

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201707062



不同剪跨比预应力活性粉末 混凝土梁抗剪承载力分析

金凌志¹, 王龙¹, 张毅¹, 周家亮²

(1. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 为了研究预应力活性粉末混凝土简支梁的抗剪性能,对 4 根不同剪跨比无粘结后张预应力活性粉末混凝土梁展开抗剪试验研究,分析剪跨比对承载力的影响,并运用我国现行规范和塑性上限理论等公式对试验梁的承载力计算进行适用性验证.结果表明:随着剪跨比的增大,试验梁的破坏形态由斜压破坏向剪压破坏和斜拉破坏转化;试验梁的承载力随剪跨比的增大而减小,斜裂缝倾角也相应变小,预应力筋应力增量提升速率加快;在 Voo 塑性上限理论公式的基础上,考虑截面尺寸的影响,运用 MATLAB 对试验梁数据进行拟合,建立的预应力活性粉末混凝土梁抗剪承载力计算修正公式具有较好的实用性.

关键词: 预应力; 活性粉末混凝土梁; 剪跨比; 塑性上限理论; 抗剪性能; 承载力

中图分类号: TU 375.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2018)03-0365-06

Analysis of Shear Capacity of Prestressed Reactive Powder Concrete Beams With Different Shear Span Ratios

JIN Lingzhi¹, WANG Long¹, ZHANG Yi¹, ZHOU Jialiang²

(1. Key Laboratory of Guangxi Geotechnical and Geotechnics Engineering,

Guilin University of Science and Technology, Guilin 541004, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The influence of shear span ratio on bearing capacity of reactive powder concrete (RPC) beam was analyzed and applicability verification was carried out with national codes and plasticity upper-bound theory to investigate the shear capacity of four unbonded post-tensioned prestressed experimental simple beams with different shear span ratio. The results show that: with the increase of shear span ratio, the failure mode of the beam was transformed from diagonal compression failure to shear compression failure and diagonal tension failure; with the increase of the shear span ratio, the bearing capacity of the beam decreased, the inclined crack inclination decreases, and the stress increment of the prestressed tendon accelerates; on the basis of Voo plastic upper bound theory formula, considering the influence of section size, using MATLAB to fit the beam data, the practicability of revised shear capacity formula of prestressed reactive powder concrete beam is benign.

Keywords: prestress; reactive powder concrete beam; shear span ratio; plasticity upper-bound theory; shear performance; bearing capacity

活性粉末混凝土(RPC)具有强度高、耐久性好、高延性等优越性能. Voo 等^[1]对 7 根预应力 RPC 无

收稿日期: 2017-07-25

通信作者: 金凌志(1959-),女,教授,主要从事新型材料混凝土结构的研究. E-mail:jlz-5904@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51368013); 广西壮族自治区重点实验室科研项目(2015-A-02)

腹筋梁的抗剪性能进行研究,表明预应力变化、钢纤维种类及掺量对抗剪承载力的影响显著.美国 FHWA 管理局^[2]对一根 24 m 的预应力 RPC 梁进行加载试验,证明 RPC 试验梁具有良好的变形能力.陈彬^[3]对 10 根预应力 RPC 梁的抗剪性能进行试验,提出适用于预应力 RPC 梁的抗剪承载力计算建议公式.王强等^[4]对 14 根分别考虑剪跨比、钢纤维体积比、配箍率、配筋率及纵筋强度影响的 HRB 500 级纵筋 RPC 梁进行受剪试验,得到其抗剪承载力实测值,并基于塑性理论推导出活性粉末混凝土梁的受剪承载力简化公式.然而,有关预应力 RPC 梁抗剪性能的试验数据还相对匮乏.本文对 4 根预应力 RPC 简支梁进行抗剪性能试验,探究不同剪跨比下预应力 RPC 梁抗剪承载力的计算方法^[5],提出预应力 RPC 简支梁抗剪承载力计算的修正公式.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计 4 根无粘结后张预应力无腹筋活性粉末混凝土梁,梁长均为 2 600 mm,主要参数为剪跨比,具体截面尺寸、配筋情况、测点布置及加载方式,如表 1 及图 1 所示.表 1 中: ρ_f 为钢纤维体积比; λ 为剪跨比; ρ 为纵筋率; δ_k 为张拉控制力; λ_p 为预应力度.

表 1 试验梁主要参数

Tab. 1 Main parameters of test beam

试验梁	$\rho_f/\%$	λ	非破坏端箍筋	纵筋	$\rho/\%$	预应力筋	δ_k/kN	λ_p
L1	0.75	1.28	C6@200	2 Φ 25	2.00	2 Φ 15.2	150	0.45
L2	0.75	1.71	C6@200	2 Φ 25	2.00	2 Φ 15.2	150	0.45
L3	0.75	2.00	C6@200	2 Φ 25	2.00	2 Φ 15.2	150	0.45
L4	0.75	2.57	C6@200	2 Φ 25	2.00	2 Φ 15.2	150	0.45

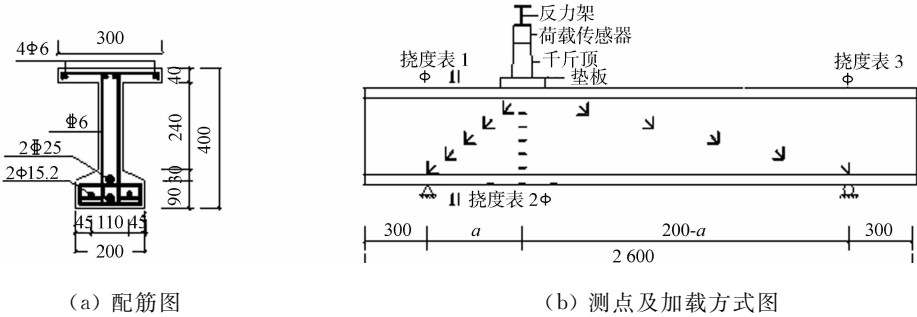


图 1 试验梁测点、配筋及加载方式(单位:mm)

Fig. 1 Measure points, reinforcement and loading pattern of test beam (unit: mm)

1.2 原材料配比

材料配比为水泥:粗砂:中砂:细砂:硅灰:钢纤维:减水剂:水=1.00:0.20:0.80:0.20:0.30:0.75:0.02:0.23.其中,钢纤维为体积比,其余为质量比.硅酸盐 42.5P II 型水泥;石英砂级配分为粗、中、细,粗砂粒径为 0.60~1.25 mm,中砂粒径为 0.3~0.6 mm,细砂粒径为 0.160~0.315 mm;硅灰中 SiO₂ 质量分数不低于 94.7%,粒径小于 0.2 μm;钢纤维长度约为 12~15 mm,长径比为 54.5~68.2,表面镀铜,抗拉强度大于 2 000 MPa;高性能聚羧酸减水剂,减水率大于 28%;水为自来水.

1.3 力学性能

RPC 力学性能指标参照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行实测,试块与试验梁由同一批材料浇筑、养护.RPC 各项力学性能指标,如表 2 所示.表 2 中: f_{cu} 为立方体抗压强度; f_t 为立方体劈裂强度; f_c 为棱柱体抗压强度; f_l 为棱柱体抗折强度.

表 2 RPC 力学指标实测值

Tab. 2 Test value of RPC mechanical parameters MPa

力学指标	L1	L2	L3	L4	平均值
f_{cu}	121.2	125.1	117.8	121.2	121.3
f_t	6.1	5.9	5.8	5.9	5.9
f_c	108.5	105.7	105.7	108.5	107.1
f_l	18.5	16.6	19.8	18.5	18.4

钢筋力学性能指标参照 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》进行实测,钢筋力学指标实测值如下:直径为 25 mm 的钢筋屈服强度、极限抗拉强度、弹性模量分别为 555.9,735.7, 2.0×10^5 MPa;直径为 15.2 mm 的钢筋极限抗拉强度、弹性模量分别为 1 860, 2.0×10^5 MPa.

1.4 加载方案

1.4.1 预应力张拉方案 试验梁的预应力度 λ_p 约为 0.45,预应力张拉值为 150 kN,4 根试验梁的有效预应力均约为 120 kN.试验梁采用两端交错张拉,即先张拉一端的第一根预应力筋至设计预应力值的 20%,锁住千斤顶持荷;然后,再张拉另一端第二根力筋到与第一根预应力筋的等值状态,张拉后停歇 10 min,观测并采集数据;每级预应力值约 30 kN,逐级增大,直到张拉力达到 150 kN,停止张拉并持荷,进入结构加载试验阶段.

1.4.2 试验梁加载方案 试验梁加载分为预加载和正式加载两个阶段.1) 预加载.预加载分三级进行,每级荷载为理论计算开裂荷载值的 20%.然后,分三级卸载,试验梁每级预加载或卸载后均持荷 10 min.2) 正式加载.每级荷载为理论计算极限荷载值的 10%,加载至约为极限荷载计算值的 90%时,每级荷载按 5%计算值进行加载,直至试验梁破坏.每级荷载加载后,均持荷 10 min,保证每级荷载所对应的裂缝得到充分发展,待试验数据基本稳定后,再进行数据采集、裂缝观察、测量和记录.

1.5 试验结果

按照试验方案得出的试验结果,如表 3 所示.表 3 中: V_{cr} 为开裂荷载; V_{max} 为极限荷载; V_{ex} 为抗剪承载力;L1 的破坏形态为斜压型;L2~L4 的破坏形态为剪压型.

表 3 不同破坏形态的试验结果

Tab.3 Test results for different failure modes

试验梁	λ	V_{cr}/kN	V_{max}/kN	V_{ex}/kN
L1	1.28	191.58	740	573.5
L2	1.71	124.39	493	345.1
L3	2.00	148.72	390	253.5
L4	2.57	72.11	368	202.4

1.6 试验现象及结果分析

1.6.1 破坏特征 试验梁 L1~L4 破坏时的裂缝情况,如图 2 所示.由图 2 可知:L1 剪跨比最小,承载力最高,破坏时没有出现临界主斜裂缝,而是在加载点与支座之间产生多条近似平行的斜裂缝,形成多个受压短柱,最后加载点的混凝土有局部压碎现象,属于斜压破坏;L2~L4 均由几条裂缝互相连通形成一条临界主斜裂缝,剪压区高度逐渐减小,最后混凝土被压碎而破坏,属于剪压破坏.L1~L4 剪跨区的斜裂缝数量依次减少,而纯弯区的受弯裂缝数量却依次增加,说明随着剪跨比的增大,试验梁的破坏形态由斜压型转为剪压型,如果继续增大还可能转为斜拉型,甚至最后转化为受弯破坏.

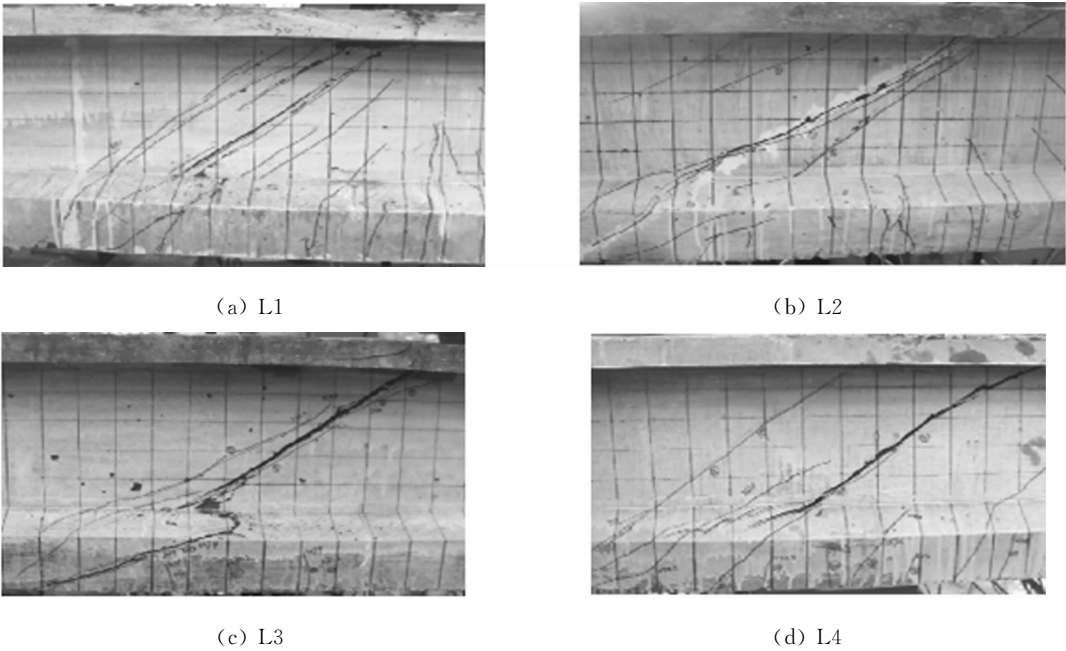


图 2 试验梁破坏时的裂缝图

Fig.2 Crack distribution under beam failure

1.6.2 剪跨比对承载力的影响 荷载-剪跨比($V_0-\lambda$)曲线,如图 3 所示.由图 3 可知:L1~L4 的剪跨比 λ 从 1.28 增加到 1.71,2.20,2.57,试验梁的承载力依次为 573.5,345.1,253.5,202.4 kN,下降幅度分别为 39.8%,55.8%和 64.7%,表明剪跨比对预应力 RPC 试验梁的破坏形态及抗剪承载力的影响比较明显;特别是小剪跨比 λ 从 1.28 增加到 1.71,承载力下降的速率最大,而后呈降低趋势.

随着剪跨比的增大,试验梁的斜裂缝倾角变小,这与文献[6]的结论一样.取 RPC 梁上的单元体进行分析,假设单元体各向匀质同性,各向极限应力等值,符合摩尔应力圆^[7]原理,如图 4 所示.图 4 中: f 为单元体的合力,即摩尔圆半径, $2f=f_1+f_2$; θ 为斜裂缝与水平方向的夹角; f_1 为单元体混凝土的主压应力 σ_1 ; f_2 为主拉应力 σ_2 .单元体合力 f 不变,正应力 σ 越大,则剪应力 τ 越小,当试验梁主拉应力达到或超过 RPC 抗拉极限应力时,RPC 即开裂.在集中荷载作用下,剪跨比 $\lambda=M/(Vh_0)$.剪跨比 λ 越大,试验梁所受弯矩 M 相对于剪力 V 的比重越高,单元体水平方向应力的夹角 θ 越小,梁的斜裂缝倾角也随之变小,剪跨比是决定试验梁承载力和破坏形态的关键因素.

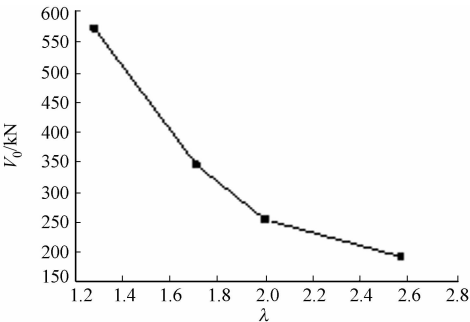


图 3 荷载-剪跨比曲线

Fig. 3 Shear capacity-shear span ratio curve

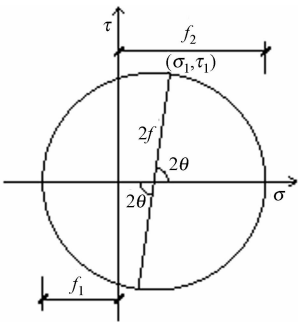


图 4 摩尔应力圆

Fig. 4 Molar stress circle

1.6.3 预应力筋应力增量 无粘结预应力筋的应力增量间接反应试验梁受力情况的变化,根据穿心式传感器所测得的试验数据绘制的荷载-应力增量($V_0-\Delta\sigma$)曲线,如图 5 所示.由图 5 可知:4 根试验梁的应力增量曲线均可分成两段,曲线上半段斜率较大,后半段出现明显转折点.这说明未开裂时,试验梁基本处于弹性受力阶段,荷载由 RPC 及纵筋、钢纤维、预应力筋共同承担;开裂后试验梁进入弹塑性阶段,裂缝处的混凝土不再承担应力,与裂缝相交处的预应力筋应力增量加速增大,荷载-应力增量曲线向横坐标偏转,曲线斜率减小.剪跨比为 1.75 与 2.0 的 L2,L3 的弹塑性阶段曲线斜率变化不明显;剪跨比最小的 L1($\lambda=1.28$)弹塑性阶段曲线斜率最大,预应力筋的应力增量最为缓慢;剪跨比最大的 L4($\lambda=2.57$)弹塑性阶段的曲线斜率最小,即预应力筋的应力增量提升速率最快.对比弹塑性阶段 L1~L4 预应力筋的应力增量曲线斜率,可知剪跨比越大,试验梁预应力筋的应力增量值增加越快.

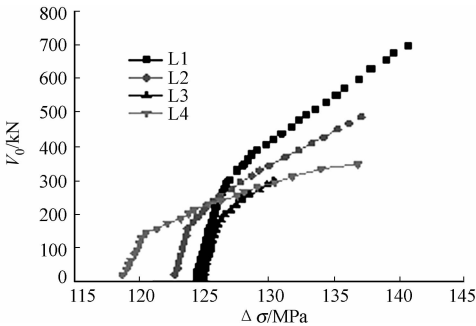


图 5 荷载-预应力筋应力增量曲线

Fig. 5 Load-stress increment curve

2 预应力 RPC 梁受剪承载力计算分析

2.1 基于我国规范公式的受剪承载力计算

GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》并没有给出无腹筋预应力混凝土受弯构件斜截面的受剪承载力计算公式,而是在有腹筋混凝土梁中才考虑增设预应力项,由预加力所提高的构件受剪承载力公式为

$$V_p = 0.05N_{p,0} \tag{1}$$

式(1)中: V_p 为预应力对构件受剪承载力的贡献; $N_{p,0}$ 为计算截面上混凝土土法相预应力为零的预加力.

文中预应力 RPC 抗剪承载力的计算,暂且沿用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》的公式进行计算,计算结果如表 4 所示.表 4 中: V_{cs} 为混凝土项受剪承载力理论计算值; V_{cal} 为混凝土项与预应力项叠加的受剪承载力理论计算值; V_{ex} 为试验实测抗剪承载力值.

由表 4 可知:试验梁的抗剪承载力实测值均高于公式的理论计算值,而且剪跨比 λ 越小,其差值越

表 4 国标公式计算值与试验值对比

Tab. 4 Comparison of calculation value of national standard formula and test value

试验梁	λ	V_{cs}/MPa	V_p/MPa	V_{cal}/kN	V_{ex}/kN	V_{ex}/V_{cal}
L1	1.28	101.32	15.51	116.83	573.5	4.909
L2	1.71	93.50	15.51	109.01	345.1	3.166
L3	2.00	84.39	15.51	99.90	253.5	2.538
L4	2.57	70.92	15.51	86.43	202.4	2.342
平均值	—	—	—	—	—	3.203
均方差	—	—	—	—	—	1.168
变异系数	—	—	—	—	—	0.365

明显,最大达 4.91 倍,均值为 3.20 倍,说明我国现行混凝土结构设计规范公式并不适用于预应力 RPC 简支梁抗剪承载力的计算,严重低估了预应力 RPC 梁的抗剪承载力,预应力和 RPC 的优越性能无法得到充分发挥.其原因有以下 2 点.1) 从 RPC 的材料组成着眼,由于去粗骨料,消除了水泥石和粗骨料之间交互面上的原始微裂纹;而硅微粉、硅灰等活性材料可以降低水化热,改善混凝土的抗温差开裂性能,使孔隙细化提高强度;采用加热养护和加压方式,充分改善 RPC 凝结后的微观结构,使其微观结构极其致密,进一步提升强度;在 RPC 中掺有一定量钢纤维,钢纤维的“桥架”作用对试验梁承载力的贡献不容忽视.2) 从预应力项分析,文献[3]研究表明,预应力对抗剪承载力的贡献随剪跨比的增大而减小,而我国规范公式仅考虑 5% 的预应力对承载力的影响,显然偏低.

2.2 基于塑性上限理论受剪承载力公式修正

Voo 等^[8]根据塑性上限理论,以裂缝滑移模型为基础,认为梁的最薄弱截面上出现首批裂缝时,裂缝截面处的混凝土应力为 0,全部拉应力转由钢筋承担,钢筋应力突增,裂缝两侧的 RPC 发生相对滑移.设试验梁开裂时,所对应的斜裂缝水平投影长度为极限承载力对应的斜裂缝水平投影长度,提出了 RPC 无腹筋梁的斜截面受剪承载力公式,即

$$V_u = 1/2f_{cu}bh(\sqrt{1+(x/h)^2} - x/h).$$

(2)

式(2)中: f_{cu} 为混凝土抗压强度; b 为梁宽度; h 为梁高度; x 为斜裂缝在水平方向的投影长度; V_u 为梁的抗剪承载力.

文献[9]已证实式(2)在一定条件下具有一定的适用性.将 4 根 RPC 预应力试验梁的斜裂缝水平投影长度代入式(2),计算出对应的极限承载力,其结果如表 5 所示.由表 5 可知:极限承载力计算值 V_u 与试验实测值 V_{ex} 并不接近,几乎大了 4 倍多,二者的比值随剪跨比的改变呈现非线性变化,说明式(2)不能较好地反应 RPC 预应力试验梁的承载力.究其原因,主要与 RPC 超高的强度和梁的截面尺寸有关,截面尺寸对混凝土梁的抗剪承载力影响显著,而式(2)一般适用于 h/b 为 3.33 左右较大的深梁^[10],需考虑截面尺寸对承载力的影响.为找出修正系数 ζ 的参考值,将 4 根试验梁实测得到的数据用 MATLAB 进行拟合,可得

$$\zeta = \frac{0.108}{1+(a/h)^2 - a/(2h)}.$$

(3)

式(3)中: ζ 为截面尺寸的影响系数.由于 4 根梁数据偏少,有待以后进一步验证.将式(3)代入式(2),有

$$V_u = \frac{0.108f_{cu}bh}{1+(a/h)^2 - a/(2h)}.$$

(4)

2.3 受剪承载力修正公式验证

徐海滨等^[11]对 6 根后张法预应力超高性能钢纤维混凝土梁的受弯性能进行试验,变化参数包括非预应力纵筋强度等级、配筋率、张拉控制应力、预应力度及试验梁尺寸等.修正公式计算值与文献[11]试验值的对比,如表 6 所示.表 6 中: a 为剪跨长; $V_{u,1}$ 为有关参数代入进行验算的计算值; $V_{ex,1}$ 为试验值.

分析表 6 中的计算值与试验值可知:计算值与试验值比值的均值为 1.03,均方差为 0.101,变异系数为 0.098,表明计算值与试验值吻合度较高,可见式(4)对预应力活性粉末混凝土梁抗剪承载力的计算具有一定的可信度。

3 结论

1) 与普通钢筋混凝土梁一样,剪跨比对预应力 RPC 试验梁承载力的影响较大,随着剪跨比的增大,试验梁所受弯矩 M 相对于剪力 V 的比重增加,破坏形态由斜压破坏向剪压破坏过渡,极限承载力随之下降,斜裂缝倾角相应减小。

2) 试验梁的荷载-预应力筋应力增量曲线可分为弹性和弹塑性两个阶段,开裂前,试验梁处于弹性受力阶段,荷载-应力增量曲线呈线性增长;开裂后,试验梁进入弹塑性阶段,预应力筋应力增量加快,荷载-应力增量曲线向横坐标偏转,曲线斜率减少,且剪跨比越大,预应力筋应力增量的提升速率越快。

3) 由于 RPC 材料的超高性能,我国现行混凝土设计规范公式不能直接运用于预应力 RPC 梁抗剪承载力的计算,澳大利亚学者 Voo 基于塑性上限理论的计算公式针对高宽比较大的深梁而构建,也不适应于普通预应力 RPC 梁抗剪承载力的计算. 文中在 Voo 公式的基础上,考虑截面尺寸对承载力的影响,运用 MATLAB 对试验梁数据进行拟合,建立了预应力活性粉末混凝土梁抗剪承载力计算的修正公式,具有较好的实用性。

参考文献:

[1] VOO Y L,FOSTER S J,GILBERT R I. Shear strength of fiber reinforced reactive powder concrete girders without stirrups [D]. Sydney:University of New South Wales,2003.

[2] BRIAN F. FHWA gives superior marks to concrete bridge girder[J]. Civil Engineering Magazine,2001,71(10):12-13.

[3] 陈彬. 预应力 RPC 梁抗剪性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2007.

[4] 王强,金陵志,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),2017,45(1):16-22. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2017.01.003.

[5] VOO Y L,FOSTER S J,GILBET R I. Shear strength of fiber reinforced reactive powder concrete prestressed girders without stirrups[J]. Advanced Concrete Technology,2006,4(1):123-132. DOI:10.3151/jact.4.123.

[6] 周英武,王苏岩,李宏男. 钢筋混凝土梁斜裂缝倾角理论与试验分析[J]. 大连理工大学学报,2008,48(2):235-239.

[7] 魏巍巍. 基于修正压力场理论的钢筋混凝土结构受剪承载力及变性研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.

[8] VOO Y L,POON W K,FOSTE S J. Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups[J]. Structural Engineering,2010,136(11):1393-1400. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000234.

[9] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. Design of concrete structures; CAN/CSA A23.3—1994[S]. Rexdale: Canadian Standards Association,1994.

[10] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. Canadian highway bridge design code; CAN/CSA-S6—2000[S]. Toronto:CSA International,2000.

[11] 徐海宾,邓宗才. 预应力超高性能钢纤维混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(12):58-64. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2014.12.008.

表 6 修正公式计算值与文献[11]试验值对比
Tab. 6 Calculated value of modified formula is compared with reference [11] test value

试验梁	a/mm	$V_{u,1}/\text{kN}$	$V_{ex,1}/\text{kN}$	$V_{ex,1}/V_{u,1}$
B1	105	483.931	407	0.841
B2	105	483.931	540	1.116
B3	105	492.411	559	1.135
B4	105	492.411	499	1.013
B5	105	475.660	521	1.095
B6	105	475.660	465	0.978
平均值	—	—	—	1.030
均方差	—	—	—	0.101
变异系数	—	—	—	0.098

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)