

体外配置 CFRP 预应力筋 RPC 梁受弯性能非线性分析

黄正猛,方志,贾理

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:为研究钢纤维对体外配置碳纤维(Carbon Fiber Reinforced Polymer,CFRP)预应力筋活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete,RPC)梁受弯性能的影响大小,探讨能否凭借RPC中钢纤维的掺入代替普通钢筋的作用,以预应力度为试验参数,进行两根体外配置CFRP预应力筋RPC梁受弯加载试验,明确梁的受力破坏过程特征。试验结果表明:梁内未配置任何普通钢筋、预应力度为1.0的全预应力梁发生少筋特征的脆性断裂破坏;梁内配置普通钢筋、预应力度为0.71的部分预应力梁,其承载能力及极限变形较全预应力梁分别提高88.7%和18.1%,破坏模式为梁内非预应力钢筋屈服、受压区混凝土压碎的延性破坏。钢纤维的掺入对全预应力梁抗弯性能的提升作用有限,普通钢筋的配置对体外CFRP预应力RPC梁受弯性能的改善作用显著,因此实际工程中不宜过高估计钢纤维的作用而取消体内非预应力钢筋的配置。基于试验结果编制非线性分析程序,并据此对部分预应力梁进行了数值参数分析,结果表明:相比体外CFRP预应力普通混凝土梁,采用RPC更能发挥CFRP筋的高强特性;有效预应力及预应力度改变对体外CFRP预应力RPC梁极限变形的影响显著高于对其承载能力的影响。

关键词:RPC;体外预应力;CFRP;钢纤维;受弯性能

1 前言

混凝土结构是当今世界土木工程中应用最广泛的结构形式之一,但普通混凝土结构普遍面临结构自重、易开裂、耐久性差等问题。因此降低结构自重、增强结构耐久性成为现今土木工程发展中的重要研究课题。

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete,RPC)基于最大密实度理论配置,具有超高的抗压强度和较高的抗拉强度、良好的韧性、优异的耐久性、热养护后基本无收缩且徐变大幅降低等特性,RPC也由此被归于超高性能混凝土范畴并被视为新一代水泥基材料,在土木工程中具有良好的应用前景,有望取代普通混凝土应用于工程结构。采用高强RPC可形成轻薄构件,从而显著降低结构自重,并大幅提高结构耐久性。

虽然薄腹RPC梁能显著增大结构的跨越能力、提高结构抵抗使用荷载的有效性,但较小的壁厚往往导致体内预应力筋难以布置,使得结构尺寸多由构造要

求而非受力要求所决定,此时,采用体外预应力结构不失为一种更加合理的选择,但传统体外预应力结构中采用的钢制预应力筋普遍存在耐久性能和抗疲劳性能不足的问题。碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,CFRP)具有强度高、重量轻、免锈蚀及抗疲劳性能好等优点,可望成为传统钢制体外预应力筋的潜在替代品,并与RPC一道,形成一种结构性能和耐久性能优良的体外预应力混凝土结构。

国内外学者针对RPC和CFRP的工程应用已进行了一系列的试验研究。余自若等进行了不同配筋率下的RPC梁抗弯试验研究,表明RPC梁的开裂荷载较普通混凝土高,但无配筋RPC梁仍表现出“少筋”破坏特点;孟履祥等通过试验研究了配置CFRP预应力筋部分预应力普通混凝土梁的受力性能,表明梁具有较好的延性和耗能能力;方志等对CFRP预应力RPC梁的受力性能进行了试验研究,表明CFRP预应力RPC梁具有期望的裂缝分布及破坏形态;Nabil F. Grace对体外CFRP预应力筋普通混凝土梁的抗疲劳性能进行了试验研究,结果表明体外CFRP预应力筋

具有良好的抗疲劳性能。

目前国内外对 RPC 和 CFRP 受力性能的研究主要集中在普通配筋 RPC 结构、体内 CFRP 预应力配筋普通混凝土结构、体内 CFRP 预应力配筋 RPC 结构及体外 CFRP 预应力配筋普通混凝土结构方面,而对体外配置 CFRP 预应力筋 RPC 结构受力性能的研究仍鲜见文献报道。另外,根据现有研究成果,RPC 中由于高强钢纤维的添加,使得其具有较高的抗拉和抗剪强度,在结构构件中能够直接承受较大的拉应力和剪应力,因此对于普通钢筋 RPC 梁和体内预应力 RPC 梁,可以取消梁内的受剪钢筋和后者体内的普通受拉钢筋,但此举对于体外预应力 RPC 梁是否合适还有待研究。基于上述两方面的考虑,该文以预应力度为试验参数,对两根体外配置 CFRP 预应力筋 RPC 梁的抗弯性能进行试验研究,以期明确这种梁的受力变形特征。

2 试验概况

2.1 试件设计

试验共设计了两根体外配置 CFRP 预应力筋的 RPC 简支 T 梁,如图 1 所示。梁长为 2.44 m,计算跨径为 2.26 m,梁高为 0.2 m,跨高比为 11.3。体外布置两根直线形 CFRP 预应力筋,转向器设置在梁跨中位置处,与 CFRP 预应力筋的接触面为马鞍形不锈钢片,曲率半径为 40 cm。试验参数预应力度 PPR [$PPR = A_p f_{fp} / (A_p f_{fp} + A_s f_y)$, A_p 和 A_s 分别为 CFRP 预应力筋和非预应力受拉钢筋的面积, f_{fp} 和 f_y 分别为 CFRP 筋抗拉强度和钢筋屈服强度]分别为 1.0 和 0.71, $PPR=1.0$ 为梁内未布置任何普通钢筋的全预应力梁, $PPR=0.71$ 为梁内受拉区布置了两根直径为 16 mm HRB400 级非预应力普通钢筋的部分预应力梁,试件设计参数如表 1 所示。表中试件编号 EB-C55-P100 的意义为:EB 表示体外预应力混凝土梁、C55 表示张拉控制应力为 $0.55 f_{fp}$ 、P100 表示预应力度为 1.0,剩余试件编号的意义类同。

表 1 试件设计参数

试件编号	$(\sigma_{con} / f_{fp}) / \%$	预应力筋面 积/ mm^2	非预应力筋 面积/ mm^2		PPR
			受拉区	受压区	
EB-C55-P100	55	152	—	—	1.00
EB-C55-P71	55	152	402.2	157	0.71

2.2 材料力学性能

RPC 设计强度等级为 150 MPa,配比为水泥:水:硅灰:石英粉:石英砂:减水剂=1:0.2:0.25:0.3:1.1:2.5%,水胶比为 0.16,钢纤维为镀铜光面平直钢纤维,体积掺量为 2%。试件先自然养护 48 h,然后再蒸气养护 72 h。采用边长 100 mm 的立方体测试强度等级;100 mm×100 mm×300 mm 试块测试弹性模量和轴心抗压强度,100 mm×100 mm×400 mm 试块测试抗折强度。实测 RPC 力学性能参数见表 2。

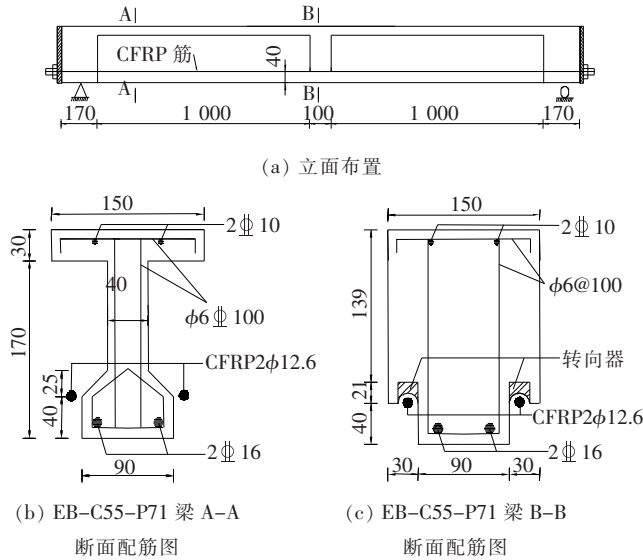


图 1 试件尺寸及配筋(EB-C55-P71)(单位:mm)

表 2 实测 RPC 力学性能

RPC 强 度等级	$f_{cu} /$ MPa	$f_c /$ MPa	$f_{r0} /$ MPa	$f_{ru} /$ MPa	$E_c /$ GPa
RPC150	156.5	127.3	11.9	25.3	44.7

注:表中 f_{cu} 、 f_c 、 f_{r0} 、 f_{ru} 和 E_c 分别为 RPC 的立方体抗压强度、轴心抗压强度、抗折初裂强度、抗折极限强度和弹性模量。

体外预应力筋采用图 2 所示进口 7 丝 CFRP 绞线,其单丝公称直径为 4.18 mm,有效直径为 3.72 mm;整束绞线的公称直径为 12.54 mm。CFRP 预应力筋采用 RPC 作为黏结介质的黏结式锚具,实测 CFRP 筋及钢筋性能参数见表 3。

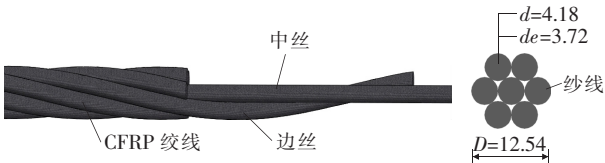


图 2 CFRP 绞线筋(单位:mm)

表 3 CFRP 筋及钢筋力学性能

筋材型号	公称直径/mm	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB400	10	2.0×10^5	463.3	593.4
HRB400	16	2.0×10^5	447.3	580.5
CFRP 筋	12.54	1.57×10^5	—	2 539.0

2.3 预应力张拉及测试

预应力筋采用图 3 所示装置,通过两个千斤顶单端同步施加,由锚固端穿心式压力传感器测量张拉力。张拉过程中用位移计测量梁的反拱值,由粘贴于混凝土

土表面的应变片测量跨中截面上、下缘纵向应变,并根据实测弹性模量得到相应应力。试验梁张拉实测结果见表 4,表中应力和应变记受拉为“+”,受压为“-”。

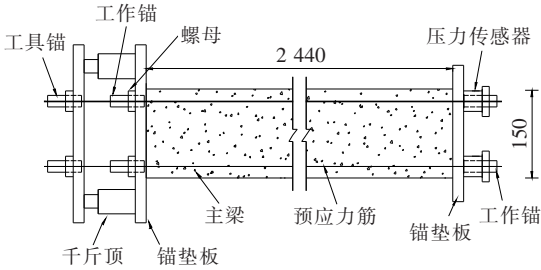


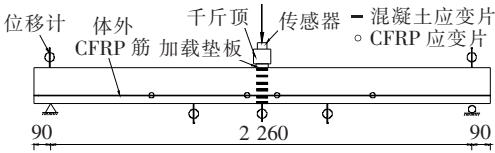
图 3 预应力张拉装置(单位:mm)

表 4 预应力张拉试验结果

试件编号	放张前预应力/MPa	预应力损失 σ_l /MPa	有效预应力 f_{pe} /MPa	梁反拱/mm	实测应变/ $\mu\epsilon$		实测应力/MPa	
					上缘	下缘	上缘	下缘
EB-C55-P100	1 391.4	32.8	1 358.6	3.17	109	-816	4.9	-36.5
EB-C55-P71	1 373.3	38.4	1 334.9	2.11	53	-641	2.4	-28.7

2.4 加载装置及测点布置

试验为跨中单点加载,采用液压千斤顶分级控制加载,由布置于千斤顶上的压力传感器控制加载速率和荷载大小,均为单调加载。当荷载降为峰值荷载的 80%或受压区混凝土压碎时认为试件破坏,主动卸载。主要测试内容有:梁体变形、体外预应力增量、试件破坏形态等。加载装置及测点布置如图 4 所示。



(a) 加载装置及测点布置示意(单位:mm)



(b) 加载装置实景

图 4 加载装置及测点布置

3 试验结果分析

3.1 受力破坏过程

试验梁主要测试结果及跨中截面荷载/弯矩—挠度($P-\Delta$)曲线分别如表 5 和图 5 所示;梁破坏时控制截面的形态如图 6 所示。

表 5 试验梁试验结果

试件编号	P_{cr} / kN	Δ_{cr} / mm	$P_k(P_y)$ / kN	$\Delta_k(\Delta_y)$ / mm	P_u / kN	Δ_u / mm	P_{cr}/P_u
EB-C55-P100	57.2	4.32	72.6	8.86	70.2	31.73	0.79
EB-C55-P71	68.9	4.72	109.8	9.47	137.0	37.48	0.50

注:表中 P_{cr} 、 $P_k(P_y)$ 、 P_u 分别为截面开裂荷载、全预应力梁裂后峰值点荷载(部分预应力梁钢筋屈服时荷载)、极限荷载; Δ_{cr} 、 $\Delta_k(\Delta_y)$ 、 Δ_u 分别为对应时刻的挠度。

从表 5、图 5、6 可见:
对于体内未配任何普通钢筋的全预应力梁 EB-C55-P100,其受力破坏过程可分为 3 个阶段:当荷载

施加到 57.2 kN 时,跨中转向块边缘截面受拉底缘应变达到基体初裂应变后基体开裂(图 5 荷载位移曲线中的 A 点),裂缝处的钢纤维随即发挥其桥接作用并

对裂缝发展有所抑制,当裂缝宽度发展至 0.45 mm 左右时,伴随着受拉区钢纤维拔出的声响,受拉边缘钢纤维作用逐渐消失,荷载达到峰值 72.6 kN(图 5 荷载位移曲线中的 B 点),较初始开裂荷载增加 26.9%,反映了钢纤维的抗拉作用。此后裂缝宽度和跨中挠度发展速度加快,而荷载基本保持不变,过程中梁的受力近似

于带拉杆的扁拱,直至梁体断裂破坏(图 5 荷载位移曲线中的 C 点),荷载降为 0。全预应力梁表现出少筋梁的破坏特征,破坏模式为梁体沿主裂缝发生梁体断裂破坏[图 6(a)],裂缝较为集中且发展速度快,破坏时梁跨中截面顶缘实测压应变为 $3\,313\,\mu\epsilon$,远未达到 RPC 的极限压应变(约为 $4\,500\,\mu\epsilon$)。

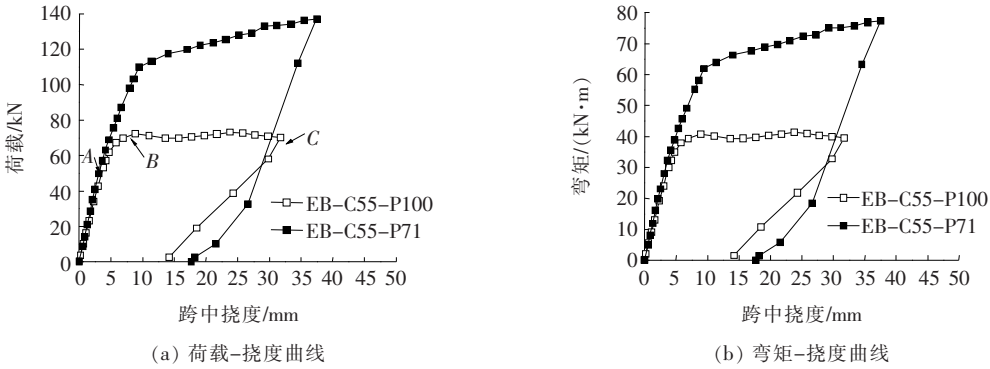


图 5 梁跨中受力—变形曲线

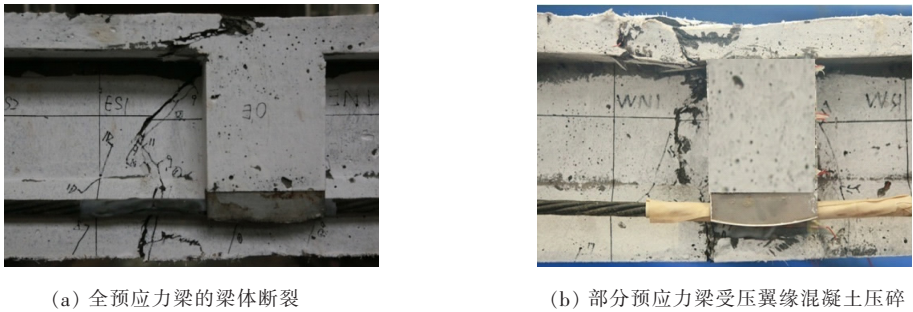


图 6 试件破坏形态

体内外混合配筋的部分预应力梁 EB—C55—P71,其受力过程经历了 RPC 开裂、体内受拉钢筋屈服和受压边缘 RPC 压碎[图 6(b)],荷载/弯矩—挠度曲线近似呈三折线,表现出延性破坏特征,破坏时跨中截面顶缘压应变达到 $4\,825\,\mu\epsilon$ 。由于体内钢筋的抗拉作用远较 RPC 中的钢纤维强,使得基体开裂后的截面刚度降低不太明显,并掩盖了钢纤维抗拉作用退出后的反映。与全预应力梁 EB—C55—P100 相比,部分预应力梁 EB—C55—P71 的荷载—挠度曲线在基体开裂前基本与全预应力梁重合,但在开裂后则表现出不同的受力现象,其裂缝数目明显增多,分布范围更大,极限荷载和极限挠度分别提高了 88.7%和 18.1%。可见,仅掺入钢纤维的全预应力梁仍表现出少筋特征的脆性断裂破坏,而配置了非预应力普通钢筋的部分预应力梁不仅承载能力及变形能力明显提高,且裂缝分布形态得以有效改善,发生延性破坏,为期望的破坏模

式。因此,体外 CFRP 预应力筋 RPC 梁中,钢纤维的掺入不能完全替代普通钢筋的作用。

3.2 体外预应力增量

体外 CFRP 预应力增量随挠度的变化规律如图 7 所示,应力增量以有效预应力为基点。

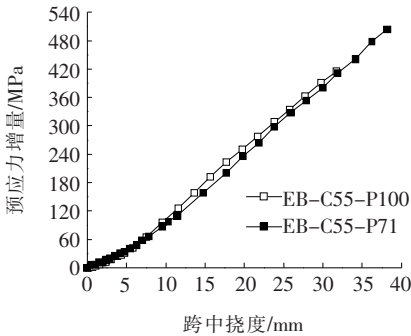


图 7 体外预应力增量—跨中挠度曲线

由图 7 可见:加载前期由于预应力施加引起梁体

反拱,CFRP预应力筋与跨中转向器未接触,致使体外预应力增量随跨中挠度变化较小。当加载至CFRP预应力筋与转向器接触后,体外预应力增量与跨中挠度接近线性增长关系。

全预应力梁EB-C55-P100、部分预应力梁EB-C55-P71极限状态时体外预应力筋的应力增量分别为415.3、503.3 MPa,部分预应力梁较全预应力梁增大了21.2%,这是因为部分预应力梁破坏时具有更大的挠度。可见,非预应力钢筋在改善体外预应力梁变形能力的同时,可提高体外CFRP筋的极限应力增量,发挥CFRP筋的高强特性。

4 数值分析

为了更好地研究体外CFRP预应力筋部分预应力RPC梁的抗弯性能,通过编制非线性分析程序对结构进行数值参数分析。

4.1 基本假定

分析过程中采用如下的基本假定:

(1) 结构在变形后,截面应变符合平截面假定(体外预应力筋应变除外)。

(2) 体外CFRP预应力筋在转向器处可以自由滑动,忽略摩擦产生的影响。

(3) CFRP筋为理想的线弹性材料,钢筋为理想的弹塑性材料;RPC的本构关系参见文献[6]。

4.2 体外预应力增量计算

根据体外CFRP筋与跨中转向器接触点竖向变形协调,可将试验梁简化为如图8所示的计算模型,由几何关系可求解体外预应力增量。

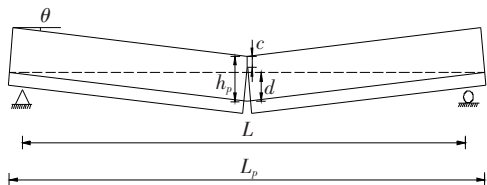


图8 计算模型

如图8所示,据几何关系可由式(1)、(2)分别近似计算梁端转角 θ 和体外预应力筋伸长量 Δ_p :

$$\theta = \tan \theta \cdot \frac{\delta}{0.5L} = \frac{2\delta}{L} \quad (1)$$

$$\Delta_p = 2(h_p - c) \cdot \theta = \frac{4(h_p - c)\delta}{L} \quad (2)$$

则体外预应力增量为:

$$\Delta f_p = \frac{4E_p(h_p - c)\delta}{LL_p} \quad (3)$$

式中: h_p 为跨中截面体外预应力筋有效高度; c 为跨中截面受压区高度; δ 为跨中截面挠度; E_p 和 L_p 分别为体外预应力筋的弹性模量和锚固点间长度。

4.3 全过程非线性分析方法

试验梁的数值分析是基于梁截面的弯矩一曲率关系进行的,分析时首先根据截面几何条件、物理条件及内力平衡条件,采用条带分层法得到梁的全过程弯矩一曲率关系,然后由弯矩一曲率关系采用共轭梁法求解梁的荷载—挠度曲线关系,其中体外预应力增量需按式(3)通过迭代计算求得。程序框架如图9所示。

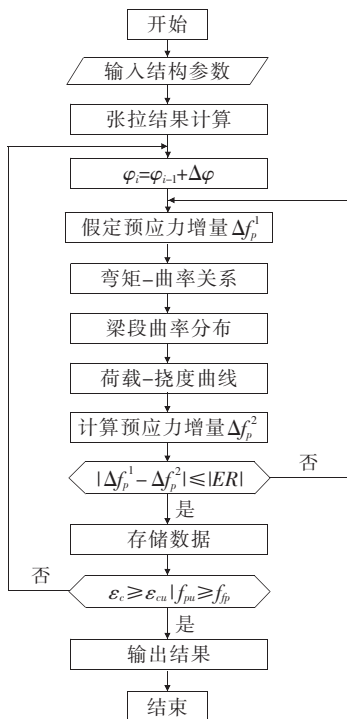


图9 全过程分析流程图

试验梁EB-C55-P71计算值与试验值比较如图10所示。由图10可见:计算值与试验值基本吻合,可以较好地描绘部分预应力梁的加载过程。

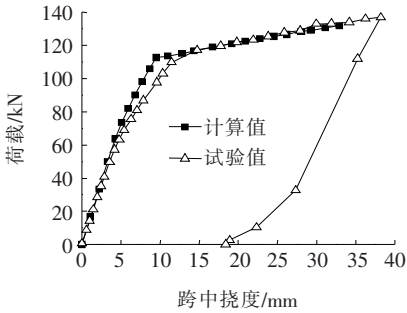
4.4 参数分析

数值分析选取的参数为有效预应力、预应力度、混凝土材性。参数分析时以梁EB-C55-P71为基准,若某一参数被选中,只改变选择分析的参数取值,其余参数均与梁EB-C55-P71保持一致。

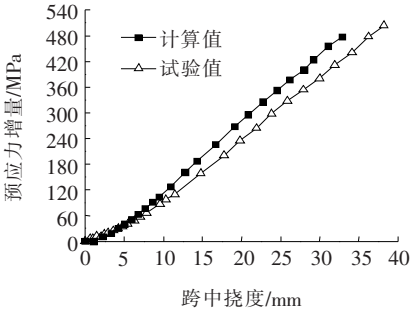
4.4.1 有效预应力的影响

图11反映了有效预应力大小对体外CFRP预应力RPC梁极限荷载、极限变形及极限预应力增量的影

响,横坐标表示预应力筋有效预应力与 CFRP 筋抗拉强度的比值($RSFO$),纵坐标为模型梁的极限荷载($LOAD$)、极限变形(DEF)和极限预应力增量($STRE$)与 $RSFO=0.05$ 时的相应值之比。



(a) 荷载-挠度曲线



(b) 跨中挠度-预应力增量曲线

图 10 梁 EB-C55-P71 计算值与试验值比较

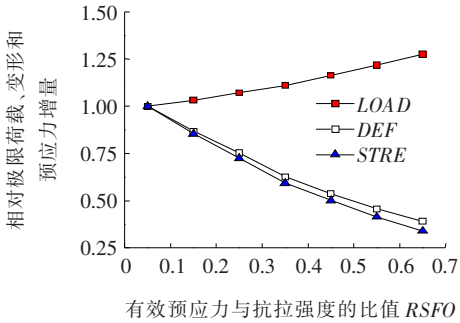


图 11 有效预应力的影响

由图 11 可以看出:随着有效预应力的增大,梁的极限荷载接近线性增加,而梁的极限变形及极限预应力增量则线性减小,但变化幅度不同。当 $RSFO$ 从 0.05 增加至 0.65,梁的极限荷载增大 27.6%,而极限变形及极限预应力增量分别减小 60.8%、65.9%。表明有效预应力的大小对梁极限变形和预应力筋极限应力的影响较极限荷载更为显著。

4.4.2 预应力度影响

图 12 反映了不同预应力度对体外 CFRP 预应力

RPC 梁极限荷载、极限变形及极限预应力增量的影响,预应力度改变通过体内非预应力普通钢筋面积的改变来实现,保持预应力筋不变。横坐标为预应力度(PPR),纵坐标为模型梁的极限荷载($LOAD$)、极限变形(DEF)和极限预应力增量($STRE$)与 $PPR=0.5$ 时的相应值之比。

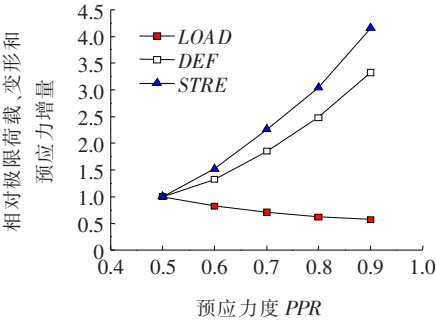


图 12 预应力度影响

由图 12 可以看出:随着预应力度增大,梁的极限荷载近似线性减小,而极限挠度和极限预应力增量则线性增大,且变化幅度不同。当预应力度由 0.5 增大到 0.9 时,梁的极限荷载减小约 42.6%,而极限变形和极限预应力增量分别增大 232.1%、315.5%。可见,预应力度改变对梁极限变形及极限预应力增量的影响较极限荷载更加明显,合适的预应力度可保证梁在较高承载能力的前提下,具有较好的变形能力。

4.4.3 混凝土材性影响

图 13 为不同混凝土材性在不同预应力度下对体外 CFRP 预应力梁极限荷载、极限变形及极限预应力增量的影响。“BC”表示普通混凝土梁,混凝土强度等级为 C80,其参数取值参见文献[11];“BR”表示 RPC 梁。图中横坐标为预应力度 PPR ,纵坐标为极限荷载($LOAD$)、极限变形(DEF)及极限预应力增量($STRE$)与 $PPR=0.5$ 时“BR”梁的相应值之比。

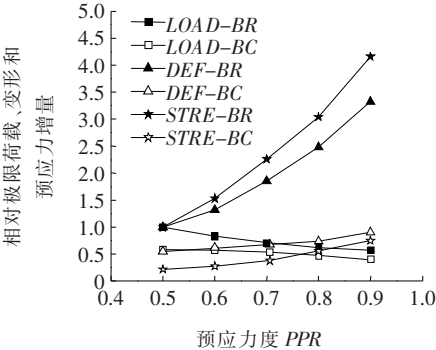


图 13 混凝土材性影响

不同 PPR 下,所有体外 CFRP 预应力模型梁均发生混凝土压碎破坏,但普通混凝土梁均为超筋结构,破坏时体内受拉钢筋仍未屈服,而 RPC 梁均属适筋结构。

由图 13 可见:随着 PPR 的增大,普通混凝土梁和 RPC 梁的极限荷载均在减小、极限变形和极限预应力增量在增大,但变化幅度不同,且预应力度的改变对 RPC 梁极限荷载、极限变形和极限预应力增量的影响较普通混凝土梁更显著。在 $PPR=0.5$ 时, RPC 梁的极限荷载、极限变形及极限预应力增量分别是普通混凝土梁的 170.6%、182.7%、450.5%,而在 $PPR=0.9$ 时,相应值分别为 142.1%、366.1%、489.6%。可见, RPC 梁的承载能力和极限变形均较普通混凝土梁大幅提高,使得 RPC 梁中 CFRP 筋的高强特性更能有效发挥,这主要得益于 RPC 的高强(抗压强度约为普通混凝土的 3.2 倍)及高极限压应变(约为普通混凝土的 1.3 倍)。

5 结论

(1) 体外 CFRP 预应力筋全预应力 RPC 梁发生少筋特征的脆性断裂破坏, RPC 中钢纤维的掺入,虽然可使 RPC 基体开裂后梁的承载能力和变形有所增加,但增加的幅度极为有限,且基本不改变梁的裂缝分布,不能改变梁体的脆性破坏特征。

(2) 体外 CFRP 预应力筋部分预应力 RPC 梁,梁内非预应力普通钢筋的配置在改善裂缝分布形态的同时,可使其获得期望的延性破坏模式。RPC 中钢纤维的掺入对全预应力梁正截面的抗弯性能改善作用极为有限,而体内非预应力筋的相应作用明显,因此实际工程中的体外预应力梁,不宜过高估计钢纤维的作用而取消体内非预应力钢筋的配置。

(3) 非线性数值分析结果与试验结果吻合较好,参数分析结果表明:对体外 CFRP 预应力结构,采用 RPC 比采用普通混凝土更能发挥 CFRP 筋的高强特

性;相比于对极限荷载的影响,有效预应力及预应力度的改变对体外 CFRP 预应力筋部分预应力 RPC 梁极限变形及极限预应力增量的影响更显著。

参考文献:

- [1] Richard P, Cheyrezy M H. Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200 ~ 800 MPa Compressive Strength[J]. ACI PSecial Publication, 1994, 114: 507 - 518.
- [2] Bonneau O, Poulin C, Dugat J, et al. Reactive Powder Concretes: from Theory to Practice[J]. Concrete International, 1996, 18(4): 47-49.
- [3] 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(10).
- [4] 余自若,阎贵平,张明波. 活性粉末混凝土的弯曲强度和变形特性[J]. 北京交通大学学报, 2006(1).
- [5] 孟履祥,陶学康,徐福泉,等. 纤维塑料筋部分预应力混凝土梁延性性能试验研究[J]. 建筑结构, 2006(S1).
- [6] 杨剑,方志. CFRP 预应力筋超高性能混凝土 T 梁的受弯性能[J]. 铁道学报, 2009(2).
- [7] Grace N F, Abdel - Sayed G. Behavior of Externally Draped CFRP Tendons in Prestressed Concrete Bridges [J]. PCI Journal, 1998, 43(5).
- [8] Voo, Y. L., Poon W. K. and Foster S. J.. Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Ultrahigh- Performance Concrete Beams without Stirrups [J]. Journal of Structural Engineering . ASCE. 2010, 136(11): 1 393-1 400.
- [9] Voo, Y. L., Foster S. J. and Gilbert R. I . Shear Strength of Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete Prestressed Girders without Stirrups [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1): 123-132.
- [10] 杜拱辰. 现代预应力混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [11] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S].
- [12] 黄侨,万世成,关键,等. 装配式预应力 CFRP 板锚具有有限元分析与施工技术[J]. 中外公路, 2019(2).
- [13] 曹国辉,方志. 体外配置 CFRP 预应力筋混凝土箱梁受弯性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2006(10).