

# 活性粉末混凝土型钢梁抗剪性能研究

卜良桃,杨斯宇

(湖南大学土木工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘要** 目的 研究活性粉末混凝土型钢梁受剪荷载作用下的抗剪性能,以解决当前组合结构因抗剪承载力不足而导致的构件截面尺寸不合理、结构自重过大等问题。**方法** 设计6根足尺活性粉末混凝土型钢梁进行静载抗剪试验,分析RPC强度、剪跨比及含钢率对试验梁抗剪承载力及破坏形态的影响。**结果** 试验梁经过弹性、开裂、裂缝发展和破坏4个阶段,破坏时没有出现粘结滑移现象,斜裂缝呈现细而密的特点;剪跨比对试验梁抗剪承载力的影响显著,当剪跨比为1时,将RPC强度从120 MPa提升至150 MPa、含钢率从6.6%提升至7.4%,抗剪承载力的增幅分别为16.8%和10.6%。**结论** 这种新型的组合梁能充分发挥RPC和型钢的材料强度,通过点焊进行固定的箍筋能起到锚固作用,使RPC和型钢能够良好协同工作。

**关键词** 型钢;活性粉末混凝土;足尺梁;组合结构;剪跨比;抗剪承载力

中图分类号 TU398

文献标志码 A

## Research on Shear Behavior of Steel Reinforced Reactive Powder Concrete Beams

BU Liangtao, YANG Siyu

(College of Civil Engineering, Hu'nan University, Changshang, China, 410082)

**Abstract:** In order to overcome the problems of the normal composite structure's unreasonable section size and excessive structure self-weight which due to the insufficient shear capacity. The shear behavior of steel reinforced reactive powder concrete beam is studied in this paper. Six full-scale SRRPC beams were made to be carried out static load shear experiment. The influences of RPC strength, shear span ratio and steel content on shear capacity and failure modes of SRRPC beams were mainly considered. After four stages of elastic working, cracking, cracks developing and destroying, the specimens show the fine and dense inclined cracks, but did not appear slip when they were destroyed. The shear span ratio has a significant effect on the shear capacity. When shear span ratio is 1, we made RPC strength increase from 120 MPa to 150 Mpa and steel content increase from 6.6% to 7.4%, the shear capacity was increased by 16.8% and 10.6%, respectively. This new type of composite beam can take full advantage of material strength of RPC

收稿日期:2020-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52078205)

作者简介:卜良桃(1963—),男,教授,博士,主要从事结构检测鉴定及加固方法等方面研究。

and steel. Stirrup fixed by spot welding can play an anchoring role, and made RPC and I-shape steel work in good coordination until specimens damaged.

**Key words:** steel; reactive powder concrete; full scale beam; composite structures; shear-span ratio; shear capacity

型钢混凝土结构因其优秀的抗震性能以及灵活的组合形式,适用于高层及大跨结构。但随着高层及大跨结构对型钢混凝土梁的抗剪承载力提出了更高要求,普通型钢混凝土梁因而需要更大的截面尺寸,空间利用率低、结构自重增加及脆性高的缺点也更加明显。此外普通型钢混凝土梁为避免剪切劈裂破坏,需通过设置剪力连接键保证型钢与混凝土共同工作<sup>[1-2]</sup>,增加了施工难度。

为了克服上述难题,研究者通过分析活性粉末混凝土(RPC)构件的受剪力学性能<sup>[3-5]</sup>,发掘 RPC 在组合结构上的应用价值, RPC 拥有普通混凝土难以达到的高强度、高韧性和高耐久性<sup>[6-7]</sup>,理论上在不降低组合梁抗剪承载力的前提下可有效减小梁构件的尺寸<sup>[8]</sup>。同时由于抗剪设计作为梁结构设计中极其重要的一环,研究者对 RPC 梁的受剪传力机理进行了分析。邓宗才等<sup>[9]</sup>考虑钢纤维抗拔作用对抗剪承载力的贡献,提出改进的压力场模型来分析 RPC 梁的剪切破坏过程,通过试验发现斜裂缝截面处纤维的抗拔剪能力占总抗剪能力的 40% ~ 60%。卜良桃等<sup>[10-12]</sup>对活性粉末混凝土型钢组合结构形式进行了系列研究,通过试验研究发现型钢与活性粉末混凝土能够良好协同工作,并提出组合梁、柱的建议计算公式。此外,研究者从 RPC 与型钢组合形式多样性的角度出发,发掘 RPC 在工程领域更大的应用价值,近年来在桥梁、核电等基建和加固领域 RPC 得到了广泛应用<sup>[13-15]</sup>。

上述研究表明,针对 RPC 与型钢组合形式的研究多集中于材料性能方向的小尺寸试件的理论分析以及异形截面梁构件的试验研究,并且应用范围比较局限。在工程应用方

向鲜有针对足尺矩形截面的型钢高强度高性能混凝土构件进行抗剪性能分析,尚未有研究者对足尺矩形截面的型钢高强度高性能混凝土梁的受剪传力机理、破坏形态进行试验研究分析。基于此,笔者提出了一种新型的高强度高性能组合梁-活性粉末混凝土型钢(Steel Reinforced Reactive Powder Concrete Beam, SRRPC)梁,通过充分发挥两种材料的优良性能,在提高抗剪承载力的同时可以减小结构尺寸,满足当前建筑结构对型钢混凝土组合梁抗剪承载力提出的更高要求。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计制作了共 6 根长度为 3 500 mm、截面宽高为 200 mm × 300 mm 的足尺 SRRPC 梁进行静力试验,研究剪跨比、RPC 强度以及含钢率对 SRRPC 梁抗剪性能的影响,剖面材料及参数如图 1 所示。

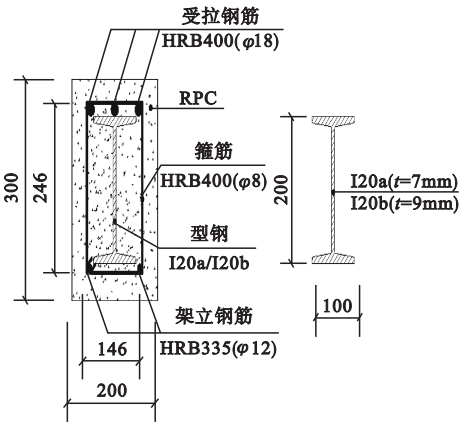


图 1 试验梁截面设计图

Fig. 1 Section details of the test beams

试验梁的型钢规格采用普通热轧工字钢 I20a 和 I20b,强度等级均为 Q235B,两种规格型钢的腹板厚度相差 2 mm。箍筋设置参照《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ

138—2016)<sup>[16]</sup> 的最小配箍率,规格为 HRB400,直径 8 mm,间距取 200 mm,架立筋规格为 HRB335,直径 12 mm。为了保证 SRRPC 梁能实现弯剪破坏,在梁截面的受拉区布置 3 根规格为 HRB400 的纵筋,直径 18 mm;型钢的保护层厚度为 50 mm,钢筋的保护层厚度为 20 mm。试验梁参数见表 1。

表 1 试验梁基本参数

| Table 1 Parameters of the test beams |      |               |        |                 |
|--------------------------------------|------|---------------|--------|-----------------|
| 编号                                   | 型钢规格 | 剪跨比 $\lambda$ | RPC 强度 | 含钢率 $\rho_s/\%$ |
| L1                                   | I20a | 1.0           | R150   | 6.6             |
| L2                                   | I20b | 1.0           | R150   | 7.4             |
| L3                                   | I20b | 1.0           | R120   | 7.4             |
| L4                                   | I20b | 1.2           | R120   | 7.4             |
| L5                                   | I20b | 1.4           | R120   | 7.4             |
| L6                                   | I20b | 1.8           | R120   | 7.4             |

1.2 试验梁制作与 RPC 力学性能

浇筑试验梁选用具有固定配合比的 RPC 干混料,其中钢纤维的体积分数为 2%,通过控制养护条件来制拌不同强度等级的 RPC。试验梁均采用卧式浇筑,将预制的型钢骨架装入木制模板后一次成型浇筑,同时预留对应批次的 RPC 试块。

试验梁在室内静置 24 h 后拆模,拆模后对试验梁与试块进行同条件养护,RPC120 的试验梁及试块进行常温养护,RPC150 的试验梁及试块先用 80 ℃热水养护 24 h,而后进行常温养护。对同条件养护的 RPC 试块进行力学性能试验,结果见表 2。

表 2 RPC 力学性能指标

| Table 2 Mechanical properties of RPC |                     |                  |                     |                  |
|--------------------------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| RPC                                  | $f_{cu}/\text{MPa}$ | $f_c/\text{MPa}$ | $f_{ts}/\text{MPa}$ | $E_c/\text{GPa}$ |
| R120                                 | 121.8               | 104.1            | 8.3                 | 42.3             |
| R150                                 | 152.4               | 128.6            | 9.5                 | 47.5             |

注: $f_{cu}$  为 RPC 的立方体抗压强度; $f_c$  为 RPC 的轴心抗压强度; $f_{ts}$  为 RPC 的立方体劈裂抗拉强度; $E_c$  为 RPC 的弹性模量。

1.3 加载方案及测量内容

试验选用电液伺服压力机控制系统,采用单调连续荷载控制分级加载法控制加载,加载装置及应变片布置如图 2 所示。试验梁上的荷载值由电液伺服压力机控制系统控制和测量,各材料的应变由静态应变测试系统自动采集。试验测量的内容包括:支座处 RPC 及型钢的应变、剪跨段 RPC、箍筋和型钢的应变、荷载、加载点与支座处位移、裂缝分布及发展等。

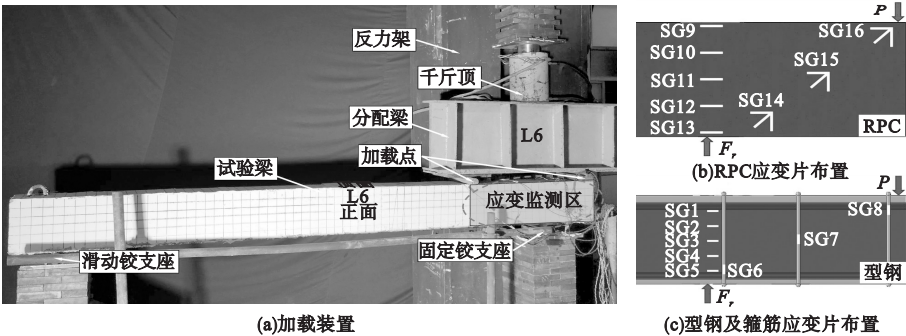


图 2 加载装置及应变片布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of device and strain gauge arrangement

2 试验结果与分析

2.1 SRRPC 梁受剪破坏特征

6 根试验梁均发生不同程度的弯剪破坏,其中 L6 呈现明显的受弯破坏形态,试件

破坏形态如图 3 所示。根据破坏过程,可将 SRRPC 梁的受剪破坏过程依次分为弹性阶段、开裂阶段、裂缝发展阶段和破坏阶段。

(1)弹性阶段

型钢和 RPC 完全协同工作,两种材料应

变呈线性增长且增幅较小。以试验梁 L1 为例, RPC 上翼缘的测点在加载至开裂前其应变值为  $510 \times 10^{-6}$ , 其余试验梁上翼缘的应变值在开裂前均较低。挠度在加载初期亦呈线性增长态势。

(2) 开裂阶段

当加载到极限荷载的 25% ~ 35% 时, 位于支座处的 RPC 表面出现细微裂缝, 属于弯剪裂缝。剪跨段的腹剪裂缝会晚于弯剪裂缝出现, 其位置分布在重心轴处的梁侧 RPC 表面。可见当试验梁处于受剪状态时, 梁顶部单元体水平拉应力较中心轴附近单元体主拉应力先达到 RPC 的抗拉强度, 此时型钢仍处于弹性变形阶段。

(3) 裂缝发展阶段

当荷载继续增大时, 弯剪裂缝的数量持续增加, 但没有明显变宽及向下延伸发展的趋势; 腹剪裂缝出现后, 腹剪裂缝会随荷载的增大向加载点和支座处延伸, 且两侧会随着荷载的增大不断出现新的斜裂缝并向两端延伸发展; 当加载至极限荷载的 60% 以上时, RPC 表面不再出现新的斜裂缝, 已有的斜裂

缝开始变宽及向两端延伸。从裂缝的分布和发展来看, 型钢和混凝土之间没有发生相对滑移, 说明箍筋的设置能实现良好的锚固效果, 使 RPC 和型钢良好协同工作。当荷载加载至极限荷载的 70% 以上时, 发展形成临界斜裂缝, 试验梁内部开始传出钢纤维剥离断裂的声音, 且随着荷载的继续增大声音出现地愈发密集。

(4) 破坏阶段

当加载至极限荷载的 85% 以上时, 可以在支座处观察到 RPC 表面起鼓, 开始出现 RPC 压溃的迹象; 同时临界斜裂缝发展成主斜裂缝, 裂缝宽度随着荷载的增加明显增大。当荷载增大到极限荷载的 90% 时, 试验梁内部传出密集的钢纤维剥离断裂声音, 主斜裂缝两侧 RPC 随裂缝宽度的增大逐渐退出工作; 悬臂端挠度出现 2 ~ 3 倍的增长, 说明剪跨段型钢腹板出现大面积屈服。当加载至极限荷载时, 可观察到试验梁呈现明显的剪切破坏形态, 同时悬臂端挠度不断增加, 无法进行下一级加载。

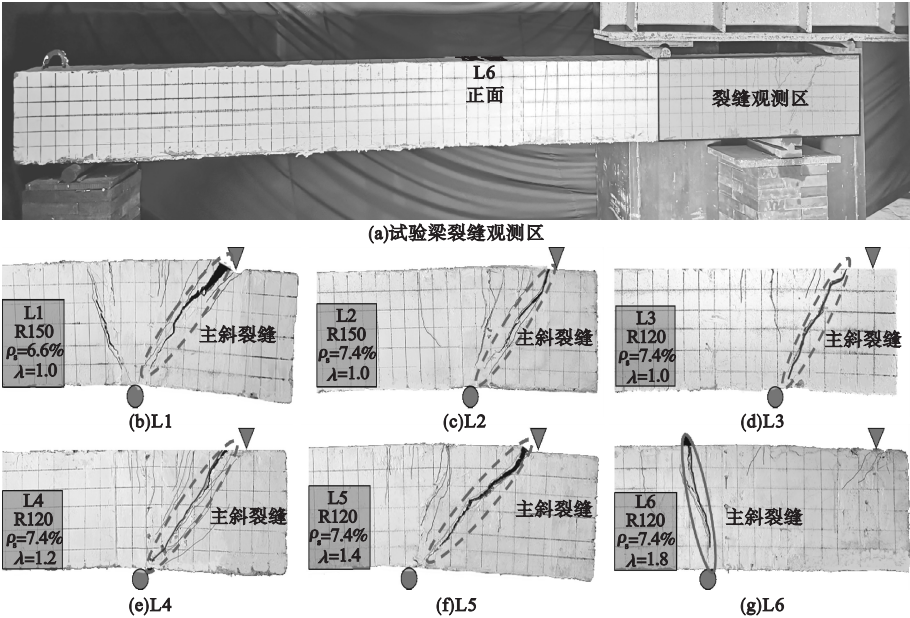


图 3 试验梁破坏形态

Fig. 3 Failure modes of test beams

2.2 试验结果

试验梁 L1 ~ L6 的开裂荷载  $P_{cr}$ 、极限荷载  $P_u$  和挠度  $v_u$  见表 3。可以看出,开裂荷载约为极限荷载的 30%,相较于文献[17]中型钢高强高性能混凝土梁,开裂荷载与极限荷载的比值提升了一倍。

表 3 试验结果

Table 3 The test results

| 编号 | $P_{cr}/\text{kN}$ | $P_u/\text{kN}$ | $(P_{cr}/P_u)/\%$ | $v_u/\text{mm}$ |
|----|--------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| L1 | 430                | 1 320           | 32.57             | 34.75           |
| L2 | 450                | 1 460           | 30.82             | 32.22           |
| L3 | 400                | 1 250           | 32.00             | 29.53           |
| L4 | 360                | 1 140           | 32.72             | 28.62           |
| L5 | 350                | 1 050           | 23.33             | 26.36           |
| L6 | 300                | 650             | 44.12             | 25.87           |

荷载与挠度关系曲线如图 4 所示。从图中可以看出,试验梁 L1 ~ L5 在开裂后,荷载挠度曲线仍能保持近似线性趋势发展至极限荷载的 70% ~ 80%。

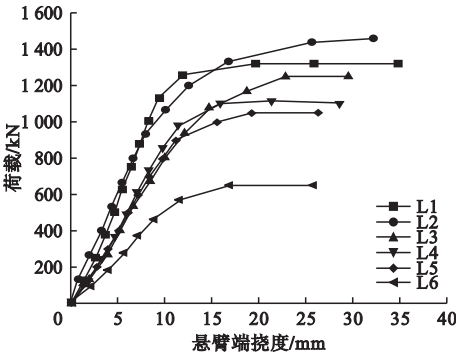


图 4 试验梁荷载 - 挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curves of text beams

2.3 试验参数分析

2.3.1 含钢率

试验梁 L1 和 L2 的型钢腹板厚度分别为 7 mm 和 9 mm,对应的含钢率分别为 6.6% 和 7.4%,试验梁 L2 的极限承载力相较于试验梁 L1 提升了 10.6%。两者荷载挠度曲线如图 5 所示,对比可知,试验梁 L2 表现出更好的变形性能。从两根试验梁的裂缝发展及分布来看,试验梁 L2 的斜裂缝分布较 L1 更为密集,且主斜裂缝宽度明显小于后者,说明通过改变型钢腹板厚度来改变含钢率能有效提高 SRRPC 梁的延性和抗剪承载力。

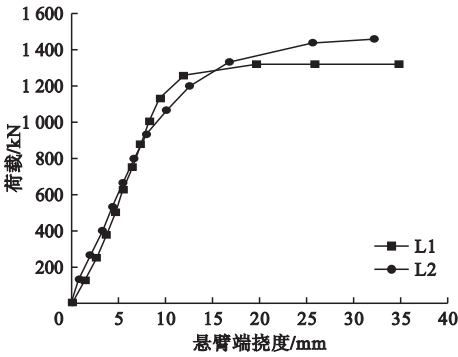


图 5 L1、L2 荷载 - 挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curves of L1 & L2

2.3.2 RPC 强度

试验梁 L2 和 L3 所用 RPC 的标号分别为 R150 和 R120,在剪跨比  $\lambda = 1$  的加载条件下,试验梁 L2 的极限承载力相较于试验梁 L3 提升了 16.8%,说明提高 RPC 强度是提升 SRRPC 梁抗剪承载力的有效途径。由于剪跨段斜裂缝出现的随机性以及 RPC 的脆性,导致应变花极易被斜裂缝破坏,笔者在两根试验梁中挑选没有过早被斜裂缝破坏的测点进行分析,剪跨段 RPC 剪应力随荷载增加的变化如图 6 所示。

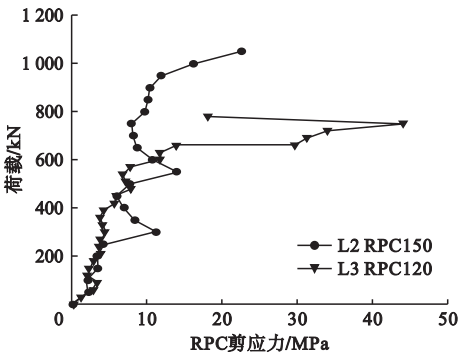


图 6 L2、L3 荷载 - 剪应力曲线

Fig. 6 Load-shear stress curves of L2 & L3

由图 6 可知,在达到开裂荷载后,RPC 剪应力进入非线性发展阶段,而当接近极限荷载时,RPC 剪应力远未达到抗压强度,反映出 RPC 抗拉强度是影响 SRRPC 梁抗剪承载力的重要因素。

2.3.3 剪跨比

试验梁 L3、L4、L5 和 L6 的剪跨比依次为 1.0、1.2、1.4 和 1.8,其中剪跨比为 1.8 的

试验梁 L6 最终发生了受弯破坏。悬臂端荷载-挠度曲线如图 7 所示。

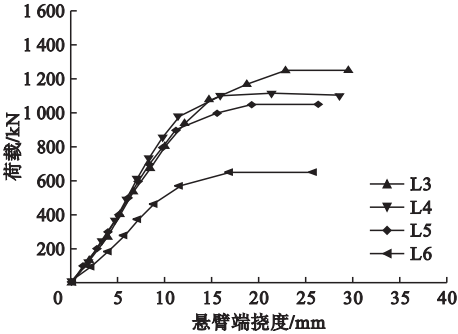


图 7 L3 ~ L6 荷载 - 挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curves of L3 ~ L6

由图 7 可知,SRRPC 梁和普通钢筋混凝土梁类似,剪跨比是影响抗剪承载力和破坏形态的关键因素,试验梁的抗剪承载力随剪跨比的增大而减小。以试验梁 L3 作为参考,其抗剪承载力为 L4 的 107.4%、L5 的 111.7%、L6 的 169.8%。试验梁 L5 和 L6 在极限荷载作用下分别发生了受剪破坏和受弯破坏,支座处型钢腹板应变沿截面高度的变化如图 8 和图 9 所示。

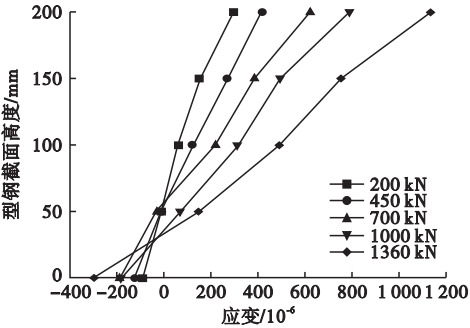


图 8 L5 截面应力分布

Fig. 8 Cross-sectional strain distribution of L5

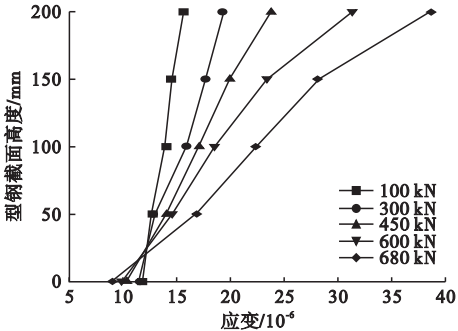


图 9 L6 截面应力分布

Fig. 9 Cross-sectional strain distribution of L6

由图 8、图 9 可知,型钢腹板应变在加载初期呈线性分布,符合平截面假定,在裂缝发展阶段后期呈非线性增长。与发生受弯破坏的试验梁 L6 的应变分布相比,发生受剪破坏的试验梁 L5 在该截面未发生屈曲。

3 抗剪承载力计算

3.1 基于试验数据的 SRRPC 梁抗剪承载力建议计算公式

由于梁受剪破坏的复杂性,国内外学者针对混凝土矩形截面梁提出了多种受剪传力机理<sup>[18-19]</sup>,但迄今为止未能达成一致共识。各国现行的标准规范在进行普通钢筋混凝土梁和普通型钢混凝土梁的抗剪设计时,普遍是基于试验数据,提出半理论半经验的抗剪承载力计算公式。由于 RPC 所含钢纤维对抗剪承载力的贡献不可忽略,使从理论出发分析 SRRPC 梁的受剪传力机理并建立便于工程设计使用的斜截面承载能力计算公式的难度大大增加。笔者参考已有研究成果<sup>[19-21]</sup>并基于上述抗剪试验,提出契合 SRRPC 梁受剪传力机理的简化计算模型,并提出抗剪承载力建议计算公式。

SRRPC 梁处于受剪状态时,RPC 既和型钢腹板共同工作承受斜压作用,又和型钢、箍筋一起承受竖向受拉作用,故笔者选择简化后的桁架-拱模型进行 SRRPC 梁抗剪承载力计算(见图 10)。如图 10(c)所示,试验梁四点受荷作用可简化等效为简支梁受单点集中荷载作用,阴影部分的拱压区由 RPC 和型钢腹板构成,作为模型的上弦压杆同时承受并传递斜压力;型钢受拉翼缘和受拉钢筋充当下弦拉杆;斜裂缝间的 RPC 充当斜压杆;考虑到 RPC 具有较普通混凝土高数倍的抗拉强度,将箍筋视作模型的竖向拉杆时,应考虑 RPC 对竖向拉杆抗拉强度的贡献。

基于上述分析,笔者采用两个假定:

(1)RPC 对抗剪承载力的贡献由 RPC 抗拉强度所控制。根据材料力学性能试验,

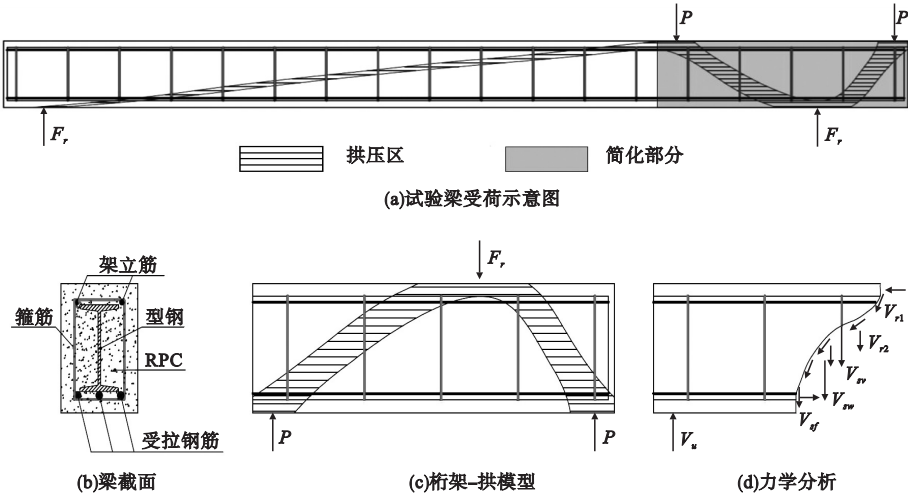


图 10 SRRPC 梁简化桁架-拱模型

Fig. 10 Simplified truss-arch model of SRRPC beam

RPC 的抗拉强度远小于抗压强度,且试验梁破坏时剪跨段 RPC 主要表现为抗拉强度控制的剪切破坏。值得注意的是,文献[17]关于 SRHSHPC 梁的抗剪试验中,当剪跨比大于 2 时,提升高性能混凝土强度对提升抗剪承载力的效果甚微,文中试验剪跨比为 1 时, RPC 强度的提升对抗剪承载力的增益较为显著,主要是因为充当斜压杆的剪跨段 RPC 单元在小剪跨比下可以充分发挥其抗压强度。考虑到 SRRPC 梁实际工况,忽略斜裂缝间 RPC 斜压杆对抗剪承载力的贡献,将其视作安全储备。

(2) 忽略型钢翼缘及纵筋在梁开裂后起到的销栓作用。由于型钢翼缘和纵筋在试验梁受剪时所能提供的抗剪承载力比较小,文中试验型钢翼缘与梁的宽度比参考文献[22]取 0.5,使型钢为 RPC 提供了有效约束,两种材料能共同工作并充分发挥其强度。为简化计算公式,忽略型钢翼缘及纵筋销栓作用,将其视作构造措施。

综上,笔者参考文献[16]将 SRRPC 梁的抗剪承载力从形式上分为三部分:①RPC 的抗剪作用  $V_r$ ;②箍筋的抗剪作用  $V_{sv}$ ;③型钢的抗剪作用  $V_{sw}$ 。

SRRPC 梁抗剪承载力计算公式可由式

(1) 表示:

$$V_u = V_r + V_{sv} + V_{sw} \tag{1}$$

通过抗力系数  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  和  $\gamma_1$  来体现各部分对斜截面承载能力的贡献及组合作用, SRRPC 梁所受剪力  $V$  应满足:

$$V \leq \alpha_1 f_t b h_0 + \beta_1 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + \gamma_1 f_v t_w h_w \tag{2}$$

式中:  $f_t$  为 RPC 抗拉强度设计值;  $b$  为截面宽度;  $h_0$  为截面有效高度;  $f_{yv}$  为箍筋的抗拉强度设计值;  $A_{sv}$  为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面积;  $s$  为沿构件长度方向上箍筋的间距;  $t_w$  为型钢腹板厚度;  $h_w$  为型钢腹板高度;  $f_v$  为型钢的抗剪强度设计值。

基于试验数据,考虑 RPC 和型钢对抗剪承载力的贡献受剪跨比的影响。通过拟合计算出抗力系数  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  和  $\gamma_1$  分别为  $\frac{2.28}{\lambda + 1}$ 、1.1 和  $\frac{1.2}{\lambda}$ 。则式(2)可表示为

$$V \leq \frac{2.28}{\lambda + 1} f_t b h_0 + 1.1 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + \frac{1.2}{\lambda} f_v t_w h_w \tag{3}$$

3.2 计算公式验证

取表 2、表 3 中材料试验强度标准值代入式(3)进行计算,并与试验结果进行对比,结果如图 11 所示。

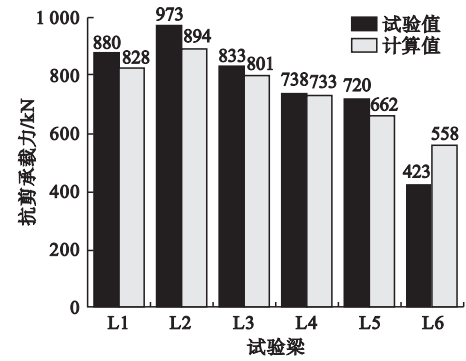


图 11 试验值与计算值对比

Fig. 11 Comparison between the experimental value and calculated value

从图 11 可以看出,除发生受弯破坏的试验梁 L6,其余试验梁的试验值均稍大于计算值,两者之比的均方差与变异系数均为 0.03,表明基于试验数据拟合效果良好。文献[18]对 10 根型钢高强性能混凝土梁进行了试验研究,其中 5 根试验梁发生剪切破坏。将试验参数代入式(3),与文献[18]试验值对比,结果见表 5。从表 5 可知,试验值与计算值的比值平均值为 1.37,均方差为 0.09,变异系数为 0.07。可认为建议计算公式对预测 SRRPC 梁的抗剪承载力具有较高的工程应用价值。

表 5 式(3)计算值与文献[18]试验值对比  
Table 5 Comparison between the calculated value of formula(3)and text value of reference [18]

| 试验梁    | 剪跨比 $\lambda$ | 混凝土强度 | $V_c/\text{kN}$ | $V_e/\text{kN}$ | $V_e/V_c$ |
|--------|---------------|-------|-----------------|-----------------|-----------|
| SRC-18 | 1.0           | C80   | 475             | 308             | 1.54      |
| SRC-19 | 1.5           | C80   | 310             | 235             | 1.32      |
| SRC-23 | 1.0           | C80   | 375             | 278             | 1.34      |
| SRC-24 | 1.5           | C90   | 330             | 243             | 1.36      |
| SRC-25 | 1.5           | C100  | 325             | 256             | 1.27      |

4 结 论

(1)由于 RPC 与型钢在受荷过程中能够互相约束并共同工作,SRRPC 梁在受荷破坏过程中难以发生斜拉破坏;同时钢纤维体积分数为 2% 时使 SRRPC 梁斜裂缝发展呈现小而密的特点,斜裂缝两侧的 RPC 不会随裂

缝的发展而迅速退出工作。相较于受剪时表现出明显脆性破坏的普通钢筋混凝土梁,SRRPC 梁的受剪破坏表现出良好的延性和破坏形态。

(2)SRRPC 梁抗剪承载力受剪跨比改变的影响最为显著,在剪跨比小于 1.8 时,RPC 强度的提升能显著提升 SRRPC 梁的抗剪承载力;通过增加型钢腹板厚度而改变含钢率能有效改善 SRRPC 梁的变形性能,即对 SRRPC 梁的延性有一定的提高。

(3)根据试验结果和简化桁架拱模型,提出了 SRRPC 梁抗剪承载力建议计算公式,能较好地预测 SRRPC 梁的抗剪承载力,对于设计计算和相关研究能提供一定的参考价值。

参考文献

[1] 孙丽,崔朦朦,崔迪,等. 钢-混凝土组合结构中 SMA 连接件抗剪试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(3):402-409. (SUN Li,CUI Mengmeng,CUI Di,et al. Research on shear resistance test of SMA connectors in steel-concrete composite structure [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science),2017,33(3):402-409. )

[2] TONG Lewei, CHEN Luhua, WEN Ming, et al. Static behavior of stud shear connectors in high-strength-steel UHPC composite beams [J]. Engineering structures, 2020, 218:110827.

[3] WU Pengtao,WU Chengqing,LIU Zhongxian, et al. Investigation of shear performance of UHPC by direct shear tests [J]. Engineering structures,2019,183:780-790.

[4] YAVAS A, GOKER C O. Impact of reinforcement ratio on shear behavior of I-shaped UHPC beams with and without fiber shear reinforcement [J]. Materials, 2020, 13 (7):1525.

[5] RIDHA M M S, SARSAM K F, AL-SHAARBAF A S. Experimental study and shear strength prediction for reactive powder concrete beams [J]. Case studies in construction materials,2018,8:434-446.

[6] 王德辉,史才军,吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. 硅酸盐通报,2016,35 (1):141-149. (WANG Dehui,SHI Caijun,WU Linmei. Research and applications of ultra-high performance concrete(UHPC)in China [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2016, 35 (1): 141-149. )

- [7] 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 Wengzhong, Lü Xueyuan. Literature review of reactive powder concrete [J]. Journal of building structures, 2015, 36(10): 44-58.)
- [8] HAN Lizhong, ZHANG Jinqian, NIE Jianguo. Ultimate bearing capacity of steel-reactive powder concrete composite beams [J]. Advanced materials research, 2014, 900: 473-482.
- [9] 邓宗才,王海忠,刘少新,等. 基于修正压力场理论的活性粉末混凝土梁抗剪承载力计算[J]. 河北工业大学学报,2014,43(6):22-25.  
(DENG Zongcai, WANG Haizhong, LIU Shaoxin, et al. Shear capacity of RPC beams based on modified pressure field theory [J]. Journal of Hebei university of technology, 2014, 43(6): 22-25.)
- [10] 卜良桃,刘鼎. 通过外包活性粉末混凝土型钢梁抗弯性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(2):389-397.  
(BU Liangtao, LIU Ding. Experimental study on prestressed steel reinforced high-strength wrapped by reactive power concrete beams [J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(2): 389-397.)
- [11] 卜良桃,刘勇. 外包活性粉末混凝土型钢柱轴压性能分析[J]. 深圳大学学报(理工版),2017,34(3):245-251.  
(BU Liangtao, LIU Yong. Analysis of axial bearing capacity of encased reactive powder concrete composite steel columns [J]. Journal of Shenzhen university (science and engineering), 2017, 34(3): 245-251.)
- [12] 卜良桃,秦川. 型钢活性粉末混凝土柱大偏压性能分析[J]. 深圳大学学报(理工版),2019,36(6):606-613.  
(BU Liangtao, QIN Chuan. Analysis of mechanical performance of steel reinforced reactive powder concrete columns under large eccentric loading [J]. Journal of Shenzhen university (science and engineering), 2019, 36(6): 606-613.)
- [13] YOO Doo-Yeol, YOON Young-Soo. A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber reinforced concrete [J]. International journal of concrete structures and materials, 2016, 10(2): 125-142.
- [14] ZHANG Shihong, SHAO Xudong, CAO Junhui. Fatigue performance of a lightweight composite bridge deck with open ribs [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(7):04016039.
- [15] 赵秋,郭杨斌,陈孔生,等. 超高性能混凝土铺装层对钢桥面板疲劳性能影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(6):961-969.  
(ZHAO Qiu, GUO Yangbin, CHEN Kongsheng, et al. Influence of ultra-high performance concrete pavement on fatigue performance of steel bridge deck [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(6): 961-969.)
- [16] 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.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the PRC. Code for design of composite structures: JGJ138—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [17] 车顺利. 型钢高强高性能混凝土梁的基本性能及设计计算理论研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.  
(CHE Shunli. Research on basic and design theory of steel reinforced high strength and high performance concrete beams [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.)
- [18] 郑山锁,胡义,车顺利,等. 型钢高强高性能混凝土梁抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学,2011,28(3):129-135.  
(ZHENG Shansuo, HU Yi, CHE Shunli, et al. Experimental study on the shear capacity of SRHSHPC beams [J]. Engineering mechanics, 2011, 28(3): 129-135.)
- [19] WANG Qiang, SONG Hualin, LU Chunling, et al. Shear performance of reinforced ultra-high performance concrete rectangular section beams [J]. Structures 2020, 27:1184-1194.
- [20] 金凌志,周家亮,李月霞,等. 高强钢筋活性粉末混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(增刊2):277-285.  
(JIN Lingzhi, ZHOU Jialiang, LI Yuexia, et al. Experimental study on shear bearing capacity of RPC beams with high strength reinforcement [J]. Journal of building structures, 2015, 36(S2): 277-285.)
- [21] 梁兴文,王照耀,于婧,等. 超高性能混凝土有腹筋梁受剪性能及受剪承载力研究[J]. 土木工程学报,2018,51(10):56-67.  
(LIANG Xingwen, WANG Zhaoyao, YU Jing, et al. Study on shear behavior and shear bearing capacity of UHPC beams with stirrups [J]. China civil engineering journal, 2018, 51(10): 56-67.)
- [22] 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.)
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)