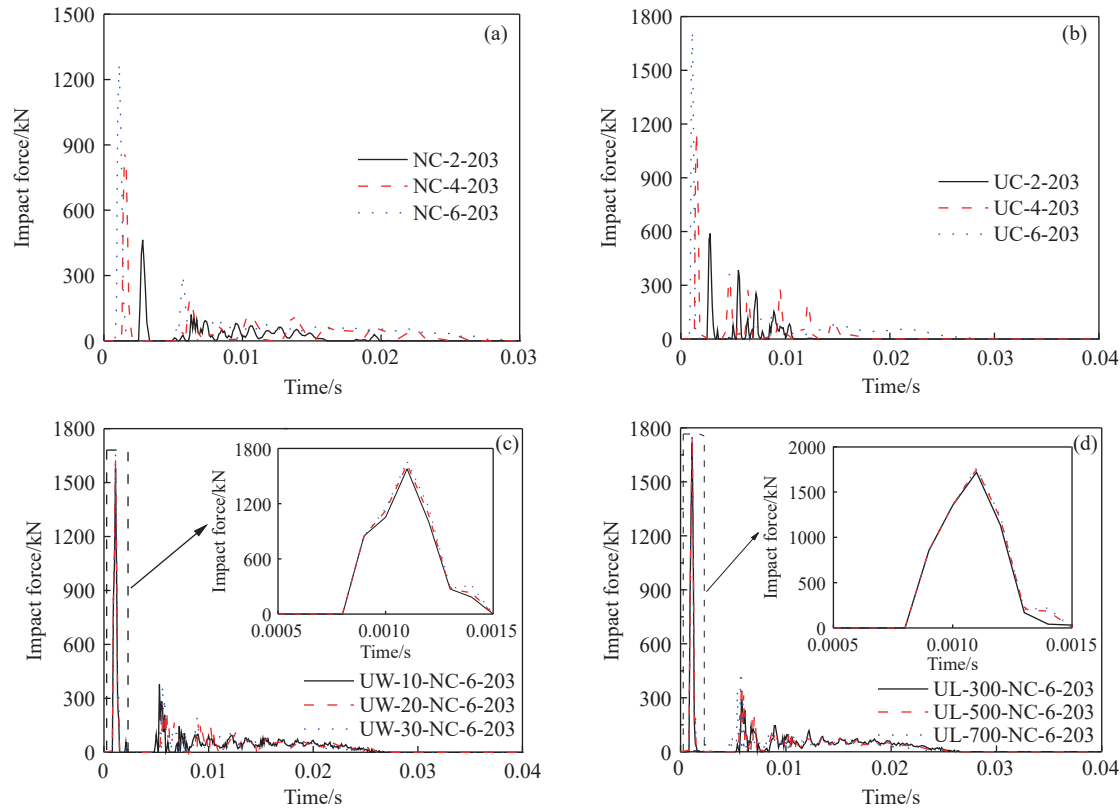


图 10 钢筋混凝土梁的冲击力时程曲线. (a) NC 梁; (b) UHPC 梁; (c) UHPC 外包梁; (d) UHPC 局部替换梁

Fig.10 Impact force time history curves of reinforced concrete beam: (a) NC beams; (b) UHPC beams; (c) beams wrapped in UHPC; (d) beams locally replaced with UHPC

表 3 冲击荷载下试件具体结果

Table 3 Impact load test results

Case	Maximum impact force/kN	Impulse/($\text{kN}\cdot\text{s}$)	Maximum displacement/mm	Residual displacement/mm	Maximum bending moment/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	Maximum shear force/kN	Energy consumption/(10^3 J)
NC-2-203	463	0.57	8.2	6.3	21.7	149	0.355
NC-4-203	872	1.12	26.0	20.1	35.1	248	1.42
NC-6-203	1271	1.61	44.8	38.2	43.1	344	3.60
UC-2-203	588	0.61	4.2	3.7	44.1	211	3.59
UC-4-203	1153	1.07	13.4	10.7	77.5	390	1.43
UC-6-203	1719	1.60	40.0	35.1	93.5	563	3.61
UL-300-NC-6-203	1717	1.56	37.4	29.7	94.4	574	3.49
UL-500-NC-6-203	1758	1.55	34.7	27.8	98.2	580	3.46
UL-700-NC-6-203	1766	1.53	33.0	26.5	99.0	563	3.60
UW-10-NC-6-203	1577	1.52	39.6	32.8	61.6	482	3.53
UW-20-NC-6-203	1625	1.53	37.6	32.2	72.9	500	3.55
UW-30-NC-6-203	1660	1.52	35.8	30.6	82.2	518	3.60

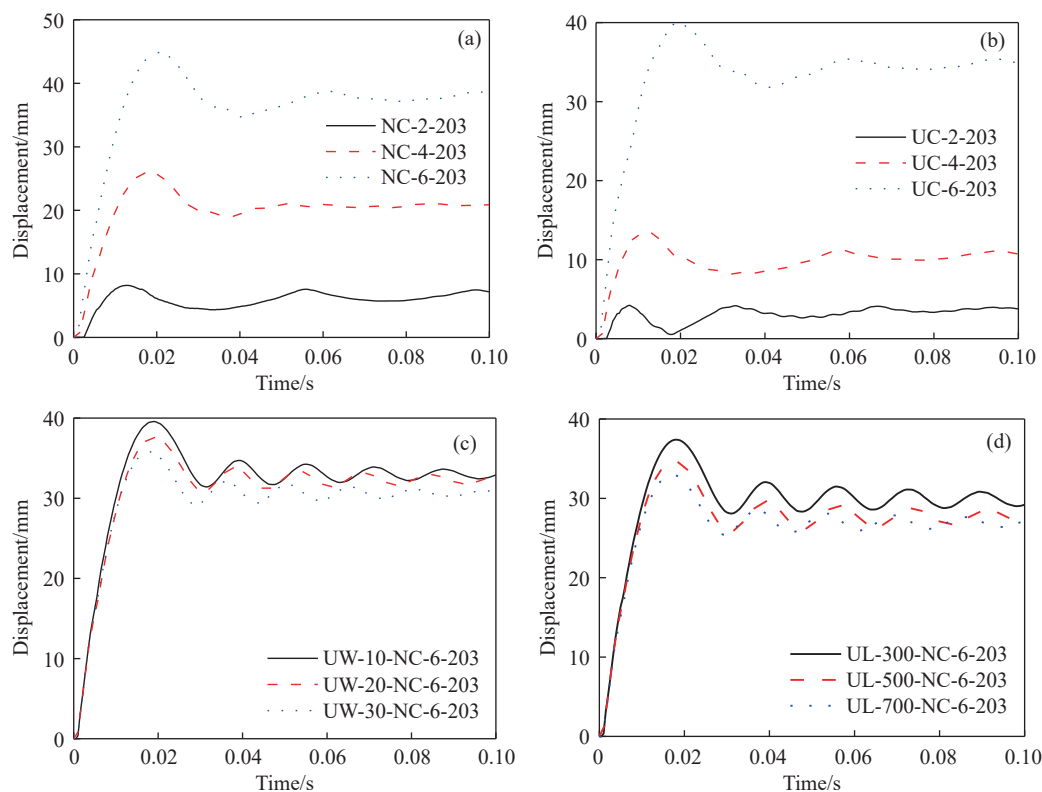


图 11 钢筋混凝土梁的位移时程曲线。(a) NC 梁; (b) UHPC 梁; (c) UHPC 外包梁; (d) UHPC 局部替换梁

Fig.11 Displacement time history curves of reinforced concrete beam: (a) NC beams; (b) UHPC beams; (c) beams wrapped in UHPC; (d) beams locally replaced with UHPC

位移都有显著的影响。UHPC 包裹梁提高了梁的整体刚度,其峰值位移和残余位移比 NC 梁小,并且随着 UHPC 包裹厚度增大而轻微降低。采用 UHPC 局部替换的方案展现出较好的位移控制能力,其峰值位移和残余位移均低于 NC 梁、UHPC 梁和 UHPC 包裹梁,具体如表 3 所示。引起该现象的原因是 UHPC 局部替换方案增强了局部强度,改变了其在冲击荷载下的破坏形态,两侧的普通混凝土将消耗更多的冲击能量,跨中的弯曲变形较小,从而有利于控制梁在冲击荷载下的位移。

2.3 内力响应

钢筋混凝土梁在冲击荷载下首先形成局部受压应力波,然后逐渐向梁的端部传递,其变形过程可以分为受迫振动和自由振动两个阶段,这样形成了不同的内力响应过程,如图 12 所示。值得注意的是,在梁发生自由振动阶段之前,即应力波传递到梁的支座,其内力变化同时会受到冲击力、惯性力和支座力共同影响。冲击力和支座反力响应时刻关系显示,相对冲击力而言,支座反力存在明显的滞后并将对梁的受迫振动阶段产生作用。

在跨中冲击荷载下梁的剪力和弯矩会分别呈现反对称和正对称的分布形式,最大剪力和弯矩

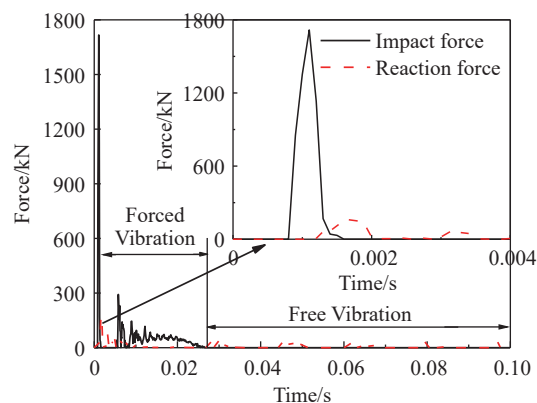


图 12 冲击力和支座反力的时程曲线

Fig.12 Time history curves of impact force and reaction force

出现在跨中区域,在靠近支座附近由于支反力的作用也会产生较大的剪力和弯矩^[25]。图 13 和 14 展示了在冲击荷载下梁的最大剪力和弯矩时程曲线。UHPC 材料可以有效提高梁的内力承载力,具体表现为局部替换方案和纯 UHPC 材料的梁弯矩和剪力值最大,其次是 UHPC 包裹的梁。此外,提高 UHPC 替换长度对其内力影响不明显;增大 UHPC 包裹厚度,其内力承载力会逐渐提高,当其厚度为 10、20 和 30 mm 时,其剪力峰值分别为 482、500 和 518 kN,具体试件的弯矩和剪力见表 3。总而言之, UHPC

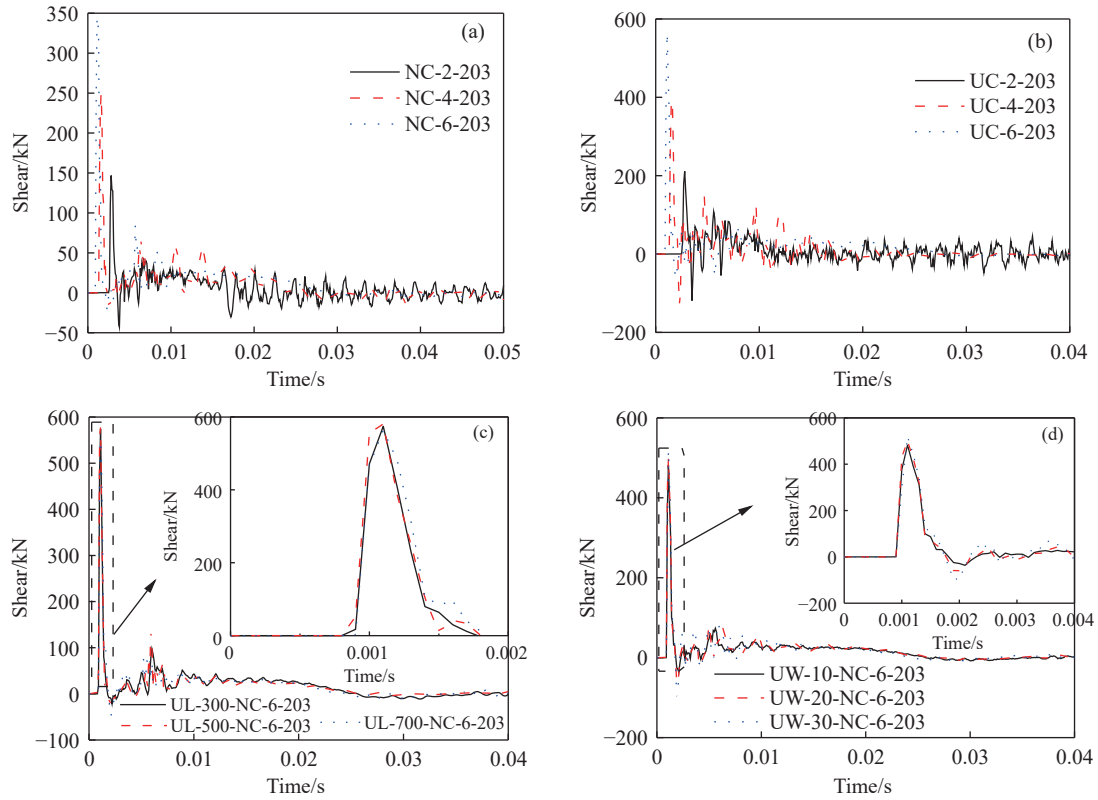


图 13 冲击荷载下梁的剪力时程曲线. (a) NC 梁; (b) UHPC 梁; (c) UHPC 局部替换梁; (d) UHPC 外包梁

Fig.13 Shear time history curves of the beam under impact loads: (a) NC beams; (b) UHPC beams; (c) beams locally replaced with UHPC; (d) beams wrapped in UHPC

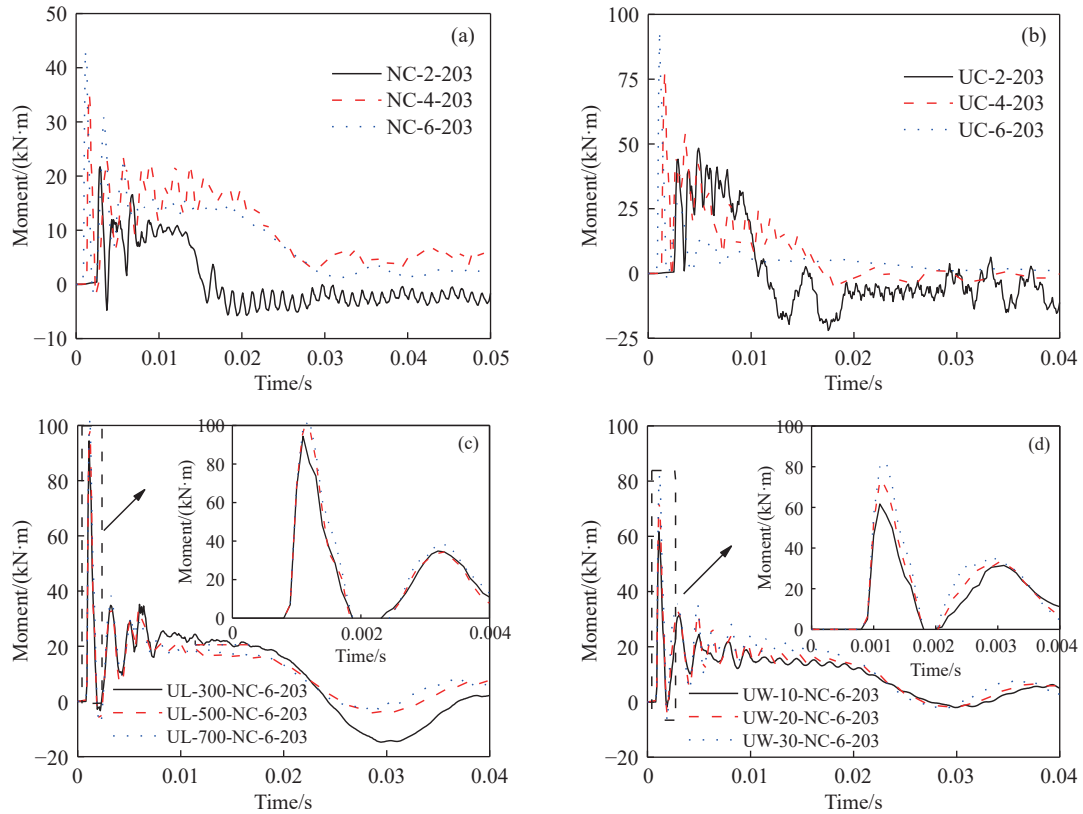


图 14 冲击荷载下梁的弯矩时程曲线. (a) NC 梁; (b) UHPC 梁; (c) UHPC 局部替换梁; (d) UHPC 外包梁

Fig.14 Bending moment time history curves of beam under impact loads: (a) NC beams; (b) UHPC beams; (c) beams locally replaced with UHPC; (d) beams wrapped in UHPC

局部替换方案具有与纯 UHPC 梁相当的局部内力承载力,且减少了 UHPC 材料的使用量,有效的降低成本提高了经济效益。

2.4 能量耗散

基于钢筋混凝土梁在冲击荷载下的冲击力和位移时程曲线,可以得到冲击力-位移曲线,其示意图如图 15(a) 所示。从图中可知,力和位移的积

分面积为梁吸收的能量。图 15(b) 描绘了各个试件在冲击荷载下的耗能,其中 E_k 表示落锤最初的动能, E 表示钢筋混凝土梁吸收的能量, E/E_k 的值围绕在 89.4% 左右波动,其最小值为 86.9%,最大值为 90.9%。因此,在相同冲击能量作用下,混凝土种类及不同混凝土组合形式的梁不会对其耗能产生明显影响。

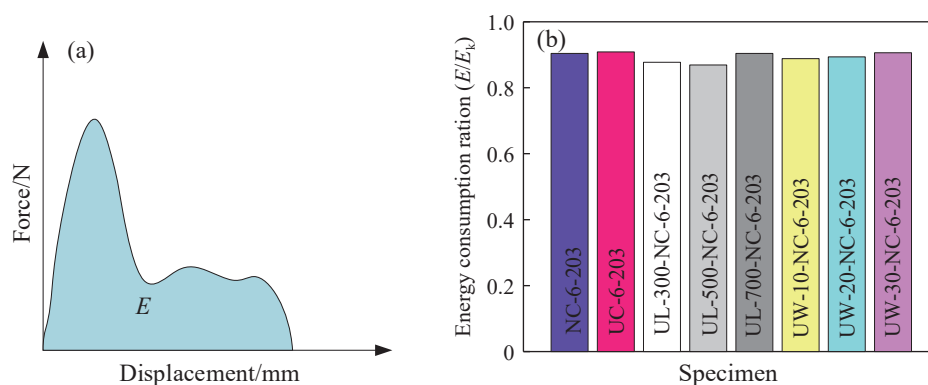


图 15 试件的能量耗散。(a) 冲击力-位移曲线; (b) 耗能比

Fig.15 Energy dissipation of specimen: (a) impact displacement curve; (b) energy consumption ratio

3 结论

为了提高钢筋混凝土梁的抗冲击性能,本文提出了采用 UHPC 局部替换和包裹的两种方案。首先,验证了 NC 和 UHPC 梁在冲击荷载下的数值模型,然后分别研究了 NC 梁、UHPC 梁和 NC-UHPC 组合梁在冲击荷载下的动态性能。结论如下:

(1) NC-UHPC 组合梁的抗冲击性能明显优于普通钢筋混凝土梁,且由于 UHPC 材料优异的力学性能,可以有效抑制其在冲击区域的局部损伤。

(2) 在明确冲击力作用位置的前提下,建议局部替换长度选取大于 UHPC 的 2 倍梁高,可以有效的避免梁的局部冲剪破坏,改善了钢筋混凝土梁的抗冲击性能。

(3) UHPC 包裹方案改变了梁在冲击荷载下的破坏模式,即呈现弯曲破坏,增大 UHPC 包裹层的厚度对其抗冲击性能有一定的提高效果,但是效果不显著。相比 UHPC 包裹方案, UHPC 局部替换梁在冲击荷载下的峰值位移和残余位移较低,且具有与纯 UHPC 梁相当的局部承载力。

NC-UHPC 组合梁一方面可以有效的提高其抗冲击性能,另一方面相对纯 UHPC 构件而言,有效的降低了经济成本。考虑到不同的构件在冲击荷载下的破坏模式差异,未来将进一步努力优化 UHPC 组合方案,改善构件的抗冲击性能以及提出

经济与性能的合理设计方案。

参 考 文 献

- [1] Jia P C, Wu H, Fang Q. Low-velocity lateral impact analyses of UHPC members based on CSC model. *J Build Struct*, 2021, 42(8): 169
(贾鹏程, 吴昊, 方秦. 基于 CSC 模型的 UHPC 构件侧向低速冲击分析. 建筑结构学报, 2021, 42(8): 169)
- [2] Fan W, Mao W, Pang Y T, et al. Reliability analysis of reinforced concrete column bridge piers subjected to vehicle collisions. *China J Highw Transp*, 2021, 34(2): 162
(樊伟, 毛薇, 庞于涛, 等. 钢筋混凝土柱式桥墩抗车撞可靠度分析研究. 中国公路学报, 2021, 34(2): 162)
- [3] Li C X, Zhang Y, Nie J, et al. Experimental research on local compression performance and bearing capacity calculation formula of UHPC. *China Civ Eng J*, 2022, 55(3): 36
(李传习, 张宇, 聂洁, 等. UHPC 局压性能试验研究与承载力计算公式. 土木工程学报, 2022, 55(3): 36)
- [4] Feng Z, Li C X, Pan R S, et al. Experimental investigation and calculation method of UHPC direct shear capacity. *China J Highw Transp*, 2021, 34(8): 78
(冯峥, 李传习, 潘仁胜, 等. UHPC 直剪性能试验与直剪承载力计算方法. 中国公路学报, 2021, 34(8): 78)
- [5] Ouyang X, Shi C J, Shi J H, et al. Compressive mechanical properties and prediction for elastic modulus of ultra-high performance concrete. *J Chin Ceramic Soc*, 2021, 49(02): 296
(欧阳雪, 史才军, 史金华, 等. 超高性能混凝土受压力学性能及其弹性模量预测. 硅酸盐学报, 2021, 49(02): 296)

- [6] Liang X W, Hu A X, Yu J, et al. Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete. *Acta Mater Compos Sin*, 2018, 35(3): 722
(梁兴文, 胡翱翔, 于婧, 等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响. 复合材料学报, 2018, 35(3): 722)
- [7] Yang J, Chen B C, Su J Z. Effect of steel fiber on elastic modulus of ultra-high-performance concrete. *J Chin Ceram Soc*, 2020, 48(5): 652
(杨简, 陈宝春, 苏家战. 钢纤维对超高性能混凝土弹性模量的影响. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 652)
- [8] Fujikake K, Senga T, Ueda N, et al. Study on impact response of reactive powder concrete beam and its analytical model. *J Adv Concr Technol*, 2006, 4(1): 99
- [9] Yoo D Y, Banthia N, Kim S W, et al. Response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low-velocity impact loading. *Compos Struct*, 2015, 126: 233
- [10] Yoo D Y, Banthia N, Yoon Y S. Impact resistance of reinforced ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *ACI Struct J*, 2017, 114(1): 113
- [11] Wei J, Li J, Wu C Q. An experimental and numerical study of reinforced conventional concrete and ultra-high performance concrete columns under lateral impact loads. *Eng Struct*, 2019, 201: 109822
- [12] Wei J, Li J, Wu C Q. Behaviour of hollow-core and steel wire mesh reinforced ultra-high performance concrete columns under lateral impact loading. *Int J Impact Eng*, 2020, 146: 103726
- [13] Jia P C, Wu H, Wang R, et al. Dynamic responses of reinforced ultra-high performance concrete members under low-velocity lateral impact. *Int J Impact Eng*, 2021, 150: 103818
- [14] Yang J, Zhou J T, Zhang Z Y, et al. Shear performance of keyway interface between UHPC and normal concrete. *China J Highw Transp*, 2021, 34(8): 132
(杨俊, 周建庭, 张中亚, 等. UHPC-NC 键槽界面抗剪性能研究. 中国公路学报, 2021, 34(8): 132)
- [15] Shao X D, Fan W, Huang Z Y. Application of ultra-high-performance concrete in engineering structures. *China Civ Eng J*, 2021, 54(1): 1
(邵旭东, 樊伟, 黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用. 土木工程学报, 2021, 54(1): 1)
- [16] Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021. *China J Highw Transp*, 2021, 34(2): 1
(《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述 2021. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1)
- [17] Doiron G. Pier repair/retrofit using UHPC—Examples of completed projects in north America // *International Interactive Symposium on UHPC*. Iowa State, 2016: 1
- [18] Brühwiler E, Denarié E, Habel K. Ultra-high performance fibre reinforced concrete for advanced rehabilitation of bridges // *Proceedings of Fib-symposium*. Budapest, 2005: 951
- [19] Fan W, Shen D J, Yang T, et al. Experimental and numerical study on low-velocity lateral impact behaviors of RC, UHPFRC and UHPFRC-strengthened columns. *Eng Struct*, 2019, 191: 509
- [20] Lee J Y, Aoude H, Yoon Y S, et al. Impact and blast behavior of seismically-detailed RC and UHPFRC-Strengthened columns. *Int J Impact Eng*, 2020, 143: 103628
- [21] Wu H, Ren G M, Fang Q, et al. Response of ultra-high performance cementitious composites filled steel tube (UHPCC-FST) subjected to low-velocity impact. *Thin Walled Struct*, 2019, 144: 106341
- [22] Wang W Q, Wu C Q, Li J, et al. Behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) filled steel tubular members under lateral impact loading. *Int J Impact Eng*, 2019, 132: 103314
- [23] Wang W Q, Wu C Q, Li J, et al. Lateral impact behavior of double-skin steel tubular (DST) members with ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC). *Thin Walled Struct*, 2019, 144: 106351
- [24] Wei J E, Li J, Wu C Q, et al. Impact resistance of ultra-high performance concrete strengthened reinforced concrete beams. *Int J Impact Eng*, 2021, 158: 104023
- [25] Pham T M, Hao H. Influence of global stiffness and equivalent model on prediction of impact response of RC beams. *Int J Impact Eng*, 2018, 113: 88
- [26] Wu M, Jin L, Du X L. Numerical investigation of precast RC beam with unbonded prestressing tendon under impact loads. *Struct Infrastruct Eng*, 2023, 19(4): 460
- [27] Li H W, Chen W S, Hao H. Factors influencing impact force profile and measurement accuracy in drop weight impact tests. *Int J Impact Eng*, 2020, 145: 103688