

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0139

HTRB600 钢筋混凝土梁动态损伤机理和承载力研究

张丛琨¹, 张仲昊¹, 汪 维^{1*}, 李 磊^{2,3}, 魏久洪^{2,3}

(1. 宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 中国人民解放军军事科学院 国防工程研究院, 河南 洛阳 471023;

3. 河南省特种防护材料重点实验室, 河南 洛阳 471023)

摘要: 近年我国大力推广热轧高强度热处理钢筋(Heat-Treated Ribbed Bars, HTRB)等新型高强钢筋(High-Strength Steel Bars, HSSB), 而钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)构件的动力特性和破坏形式受到加载速率的影响而发生明显的改变. 为研究配置 HTRB600 的 RC 梁的动态力学性能, 设计了不同加载速度和不同混凝土强度的 4 组试验. 结果表明: 梁在动态加载下的破坏过程可分为弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段. 屈服荷载随着加载速度的增加而增加, 将材料静态强度替换为动态强度后, 规范中的公式可以准确预测梁的屈服弯矩. 使用 LS-DYNA 程序建立了精确的有限元模型, 通过数值模拟分析了梁的损伤机理和极限承载力, 发现梁的极限荷载随着加载速度的提高而增大, 极限挠度和延性比随着加载速度的增加而减小, 混凝土强度对梁的极限承载力影响较小.

关键词: 高强钢筋; 钢筋混凝土梁; 抗弯承载力; 动态加载; 数值模拟; 损伤机理

中图分类号: TU31

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 06-0051-10

我国近年来大力推广热轧高强度热处理钢筋(Heat-Treated Ribbed Bar, HTRB)等新型高强钢筋(High-Strength Steel Bar, HSSB)^[1-4], 而钢筋在实际工程中的应用是以钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)结构形式存在. RC 结构在防护工程中难免会受到冲击、爆炸等动态荷载作用, 而 RC 梁在动态荷载下会产生高应变率, 因此研究配置 HTRB600 的高强 RC 梁在动态加载下的力学性能意义重大.

对动态荷载下的 RC 梁的力学性能国内外学者均有研究, 如肖诗云等^[5]对 RC 梁进行了 4 种加载速率下的力学性能试验, 发现开裂、极限、破坏荷载和开裂、屈服、极限位移以及位移延性系数均随加载速率的提高而显著提高. 李磊等^[6]研究了 500 MPa 级热轧带肋钢筋(Hot-rolled Ribbed Bars, HRB)RC 梁的静态和动态受弯承载力, 发现在动态加载下梁的屈服载荷和极限载荷有小幅提升. 邹

笃建等^[7]通过三点弯曲动态加载试验提出了考虑应变率效应的素混凝土和 RC 梁弹性模量提高系数的经验公式. 袁健等^[8]研究了 3 种加载速率对 RC 梁的破坏模式和荷载—挠度曲线的影响, 发现梁的受剪承载力的变化主要是材料应变率造成. 项长生等^[9]研究低速冲击下 RC 深梁的抗冲击性能, 发现冲击速度明显影响深梁冲击位置截面的损伤程度. 周锡武等^[10]研究了不锈钢 RC 梁在冲击荷载作用下的损伤行为, 分析得出局部响应阶段梁扰动区域内力计算的经验公式. Guo 等^[11]研究了钢筋再生骨料混凝土梁冲击作用下的动力行为及能量耗散, 提出了梁的全局损伤耗能的计算方法. 伍敏等^[12]通过数值模拟研究了普通钢筋混凝土—超高性能混凝土(Normal Reinforced Concrete-Ultrahigh-Performance Concrete, NC-UHPC)组合梁抗冲击性能, UHPC 局部替换方案可以有效地避免梁的局部

收稿日期: 2024-01-27.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11302261, 11972201); 河南省科技创新人才计划(154200510028).

第一作者: 张丛琨, 硕士研究生, 主要研究方向: 爆炸与冲击动力学. E-mail: 15615113926@163.com

*通信作者: 汪维, 博士/教授, 主要研究方向: 爆炸与冲击动力学. E-mail: wangwei7@nbu.edu.cn

冲剪破坏. Zhang 等^[13]研究了冲击-爆炸联合荷载作用下 RC 梁的力学特性, 基于残余抗弯能力提出的损伤指数评估了不同钢筋混凝土梁的易损性. Das Adhikary 等^[14]研究了 RC 梁在不同加载速率下的性能, 发现梁的峰值载荷、刚度、吸收能量和应变率随着加载速率的提高而提高, 并提出了经验公式, 准确预测了不同加载速率下 RC 梁的最大抗力的动态增大系数. 由此可见, RC 梁在快速加载下的破坏模式及抗弯承载力问题存在分歧, 对配置新型 HSSB 的 RC 梁的动态力学性能研究偏少.

为了研究 HTRB600 RC 梁在动态加载下的损伤机理和抗弯承载力, 本文采用四点弯曲加载方式开展了不同速率下 HTRB600 RC 梁动态抗弯性能试验, 研究加载速率和混凝土强度对梁破坏形态和抗弯承载力的影响, 通过数值模拟并结合试验数据分析 HTRB600 RC 梁的损伤机理和极限承载力. 研究结果可为防护工程提供参考.

1 试验介绍

1.1 材料

试验采用 2 种钢筋: 热轧后带有控制冷却并经回火处理的钢筋(Remained-heat-treatment Ribbed Bars, RRB)箍筋(RRB400)和纵筋(HTRB600). 试验前对 2 种钢筋分别抽样 3 根进行拉伸测试, 结果见表 1.

表 1 HSSB 的测试数据

钢筋种类	直径/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
RRB400	6	482	541	2.5
HTRB600	12	625	829	8.9

2 种混凝土标号为 C40 和 C60, 分别制作 3 块边长为 150 mm 的立方体混凝土试块, 并与 RC 梁一起养护 28 d. 根据文献^[15]进行测试, 测得 C40 和 C60 立方体的抗压强度分别为 42.1 MPa 和 1.8 MPa.

1.2 试件设计和制作

试验设计了不同加载速度、不同混凝土种类的 4 组试验梁(表 2). 试件编号规则按照纵筋强度、混凝土强度、纵筋配筋率、加载速度进行分类, 低速和高速加载分别用字母 D 和 G 表示, 静态加载使用字母 J 表示. 例如 6C406D 试件代表纵筋为

HTRB600、混凝土为 C40、配筋率为 0.6%、加载速度为低速. 由于混凝土强度离散性较大, 为确保试验的精确性, 每组试验准备 3 根试件. 试验中所有试件的纵筋为 HTRB600、箍筋为 RRB400. 在试验过程中, 所有试件的长度均为 1 800 mm, 跨度均为 1 500 mm, 横截面均为 300 mm×150 mm, 试件主筋的混凝土保护层厚度为 25 mm.

表 2 试验方案

试件 编号	纵筋 种类	混凝土 种类	配筋 率/%	加载 速度	试件 数/根
6C406D	HTRB600	C40	0.6	低速	3
6C606D	HTRB600	C60	0.6	低速	3
6C406G	HTRB600	C40	0.6	高速	3
6C606G	HTRB600	C60	0.6	高速	3

图 1 为钢筋布置结构. 试件底部为 2 根 HTRB600 纵筋, 上部为 2 根构造筋, 在纯弯曲段受压区未放置任何钢筋, 箍筋间距为 100 mm. 试块和梁浇注完成后养护 28 d. 在试件表面刷白, 并绘制边长 50 mm 的网格以便观察和测量裂缝, 随后进行试验.

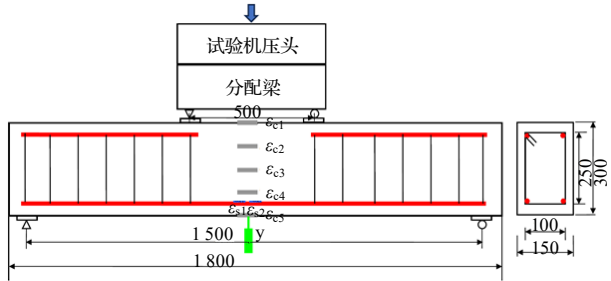


图 1 配筋方式及加载量测方案(单位: mm)

1.3 加载与量测方案

试验采用 KG-400T 动载材料试验机, 该试验机最大静载压力 5 000 kN, 最大动载压力 4 000 kN, 最大加载速度 1.0 m·s⁻¹. 所有试件的跨度保持在 1 500 mm, 两端固定在刚性支撑上.

试验使用图 1 所示的 4 点弯曲加载方式, 2 个加载点分别在试件跨度的三等分点处. 试验加载速度过高会导致试件振荡严重, 从而使试验数据失真. 因此, 选取试验机加载速度(低速 0.1 m·s⁻¹ 和高速 0.2 m·s⁻¹)范围内较低速度加载.

测点布置位置见图 1, 在跨中表面均匀布置 5 个混凝土应变测点(ε_c)用来测量沿高度分布的混凝土表面应变. 在 2 根受拉纵筋上各布置 2 个钢筋应

变测点(ϵ_s)用来测量钢筋应变. 在梁的底部跨中位置布置位移传感器(y)用来测量挠度. 梁表面的裂缝宽度用裂缝测宽仪测量.

2 结果与分析

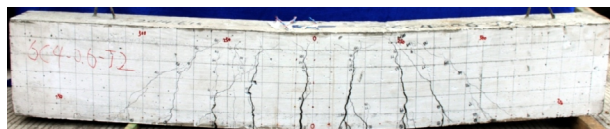
对所测数据取平均值, 结果见表 3. 受试验机加载行程限制, 部分试件在加载至试验机行程最大处时还没有达到极限状态. HTRB600 RC 梁在静态加载下的力学性能文献[16]已进行了研究. 为便于对比 RC 梁在不同加载速度下的力学性能变化, 将静态加载试验测得数据也列于表 3.

表 3 试验结果

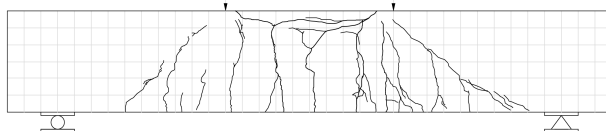
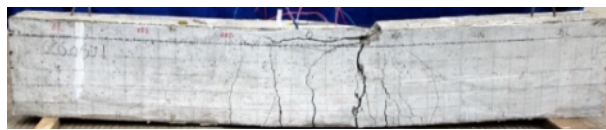
试件 编号	开裂荷 载/kN	屈服荷 载/kN	最大荷 载/kN	屈服挠 度/mm	最大挠 度/mm
6C406J	37.3	145.7	175.1	5.54	32.2
6C606J	32.5	146.7	185.5	5.66	36.6
6C406D	73.5	155.9	174.3	4.91	22.0
6C606D	75.8	168.4	198.5	5.61	18.7
6C406G	84.6	169.7	205.4	4.87	23.3
6C606G	95.4	172.5	203.9	4.50	21.7

2.1 破坏形态和裂缝分布

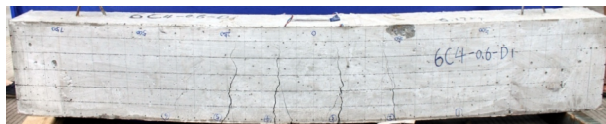
图 2(a)和(b)为文献[16]中静态加载试件失效模式及裂缝分布, 图 2(c)~(f)为动态加载下试件的失效模式和裂缝分布, 可见不同混凝土的 RC 梁在静态、低速和高速加载下的破坏形态基本相同, 均为弯曲破坏. 在梁跨中位置的纯弯段产生部分垂直弯曲裂缝, 在纯弯段两侧的受剪区产生少量 45° 剪切裂缝. 通过对比静态与动态加载时的裂缝分布可以看出, 动态加载下试件的裂缝数量均少于静态加载时的裂缝数量. 这是因为在静态加载时, 由于分级加载, 试件中的微裂纹均可以充分拓展; 而动态加载为瞬时连续加载, 混凝土开裂较快, 裂缝来不及拓展, 因此裂缝数量减少.



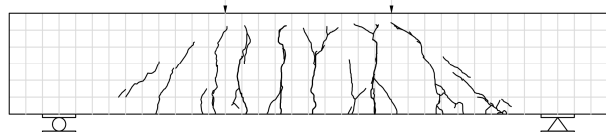
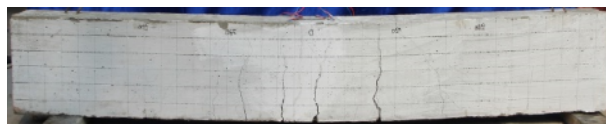
(a) 6C406J



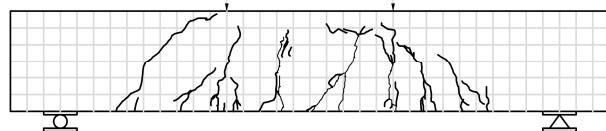
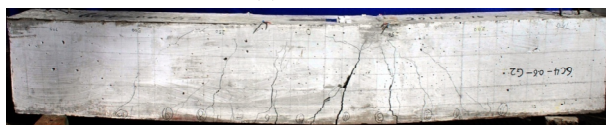
(b) 6C606J



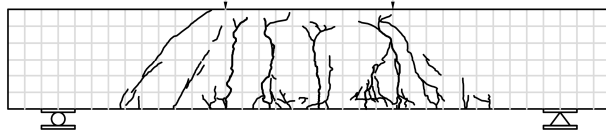
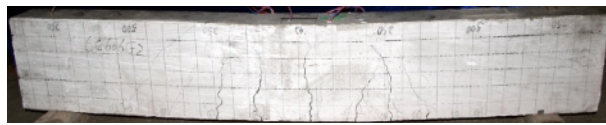
(c) 6C406D



(d) 6C606D



(e) 6C406G



(f) 6C606G

图 2 试件的失效模式及裂缝分布

2.2 荷载—挠度曲线

图 3 为试验梁的荷载—挠度曲线, 从图中可见各件的荷载—挠度曲线发展趋势大体相同. 随着

荷载施加在梁上,荷载—挠度曲线线性增长,此时荷载主要由受拉区的混凝土承担,梁处于弹性阶段.随着荷载的增大,受拉区的混凝土开裂,此前混凝土承受的荷载转移,由梁底部受拉纵筋承担,此时荷载—挠度曲线的斜率降低,出现第一个转折点,进入带裂缝工作阶段,这时的荷载为开裂荷载.随着荷载继续加载,裂缝的宽度不断增大,裂缝逐渐向受压区拓展,同时新裂缝不断出现,直至钢筋的应力达到屈服强度,荷载—挠度曲线斜率明显降低,出现第二次转折点,进入破坏阶段,这时的荷载和挠度分别为屈服荷载和屈服挠度.进入破坏阶段后,钢筋应力几乎不再增加,但是应变增长快速,荷载—挠度曲线基本保持水平,直至加载至试验机的最大行程.

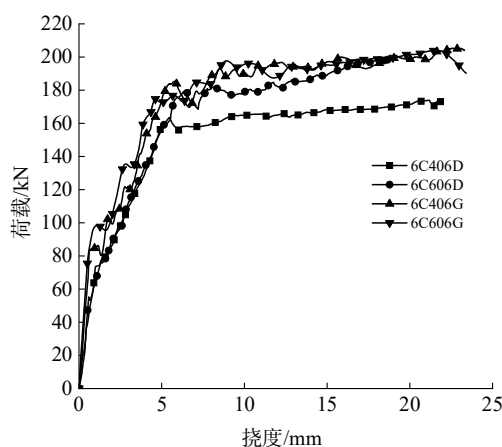


图3 荷载—挠度曲线

2.3 抗弯性能分析

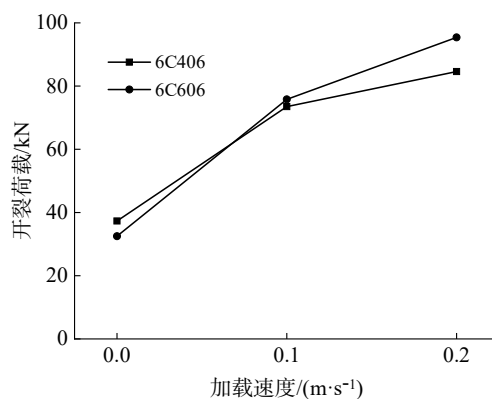
表3和图4显示了不同加载速度(静态、低速和高速)对RC梁的抗弯性能的影响.

从图4(a)可见,开裂荷载随着加载速度的增加而大幅提升.随着加载速度的增加,6C406试件的开裂荷载分别逐级增加了97.1%和15.1%,6C606试件的开裂荷载分别逐级增加了133.2%和25.9%.这是因为开裂荷载主要由混凝土的抗拉强度决定,而在动态加载下混凝土的抗拉强度会有较大幅度的提升,而且开裂荷载是由荷载—挠度曲线和荷载—钢筋应变曲线判断得出.由于试验加载较快,试件开裂后需要经过一定时间的扩展才能使挠度和钢筋应变产生突增,导致第一个拐点出现的时间往往晚于试件实际开裂时间,因此开裂荷载提升幅度较大.

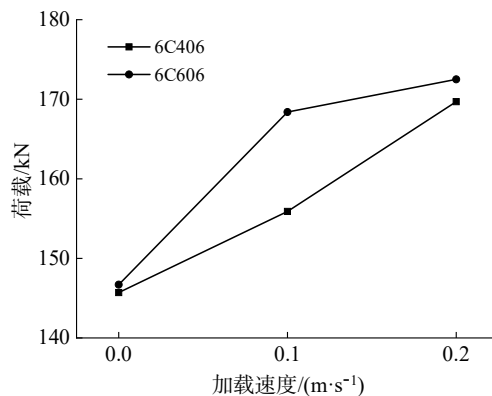
从图4(b)可见,屈服荷载随着加载速度的增大而增大,6C406试件的屈服荷载分别逐级增加了7.0%和8.9%,6C606试件的屈服荷载分别逐级增加了14.8%和2.4%.这是因为在HTRB600达到屈服强度时受压区混凝土仍处于弹性阶段,因此梁的屈服荷载主要由纵筋承担,而在动态加载时纵筋的强度会有所提升,导致梁的屈服荷载提升.

从图4(c)可见,随着加载速度逐渐增大,屈服挠度逐渐减小,但是减小趋势较小.这是因为随着加载速度的增加,纵筋的屈服强度有所提升,从而使梁的刚度增加,导致梁的屈服挠度减小.

从图4还可以看出,在动态加载下,增加混凝土强度会提高梁的开裂荷载和屈服荷载,但是提高幅度较小.这是因为在弹性阶段,虽然开裂荷载主要由混凝土的抗拉强度决定,但C40和C60混凝土的抗拉强度均较小,虽然动态加载会使其抗拉强度有所提升,但是C40和C60混凝土动态抗拉强度依然差距较小.而在带裂缝工作阶段,梁所受到的荷载主要由钢筋承担,因此混凝土强度对梁的屈服荷载影响较小.



(a) 开裂荷载



(b) 屈服荷载

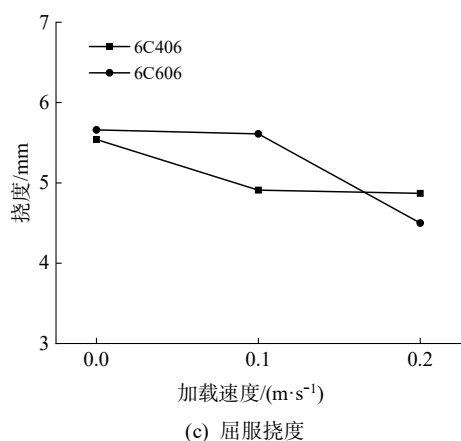
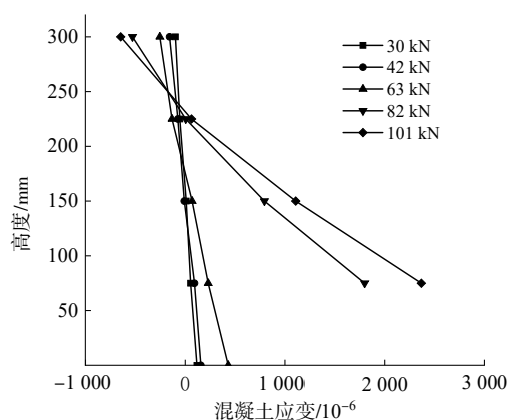


图4 抗弯性能随加载速度的变化趋势

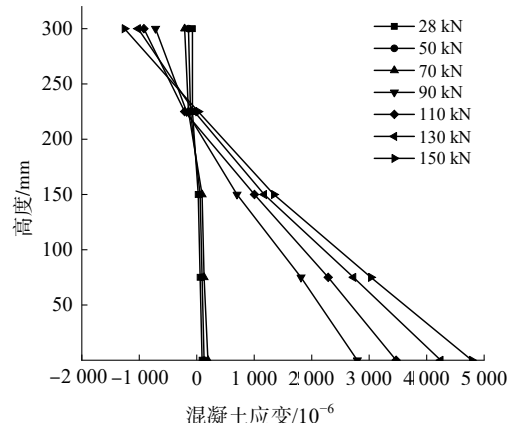
2.4 屈服弯矩预测

平截面假定基于文献[17]的研究. 为了分析 RC 梁的屈服弯矩, 需要验证该假定是否在动态加载下成立.

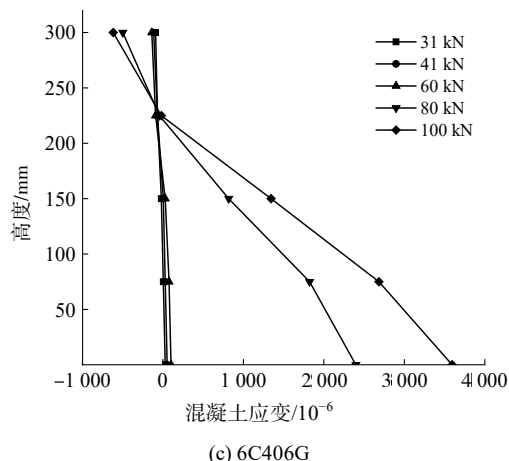
图5为试件在各级荷载下跨中混凝土的应变分布. 从图5可以看出, 本次试验中所有试件均符合平截面的假定.



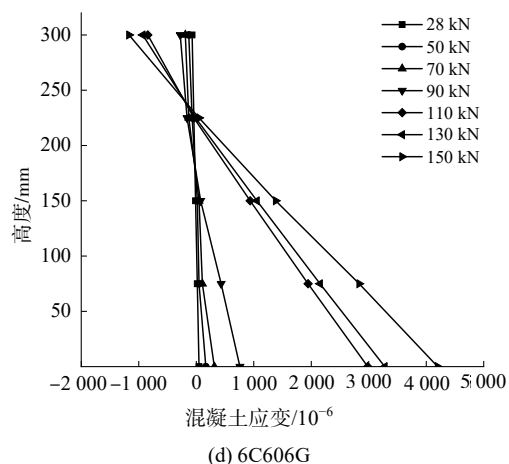
(a) 6C406D



(b) 6C606D



(c) 6C406G



(d) 6C606G

图5 跨中截面应变分布

根据试件的受力形式, 可以计算出梁在承受 4 点弯曲荷载时的弯矩为:

$$M = FL / 6, \quad (1)$$

式中: M 为梁弯矩; F 为梁荷载; L 为梁跨度.

根据文献[17], RC 梁的屈服弯矩 M_y 的计算公式为:

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s, \quad (2)$$

$$M_y = \alpha_1 f_c b x (h_0 - x / 2), \quad (3)$$

式中: α_1 为系数, 对 C40 混凝土取 1.0, 对 C60 混凝土取 0.98; f_c 为混凝土轴心抗压强度; b 为截面宽度; x 为截面受压区高度; f_y 为钢筋抗拉强度; A_s 为受拉钢筋截面积; h_0 为截面有效高度.

根据式(2)和式(3)对试件的屈服弯矩进行计算, 在理论计算时钢筋和混凝土的材料参数均选用实测值. 由于在动态加载下材料强度会有所提升, 选用材料在静态试验下测得的强度显然不合适. 试验中测得低速加载时钢筋应变率约为 0.05 s^{-1} , 混凝土应变率约为 0.04 s^{-1} , 高速加载时的钢筋应变

率约为 0.10 s^{-1} , 混凝土应变率约为 0.08 s^{-1} . 根据文献[18-19], 低速加载时 HTRB600 屈服强度动态增长因子(Dynamic Increase Factor, DIF)为 1.03, 混凝土抗压强度 DIF 为 1.15, 高速加载时 HTRB600 屈服强度 DIF 为 1.06, 混凝土抗压强度 DIF 为 1.20.

计算结果与实测结果见表 4, 其中 M_y^t 为试验测得的屈服弯矩, M_y^c 为理论计算的屈服弯矩. 从表 4 可以看出, 通过 DIF 计算材料强度后, 采用规范中的公式计算承载力准确性较好, 且安全度高.

表 4 实测屈服弯矩和计算屈服弯矩

试件编号	$M_y^t/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y^c/(\text{kN}\cdot\text{m})$	M_y^t/M_y^c
6C406D	38.98	36.38	1.07
6C606D	42.10	37.00	1.14
6C406G	42.43	37.46	1.13
6C606G	43.13	38.09	1.13

3 数值模拟

3.1 有限元(Finite Element, FE)模型

由于动态加载试验中裂缝发展速度很快, 且无法直接观察到内部钢筋的变化, 很难深入了解 RC 梁的损伤过程. 因此, 采用 LS-DYNA 程序来模拟和预测 RC 梁在四点弯曲动态加载下的损伤机理和失效模式. 在 FE 模型中, 所有部件均采用三维实体单元. 为保证数值模拟的准确性, 采用等比例全模型建模, 单位制为 g-mm-ms. 数值模拟中仅对下支座进行全约束, 其他部分均不设置约束, 利用 CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 关键字模拟钢筋与混凝土之间的接触. 为了保证网格质量, 模型采用六面体网格划分, 6 mm 的网格尺寸可以保证较高的计算精度, 网格划分后的模型如图 6 所示.

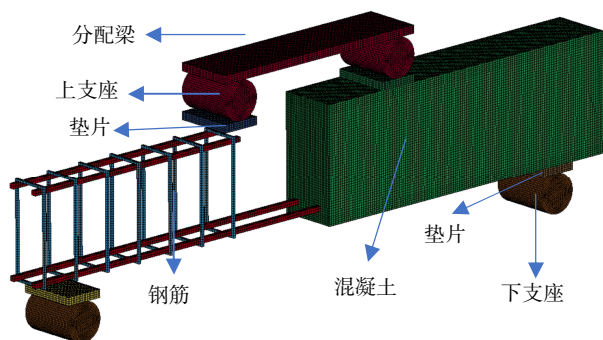


图 6 有限元模型

3.2 材料模型

3.2.1 混凝土

采用 MAT_159(MAT_CSCM_CONCRETE)对混凝土进行建模, 该材料模型可以准确预测混凝土结构在动态加载下的损伤. 在 LS-DYNA 程序中该材料模型可以根据输入的混凝土的轴压强度和最大骨料尺寸自动计算其他所有材料参数. 采用单元侵蚀参数(ERODE)值删除变形较大单元.

本研究将 ERODE 值设定为 1.1, 即当单元的最大主应变超过 0.1 时, 单元将从数值模型中删除. 混凝土的密度为 $2.32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 最大骨料尺寸 30 mm, 其他参数依照实测值进行选取.

3.2.2 钢筋

采用 MAT_003(MAT_PLASTIC_KINEMATIC)材料模型对钢筋进行建模, 该材料模型被广泛应用于模拟钢筋混凝土结构中的钢筋. 本研究钢筋密度为 $7.89 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、杨氏模量为 200.0 GPa、泊松比为 0.3, 屈服强度和伸长率均使用试验值, 使用 Cowper-Symonds 模型模拟钢筋的应变率效应.

3.2.3 垫片、支座和分配梁

试验中垫片、支座和分配梁均使用高强度钢, 并未发现变形, 因此使用关键字 MAT_020(MAT_RIGID)来模拟垫片、支座和分配梁.

3.3 数值模拟结果与试验结果对比

6C406D 和 6C406G 试件在四点弯曲动态加载下的试验和数值模拟损伤结果如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 裂缝发展形态基本相同, 数值模拟可以较好模拟 RC 梁在四点弯曲快速加载下的破坏模式.

试验与仿真的荷载—挠度曲线对比如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 两者发展趋势基本相同. 同时可知, 6C406D 试件的实测和数值模拟屈服荷载分别为 155.90 kN 和 173.44 kN, 误差为 11.3%, 6C406G 试件的实测和数值模拟屈服荷载分别为 169.70 kN 和 193.18 kN, 误差为 13.8%. 可见数值模拟结果与试验结果基本一致, 数值模拟可以较准确地反映 RC 梁在不同加载速度下的损伤模式.

3.4 基于数值模拟的损伤机理分析

试验采用连续快速加载方法, 所有试验均在 300 ms 内完成加载, 而裂缝拓展需要时间, 因此通过肉眼难以准确观察试件裂缝的发展过程. 而

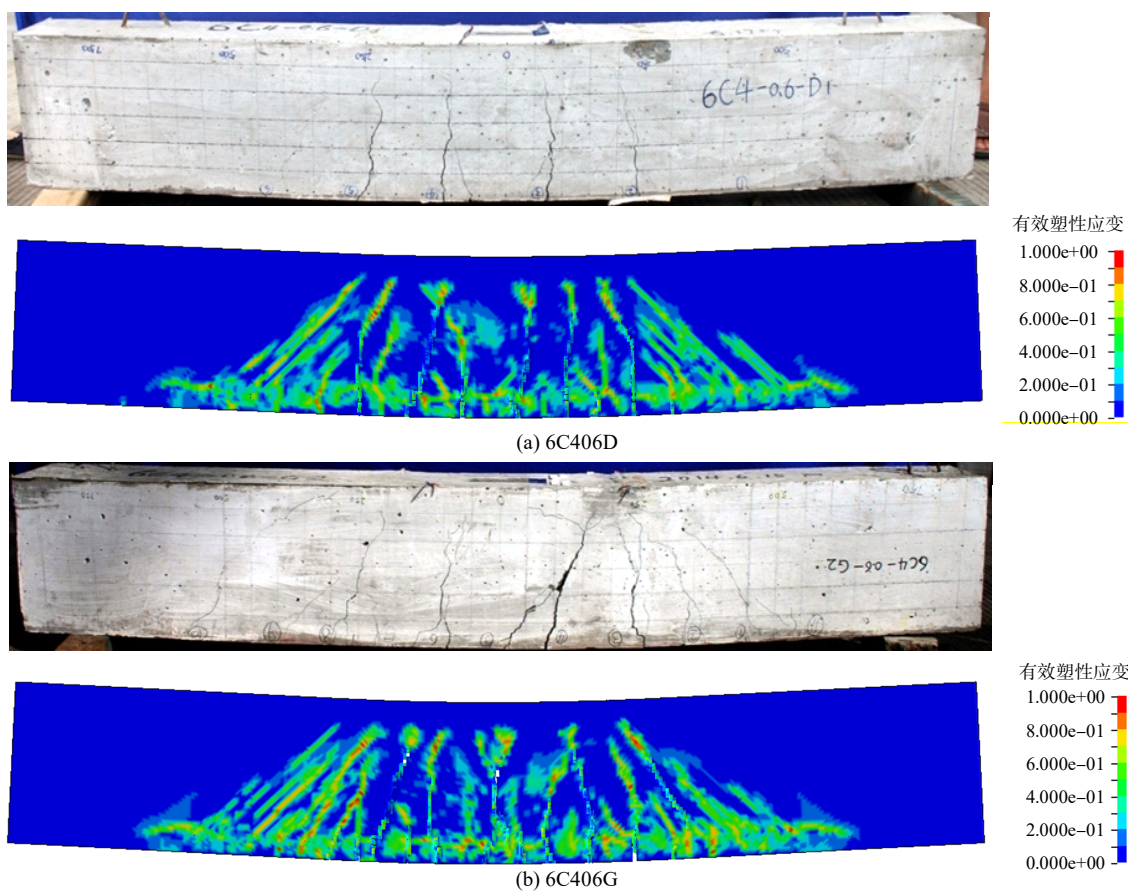


图7 破坏模式

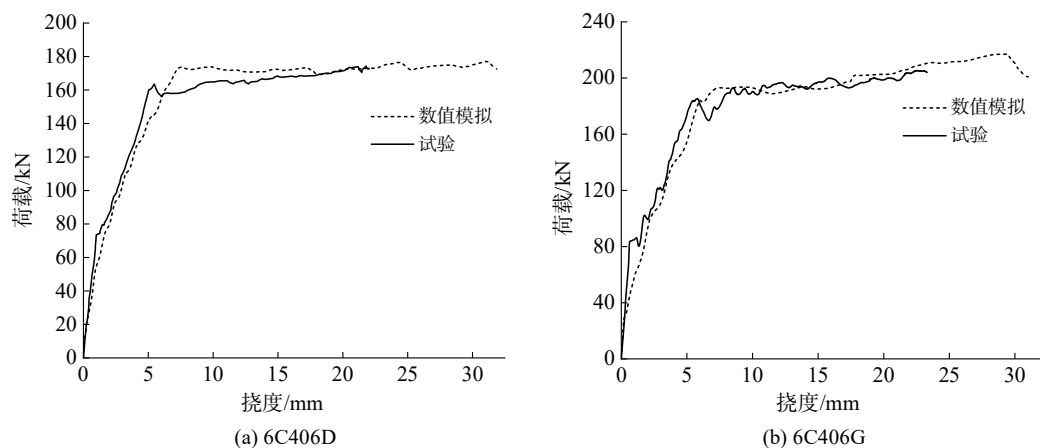


图8 荷载—挠度曲线

试验中钢筋的变化仅能通过应变片输出的数据来推测, 因此有必要通过数值模拟来分析 RC 梁在四点弯曲动态加载下的损伤机理。

以 6C406D 工况为例, 图 9 展示了该试件的动态损伤过程。随着在梁上施加荷载, 试件进入弹性阶段, 此阶段整体变形较均匀, 试件中性轴位于高度方向的中线上。随着荷载逐渐增加, 35 ms 时在

梁的加载点对应的底部产生了初始裂纹, 进入带裂缝工作阶段, 此时钢筋和混凝土的有效塑性应变分布如图 9(a)所示。从图 9(a)可以看出, 此时钢筋基本未产生塑性变形, 开裂荷载为 121.02 kN, 同时可以看出仿真测得的开裂荷载大于试验所测。原因可能是: (1)初始裂纹的宽度一般都很小, 受限于数值模拟计算精度的影响, 本研究使用的有限

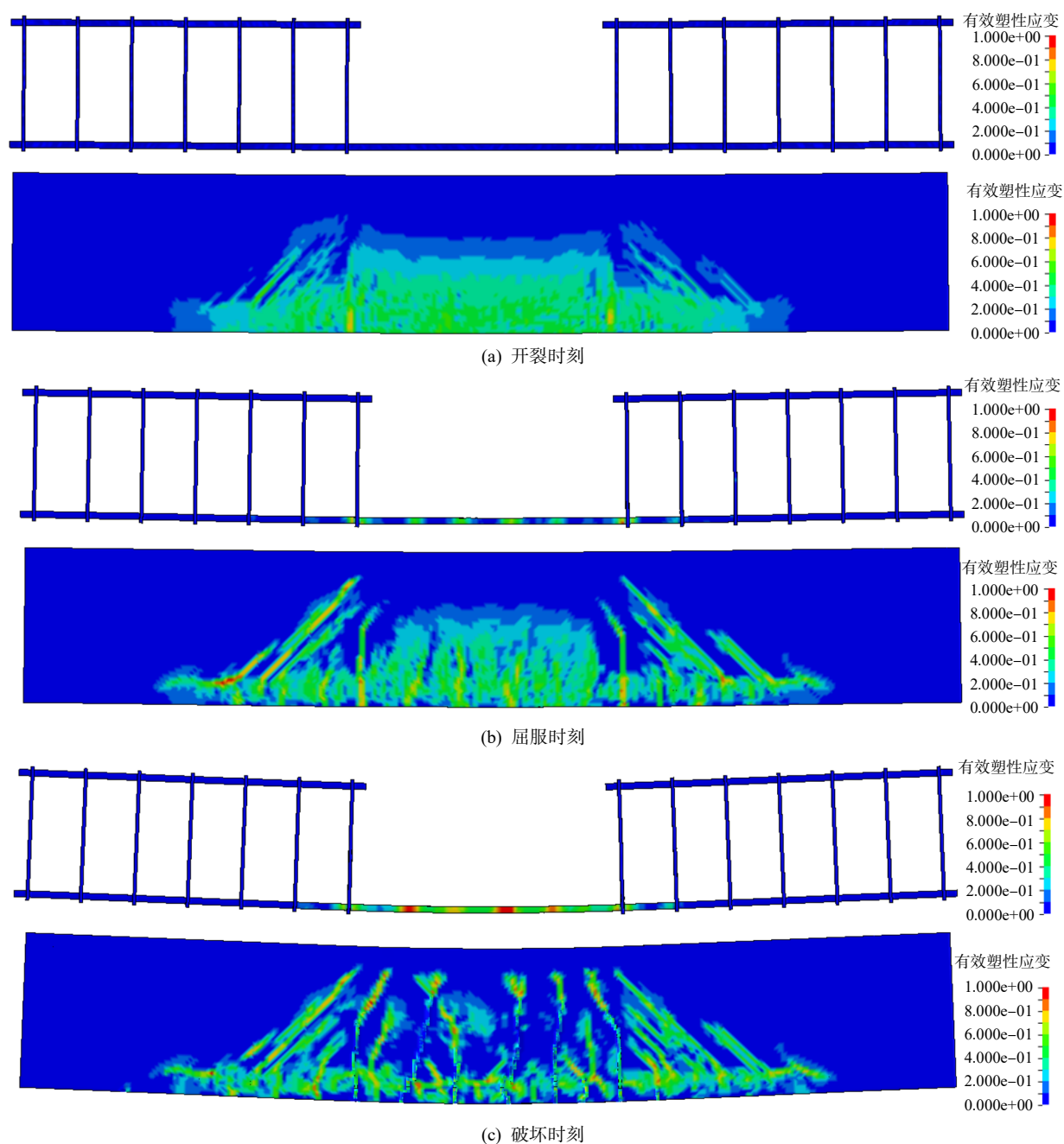


图9 数值模拟破坏过程

元模型的网格尺寸为 6 mm, 无法反映宽度较小的裂纹, 因此在数值模拟中观察到裂缝时已超过产生初始裂缝的时刻. (2)在数值模拟中有限元模型的材料是理想的, 而在实际试验中混凝土的离散性较大, 导致数值模拟与试验结果出现误差.

随着持续加载, 已有裂缝宽度不断增大, 在纯弯段不断出现新的垂直裂缝, 在受剪区逐渐出现 45°剪切裂缝, 中性轴缓慢向受压区移动. 在 60 ms 时, 钢筋应力达到屈服强度, 此时钢筋和混凝土的

有效塑性应变分布如图 9(b)所示. 这时荷载为 173.44 kN, 试件进入破坏阶段, 纵筋进入塑性变形阶段, 应力基本不变, 但是应变快速增长, 梁的挠度快速增长. 跨中的裂缝逐渐向受压区延伸, 且宽度同步增长, 中性轴快速向受压区移动. 直至加载到 205 ms 时梁彻底破坏, 此时钢筋和混凝土的破坏模式如图 9(c)所示.

本次试验中其他工况的失效过程基本与 6C406D 试验梁类似.

3.5 极限承载力分析

试验受试验机行程的限制,试件无法加载至梁彻底破坏,因此无法准确测得试验梁的极限荷载和挠度,有必要通过数值模拟来判断试验梁的极限荷载和挠度.极限荷载定义为梁从开始加载至彻底破坏过程中出现的最大荷载,对应的挠度为极限挠度.数值模拟测得的极限荷载和极限挠度见表5.为便于对比,表5中列出了文献[16]中静态加载测得的试验数据.

表5 数值模拟结果

试件编号	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	屈服挠度/mm	极限挠度/mm	延性比
6C406J	145.70	175.10	5.54	32.20	5.81
6C606J	146.70	185.50	5.66	36.60	6.47
6C406D	173.44	177.13	7.47	31.08	4.16
6C606D	184.22	200.02	6.91	30.22	4.37
6C406G	193.18	217.01	7.37	29.45	4.00
6C606G	199.12	223.54	6.74	27.95	4.15

从表5可以看出,极限荷载随着加载速度的提高而增大,极限挠度随着加载速度的增加而减小.提高混凝土强度会提高梁在动态加载下的极限荷载,减小梁的极限挠度,但是影响幅度较小.

RC梁的延性比是衡量其变形能力的重要指标,延性比定义为梁极限状态时跨中挠度与梁屈服状态时跨中挠度的比值.从表5可以看出,随着加载速度的增加,梁的延性比下降,且配置C60混凝土的梁的延性比更高.

4 结论

对不同混凝土强度的HTRB600 RC梁进行了不同加载速度的四点弯曲试验,研究了梁的承载能力.使用LS-DYNA程序建立了有限元模型,通过数值模拟分析了梁的动态损伤机理和极限承载力,主要结论如下:

(1)HTRB600 RC梁在四点弯曲快速加载下的破坏模式均为弯曲破坏,破坏过程可以分为弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段.建立了准确的FE模型,发现梁的裂缝发展过程为:首先在梁的加载点对应的底部产生裂纹,随后裂缝在纯弯段逐渐增加,同时受剪区开始出现斜向裂纹,纵筋屈服后裂缝的宽度和深度不断增大,直至彻底破坏.

(2)梁的屈服荷载随着加载速度的增加有所提升.6C406试件的屈服荷载分别逐级增加了7.0%和8.9%;6C606试件的屈服荷载分别逐级增加了14.8%和2.4%.

(3)考虑材料强度动态提升,然后使用规范中公式可以准确预测梁在快速加载下的屈服弯矩.

(4)使用LS-DYNA程序研究了梁的极限承载力.极限荷载随着加载速度的增加而增加,极限挠度和延性比随着加载速度的提高而减小,混凝土强度对极限承载力影响较小.

参考文献:

- [1] 白力更,刘维亚.超高强钢筋在混凝土结构中的研究与应用[J].建筑结构,2016,46(12):49-53.
- [2] 公伟,胡克旭,王懿迪.HTRB600级高强钢筋高温后力学性能试验研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2017,34(1):6-11.
- [3] 王丽梅,周布奎,卢芳云,等.HTRB700钢筋混凝土梁静载抗弯性能试验研究[J].防护工程,2020,42(1):18-23.
- [4] 姚贤华,管俊峰,刘霖艾,等.配置600MPa高强钢筋的混凝土梁裂缝宽度试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(6):169-181.
- [5] 肖诗云,曹闻博,潘浩浩.不同加载速率下钢筋混凝土梁力学性能试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(12):142-146.
- [6] 李磊,何翔,孙敖,等.HRB500钢筋混凝土梁静动态受弯承载力试验研究[J].中国测试,2016,42(10):49-55.
- [7] 邹笃建,刘铁军,滕军,等.混凝土梁式构件弹性模量的应变率效应研究[J].振动工程学报,2011,24(2):170-174.
- [8] 袁健,易伟建.加载速率对钢筋混凝土梁受剪性能影响的试验研究[J].振动与冲击,2019,38(7):119-127.
- [9] 项长生,孙伟,周宇.低速冲击下钢筋混凝土深梁抗冲击性能及其损伤评估[J].兰州理工大学学报,2021,47(2):113-121.
- [10] 周锡武,汪祥宇,张稳,等.不锈钢钢筋混凝土梁动态损伤试验与数值模拟[J].铁道科学与工程学报,2021,18(9):2400-2407.
- [11] GUO J L, CAI J, CHEN Q J, et al. Dynamic behaviour and energy dissipation of reinforced recycled aggregate concrete beams under impact[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214:143-157.
- [12] 伍敏,黄于倩,潘仁胜,等.NC-UHPC组合梁抗冲击性

- 能的数值研究[J]. 工程科学学报, 2024, 46(2):354-364.
- [13] ZHANG C W, GHOLIPOUR G, MOUSAVI A A. Nonlinear dynamic behavior of simply-supported RC beams subjected to combined impact-blast loading[J]. Engineering Structures, 2019, 181:124-142.
- [14] DAS ADHIKARY S, LI B, FUJIKAKE K. Dynamic behavior of reinforced concrete beams under varying rates of concentrated loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 47:24-38.
- [15] GB/T 50152—2012. 混凝土结构试验方法标准[S].
- [16] 张丛琨, 张仲昊, 汪维, 等. 超高强钢筋混凝土梁在静态加载下的抗弯性能试验[J]. 兵工学报, 2023, 44:107-116.
- [17] GB 50010—2010. 混凝土结构设计规范[S].
- [18] 李磊, 张磊, 魏久淇, 等. 新型高强钢筋动态拉伸力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(19):62-68, 106.
- [19] 陈肇元. 爆炸荷载下的混凝土结构性能与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

Dynamic failure mechanism and flexural capacity of HTRB600 reinforced concrete beams

ZHANG Congkun¹, ZHANG Zhonghao¹, WANG Wei¹, LI Lei^{2,3}, WEI Jiuqi^{2,3}

(1.Key Laboratory of Impact and Engineering of Ministry of Education of China, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Institute of Defense Engineering, Academy of Military Sciences of Chinese People's Liberation Army, Luoyang 471023, China;

3.Henan Provincial Key Laboratory of Special Protective Materials, Luoyang 471023, China)

Abstract: In recent years, China has vigorously promoted the use of new high-strength steel bars (HSSB) such as HTRB (heat-treated ribbed bars), and the dynamic characteristics and failure modes of reinforced concrete (RC) members vary significantly due to the influence of loading rates. In order to study the dynamic mechanical properties of RC beams reinforced with HTRB600, four groups of tests with different loading speeds and different concrete strengths were designed. The results show that the failure process of the beams under dynamic loading can be divided into three stages, including elastic stage, working stage with cracks and failure stage. The yield load increases with the increase of loading speed. After replacing the static strength of material with dynamic strength, the formula in the specification can accurately predict the yield bending moment of the beams. An accurate finite element model was established using LS-DYNA, and the failure mechanism and the ultimate flexural capacity of the beams were analyzed by numerical simulation. The results suggest that the ultimate load of the beams increases with the increase of the loading speed, the ultimate deflection and the ductility ratio both decrease with the increase of the loading speed, and the concrete strength has little effect on the ultimate flexural capacity.

Key words: high-strength steel bar; reinforced concrete beams; flexural capacity; dynamic loading; numerical simulation; failure mechanism

(责任编辑 史小丽)