

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201606036

预应力 RPC-NC 叠合梁抗弯延性试验分析

季文玉, 李旺旺, 王 珏

(交通基础设施安全风险管理部门交通运输部重点实验室(北京交通大学), 北京 100044)

摘要: 为有效推动高性能材料在现代桥梁结构中的应用以满足快速发展的高速铁路技术, 本文设计并制作了 10 根预应力活性粉末混凝土(RPC)-普通混凝土(NC)叠合梁和 1 根预应力纯 NC 梁, 通过试验方法研究了高性能材料 RPC 在梁结构中应用后叠合梁的抗弯延性性能, 并以叠合梁跨中位移延性系数进行描述. 试验主要考虑了 RPC 高度、预应力比率、NC 等级等因素对叠合梁抗弯延性的影响. 研究表明: 随着 RPC 高度的增加, 叠合梁截面配筋指数降低, 抗弯位移延性系数增大; 随着钢绞线根数的增多, 预应力比率增大, 位移延性系数相应增大; 叠合梁上部 NC 等级提高后, 脆性破坏特征并不明显, 抗弯位移延性系数增大. 由于 RPC 材料优异的力学性能以及钢纤维的作用提高了叠合梁在出现峰值荷载后的变形能力, 使得其抗弯位移延性要明显优于纯 NC 梁, 可见 RPC 材料在拥有高强度的同时具有良好的延性特征. 同时以试验数据为基础, 拟合出适用于预应力 RPC-NC 叠合梁抗弯位移延性系数的计算公式.

关键词: 活性粉末混凝土; 普通混凝土; 叠合梁; 配筋指数; 预应力比率; 位移延性

中图分类号: TU378.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)06-0021-07

Experiment analysis on flexural ductility of prestressed RPC-NC composite beam

JI Wenyu, LI Wangwang, WANG Jue

(Security Risk Management of Transportation Infrastructure (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China)

Abstract: Promoting the application of high performance material in modern bridge structures in order to meet the rapid development of high-speed railway technology, 10 pre-stressed reactive powder concrete (RPC)-normal concrete (NC) composite beams and 1 pre-stressed pure NC beam were designed and fabricated to investigate the flexural ductility of composite beams with the high performance material RPC, which was evaluated by the displacement ductility ratio at mid-span of composite beam. In this paper the effect of the height of RPC, the pre-stress ratio and degree of NC were mainly considered on the flexural ductility of composite beam. The results show that the sectional reinforced index decreases and the flexural displacement ductility ratio increases with the increasing height of RPC. Both the pre-stress ratio and flexural ductility increase with the increasing of steel strand number. The flexural ductility increases with the grade of upper NC as the brittle failure feature is not obvious. The deformation capacity of composite beam after the appearance of peak load increase, and the flexural ductility is significantly better than NC beam because of the excellent mechanical properties of RPC and the effect of steel fibers. It can be observed that the RPC has both high strength and good ductility. The fitting formula to calculate the flexural ductility of composite beams was proposed simultaneously based on the test results.

Keywords: reactive powder concrete; normal concrete; composite beam; reinforced index; pre-stress ratio; displacement ductility

随着中国经济迅猛发展, 高速与重载铁路逐渐成为交通运输发展的两大方向, 这就对桥梁工程建设的要求愈加严格. 近年来, 桥梁跨度不断增大, 铁路列车轴重也不断增加, 新型高性能材料的合理应用成为解决工程难题的关键.

活性粉末混凝土(RPC)是一种新型高性能材料^[1-2], 自其出现便引起了工程界研究人员的关

注^[3-5]. RPC 有着超高的力学性能和耐久性, 是现代桥梁结构理想的工程材料, 被陆续应用于众多铁路、公路项目中^[6-7]. 但由于其制作工艺相对复杂, 大部分构件仍处于工厂预制阶段, 另一方面, 由于其造价相对较高, 导致 RPC 尚未被大规模应用.

高韧性工程水泥复合材料(ECC)被徐世焯等^[8]进一步发展为超高韧性复合材料(UHTCC), 并深入研究了其基本力学性能和在工程结构中的应用. Maalej 等^[9]首次提出将钢筋混凝土结构钢筋两侧各一倍保护层厚度范围内替换为 UHTCC 这一理念, 并对一根功能梯度复合梁进行了研究. 然而该种复合梁的最优组合形式、设计理论及受力性能尚未

收稿日期: 2016-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(51278040);

教育部中央高校基本科研业务费(2014YJJS106)

作者简介: 季文玉(1960—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 李旺旺, wangwangli@bjtu.edu.cn

进行深入研究.文献[10-11]在对 UHTCC 材料性能充分研究基础上实现了多重微细裂缝的稳态开裂,对于结构非线性变形、提高韧性和抵抗裂缝有着显著贡献.为控制钢筋混凝土结构裂缝宽度,提高其在恶劣环境下的耐久性,并获得较高的性能成本比,使用 UHTCC 替代钢筋混凝土受拉区的部分混凝土,并针对其受力性能进行了深入的理论和试验研究.试验结果表明,该叠合梁不仅能够提高承载力,而且能够有效控制裂缝宽度,极大提高结构的耐久性.

由于 RPC 材料的高强度、高弹模以及内部结构致密的特性,在梁结构中应用能够在提高结构的强度、刚度、减小结构截面的同时提高梁的抗裂性和耐久性.本文在梁结构的受拉区应用 RPC,充分发挥 RPC 良好的力学性能和抗裂性,将普通混凝土(NC)应用于梁的上部,发挥其良好的抗压性能.该新型结构形式在充分发挥二者优势的同时降低了造价,并且充分利用了二者同为混凝土基材的粘结性能^[12],将原光圆箍筋替换为具有抗剪和抗拉拔能力的螺纹钢筋,以满足叠合面抗剪和撕裂的要求.该新型结构整体受力性能好,克服了预制装配式结构整体性不强,抗震性能受到影响的问题.由于 RPC 材料的加入可大大提高叠合梁抵抗开裂的能力,更加有效保护梁底钢筋,从而延长构件的使用寿命.叠合梁预制部分在工厂预制,机械化程度高,工艺完善,有利于提高结构质量和节约材料成本,对于建筑结构的环保节能有重要意义.叠合结构下部预制完成后,在施工过程中可兼做模板使用,减少支模工作量,提高施工效率,降低施工成本,对于高空作业施工尤为重要.

但是随着新型材料强度的提高,其脆性破坏特征愈加显著,不符合当前结构设计延性破坏的理念.桥梁结构在实际使用过程中不仅要有足够的强度和刚度,在遇到碰撞、超载和地震等偶然荷载时还要具备足够的变形能力以满足必要的延性要求^[13].本文拟对预应力 RPC-NC 叠合梁的抗弯延性性能进行试验研究.针对提出的新型 RPC-NC 叠合梁的抗弯延性性能,共制作了 11 根试验梁,其中 9 根试验梁主要研究 RPC 高度和预应力比率的影响,其余 2 根为对照梁,用于对照不同 NC 强度和纯 NC 梁与叠合梁的区别.本文拟通过静载试验研究 RPC 高度、预应力比率、NC 强度等因素对叠合梁延性性能的影响,在试验基础上探究预应力 RPC-NC 叠合梁抗弯延性计算方法.

1 试验概况

1.1 模型梁设计

本文以铁路标准 2101 号跨度 32 m T 形梁为原型进行缩尺设计,依据相似理论模拟原型梁应力状

态,模型梁全长 4.4 m,试验跨度 4.0 m,剪跨段长度 1.5 m,中间纯弯段 1.0 m.模型梁均采用后张法预应力施工,在梁的一端预埋振弦穿心式压力传感器,全程监测钢绞线张拉力的变化.模型梁设计主要考虑 RPC 高度、配筋指数、预应力比率、NC 强度等级等因素的影响,试验梁参数见表 1,其中,配筋指数 $w = (A_{p,f_{py}} + A_{s,f_y}) / f_c b h_0$,预应力比率 $i = A_{p,f_{py}} / (A_{p,f_{py}} + A_s f_y)$,其中 f_{py} 取钢绞线实测屈服强度, f_y 取钢筋实测屈服强度,见表 3.图 1 展示了模型梁截面,试验梁截面具体的尺寸见图 1(a),钢绞线在模型梁梁底通长布置,钢筋及钢绞线布置见图 1(b),其中预应力钢绞线孔道直径为 50 mm.

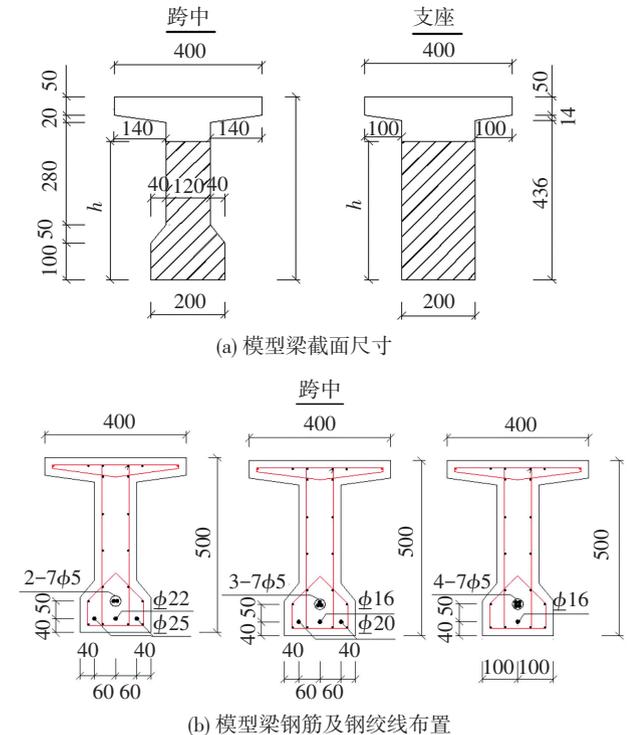


图 1 模型梁截面 (mm)

Fig.1 Section size of model beam (mm)

1.2 模型梁制作及材性试验

模型梁在中铁六局丰台桥梁厂内施工完成.施工过程中先进行钢模板制作和模型梁钢筋笼绑扎,然后浇筑 RPC 并进行高温蒸汽养护, RPC 养护完成后浇筑 NC,之后进行整体浇水养护 7 d,最后进行自然养护,见图 2.

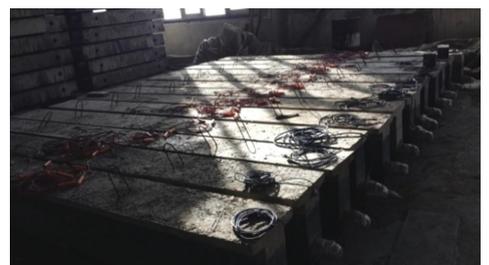


图 2 自然养护中的模型梁

Fig.2 Model beams in natural curing

表 1 模型梁参数

Tab.1 Design parameters of model beams

试件编号	NC 等级	纵向钢筋	RPC 高度/mm	预应力比率 i	配筋指数 w	有效张拉应力 σ_{pe}/MPa
S50-2-290	C50	2 Φ 25+1 Φ 22	290	0.457	0.242	1 353
S50-2-360	C50	2 Φ 25+1 Φ 22	360	0.457	0.214	1 411
S50-2-430	C50	2 Φ 25+1 Φ 22	430	0.457	0.195	1 350
S50-3-290	C50	2 Φ 20+1 Φ 16	290	0.669	0.276	1 162
S50-3-360	C50	2 Φ 20+1 Φ 16	360	0.669	0.262	1 136
S50-3-430	C50	2 Φ 20+1 Φ 16	430	0.669	0.245	1 175
S50-4-290	C50	1 Φ 16	290	0.914	0.323	1 230
S50-4-360	C50	1 Φ 16	360	0.914	0.279	1 208
S50-4-430	C50	1 Φ 16	430	0.914	0.242	1 226
S70-3-360	C70	2 Φ 20+1 Φ 16	360	0.669	0.230	1 171
SNC50-3-0	C50	2 Φ 20+1 Φ 16	0	0.669	0.505	1 118

注:试件编号中间数字代表钢绞线根数,末尾数字代表 RPC 高度。

模型梁制作过程中,预留每根梁的 RPC 与 NC 立方体抗压试块、轴心抗压试块和抗折试块,与模型梁同条件养护.不同直径的梁底纵向钢筋和钢绞线预留相应的轴拉试件.材性试验结果总结于表 2、3.

表 2 RPC 和 NC 实测力学性能

Tab.2 Mechanical properties of RPC and NC

编号	材料	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
S50-2-290	RPC	141.36	119.12	48.53
S50-2-290	NC	79.50	57.94	38.66
S50-2-360	RPC	146.93	121.30	46.85
S50-2-360	NC	87.39	54.40	39.73
S50-2-430	RPC	149.00	118.71	48.47
S50-2-430	NC	67.74	63.56	39.75
S50-3-290	RPC	145.16	116.97	48.91
S50-3-290	NC	82.71	64.09	36.91
S50-3-360	RPC	136.51	111.29	45.96
S50-3-360	NC	67.32	60.52	36.86
S50-3-430	RPC	148.21	108.00	44.74
S50-3-430	NC	66.03	51.49	37.14
S50-4-290	RPC	135.88	109.04	46.84
S50-4-290	NC	67.83	57.67	33.88
S50-4-360	RPC	135.60	108.53	44.22
S50-4-360	NC	61.99	49.16	36.06
S50-4-430	RPC	139.52	112.96	46.98
S50-4-430	NC	63.49	60.97	36.99
S70-3-360	RPC	140.41	124.66	47.55
S70-3-360	NC	82.73	77.23	39.55
SNC50-3-0	NC	50.72	45.73	36.21

表 3 钢筋及钢绞线实测力学性能

Tab.3 Mechanical properties of steels and strands

钢筋种类	公称直径/mm	屈服强度 $f_y(f_{py})/\text{MPa}$	极限强度 $f_u(f_{pu})/\text{MPa}$	弹性模量 $E(E_p)/\text{GPa}$
HRB335	16.00	472	569	211
HRB335	20.00	443	588	208
HRB335	22.00	439	580	210
HRB335	25.00	440	576	210
1860 钢绞线	15.24	1810	1975	196

1.3 试验加载方案

试验采用四点对称弯曲分级加载,荷载通过 2 000 kN 千斤顶施加,由位于分配梁下的压力传感器测量施加荷载的大小,采用逐级加载方式,加载速度为 4 kN/s,每级持荷时间为 10 min,直至模型梁破坏.跨中梁底设置位移传感器测量模型梁在试验过程中的挠度值,加载装置见图 3.

1.4 试验结果

图 4 为典型叠合梁与 NC 对照梁荷载-位移曲线对比,由图 4 可知叠合梁与 NC 梁发展趋势相似,在受弯过程中开裂、屈服特征明显,普通钢筋屈服后进入屈服阶段,随后由于钢绞线应力继续增大,模型梁承载力继续增大,最终由于梁顶的混凝土土压碎破坏荷载出现骤减.模型梁破坏后,钢绞线并未断裂,在减荷过程中,梁体均有明显回弹现象,叠合梁在破坏后仍具有一定残余承载能力.11 根模型梁的屈服荷载 P_y 、屈服位移 Δ_y 、极限荷载 P_u 、极限位移 Δ_u 、位移延性系数 μ_Δ 总结于表 4.

表 4 叠合梁抗弯延性试验参数

Tab.4 Experimental parameters of flexural ductility of composite beams

试件编号	P_y/kN	P_u/kN	Δ_y/mm	Δ_u/mm	μ_Δ
S50-2-290	607.48	845.61	17.35	42.52	2.451
S50-2-360	605.21	867.30	18.44	49.65	2.693
S50-2-430	610.57	866.70	19.50	58.91	3.021
S50-3-290	608.37	849.30	19.87	55.51	2.795
S50-3-360	606.42	873.60	17.84	51.97	2.913
S50-3-430	600.28	851.00	18.88	57.22	3.031
S50-4-290	573.31	790.00	17.35	48.48	2.794
S50-4-360	567.20	774.10	18.95	57.83	3.052
S50-4-430	575.21	787.40	19.33	66.74	3.453
S70-3-360	614.00	816.40	17.64	55.09	3.123
SNC50-3-0	594.74	731.20	23.28	44.23	1.900

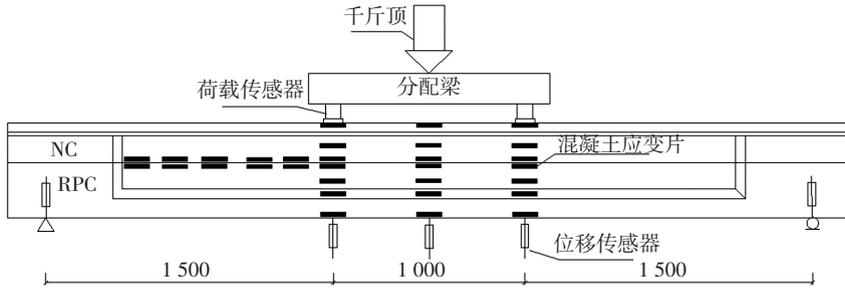


图 3 模型梁加载装置 (mm)

Fig.3 Test setup of model beams (mm)

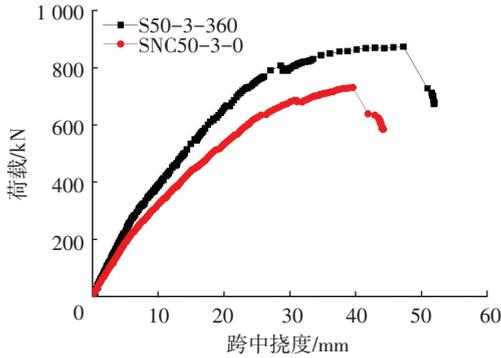
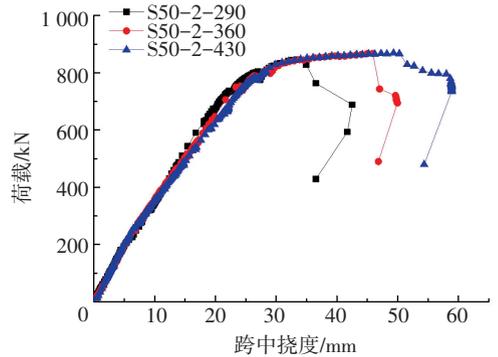


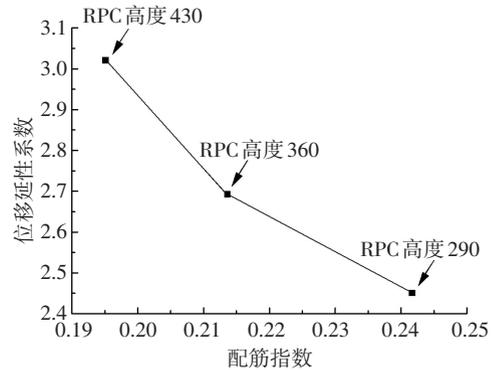
图 4 典型叠合梁荷载-位移曲线

Fig.4 Typical curves of load-displacement of composite beam

荷载-挠度曲线及相应位移延性系数见图 6.



(a) 不同 RPC 高度下荷载-位移曲线



(b) 不同配筋指数对应位移延性系数

图 6 配筋指数与位移延性系数关系

Fig.6 The relationship of reinforced index and displacement ductility ratio

2 试验结果与分析

2.1 抗弯位移延性系数

构件的延性是指在承受荷载或其他作用下进入非线性状态后,在承载力没有明显降低情况下的变形能力^[14],抗弯构件通常采用跨中位移延性系数来描述.由于梁底受拉区同时配有预应力钢绞线和普通钢筋,因此选用普通钢筋达到屈服强度时梁的跨中挠度作为屈服位移;由于试验梁破坏后钢绞线并未断裂,在减荷过程中存在明显回弹力,因此取用抗弯承载力下降至极限承载力 80%时对应的跨中挠度作为极限位移^[15],见图 5.

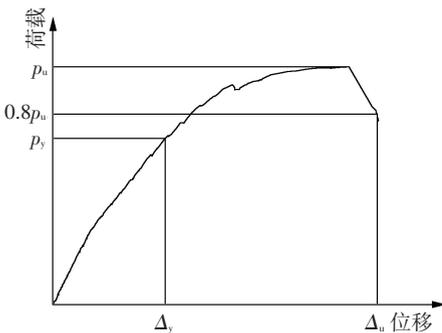


图 5 叠合梁荷载-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curve of composite beam

2.2 配筋指数对位移延性系数的影响

相同钢绞线根数,不同 RPC 高度情况下叠合梁

钢绞线和普通钢筋配筋率相同的情况下,随着 RPC 高度的增加,由配筋指数计算公式 $w = (A_p f_{py} + A_s f_y) / f_c b h_0$ 可知,其梁截面配筋指数降低.试验得出各叠合梁抗弯延性系数,见图 6(b),可知随着 RPC 高度的增加,配筋指数降低,延性系数增大.由图 6(a)可明显看出,随着 RPC 高度的增加,叠合梁在屈服之前各阶段位移相差不大;RPC 具有极高抗压强度和一定的抗拉强度,在屈服之后的阶段随着 RPC 高度的增加,叠合梁中和轴以上材料的抗拉和变形能力也有所增加,叠合梁延性位移增大.由以上试验结果可知,随着 RPC 高度的增加,叠合梁的延性得到了提高.

2.3 预应力比率对位移延性系数的影响

相同 RPC 高度,不同钢绞线根数情况下叠合梁荷载-挠度曲线及相应位移延性系数见图 7.

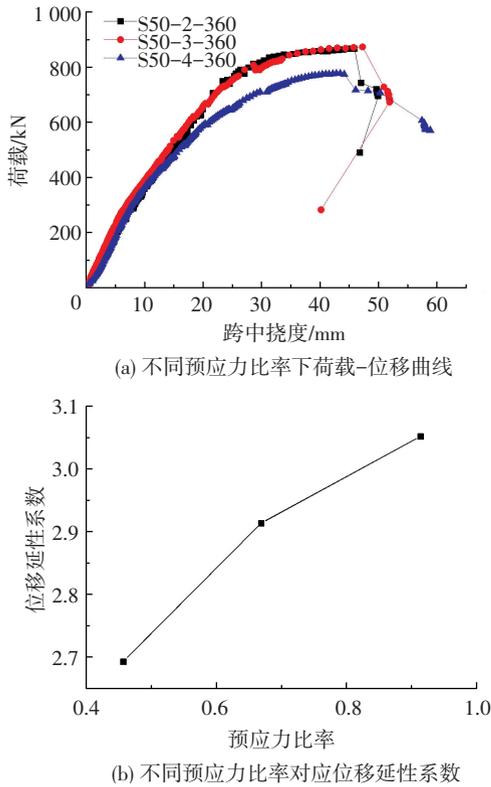


图 7 预应力比率与位移延性系数关系

Fig.7 The relationship of prestress ratio and displacement ductility ratio

由图 7(a)可知,预应力比率对叠合梁极限挠度影响不大;在达到极限破坏荷载之后,随着预应力比率的增大,下降段位移增大.模型梁总体配筋率基本一致,随着钢绞线根数增多,钢绞线面积增大,普通钢筋面积减小,普通钢筋达到屈服后,钢绞线应力继续增大,梁顶 NC 被压碎,梁底普通钢筋和钢绞线并未断裂,梁体中钢绞线作用增大,梁体在破坏后减荷阶段变形能力增加.如图 7(b)所示,随着预应力比率的增大,普通钢筋面积减小,在破坏后减荷阶段梁体变形能力增大,位移延性系数增大.

2.4 对照组对位移延性系数的影响

对照组叠合梁荷载-挠度曲线及相应位移延性系数见图 8.由图 8(a)给出的对照组模型梁荷载-挠度曲线可知,随着 NC 强度的提高,极限破坏荷载对应的挠度降低,但极限位移有所提高.可见叠合梁中 NC 等级提高后,脆性破坏特征并不明显,叠合梁的抗弯延性反而增加了;与纯 NC 梁相比,叠合梁不仅提高了极限荷载和极限挠度,普通钢筋屈服后的延性阶段也明显优于纯 NC 梁.对照组模型梁位移延性系数结果见图 8(b),可见 NC 等级提高后,延性系数

有所增加;由于 RPC 良好的力学性能和抗裂能力, RPC 的加入使得叠合梁的抗弯延性要明显优于纯 NC 梁.

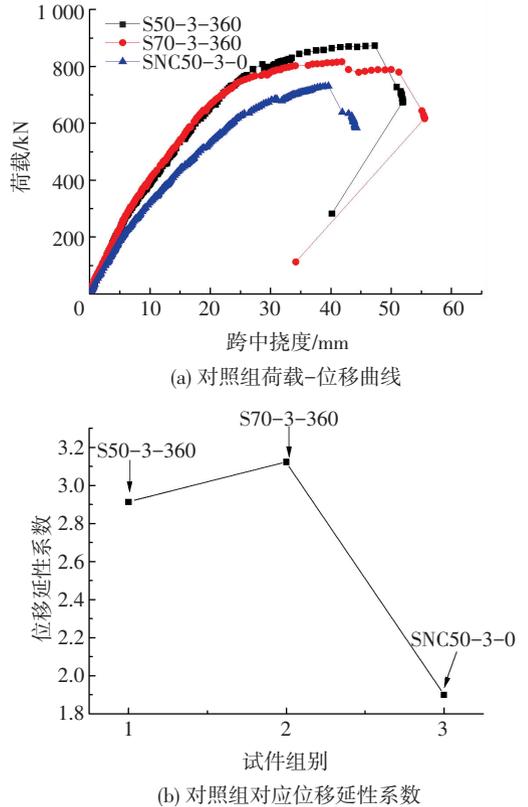


图 8 对照组与位移延性系数关系

Fig.8 The relationship of control specimens and displacement ductility ratio

2.5 本文试验与现有相关文献结果对比

将本文试验得出的结果与国内外最新相关文献的结果进行对比分析.文献[16]研究了不同种类钢纤维对超高强混凝土(UHPC)梁延性的影响,其延性系数试验结果为 4.04~10.34,比本文试验结果要大,是由于其配置的普通钢筋延性要优于钢绞线;文献[17]将玻璃纤维增强塑料(GFRP)作为普通混凝土梁的钢筋并研究其延性性能,由于 GFRP 筋基本处于线弹性阶段,该文献计算得出极限位移与使用荷载下位移的比值并定义其为延性变形系数,由试验结果计算得出延性变形系数为 5.30~5.37,比本文试验结果要大;文献[18]研究了不同预应力等级情况下以碳纤维增强塑料(CFRP)为预应力筋的钢筋混凝土梁的延性,延性系数为 1.90~4.10,其中系数 1.9 对应张拉应力为 40%屈服应力情况,系数 4.1 对应无张拉应力情况,其低应力情况下延性系数与本文结果接近;文献[19]对 HRB500 钢筋预应力 UHPC 梁延性进行了研究,其中 HRB500 钢筋预应力梁延性系数为 3.02~3.70,对照组 HRB335 钢筋预应力梁延性系数为 4.87.其试验组结果与本文结果

基本一致,是由于全截面 UHPC 比叠合梁延性好,同时 HRB500 钢筋较本文 HRB335 钢筋延性差,二者效应相互抵消的结果.其对照组的结果比本文延性系数大,与本文得出的随着 RPC 高度增加延性系数增大的结论一致;文献[20]对 CFRP 配筋的 RPC 梁的延性进行了研究,由于 CFRP 筋为线弹性材料延性较差,其延性系数试验结果为 1.36~1.93,远小于本试验结果.

3 位移延性系数计算

3.1 位移延性系数影响因素

由本文第 2 部分分析可知,叠合梁抗弯位移延性系数与配筋指数(RPC 高度)和预应力比率密切相关.各试验梁配筋指数与位移延性系数的关系见图 9,由图 9 可知在相同预应力比率下的位移延性系数与配筋指数呈线性关系.由以上分析可以确定叠合梁抗弯延性系数的计算应基于配筋指数和预应力比率两个因素.

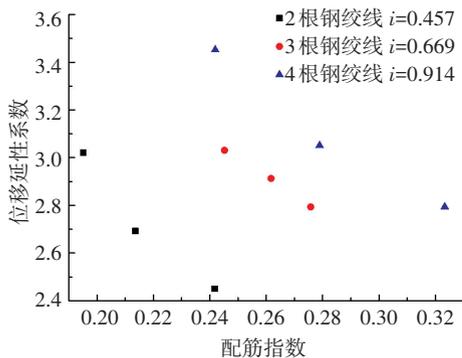


图 9 配筋指数与位移延性系数关系

Fig.9 The relationship of reinforced index and displacement ductility ratio

3.2 位移延性系数计算

由上文分析可知,叠合梁抗弯延性系数与配筋指数和预应力比率相关.因此,根据叠合梁抗弯延性系数与二者之间的关系,首先确定公式为式(1)形式.其中 k_i 、 b_i 是关于预应力比率的系数, b_w 是关于配筋指数的系数, i 为预应力比率, w 为配筋指数.

$$\mu_{\Delta} = (k_i \times i + b_i)w + b_w. \quad (1)$$

基于数理方法和试验结果对式(1)进行拟合,经计算得出 $k_i = 14.320$, $b_i = -19.229$, $b_w = 5.191$.将试验梁及对照梁的相关计算参数代入式(1),得出的计算值与试验值及其比值见表 5.

由表 5 可知,试验组和对照组叠合梁计算误差均在 15% 以内, S70-3-360 计算误差为 4.8%,对于高 NC 等级的叠合梁该公式依然适用.叠合梁抗弯延性系数计算值与试验值之比的平均值为 0.975,标准差为 0.104,计算结果与试验结果吻合良好.但是对

于纯 NC 梁,计算值与试验值比值仅为 0.169,可见该公式不适用于纯 NC 梁延性的计算.

表 5 抗弯位移延性系数计算结果与试验值对比

Tab.5 Comparison of calculation and testing results of flexural displacement ductility ratio

试件编号	i	w	μ_{Δ}^t	μ_{Δ}^c	$\mu_{\Delta}^c/\mu_{\Delta}^t$
S50-2-290	0.457	0.242	2.451	2.125	0.867
S50-2-360	0.457	0.214	2.693	2.481	0.922
S50-2-430	0.457	0.195	3.021	2.716	0.899
S50-3-290	0.669	0.276	2.794	2.530	0.906
S50-3-360	0.669	0.262	2.913	2.666	0.915
S50-3-430	0.669	0.245	3.031	2.825	0.932
S50-4-290	0.914	0.323	2.794	3.206	1.147
S50-4-360	0.914	0.279	3.052	3.478	1.140
S50-4-430	0.914	0.242	3.453	3.706	1.073
S70-3-360	0.669	0.230	3.123	2.972	0.952
SNC50-3-0	0.669	0.505	1.900	0.322	0.169
平均值	—	—	—	—	0.975
标准差	—	—	—	—	0.104

4 结 论

1) 本文对 10 根预应力 RPC-NC 叠合梁和 1 根预应力纯 NC 梁荷载-挠度曲线及相应的抗弯位移延性系数进行了分析.试验结果表明,由于 RPC 材料优异的力学性能提高了叠合梁在出现峰值荷载后的变形能力,使得抗弯位移延性明显优于纯 NC 梁.说明 RPC 的加入不仅能够提高梁的承载能力和耐久性,对于梁体延性的提高也有着十分重要的作用.

2) 预应力 RPC-NC 叠合梁抗弯位移延性系数与配筋指数和预应力比率有明显的相关性.随着 RPC 高度增加,梁截面配筋指数降低,抗弯位移延性系数增大;钢绞线根数增多,预应力比率增大,位移延性系数增大;与 S70-3-360 结果比较得出,上部 NC 等级提高,叠合梁抗弯位移延性系数增大.

3) 叠合梁抗弯位移延性系数的计算与配筋指数和预应力比率密切相关.以二者为变量,以试验数据为基础,通过数理方法拟合出预应力 RPC-NC 叠合梁抗弯位移延性系数的计算公式.将公式计算值与试验值进行了比较,计算值与试验值之比的平均值为 0.975,标准差为 0.104,计算结果与试验结果吻合良好.

参考文献

- [1] DUGAT J, ROUX N, BERNIER G. Mechanical properties of reactive powder concretes [J]. Material and Structure, 1996, 29 (5): 233-240.
- [2] BONNOEAU O, POULIN C, DUGAT J, et al. Reactive powder concrete: from theory to practice [J]. Concrete International, 1996, 18(4): 47-49.
- [3] HABEL K, VIVIANI M, DENARIE E. Development of the mechan-

- ical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(7): 1362-1370.
- [4] 季文玉,丁波,安明喆. 活性粉末混凝土 T 形梁抗剪试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2011, 32(5): 38-42.
JI Wenyu, DING Bo, AN Mingzhe. Experimental study on the shear capacity of reactive powder concrete beams [J]. *China Railway Science*, 2012, 32(5): 38-42.
- [5] 安明喆,贾方方,余自若,等. 活性粉末混凝土受弯构件中钢筋粘结性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(8): 105-110.
AN Mingzhe, JIA Fangfang, YU Ziruo, et al. Bond properties of reinforcement anchored in reactive powder concrete flexural members [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(8): 105-110.
- [6] 闫志刚,季文玉,安明喆. 活性粉末混凝土低高度梁设计及试验研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(5): 96-101.
YAN Zhigang, JI Wenyu, AN Mingzhe. Design and experimental study of low-height reactive powder concrete beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(5): 96-101.
- [7] BIERWAGEN D, HAWASH A. Ultra high performance concrete highway bridge [C]// *Proceeding of the 2005 Mid-continue Transportation Symposium*. Iowa: AMES, 2005: 1-14.
- [8] 徐世焯,张秀芳. 钢筋增强超高韧性水泥基复合材料 RUHTCC 受弯梁的计算理论与试验研究[J]. *中国科学 (E 辑: 技术科学)*, 2009, 39(5): 878-896.
XU Shilang, ZHANG Xiufang. Calculation bending theory and experiment study of reinforced ultra-high toughness cementitious composites (RUHTCC) beams [J]. *Science in China (Series E: Technological Sciences)*, 2009, 39(5): 878-896.
- [9] MAALEJ M, LI V C. Introduction of strain hardening engineered cementitious composites in design of reinforced concrete flexural members for improved durability [J]. *Structural Journal*, 1995, 92(2): 167-176.
- [10] 张秀芳,徐世焯. 采用超高韧性水泥基复合材料提高钢筋混凝土梁弯曲抗裂性能研究(I): 基本理论[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(12): 48-53. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2008.12.013.
ZHANG Xiufang, XU Shilang. Improvement of the flexural and cracking behavior of RC beams using ultra-high toughness cementitious composites (I): theoretical analysis [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(12): 48-53. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2008.12.013.
- [11] 张秀芳,徐世焯,侯利军. 采用超高韧性水泥基复合材料提高钢筋混凝土梁弯曲抗裂性能研究(II): 试验研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(10): 53-66. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2009.10.013.
ZHANG Xiufang, XU Shilang, HOU Lijun. Improvement of the flexural and cracking behavior of RC beams using ultra-high toughness cementitious composites (II): experimental study [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(10): 53-66. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2009.10.013.
- [12] 季文玉,过民龙,李旺旺. RPC-NC 组合梁界面受力性能研究[J]. *中国铁道科学*, 2016, 37(1): 46-52. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2016.01.07.
JI Wenyu, GUO Minglong, LI Wangwang. Interface mechanical behavior of RPC-NC composite beam [J]. *China Railway Science*, 2016, 37(1): 46-52. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2016.01.07.
- [13] 张利梅,赵顺波,黄承逵. 预应力高强混凝土梁延性性能分析与试验研究[J]. *工程力学*, 2005, 23(3): 166-171.
ZHANG Limei, ZHAO Shunbo, HUANG Chengkui. Experimental study of ductility of prestressed high-strength concrete beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 23(3): 166-171.
- [14] 贾金青,孟刚,封硕,等. 预应力型钢超高强混凝土梁抗弯延性试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(4): 64-70. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.011.
JIA Jinqing, MENG Gang, FENG Shuo, et al. Flexural ductility of prestressed steel reinforced ultra-high strength concrete beams [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(4): 64-70. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.011.
- [15] LEGERON F, PAULTRE P. Behavior of high-strength concrete columns under cyclic flexure and constant axial load [J]. *ACI Structural Journal*, 2000, 97(4): 591-601.
- [16] YOO D Y, YOON Y S. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers [J]. *Engineering Structures*, 2015, 102: 409-423. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.029.
- [17] REFAI A E, ABED F, AI-RAHMANI A. Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 518-529. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.063.
- [18] REZAZADEH M, COSTA I, BARROS J. Influence of prestress level on NSM CFRP laminates for the flexural strengthening of RC beams [J]. *Composite Structures*, 2014, 116: 489-500. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.05.043.
- [19] 徐海宾. HRB500 钢筋预应力超高性能混凝土梁受力性能研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015: 56-57.
XU Haibin. Research on the performance of HRB500 bars reinforcement prestressed ultra-high performance concrete beams [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015: 56-57.
- [20] 杨剑,方志. CFRP 配筋活性粉末混凝土梁延性和变形性能[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(3): 14-22. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.08.000.
YANG Jian, FANG Zhi. Ductility and deformability of RPC beams prestressed with CFRP tendons [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(3): 14-22. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.08.000.

(编辑 赵丽莹)