

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.06.010

# 二次受力下钢筋 RPC 外包型钢梁的受弯性能

卜良桃,杨丁辉

(湖南大学土木工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘要:**为探究新型材料对钢结构性能的增强效果,通过外包钢筋活性粉末混凝土(RPC)对受荷状态下的型钢梁进行加固并分析其受弯性能。通过二次受力下的抗弯试验,分析了钢筋 RPC 外包型钢梁的破坏过程和初始荷载、RPC 强度、型钢强度对梁抗弯承载力的影响,并对试验结果进行了有限元模拟验证。结果表明:在不同参数影响下,外包钢筋 RPC 增强后的型钢梁与纯钢梁相比抗弯承载力提高 1.7~2 倍,破坏过程表现出良好的延性;受力过程中型钢与 RPC 界面未发生黏结破坏,两者能够共同工作;钢筋 RPC 外包型钢梁的极限承载力随初始荷载的增大而减小,随 RPC 强度和型钢强度增大而增大。根据试验结果,提出了二次受力下钢筋 RPC 外包型钢梁受弯承载力计算公式以及 RPC 强度折减公式,试验值、计算值和模拟值三者吻合良好。

**关键词:**钢梁;二次受力;活性粉末混凝土;抗弯;承载力

中图分类号:TU398      文献标志码:A      文章编号:1000-1980(2021)06-0550-09

## Flexural behavior of reinforced RPC wrapped steel beams under secondary loading

BU Liangtao, YANG Dinghui

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to explore the enhancement effect of new materials on the performance of steel structures, the flexural behavior of steel beams under load is analyzed by strengthening and transforming the steel beams with Reinforced Reactive Powder Concrete (RPC). Through the bending test of the test beam under the secondary load, the failure process of the beam was analyzed. Then, the influences of initial load, RPC strength, and section steel strength on the bearing capacity of beam were studied. The test results were verified by the finite element simulation. The research shows that under the influence of different parameters, the bending capacity of the steel beam wrapped by reinforced RPC is 1.7~2 times higher than that of the pure steel beam and the specimen shows better ductility during the failure process. Meanwhile, no bond failure occurs at the interface between the section steel and the RPC, and both can work well together. The ultimate bearing capacity of the beam decreases with the increase of the initial load and increases with the increase of RPC strength and section steel strength. According to the experimental results, the calculation formula for the flexural bearing capacity of steel beam wrapped by reinforced RPC under the secondary load and the RPC strength reduction formula are proposed. The experimental value, the calculated value and the simulated value are in good agreement.

**Key words:** steel beam; secondary loading; reactive powder concrete; bending resistance; bearing capacity

钢结构作为建筑结构常见形式之一,在服役过程中因老化损伤,遭受极端环境,使用功能改变等原因,其性能无法满足正常使用需求,因此需要对现役钢结构建筑进行修复和增强。传统钢结构加固方法<sup>[1]</sup>主要有焊接加固、粘接加固、预应力加固、连接件加固等,但这些方法都无法解决钢结构耐火性、耐腐蚀性差的问题。为弥补上述不足,王元清等<sup>[2-4]</sup>提出了一种通过外包混凝土增强钢结构性能的方法,对外包钢筋混凝土加固钢柱的轴压性能进行了研究,杨文强等<sup>[5-6]</sup>将该方法应用在钢框架结构加固中,并进一步研究了施工的构造措施。外包混凝土加固法对钢结构无焊接损伤,能显著提高其承载力、刚度和稳定性。但普通混凝土强度低,脆性大,且材料中含有石子等粗骨料,难以保证浇筑的密实性,对钢结构的修复和增强成效有限。

**基金项目:** 中国工程建设标准化协会科技项目(建标协字[2018]030号)  
**作者简介:** 卜良桃(1963—),男,教授,博士,主要从事工程结构加固技术研究。E-mail:plt63@126.com  
**引用本文:** 卜良桃,杨丁辉.二次受力下钢筋 RPC 外包型钢梁的受弯性能[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):550-558.  
BU Liangtao, YANG Dinghui. Flexural behavior of reinforced RPC wrapped steel beams under secondary loading[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(6):550-558.

为此,本文通过外包钢筋活性粉末混凝土(reactive powder concrete,RPC)的方式对受荷状态下的型钢梁进行加固,以满足钢结构更高的使用要求。RPC 是一种由水泥、高活性掺合料(硅灰、矿渣等)、高效减水剂和钢纤维配制出的新型水泥基复合材料,与普通混凝土相比,RPC 材料的机体均质性和密实度更高,在保证更高强度的同时又兼备了良好的延性,与钢结构的界面黏结性更强<sup>[7]</sup>。因其优异的力学性能、耐久性和体积稳定性,RPC 被广泛应用于桥梁、隧道和海工结构等领域<sup>[8-9]</sup>。近年来,不少学者将 RPC 运用在不同结构的加固改造中<sup>[10-12]</sup>,但对钢结构改造尚无先例。本文通过试验与有限元模拟相结合的方法研究了二次受力下钢筋 RPC 外包型钢梁的受弯性能,提出了抗弯承载力计算公式,旨在为该方法在实际工程中的设计应用提供依据。

# 1 试验概况

## 1.1 试验设计

试验设计了 7 根试验梁 RB0 ~ RB6 和 1 根纯型钢对比梁 B0,所有试件的原型钢梁选用同一类型热轧工字型钢,型号为 I32 a,梁长为 4 500 mm。试验梁一次和二次受力采用两加载点三等分的加载方式,支座两端外伸 150 mm,纯弯段长度为 1 400 mm,方便研究梁在纯弯状态下的受力性能。试验变量为初始荷载、RPC 强度和型钢强度,设计参数如表 1 所示。RPC 与钢材力学性能指标按照 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》<sup>[13]</sup>和 GB/T 228. 1—2010《金属材料拉伸实验》<sup>[14]</sup>的要求进行试验测试,结果见表 2 和表 3。

表 1 试验梁设计参数

Table 1 Design parameters of test beams

| 构件编号 | 型钢强度等级 | RPC 强度等级 | 初始荷载占极限荷载百分比/% |
|------|--------|----------|----------------|
| B0   | Q235   |          |                |
| RB0  | Q235   | R120     | 0              |
| RB1  | Q235   | R120     | 30             |
| RB2  | Q235   | R120     | 50             |
| RB3  | Q235   | R120     | 70             |
| RB4  | Q235   | R100     | 50             |
| RB5  | Q235   | R140     | 50             |
| RB6  | Q345   | R120     | 50             |

表 2 RPC 力学性能指标

Table 2 Mechanical performance index of RPC

| RPC 强度等级 | 立方体抗压强度/MPa | 轴心抗压强度/MPa | 轴心抗拉强度/MPa | 弹性模量/GPa |
|----------|-------------|------------|------------|----------|
| R100     | 109. 5      | 96. 7      | 8. 2       | 39. 5    |
| R120     | 133. 5      | 120. 4     | 10. 7      | 42. 7    |
| R140     | 147. 3      | 134. 7     | 12. 1      | 44. 6    |

表 3 钢材力学性能指标

Table 3 Mechanical performance index of steel

| 钢材规格    | 屈服强度/MPa | 极限强度/MPa | 屈服应变/ $10^{-6}$ | 弹性模量/GPa |
|---------|----------|----------|-----------------|----------|
| Φ 8 钢筋  | 339. 9   | 502. 1   | 1 700           | 210      |
| Φ 10 钢筋 | 341. 6   | 510. 5   | 1 700           | 210      |
| Q235 型钢 | 240. 4   | 407. 3   | 1 200           | 206      |

根据文献[15],纵筋的设置能大幅提升梁的抗弯承载力,钢纤维和箍筋的设置不仅能加强纵筋提升的效果,并且能有效约束核心区 RPC,抑制剪切裂缝和黏结裂缝的产生,因此在浇筑 RPC 前,首先对受荷状态下的型钢梁进行钢筋绑扎。试验采用的纵筋和箍筋均为 HRB335 级钢筋,纵筋采用 4 Φ 12 对称分布,箍筋采用 Φ 8@200 分布,型钢居中放置,所有试件外包钢筋 RPC 后截面尺寸为 200 mm × 400 mm,截面形式如图 1 所示。由于实际工程中型钢梁两端并无 RPC 保护层厚度,为更好模拟真实受力状态,设计在型钢梁两端焊接钢板,钢板用来模拟柱对型钢梁端部附近 RPC 的约束作用,同时方便受荷状态下支撑模板。

试验中主要测量的数据包括所施荷载、挠度和截面应变等。施加的荷载由电液伺服压力机控制系统直接读取;梁的挠度由对称布置在跨中,加载点和支座处的 5 个百分表测得;应变数据通过静态电阻应变仪自动采集。试验梁的测点布置方案如下:一次受力阶段,在型钢梁跨中位置处,沿腹板高度均匀布置 5 个应变片,上下翼缘各布置 3 个应变片,用于测量跨中位置应变沿截面高度分布规律;二次受力阶段,在 4 根纵筋的跨中位置处各布置一个应变片,RPC 在跨中位置处沿截面高度均匀布置 5 个应变片,以便验证平截面假定。试验加载装置如图 2 所示。

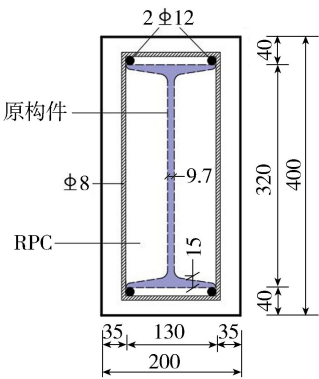


图 1 试验梁截面形式(单位:mm)  
Fig. 1 Section form of test beam (unit: mm)

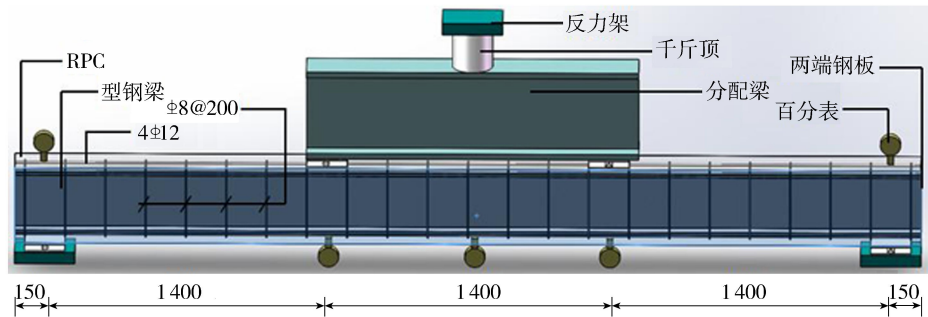


图 2 试验装置(单位:mm)  
Fig.2 Test device (unit: mm)

1.2 试验加载方案

试验梁的加载方案按照 GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》<sup>[16]</sup>的要求,采用两阶段受力的方式进行分级加载,两个阶段正式加载前均进行预加载。第 1 阶段对型钢梁施加所需的初始荷载,每级加载后记录挠度与应变。型钢梁达到所需初始荷载后在受荷状态下绑扎钢筋骨架,支模浇筑 RPC 并养护,过程中观察压力控制系统并及时调整压力机,保持荷载基本不变。养护完成后对试验梁进行第 2 阶段加载,每级加载预计极限荷载的 10%,接近预计的极限荷载时,根据梁的受损情况,每级加载不超过预计极限荷载的 5%,直至破坏,每级加载后观察梁的变形和裂缝开展情况,并记录相应的挠度与应变。对比梁 B0 直接分级加载至屈服,试验测得 B0 的极限承载力为 298 kN。

2 试验结果分析

2.1 荷载-挠度曲线

试验梁破坏过程与型钢高强混凝土梁类似,荷载-挠度曲线特征表现为一般弯曲破坏<sup>[17]</sup>,受力过程可分为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段 3 个阶段,如图 3 所示。RB0 比 B0 承载力提升约 2 倍,曲线斜率也明显大于 B0,说明型钢梁在加固后承载力和截面刚度显著增强。在弹性阶段,试验梁 RB0 曲线基本呈线性增长;开裂后,由于材料中的钢纤维具有“桥联”作用<sup>[18]</sup>,在提高 RPC 抗裂性的同时承担了部分拉力,使得梁在开裂之初仍能保持较大的刚度,之后随着荷载逐渐增大曲线斜率渐进变小,此时试验梁处于弹塑性阶段;破坏时,试验梁由于型钢屈服而产生较大变形,挠度剧增,但仍能保持稳定的承载力,曲线出现屈服平台但未发生突变。在受力过程中由于钢纤维被拉断需要大量耗能<sup>[19]</sup>,因此曲线较为饱满,说明试验梁破坏过程具有良好的延性。

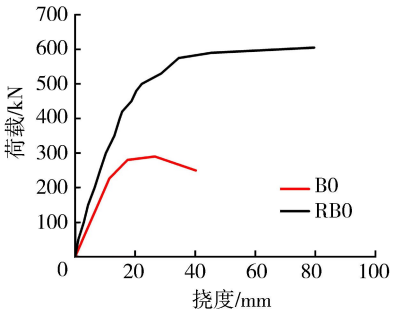


图 3 RB0 与 B0 荷载-挠度曲线  
Fig.3 Load-deflection curves of RB0 and B0

RB0 ~ RB3 探究了不同初始荷载对试验梁受力性能的影响,4 根梁的初始荷载分别占极限荷载的 0、30%、50% 和 70%,其荷载-挠度曲线如图 4(a)所示,4 条曲线的增长趋势相似,其中 RB1、RB2、RB3 曲线的

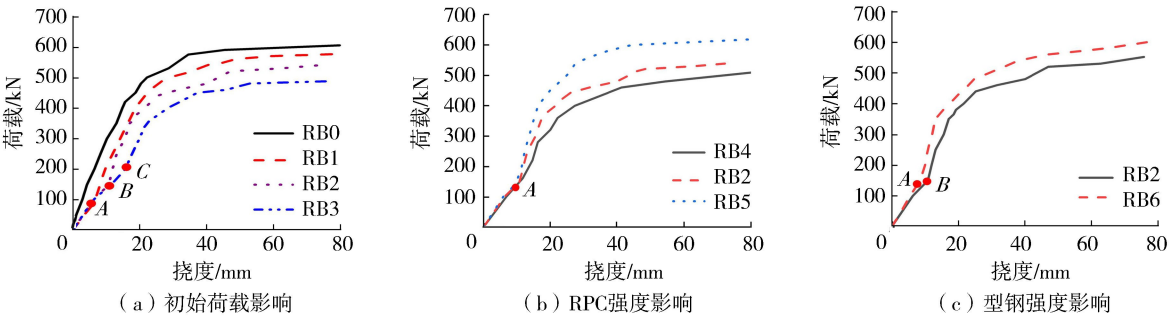


图 4 荷载-挠度曲线  
Fig.4 Load-deflection curves

变化特征与钢纤维水泥砂浆加固 RC 梁相似<sup>[20]</sup>,在外包钢筋 RPC 前后出现分界点,图中分别用 A、B、C 表示。从承载力角度看,初始荷载越大,试验梁极限承载力越低,RB1 ~ RB3 分别占 RB0 承载力的 96%、91.8% 和 84.2%。这是因为 RB1 ~ RB3 的原型钢梁相比外包部分存在应力超前现象,初始荷载越大,原型钢梁越早失效,导致外包部分材料的利用率较低,承载力小于一次整体浇筑试件 RB0。从刚度角度看,RB1 ~ RB3 在分界点以下曲线近似重合,二次受力时外包部分对型钢梁产生约束,梁的截面刚度增大,且在弹性阶段,曲线斜率相似,说明截面刚度增强的幅度相近。从梁的性能增强效果看,初始荷载越大,二次受力时的弹性阶段越短,说明试验梁刚度增强效果越弱,这是因为初始荷载越大,型钢梁越早屈服,屈服后的型钢梁形变继续增大但不贡献承载力,试验梁难以长时间保持较大刚度,会快速进入屈服阶段,承载力也会随之降低。对于 RB0、RB1 来说,由于初始荷载较小,在受拉区 RPC 开裂初期依旧能保持较大的刚度,但 RB3 几乎在受拉区 RPC 开裂的同时就进入弹塑性阶段,曲线最先出现非线性。在实际工程中,当原型钢梁屈服时,就认为试件已经破坏,因此当初始荷载达到极限荷载的 70% 时,虽然加固梁的承载力较型钢梁提升了近 1.7 倍,但此时刚度的增强效果较差,外包部分材料的利用率低,梁的整体性能增强效果并不理想。

RB4、RB2、RB5 探究了不同的 RPC 强度对试验梁承载力的影响,三者的 RPC 强度分别为 100 MPa、120 MPa 和 140 MPa,其荷载-挠度曲线如图 4(b) 所示,图中 A 点代表三者一次与二次受力的分界点,由于 3 根试件所用的型钢梁和施加的初始荷载均相同,因此在 A 点以下 3 条曲线基本重合。在 A 点以上,随着 RPC 强度越高,梁的承载力和刚度也越大。与 RB4 相比, RB2、RB5 的承载力分别提高了 1.07 倍和 1.13 倍,这是由于 RPC 提供的承载力是极限承载力的主要部分,在受力过程中,型钢梁的应力超前,会首先进入屈服阶段,此时外包的钢筋 RPC 部分将承担更多的外部荷载,越高强度的 RPC 就能提供越高的承载力;其次, RPC 强度越高与型钢梁之间的化学胶结力也越大,使两者受力过程中有更好的黏结力,保证了试件的整体性,进而提高了承载力。

不同型钢强度对应的荷载-挠度曲线如图 4(c) 所示,图中 RB2 和 RB6 型钢强度分别为 Q235、Q345, A、B 两点分别代表两者加固增强前后的分界点。RB6 较 RB2 承载力提高了 1.1 倍,这是因为原型钢梁强度越高其承载力越高,在试验梁受力过程中贡献了更多的承载力,因此梁的承载力随着型钢强度增大而增大。

2.2 裂缝开展分析

试件 RB0 ~ RB6 裂缝形态大致相同,包括多条弯曲裂缝和少数横向裂纹,试验梁破坏后形态完好,在受力过程中型钢与 RPC 界面处未出现典型的黏结破坏裂缝<sup>[21]</sup>。试验梁的最终破坏形态为:纯弯段受拉区 RPC 开裂,部分钢纤维被拔出,形成多条纵向贯穿裂缝,受拉纵筋屈服;受压区 RPC 在加载点处出现细小横向裂纹但未被压溃,部分试验梁的受压钢筋屈服。试件 RB0 的跨中位置处,受压区 RPC 出现横向裂缝,宽度为 1 ~ 2 mm,未发生剥离,其他现象与试件 RB0 ~ RB6 类似,试验梁破坏形态如图 5 所示。

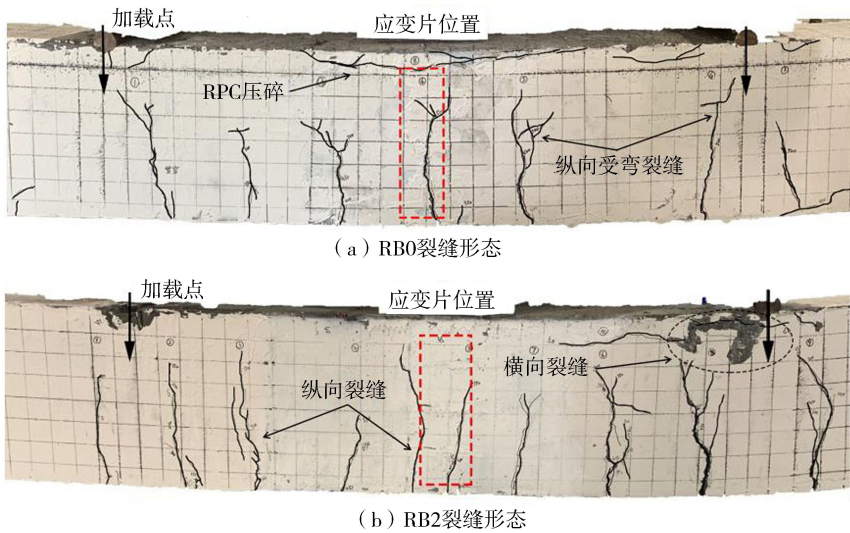


图 5 试验梁破坏形态

Fig. 5 Failure pattern of test beam

以试件 RB2 为例,试验梁裂缝发展过程为:二次受力加载初期,梁的变形不明显,试件表面无裂缝产生;当荷载达到 300 kN 左右时,受拉区出现一条竖向裂缝,随着荷载增大,试件产生更多新增裂缝,既有裂缝开始竖直向上发展,与普通混凝土开裂后不同的是,由于钢纤维的作用,裂缝的延伸和加宽受到抑制,裂缝特征表现为密而细;当荷载接近极限承载力时,试验梁变形明显,加载过程中伴有部分钢纤维被拉断发出的啪啪声,纵向弯曲裂缝分布均匀,间距为 200 ~ 250 mm,与箍筋分布相似,裂缝长度为 250 ~ 300 mm,最大裂缝宽度为 11 mm。受压区 RPC 在加载点处产生多条细密的横向裂缝,宽度均小于 1 mm,除此之外受压区 RPC 无明显压碎迹象。

2.3 应变分析

无初始荷载试件 RB0 应变随荷载变化规律如图 6 所示,型钢、RPC、钢筋应变在加载初期基本随荷载增大沿控制截面呈线性增长,且三者应变曲线基本重合,说明受力过程中三者协同工作,但由于测点位置略有偏差,导致钢筋和 RPC 应变略大于型钢。从图 6(a)可知,当荷载约 200 kN 时,RPC 拉应变达到  $346\times10^{-6}$ ,参考文献[22]中 RPC 极限应变取值,此处 RPC 拉应变已经超过极限拉应变,受拉区出现裂缝,但由于开裂后钢纤维会继续承担拉力,因此受拉区 RPC 不会立刻退出工作,曲线仍近似保持线性。荷载超过 350 kN 后三者应变曲线出现非线性,此时型钢受拉翼缘应变达到  $1485\times10^{-6}$ ,开始进入塑性阶段。从图 6(b)可知,荷载超过 500 kN 时三者曲线出现非线性,接近极限荷载时,受压区 RPC 所测压应变为  $3796\times10^{-6}$ ,基本达到材料的极限压应变限值,型钢受压翼缘和受压钢筋测得最大压应变分别为  $2437\times10^{-6}$  和  $2509\times10^{-6}$ ,远超材料的屈服应变,说明破坏时受压钢筋屈服,受压区 RPC 被压碎。

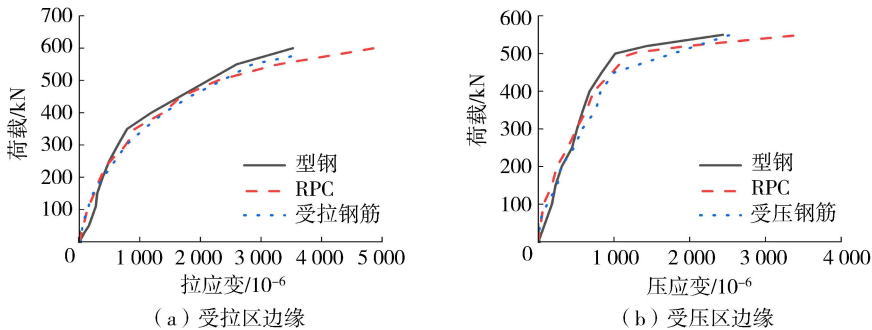


图 6 无初始荷载试件 RB0 荷载-应变曲线

Fig. 6 Load-strain curve of typical specimen RB0 without initial load

受荷下增强试件 RB2 的边缘应变变化规律如图 7 所示,与 RB0 相比最明显的区别就是外包钢筋 RPC 部分与型钢相比,产生了应变滞后现象,随着初始荷载增大,滞后现象越明显。在二次受力加载初期,钢筋和 RPC 应变曲线变化一致,两者与型钢应变的差值也随荷载增大基本保持不变,说明原型钢梁与外包部分在受力时能保持协调变形。在二次受力时,型钢曲线斜率增大,随后变缓,这是由于新增外包部分为型钢承担了部分拉应力,因此相同荷载下型钢形变变小,随后两者开始共同受力。由图 7(a)可知,型钢受拉翼缘在 300 kN 左右时应变为  $1369\times10^{-6}$ ,开始进入塑性阶段,钢筋与 RPC 曲线斜率开始同步变小。由图 7(b)可知,当荷载超过 430 kN 时,型钢受压翼缘应变曲线出现非线性,此时受压翼缘测得压应变为  $1287\times10^{-6}$ ,开始进

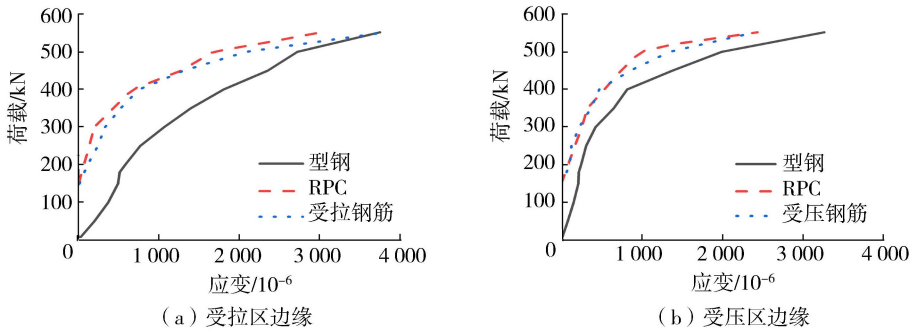


图 7 受荷试件 RB2 荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curve of typical loading specimen RB2

入屈服。在试件破坏时,受压区 RPC 所测得压应变为  $2\,440\times10^{-6}$ ,受压钢筋应变为  $2\,368\times10^{-6}$ ,型钢受压翼缘应变为  $3\,269\times10^{-6}$ ,说明此时受压钢筋基本达到屈服,但 RPC 未达到其极限压应变,其抗压强度并未被充分利用。

3 承载力计算方法研究

受荷状态下加固的试件与一次整体浇筑而成的试件不同,在整个受力过程中,由于原型钢梁存在应力超前而外包部分存在应变滞后的现象,两者无法同时达到峰值应力,因此二次受力下试件的极限承载力要比一次整体浇筑试件要低<sup>[23]</sup>。在实际工程中,当型钢梁屈服时,认为梁已经达到极限状态,此时受压区 RPC 还未达到峰值应力,其抗压强度未得到充分利用,因此考虑对 RPC 抗压强度进行折减。设  $\varphi$  为 RPC 抗压强度折减系数,即  $\varphi=\sigma/f_c$ ,  $f_c$  为 RPC 轴心抗压强度。极限状态下底部受拉钢筋屈服,受压钢筋有部分屈服,为简化计算认为钢筋骨架此时全部屈服,不再考虑钢筋强度折减。

在推导折减系数  $\varphi$  的过程中,因受压区 RPC 的应力分布和受力过程较为复杂,为简化计算,本文借鉴文献[24]的推导理论,进行以下假设:(a)由于纯弯段梁的纵向纤维为单向应力状态,横截面上只有正应力,为研究受压区 RPC 强度的利用率,本文忽略弯曲变形,只考虑沿梁跨度方向的轴向变形,将纯弯段部分近似看做轴心受压试件。此时,横截面上 RPC 各点正应力,形变相同且变化一致;(b)材料间不考虑黏结滑移,认为型钢梁从一次受力结束到二次受力破坏时受压翼缘的形变量与受压区 RPC 形变量是相同的;(c)型钢本构关系采用理想弹塑性二折线模型。参考文献[25]中 RPC 受压应力-应变关系,RPC 强度折减系数  $\varphi$  可按照下式计算:

$$\varphi = \frac{\sigma}{f_c} = a \frac{F_s}{\varepsilon_0 E_s} \left(1 - \frac{\sigma_s}{F_s}\right) + (5 - 4a) \left[\frac{F_s}{\varepsilon_0 E_s} \left(1 - \frac{\sigma_s}{F_s}\right)\right]^4 + (3a - 4) \left[\frac{F_s}{\varepsilon_0 E_s} \left(1 - \frac{\sigma_s}{F_s}\right)\right]^5 = 1.67 \frac{F_s}{\varepsilon_0 E_s} (1 - \beta) - 1.68 \left[\frac{F_s}{\varepsilon_0 E_s} (1 - \beta)\right]^4 + 1.01 \left[\frac{F_s}{\varepsilon_0 E_s} (1 - \beta)\right]^5 \tag{1}$$

式中: $a$ ——待定参数,本文取  $a=1.67$ <sup>[25]</sup>;  $F_s$ ——型钢梁破坏时受压翼缘最大应力值,MPa;  $\varepsilon_0$ ——RPC 峰值压应力对应的压应变;  $E_s$ ——型钢弹性模量,MPa;  $\sigma_s$ ——一次受力后型钢受压翼缘最大应力值,MPa;  $\beta$ ——初始荷载所占极限荷载百分比。

根据试验结果,受压区 RPC 的应变分布在二次受力过程中仍符合平截面假定,本文对 JGJ 138—2016《组合结构设计规范》<sup>[26]</sup>中框架梁的抗弯承载力计算公式进行了修正,考虑了 RPC 抗压强度折减系数和抗拉强度<sup>[27]</sup>的影响,根据极限平衡状态,得到了二次受力下钢筋计算公式:

$$\alpha_1 \varphi f_c b x - k f_t b \left(h - \frac{x}{\beta_1}\right) + f'_y A'_s + f'_a A'_{af} - f_s A_s - f_a A_{af} + N_{aw} = 0 \tag{2}$$

$$M_u \leq \alpha_1 \varphi f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) - k f_t b \left(h - \frac{x}{\beta_1}\right) \left[\frac{1}{2} \left(h - \frac{x}{\beta_1}\right) - a\right] + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) + f'_a A'_{af} (h_0 - a'_a) + M_{aw} \tag{3}$$

式中: $\alpha_1$ ——受压区 RPC 压应力影响系数;  $\beta_1$ ——受压区 RPC 压力图形影响系数;  $f_t$ ——RPC 轴心抗拉强度,MPa;  $k$ ——RPC 抗拉强度利用系数,本文取  $k=0.25$ <sup>[27]</sup>;  $b$ 、 $h$ ——加固梁截面宽度、高度,mm;  $x$ ——RPC 等效受压区高度,mm;  $f'_y$ ——钢筋抗压强度,MPa;  $A'_s$ ——受压钢筋截面面积,mm<sup>2</sup>;  $f_a$ 、 $f'_a$ ——型钢抗拉、抗压强度,MPa;  $A_{af}$ 、 $A'_{af}$ ——型钢受拉、受压翼缘截面面积,mm<sup>2</sup>;  $N_{aw}$ ——型钢腹板承受的轴向合力,N;  $h_0$ ——加固梁截面有效高度,mm;  $a$ ——型钢受拉翼缘与受拉钢筋合力点至截面受拉边缘的距离,mm;  $a'_s$ 、 $a'_a$ ——受压区钢筋、型钢翼缘合力点至截面受压边缘的距离,mm;  $M_u$ ——RPC 外包型钢梁抗弯承载力矩,N·mm;  $M_{aw}$ ——型钢腹板承受的轴向合力对型钢受拉翼缘和纵向受拉钢筋合力点的力矩,N·mm。

式(2)(3)的基本假定、相关参数的取值和计算公式与 JGJ 138—2016《组合结构设计规范》<sup>[26]</sup>和 DBJ43/T325—2017《活性粉末混凝土结构技术规程》<sup>[26-27]</sup>相同。为验证修正后理论公式的正确性,计算得出 RB0~RB6 的折减系数和承载力,将承载力计算值与试验值进行对比,结果列于表 4。由表 4 可知,理论计算值较试验值偏小,可见计算结果偏于保守,有较大的安全储备,可为工程实际应用提供参考。

表 4 试验值、计算值、模拟值结果对比

Table 4 Comparison of test value, calculated value and simulated value

| 试件编号 | $P_u/\text{kN}$ | $M_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$ | $\varphi$ | $M'_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$ | $M''_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$ | $M_u/M'_u$ | $M_u/M''_u$ |
|------|-----------------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|------------------------------------|------------|-------------|
| RB0  | 601             | 420.7                            | 0         | 383.3                             | 395.5                              | 1.097      | 1.064       |
| RB1  | 577             | 403.9                            | 0.647     | 370.1                             | 363.3                              | 1.091      | 1.112       |
| RB2  | 552             | 386.4                            | 0.462     | 357.9                             | 341.6                              | 1.079      | 1.131       |
| RB3  | 506             | 354.2                            | 0.277     | 337.1                             | 350.7                              | 1.051      | 1.011       |
| RB4  | 514             | 359.8                            | 0.518     | 351.2                             | 355.6                              | 1.024      | 1.012       |
| RB5  | 583             | 408.1                            | 0.418     | 359.1                             | 403.9                              | 1.137      | 1.059       |
| RB6  | 607             | 424.9                            | 0.551     | 413.5                             | 431.2                              | 1.028      | 0.985       |

注: $P_u$  为压力机读数; $M_u$ 、 $M'_u$ 、 $M''_u$  分别为梁的抗弯力矩实测值、公式计算值和有限元模拟值; $\varphi$  为 RPC 抗压强度折减系数计算值。

4 有限元模拟校核

4.1 有限元建模过程

采用 ABAQUS 有限元软件建立模型,主要步骤如下:(a)单元选取。RPC 与型钢部分采用 8 节点六面体线性减缩积分单元 C3D8R 来模拟,钢筋部分采用两结点线性三维桁架单元 T3D2 来模拟。(b)相互作用。型钢、RPC、钢筋骨架三者间不考虑黏结滑移,钢筋骨架通过 Embedded 命令嵌入 RPC 中,型钢与 RPC 接触面用 Tie 命令绑定处理;在加载点位置处选取大小适合的面积各用一个参考点进行耦合约束,防止点加载造成应力集中导致结果不收敛;为准确的模拟试件的二次受力过程,本文通过“\* Model Change”命令在一次与二次受力时,分别“杀死”和“激活”钢筋 RPC 部分来实现试件的二次受力<sup>[28]</sup>,如图 8 所示。(c)设置边界条件。在对应支座位置采用线约束来模拟边界条件,固定铰支座约束  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向自由度,滑动铰支座约束  $y$ 、 $z$  方向自由度。(d)网格划分。型钢和 RPC 部分网格采用六面体网格划分,钢筋骨架采用桁架杆单元划分。

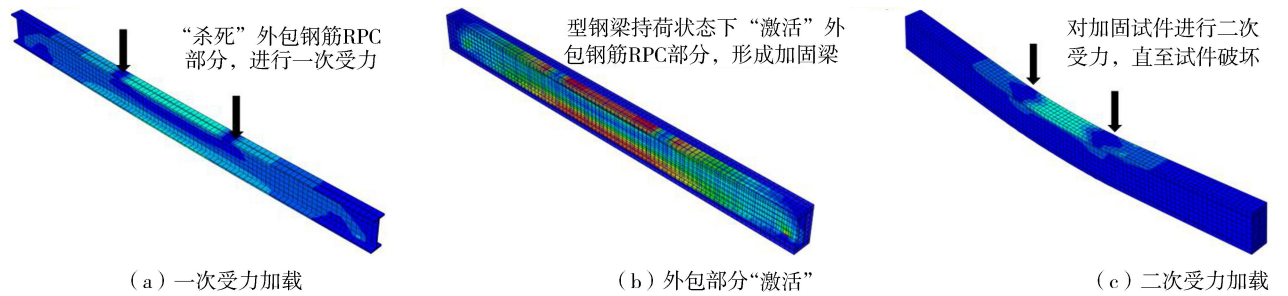


图 8 有限元模拟分析过程

Fig.8 Finite element simulation analysis process

4.2 试验与模拟结果对比

RB0 ~ RB6 抗弯承载力的模拟值与试验值对比结果如表 4 所示。由表 4 可知,模拟值与试验值结果较为接近,误差较小。各试件的有限元模型计算所得到的荷载-挠度曲线与试验曲线基本吻合,以试件 RB6 为例,如图 9 所示,有限元分析结果能较准确地模拟出试验梁一次与二次受力过程中各个阶段的受力特征。图 10 为试验梁 RB2 的模拟损伤过程,由图 10 可知,RB2 的裂缝开展过程和分布形态与试验现象相符,能准确

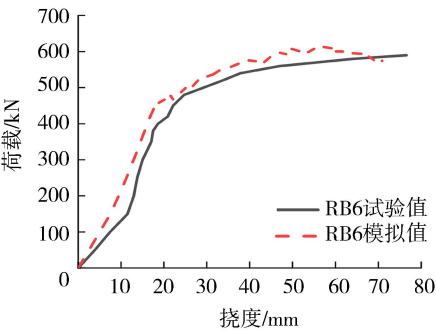


图 9 荷载-挠度曲线对比

Fig.9 Comparison of load-deflection curves

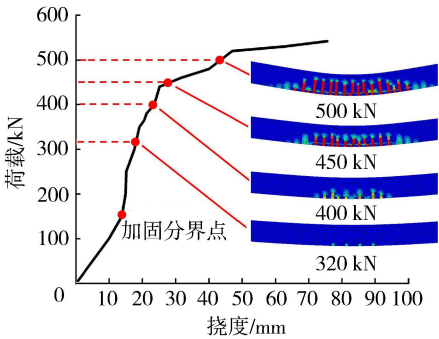


图 10 模拟损伤过程

Fig.10 Simulated damage process

反映出二次受力下钢筋 RPC 外包型钢梁的破坏特征。综上所述,有限元计算模型设计合理,试验结果正确可靠。

5 结 论

- a. 通过外包钢筋 RPC 的方法增强型钢梁可以显著提高原试件的抗弯承载力和截面刚度,且该方法使原试件承载力有较大的提升空间,在初始荷载达到极限荷载 70% 的情况下仍能将原试件承载力提高近 1.7 倍。由试验结果可知,试验梁抗弯承载力随初始荷载的增大而降低,随 RPC 强度和型钢强度增大而提高。
- b. 在现有规范的基础上提出了二次受力下钢筋 RPC 外包型钢梁抗弯承载力计算公式和 RPC 抗压强度折减系数计算公式,公式计算结果较试验值偏于安全。
- c. 本文基于 ABAQUS 有限元软件建立的钢筋 RPC 外包受弯型钢梁模型设计合理,模拟结果与试验结果基本吻合,可为相关分析提供参考。

参考文献:

[ 1 ] 王元清,宗亮,施刚,等. 钢结构加固新技术及其应用研究[J]. 工业建筑,2017,47(2):1-6. ( WANG Yuanqing,ZONG Liang,SHI Gang,et al. Application research on new strengthened technologies for steel structures [J]. Industrial Building,2017,47(2):1-6. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 周乐,王晓初,白云皓,等. 荷载下外包钢筋混凝土加固轴心受压钢柱受力性能研究[J]. 工程力学,2017,34(1):192-203. ( ZHOU Le,WANG Xiaochu,BAI Yunhao,et al. Research on mechanical properties of axially loaded steel columns reinforced by outsourcing reinforced concrete while under load[J]. Engineering Mechanics,2017,34(1):192-203. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 周乐,聂晓梅,王元清,等. 荷载下外包钢筋混凝土加固钢柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(增刊1):275-284. ( ZHOU Le,NIE Xiaomei,WANG Yuanqing,et al. Experimental study on axial compression behavior on steel columns strengthened by enclosed reinforced concrete under load [J]. Journal of Building Structures,2015,36( Sup1 ): 275-284. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 王元清,唐伟明,宗亮,等. 荷载下外包钢筋混凝土加固钢柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(增刊2):16-21. ( WANG Yuanqing,TANG Weiming,ZONG Liang,et al. Experimental investigation on axial load-bearing property of steel column encased by reinforced concrete cover[J]. Journal of Building Structures,2015,36(Sup2):16-21. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 杨文强,刘巍,黄正明. 钢柱外包混凝土加固在钢框架加固中的应用[J]. 建筑结构,2018,48(增刊2):735-740. ( YANG Wenqiang,LIU Wei,HUANG Zhengming. Application of steel column wrapped concrete reinforcement in steel frame reinforcement[J]. Building Structure,2018,48( Sup2 ):735-740. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 杨文强,黄正明. 钢柱外包混凝土加固钢框架构造措施研究[J]. 建筑结构,2019,49(增刊2):706-710. ( YANG Wenqiang,HUANG Zhengming. Study on construction measures of steel frame reinforced by steel column wrapped concrete method[J]. Building Structures,2019,49(Sup2):706-710. ( in Chinese ) )

[ 7 ] 卜良桃,罗恺彦. 型钢外包活性粉末混凝土(RPC)的界面黏结性能[J]. 科学技术与工程,2018,18(3):307-312. ( BU Liangtao,LUO Kaiyan. Interface bonding performance between shape steel and reactive powder concrete in steel reinforced RPC structures[J]. Science Technology and Engineering,2018,18(3):307-312. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 郑文忠,吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展[J]. 建筑结构学报,2015,36(10):44-58. ( ZHENG Wenzhong,LYU Xueyuan. Literature review of reactive powder concrete[J]. Journal of Building Structures,2015,36(10):44-58. ( in Chinese ) )

[ 9 ] 李海艳,张博扬,李金书. 钢筋活性粉末混凝土简支梁受弯力学性能试验与计算[J]. 工程力学,2020,37(6):131-139. ( LI Haiyan,ZHANG Boyang,LI Jinshu. Experimental and calculation of flexural mechanical properties of reinforced reactive powder concrete simply supported beams[J]. Engineering Mechanics,2020,37(6):131-139. ( in Chinese ) )

[ 10 ] 邓宗才,张戊晨. 混杂纤维增强 RPC 加固混凝土梁抗弯性能[J]. 哈尔滨工程大学学报,2015,36(9):1199-1205. ( DENG Zongcai,ZHANG Wuchen. Flexural performance of reinforced concrete beams reinforced with hybrid fiber reactive powder concrete[J]. Journal of Harbin Engineering University,2015,36(9):1199-1205. ( in Chinese ) )

[ 11 ] 位三栋,马跃强,彭斌,等. 超高性能混凝土加固历史保护建筑砖砌体承重墙性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(增刊2):284-289. ( WEI Sandong,MA Yueqiang,PENG Bin,et al. Experimental study on performance of UHPC-strengthened historical protected brick masonry load-bearing walls [J]. Journal of Building Structures,2018,39( Sup2 ): 284-289. ( in Chinese ) )

[ 12 ] 陈仁朋,鲁立,张阳,等. 盾构管片 UHPC 加固技术及力学性能分析[J]. 工程力学,2019,36(11):41-49. ( CHEN Renpeng,

- LU Li,ZHANG Yang,et al. Reinforced technology and mechanical properties of shield tunnel lining with UHPC[J]. Engineering Mechanics,2019,36(11):41-49. (in Chinese))
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015[S]. 北京,中国标准出版社,2015.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸实验:GB/T 228.1—2010[S]. 北京,中国标准出版社,2010.
- [15] 伍凯,徐超,曹平周,等. 型钢-钢纤维混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J]. 土木工程学报,2019,52(9):41-52. (WU Kai, XU Chao, CAO Pingzhou, et al. Experimental study on the flexural behavior of profile steel-steel fiber reinforced concrete composite beams[J]. China Civil Engineering Journal,2019,52(9):41-52. (in Chinese))
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准:GB/T50152—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [17] 郑山锁,陶清林,王斌,等. 型钢高强混凝土梁力学性能试验研究[J]. 工程力学,2013,30(11):101-109. (ZHENG Shansuo,TAO Qinglin, WANG Bin, et al. Experimental study on mechanical behavior of SRHSC beam[J]. Engineering Mechanics,2013,30(11):101-109. (in Chinese))
- [18] 刁波,封云,叶英华,等. 钢筋超高性能混合钢纤维混凝土梁受剪性能研究[J]. 工业建筑,2012,42(11):6-10. (DIAO Bo, FENG Yun, YE Yinghua, et al. Research on shear performance of ultra-high performance concrete beams with steel bar and hybrid steel fiber[J]. Industrial Building,2012,42(11):6-10. (in Chinese))
- [19] 聂建国,王洪全,谭英,等. 钢-高强混凝土组合梁的试验研究[J]. 建筑结构学报,2004(1):58-62. (NIE Jianguo, WANG Hongquan, TAN Ying, et al. Experimental study on composite Steel-HSC beams[J]. Journal of Building Structures,2004(1):58-62. (in Chinese))
- [20] 卜良桃,彭超,李为. 钢纤维水泥砂浆加固钢筋混凝土足尺梁抗弯性能[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):98-103. (BU Liangtao,PENG Chao,LI Wei. Flexural behaviors of RC beams reinforced by steel fiber cement mortar[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2010,38(1):98-103. (in Chinese))
- [21] 伍凯,曹平周,薛建阳,等. 型钢混凝土应力传递与黏结破坏机理分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(1):37-41. (WU Kai, CAO Pingzhou, XUE Jianyang, et al. Analysis of stress transfer and bond failure mechanism of steel reinforced concrete[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(1):37-41. (in Chinese))
- [22] 吕雪源,王英,符程俊,等. 活性粉末混凝土基本力学性能指标取值[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014,46(10):1-9. (LYU Xueyuan,WANG Ying,FU Chengjun, et al. Basic mechanical property indexes of reactive powder concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2014,46(10):1-9. (in Chinese))
- [23] 周乐,王晓初,白云皓,等. 负载下外包钢筋混凝土加固轴压钢柱承载力计算方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(6):990-997. (ZHOU Le, WANG Xiaochu, BAI Yunhao, et al. A bearing capacity calculation method of axially loaded steel columns reinforced by outsourcing concrete under loading[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Sciences),2015,31(6):990-997. (in Chinese))
- [24] 万路霞,周乐,伊军伟. 负载下外包钢筋混凝土加固轴压钢柱承载力计算方法[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2016,28(4):320-324. (WAN Luxia, ZHOU Le, YI Junwei. A bearing capacity calculation method of axially loaded steel columns reinforced by outsourcing concrete under loading[J]. Journal of Shenyang University(Natural Sciences),2016,28(4):320-324. (in Chinese))
- [25] 马亚峰. 活性粉末混凝土(RPC200)单轴受压本构关系研究[D]. 北京:北京交通大学,2006.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范:JGJ 138—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [27] 湖南省住房和城乡建设厅. 活性粉末混凝土结构技术规程:DBJ 43/T 325—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [28] 周乐,郑媛. 基于 ABAQUS 的负载下外包钢筋混凝土加固钢柱非线性有限元分析[J]. 钢结构,2017,32(12):17-21. (ZHOU Le,ZHENG Yuan. Nonlinear finite element analysis for steel column with out-wrap reinforced concrete under loads based on ABAQUS[J]. Steel Structure,2017,32(12):17-21. (in Chinese))

(收稿日期:2020-08-10 编辑:郑孝宇)