

## 配筋活性粉末混凝土梁抗剪承载力分析

罗俊<sup>1</sup>, 陈鸣<sup>2</sup>, 秦明强<sup>3</sup>

(1. 长江工程职业技术学院, 湖北 武汉 430212; 2. 中交第二航务工程局有限公司;

3. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司)

**摘要:**活性粉末混凝土(RPC)作为一种新型工程材料,其在工程中的应用前景越来越受到关注,但对其抗剪机理尚未完全认识。该文根据 RPC 的力学特性,基于 Rankine 破坏准则,推导了极限平衡法求解配筋 RPC 梁抗剪承载力的计算公式。该公式形式简洁,主要考虑了剪跨比、纵筋率和箍筋率等因素对抗剪承载力的影响。通过试验梁数据对比,验证了计算公式的有效性。该公式将加深人们对活性粉末混凝土梁抗剪机理的认识,进一步推动活性粉末混凝土在工程中的广泛应用。

**关键词:**活性粉末混凝土;抗剪承载力;极限平衡法;建议公式

活性粉末混凝土(RPC)是一种具有高强度、高耐久性、高延性及高温适应性的新型高性能混凝土材料。但配筋 RPC 结构受剪机理复杂,受剪破坏的影响因素众多,至今仍未建立一套普遍接受的理论体系来解释配筋 RPC 梁的抗剪行为。国内外学者进行了大量试验,研究了配筋 RPC 的受剪性能,对抗剪承载力的研究也有一定的进展。罗伯光等通过高强钢筋 RPC 抗剪性能试验,研究了剪跨比、配箍率以及纵筋配筋率等因素对 RPC 梁抗剪破坏形态及抗剪承载能力的影响,并采用桁架拱模型对试验梁抗剪承载力进行了计算;邓宗才、王强等提出了基于修正压力场理论的配筋 RPC 梁抗剪承载力计算方法;王强等基于塑性理论对配筋 RPC 梁进行分析,推导了 RPC 梁的受剪承载力公式与简化公式。虽然已有大量的抗剪理论,但仍没有一种普遍接受的抗剪计算方法。另外,大量研究表明:不论剪跨比多少,梁的剪切破坏与剪压区混凝土密切相关。该文基于剪压区 RPC 的简化强度准则,通过极限状态下隔离体平衡条件,推导出配筋 RPC 梁抗剪承载力理论计算公式。

## 1 配筋活性粉末混凝土梁抗剪承载力计算模型

### 1.1 极限平衡法截面剪切破坏机理

极限平衡法建立结构剪切破坏极限状态时的平

衡,求解极限抗剪承载力。由于 RPC 中粗骨料粒径不大,因此骨料咬合力和黏聚力较小,可忽略不计。且研究表明:配筋率不大的情况下,纵筋销栓力对抗剪承载力影响不大,该文计算也忽略不计。

极限状态下,配筋 RPC 梁隔离体受力状态如图 1 所示。图中: $V$  为剪力; $T$  为纵筋拉力, $A_s$  为纵筋面积, $f_s$  为纵筋应力; $\sigma$  为剪压区压应力; $\tau$  为剪压区剪应力; $C$  为斜裂缝水平投影长度; $\xi$  为受压区高度系数; $h$  为主梁高度; $h_0$  为受压区的有效高度; $f_{sv}$  为箍筋应力。

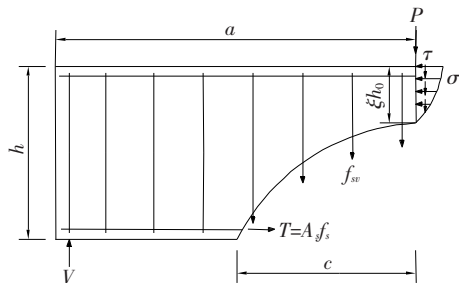


图1 配筋RPC梁剪压区隔离体受力状态

### 1.2 剪压区RPC简化强度破坏准则

假定极限状态下,混凝土应力满足 Mohr 应力圆,并采用 Rankine 破坏准则,当主拉应力达到混凝土抗拉强度时,结构承载力由混凝土抗拉强度控制:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_u}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_u}{2}\right)^2 + \tau_u^2} \leq f_t' \quad (1)$$

当主压应力达到混凝土抗压强度时,结构承载力

由混凝土抗压强度控制:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_u}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_u}{2}\right)^2 + \tau_u^2} \leq -f'_c \quad (2)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为剪压区混凝土主拉应力、主压应力;  $\sigma_u$ 、 $\tau_u$  分别为极限状态下混凝土正应力、剪应力;  $f'_t$ 、 $f'_c$  分别为多轴应力下混凝土的抗拉、抗压强度。

极限状态下,剪压区混凝土的正应力呈曲线分布,其应力分布方程不易确定,为便于分析,假定截面正应力呈矩形分布,截面受压区混凝土正应力取其平均值进行计算:

$$\bar{\sigma}_u = \frac{\int_0^{\xi h_0} \sigma_u(x) dx}{\xi h_0} \quad (3)$$

式中:  $\bar{\sigma}_u$  为受压区混凝土正应力平均值;  $\sigma_u(x)$  为截面受压区混凝土正应力的分布函数。

从加载至极限状态下钢筋混凝土梁剪跨区截面正应力分析可知,截面正应力并非常数,而是随着距中和轴的距离而变化,因此图中的剪应力可以表示为距离中性轴  $x$  处的正应力的函数  $\tau_u(x)$ 。

当由抗拉强度控制时:

$$\tau_u(x) = \sqrt{f'_t[f'_t - \sigma_u(x)]} \quad (4)$$

当由抗压强度控制时:

$$\tau_u(x) = \sqrt{f'_c[f'_c + \sigma_u(x)]} \quad (5)$$

经分析,极限状态下截面剪应力为定值  $\bar{\tau}_u$ :

$$\bar{\tau}_u = \begin{cases} \sqrt{f'_t[f'_t - \bar{\sigma}_u]} & (\text{由抗拉控制}) \\ \sqrt{f'_c[f'_c + \bar{\sigma}_u]} & (\text{由抗压控制}) \end{cases} \quad (6)$$

剪压区混凝土承担的剪力为:

$$V_u = b \int \tau_u(x) dx \approx \bar{\tau}_u b \xi h_0 \quad (7)$$

一般情况下,梁发生剪切破坏时,主压应力并不大,极限状态时配筋 RPC 梁的抗剪承载力由抗拉强度控制:

$$\bar{\tau}_u = \sqrt{f'_t[f'_t - \bar{\sigma}_u]} \quad (8)$$

引入  $f'_c$ , 将式(8)变形得:

$$\frac{\bar{\tau}_u}{f'_c} = \sqrt{\frac{f'_t[f'_t - \bar{\sigma}_u]}{f'_c[f'_c - f'_c]}} \quad (9)$$

参考文献[19—27]中 RPC 的抗拉强度及抗压强度试验数据,取 RPC 抗拉强度  $f_t = 0.083f'_c$ 。对于发生剪切破坏的梁,参考文献[24],近似取  $f'_t = f_t$ ,  $f'_c = 0.83f'_c$ 。

简化式(9)得:

$$\frac{\bar{\tau}_u}{f'_c} = \sqrt{\frac{1}{10} \left[ \frac{1}{10} - \frac{\bar{\sigma}_u}{f'_c} \right]} \quad (10)$$

根据式(10)可绘制  $\frac{\bar{\tau}_u}{f'_c}$  和  $\frac{\bar{\sigma}_u}{f'_c}$  的关系曲线,如图 2 所示。

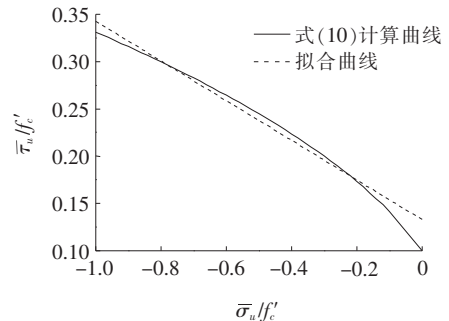


图2  $\bar{\tau}_u/f'_c$  和  $\bar{\sigma}_u/f'_c$  关系曲线

为简化计算,对式(10)进行线性化处理,可得剪压区 RPC 简化强度准则:

$$\frac{\bar{\tau}_u}{f'_c} = 0.133 - 0.211 \frac{\bar{\sigma}_u}{f'_c} \quad (11)$$

### 1.3 配筋 RPC 梁抗剪承载力

如图 1 所示,隔离体的平衡条件:

$$\sum X = 0 \Rightarrow \bar{\sigma}_u b \xi h_0 = A_s f_s \quad (12)$$

$$\sum Y = 0 \Rightarrow V = \bar{\tau}_u b \xi h_0 + \rho_{sv} f_{sv} b c \quad (13)$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow V a = \rho_{sv} f_{sv} b \frac{c^2}{2} + \bar{\sigma}_u b \xi h_0 \left( h_0 - \frac{\xi h_0}{2} \right) \quad (14)$$

为简化计算,根据试验梁统计结果,取  $c =$

$0.8\lambda h_0$ ,  $\lambda$  为受剪梁剪跨比,  $\lambda = \frac{a}{h_0}$ 。

式(11)~(14)共 4 个方程 4 个未知数,联立可解得抗剪承载力:

$$V = [(0.266bh_0 A_s f_s f'_c + 0.8\lambda bh_0 A_s f_s \rho_{sv} f_{sv}) - 0.211 A_s^2 f_s^2 + 0.085b^2 \lambda^2 h_0^2 \rho_{sv} f_{sv} f'_c] / (0.266\lambda bh_0 f'_c + A_s f_s) \quad (15)$$

## 2 试验验证

### 2.1 建议公式计算结果与该文试验结果比较

试验共制作 8 根配筋 RPC 试验梁。试验梁截面均采用 T 形截面且各梁截面尺寸相同。影响梁抗剪承载力的因素较多,此次试验主要研究剪跨比、配箍率以及纵筋率等参数对梁抗剪承载力的影响。试验梁尺寸见图 3。

试验梁编号及参数见表 1。

试验采用两点加载,如图 4 所示。通过调整分配梁分配点的位置,实现不同的剪跨比要求。

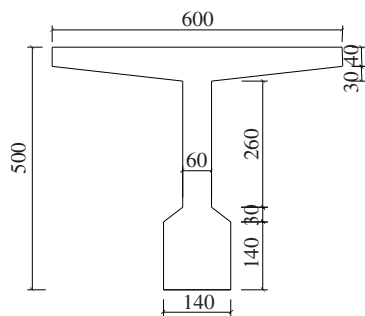


图 3 试验梁构造尺寸图(单位:mm)

表 1 试验梁参数

| 试验梁<br>编号 | $h_0$ /<br>mm | 剪跨比<br>$\lambda$ | 配箍率<br>$\rho_{sv} / \%$ | 配筋率<br>$\rho / \%$ |
|-----------|---------------|------------------|-------------------------|--------------------|
| L-1       | 430           | 3                | 0.47                    | 9.47               |
| L-2       | 430           | 2                | 0.47                    | 9.47               |
| L-3       | 430           | 1                | 0.47                    | 9.47               |
| L-4       | 430           | 2                | 0                       | 9.47               |
| L-5       | 430           | 2                | 0.24                    | 9.47               |
| L-6       | 430           | 2                | 0.31                    | 9.47               |
| L-7       | 430           | 2                | 0.47                    | 10.72              |
| L-8       | 430           | 2                | 0.47                    | 13.57              |

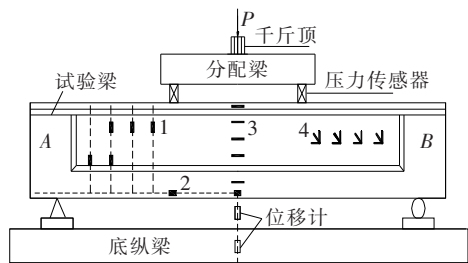


图 4 RPC 梁试验方案

试验中 $\lambda=2,3$ 的试验梁均发生剪压破坏,典型剪压破坏裂缝形态如图 5 所示。荷载作用下,腹板剪跨区不断出现腹剪斜裂缝,并逐渐贯通后形成主裂缝。

由于中国目前尚无 RPC 梁抗剪承载力计算规范,该文选取 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》以及采用式(15)的抗剪承载力公式对该文试验梁进行计算,各计算值与试验值的比较结果见表 2。

由表 2 可知:混凝土结构设计规范公式的计算结果均小于试验结果,且相差较大,不能准确计算 RPC 梁抗剪承载力。试验结果与该文建议公式的计算值比较可得,其比值的平均值为 0.978,标准差为 0.091,可见该文建议公式计算结果与此次试验值吻合程度较好。

2.2 建议公式计算结果与其他试验结果比较

为验证该文建议公式的适用性,对文献[5、7]中的



图 5 试验梁典型破坏图

表 2 建议公式计算结果与该文试验结果比较

| 试件<br>编号 | $V_{exp} /$<br>kN | $V^{[31]} /$<br>kN | $V_{exp} / V^{[31]}$ | $V^{[式(15)]} /$<br>kN | $V_{exp} / V^{[式(15)]}$ |
|----------|-------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| L-1      | 410               | 146                | 2.808                | 525                   | 0.781                   |
| L-2      | 556               | 163                | 3.411                | 570                   | 0.975                   |
| L-3      | 780               | 212                | 3.679                | 842                   | 0.926                   |
| L-4      | 424               | 146                | 2.904                | 394                   | 1.076                   |
| L-5      | 500               | 145                | 3.448                | 484                   | 1.034                   |
| L-6      | 507               | 144                | 3.521                | 510                   | 0.994                   |
| L-7      | 633               | 163                | 3.883                | 619                   | 1.022                   |
| L-8      | 788               | 163                | 4.834                | 774                   | 1.018                   |
| 平均值      | —                 | —                  | 3.561                | —                     | 0.978                   |
| 均方差      | —                 | —                  | 0.630                | —                     | 0.091                   |

注: $V^{[式(15)]}$ 为式(15)计算值; $V^{[31]}$ 为规范计算值; $V_{exp}$ 为试验数据。

RPC 梁抗剪承载力进行了计算,并与文献中的试验结果进行了对比,建议公式计算结果与文献试验结果比较如表 3 所示。

由表 3 可知:试验值与理论值之比的平均值为 1.509,均方差为 0.216,试验值与理论值较吻合,离散系数较小。该文提出的抗剪承载力计算公式可应用于 RPC 梁抗剪设计与计算。

3 结论

(1) 基于极限平衡法的受剪破坏分析,可以较好地预测 RPC 梁的抗剪极限承载力,公式推导过程合理。

(2) 将抗剪承载力的试验结果与混凝土结构设计规范抗剪强度计算公式的计算结果进行比较,由于现

| 表3 建议公式计算结果与文献试验结果比较 |       |      |              |             |
|----------------------|-------|------|--------------|-------------|
| 项目                   | 试件编号  | V/kN | $V_{exp}/kN$ | $V_{exp}/V$ |
| 文献[7]                | L01-A | 326  | 656          | 2.015       |
|                      | L02-A | 298  | 386          | 1.295       |
|                      | L03   | 253  | 356          | 1.408       |
|                      | L04-A | 206  | 335          | 1.624       |
|                      | L05-B | 279  | 419          | 1.504       |
|                      | L06-B | 291  | 430          | 1.475       |
|                      | L07-B | 342  | 426          | 1.246       |
|                      | L08-C | 210  | 301          | 1.436       |
|                      | L09-C | 269  | 425          | 1.582       |
| 文献[5]                | L-0   | 253  | 356          | 1.408       |
|                      | LA-1  | 326  | 651          | 2.000       |
|                      | LA-2  | 298  | 385          | 1.291       |
|                      | LA-3  | 206  | 335          | 1.624       |
|                      | LB-1  | 279  | 422          | 1.513       |
|                      | LB-2  | 291  | 431          | 1.480       |
|                      | LB-3  | 322  | 435          | 1.351       |
|                      | LB-4  | 368  | 485          | 1.318       |
|                      | LC-3  | 229  | 416          | 1.817       |
|                      | LD-1  | 210  | 301          | 1.436       |
|                      | LD-2  | 269  | 425          | 1.582       |
|                      | LE-1  | 253  | 325          | 1.285       |
| 平均值                  |       |      |              | 1.509       |
| 均方差                  |       |      |              | 0.216       |

注:V为公式计算值; $V_{exp}$ 为试验数据。

有规范的斜截面抗剪承载力计算公式是针对普通混凝土,未考虑RPC的高强度和高韧性,计算结果偏离试验值较大。

(3) 将该文的建议计算公式应用于王强、罗伯光等的RPC梁抗剪性能试验结果中,计算式的计算结果与试验结果也较吻合。由此可知采用该文建议公式来预测RPC梁的抗剪承载能力是可行的。

参考文献:

[1] 丁波. 铁路钢筋活性粉末混凝土T形梁抗剪性能试验研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文,2011.

[2] 金凌志,祁凯能,曹霞. 高强钢筋活性粉末混凝土简支梁受剪性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2013(8).

[3] 曹霞,唐婷,彭金成,等. 纵筋率对高强钢筋RPC简支梁受剪性能的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版),2015(4).

[4] 张猛,金凌志. 中等剪跨比高强钢筋活性粉末混凝土无腹

筋梁抗剪性能试验研究[J]. 工业建筑,2016(11).

[5] 王强. HRB500级钢筋活性粉末混凝土梁抗剪性能研究[D]. 广西大学博士学位论文,2018.

[6] 李月霞,刘超,金凌志. 高强钢筋活性粉末混凝土梁的抗剪承载力试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2017(4).

[7] 罗伯光,覃荷瑛,金凌志. 基于桁架拱模型的活性粉末混凝土梁抗剪承载力研究[J]. 建筑科学,2016(7).

[8] 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(6).

[9] 王强,金凌志,蒋春松. 基于修正压力场理论的活性粉末混凝土梁抗剪分析[J]. 大连理工大学学报,2018(6).

[10] 王强,金凌志,曹霞,等. 基于塑性理论的活性粉末混凝土梁抗剪承载力[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017(1).

[11] 黄正猛,方志,贾理. 体外配置CFRP预应力筋RPC梁受弯性能非线性分析[J]. 中外公路,2020(4).

[12] 刘彬,张建仁,王磊,等. 钢筋混凝土梁抗剪承载力计算理论综述(下)[J]. 中外公路,2011(3).

[13] Choi K, Park H, Wight J K. Unified Shear Strength Model for Reinforced Concrete Beams—Part 1:Development[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(2):142—152.

[14] Tureyen A K, Frosch R J. Concrete Shear Strength: Another Perspective[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(5):609—615.

[15] 张克波,梁振刚,郭梁威. 配斜筋钢筋混凝土梁抗剪承载力分析及试验研究[J]. 中外公路,2015(1).

[16] 周磊,黄启舒. 超高性能纤维混凝土薄板的抗剪加固效果研究[J]. 中外公路,2018(5).

[17] Zararis P D, Papadakis G C. Diagonal Shear Failure and Size Effect in RC Beams without Web Reinforcement[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7):733—742.

[18] Bazant Z P. Fracturing Truss Model: Size Effect in Shear Failure of Reinforced Concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(12):1 276—1 288.

[19] 杨志慧. 不同钢纤维掺量活性粉末混凝土的抗拉力学特性研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文,2006.

[20] 鞠彦忠,王德弘,康孟新. 不同钢纤维掺量活性粉末混凝土力学性能的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2013(2).

[21] 鞠彦忠,王德弘,李秋晨,等. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响[J]. 实验力学,2011(3).

[22] 郝文秀,徐晓. 钢纤维活性粉末混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑技术,2012(1).

[23] 刘红彬,鞠杨,孙华飞,等. 硅灰掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响[J]. 工业建筑,2015(4).