

文章编号:1671-8879(2018)02-0050-12

不同养护条件下活性粉末混凝土局压承载力试验

李立峰^{1,2}, 李文全¹, 石雄伟^{1,3}, 唐金良¹, 陈明玉¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 西安公路研究院, 陕西 西安 710065)

摘要:为了保证活性粉末混凝土(RPC)在不同材料设计和工程条件下预应力锚固区的局部受压安全性,以养护条件、钢纤维掺量与局压面积比为基本参数,深入研究各因素对 RPC 材料局部受压承载力的影响,完成了 18 个 RPC 试件的轴心局压承载力试验,获得了试件的局部受压极限承载力、破坏形态、裂缝发展模式以及荷载-位移关系等,并由此分析了 RPC 材料试件局部受压机理。在此基础上,引入 RPC 材料在不同养护条件和钢纤维掺量下的受压和受拉本构关系,基于 ABAQUS 建立 RPC 构件局部承压非线性有限元模型,完成全过程非线性分析,并将有限元结果与试验结果进行对比。基于现有规范公式,根据上述主要试验因素的影响规律,建立实用的 RPC 材料局压承载力统一计算公式。研究表明:与自然养护相比,采用蒸汽养护的 RPC 试件局压承载力提高约 7%;钢纤维掺量(体积分数,下同)从 1% 增加到 2% 以及从 2% 增加到 3% 时,试件局部受压承载力的增幅分别为 26.8% 和 13.2%,说明钢纤维的掺入能有效提高 RPC 材料的局压承载力,但其提高作用随钢纤维掺量的增加而减弱;与普通混凝土相似,RPC 材料局部受压承载力与局压面积比存在线性关系,说明局压面积比对材料局部受压性能的影响属于结构层面,并不因材料性能的增强而改变;有限元分析以及拟合公式结果均与试验结果吻合良好。

关键词:桥梁工程;活性粉末混凝土;轴心局压试验;承载力;养护条件;钢纤维掺量;局压面积比

中图分类号:U444 文献标志码:A

Local compressive bearing capacity of reactive powder concrete under different curing conditions

LI Li-feng^{1,2}, LI Wen-quan¹, SHI Xiong-wei^{1,3}, TANG Jin-liang¹, CHEN Ming-yu¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Wind and Bridge Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 3. Xi'an Highway Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: In order to guarantee the local compressive safety of reactive powder concrete (RPC) member's prestressed anchorage zone under different material design and engineering conditions. Curing condition, amount of steel fibers, and ratio of block area to bearing area, on the local bearing capacity of RPC members were studied. 18 axial compressive specimens were tested, and from which, failure mode, crack patterns and load-displacement relationship were obtained. Meanwhile, by introducing the constitutive relationships of RPC under different curing conditions

收稿日期:2017-10-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51278183);交通运输部建设科技项目(2013318798320);陕西省交通运输厅科研项目(14-18K)

作者简介:李立峰(1971-),男,湖南沅江人,教授,博士研究生导师,E-mail:lilifeng@hnu.edu.cn.

and steel fiber contents, the nonlinear finite element model under local compression was built and the nonlinear analysis of load process was completed based on ABAQUS software. On this basis, a uniform formula was established by considering the existing formulas and the influence of three parameters mentioned above. The results show that comparing with natural curing, steam curing increases the local bearing capacity of RPC members about 7% which means it has little effect. When volumetric fraction of steel fibers increases from 1% to 2% and from 2% to 3%, the amplification of specimen's strength are 26.8% and 13.2%, respectively, which means that steel fiber can improve the local bearing capacity of RPC specimens, but the effects decreases with the increase of its fraction. Just like normal concrete members, the relationship between local capacity and the ratio of block area to bearing area are linear, which indicates that the influence of ratio of block area to bearing area on local compressive properties of material belongs to structural layer. It does not change with the enhancement of material properties. The results of finite element analysis and fitting formula are in good agreement with the experimental results. 9 tabs, 11 figs, 26 refs.

Key words: bridge engineering; reactive powder concrete; axial local compressive test; bearing capacity; curing condition; steel fiber content; local compression area ratio

0 引言

活性粉末混凝土(RPC)是一种新型水泥基复合材料,与普通混凝土相比,RPC材料的强度、韧性和耐久性的大幅提高,国内外学者对其配比及力学性能已进行大量研究^[1-4]。目前针对RPC材料的研究主要集中于结构构件基本力学性能和设计计算理论等方面^[5-8]。

RPC材料优异的力学性能及预应力结构合理的受力状态,使预应力RPC结构在同等承载力条件下可有效减小结构尺寸,实现结构轻型化,进而增加桥梁结构的跨越能力。与此同时,结构尺寸的减小也使得预应力锚固区局部承压问题变得更为突出和复杂,因此对RPC材料局部受压性能展开研究是必不可少的。

国内外学者对普通混凝土的局部承压性能已进行了系统的研究,包括影响因素、破坏机理、计算方式等,并提出了套箍强化理论、楔劈理论、拉压杆桁架模型等^[9-14],但目前对RPC材料局部受压性能的相关研究尚少。张利娜等以局压面积比及加载位置为试验变量,进行了预应力锚固区的棱柱体局部受压模拟试验,结果表明,加载位置和预留孔道等因素会削弱试件的局部受压承载力,但试验中试件强度普遍较低,而局压面积比普遍偏大,试验结果有一定局限性^[15]。周威等就预留孔道、网格间接钢筋和螺旋箍筋等对RPC材料局部受压承载力的影响进行了试验研究,发现间接钢筋的配置有效地减弱了

RPC试件的脆性,可保证其发生延性破坏,并提出了相应的局部受压承载力计算公式,但其研究对象是未掺加钢纤维的素RPC^[16-18]。针对养护条件、钢纤维掺量等明显区别于普通混凝土的影响因素,目前仍缺乏较为系统的研究。

试验研究表明,高温养护条件对RPC的抗压强度有较为明显的增强效果,但对其劈裂抗拉强度的影响较小;在一定范围内,RPC抗压强度和劈裂抗拉强度会随着钢纤维掺量的增加有不同程度的提高^[19-20]。可见,养护条件和钢纤维掺量对RPC局部受压性能的影响是不容忽视的。为此,本文设计模拟预应力锚固区预留孔道的棱柱体试件,并选择养护条件、钢纤维掺量和局压面积比3个因素为基本可变参数,进行RPC材料局部受压试验,探索上述参数对RPC局部受压性能的影响,并基于试验结果提出预应力锚固区RPC材料局压承载力实用计算方法。

1 局部承压试验

1.1 试验模型

根据圣维南原理,集中压力在传递至承压面长边长度范围外时基本达到均匀分布,考虑到合适的试件高宽比有利于减小试验机与试件接触面间的摩阻力以及试件附加偏心距对试验准确性的影响,本试验试件均采用高宽比为2.0,尺寸为150 mm×150 mm×300 mm的棱柱体,并在试件横截面中心预留直径40 mm贯穿全高的圆形孔,模拟RPC材

料在预应力锚固区的受力状态。

1.2 试验参数

RPC材料局部受压承载力的影响因素较多,养护条件、钢纤维掺量主要影响RPC材料自身的力学性能,局压面积比主要影响试件受力分布。

养护条件分为自然养护和蒸汽养护2种:自然养护是将试件浇筑成型,待材料硬化后在自然环境下养护28d,定义为ZR组;蒸汽养护是试件浇筑成型后,在温度为90℃、相对湿度为95%的蒸汽环境下养护48h,定义为GR组。

混凝土中掺入钢纤维可以有效地降低混凝土裂缝界面上的应力集中现象,推迟宏观裂缝的产生,有利于RPC材料抗拉、压强度的提高。由于钢纤维外形尺寸等参数在相关研究中已逐步标准化,因此本文中不予考虑。钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响较为明显。本次试验选取1%、2%、3%这3种钢纤维体积掺量 V_{SF}/V_{RPC} (其中 V_{SF} 为RPC材料中钢纤维的体积; V_{RPC} 为RPC材料的体积)进行分析。

预应力锚垫板下复杂的受力状态会产生纵向压缩及横向膨胀,两者都会受到周围混凝土的约束作用,从而对锚固区局压承载力产生影响,因此选取局压面积比 A_b/A_1 (其中 A_b 为试件承压端部面积; A_1 为试件局部承压面积)作为试验参数。鉴于小局压面积比在实际工程中应用更为广泛,并且RPC材料结构尺寸的减小也会造成预应力锚固区局压面积比偏小,因此,承压板选用直径 d 分别为85、100、115cm,厚度为4cm的圆形钢板,其局压面积比分别为3.965、2.865、2.166。试件基本参数如表1所示。

1.3 材料试验与力学性能

RPC材料配合比如表2所示,配比中石英砂粒径较小,掺入矿渣粉;水胶比定为0.2。与试件同批浇筑边长100mm的立方体试块同条件养护28d进行RPC材料基本力学性能试验,结果如表3所示。

1.4 加载方案及测量内容

试验加载装置采用YAW-10000型微机控制电液伺服压力试验机,最大试验力为10000kN。采用分级加载方式,每级荷载不大于预估破坏荷载的10%,持荷5min后进行下级加载,每级之间加载速率为2kN/s。为减小试件不平整度,确保均匀加载,试验前在试件与压力机底板、试件与承压板之间铺洒细砂垫层,正式加载前要对试件进行预压,以压

表1 试件参数

Tab.1 Parameter of specimens

试件编号	d/mm	$\frac{V_{SF}}{V_{RPC}}$	$\frac{A_b}{A_1}$
ZR-1/(GR-1)	85	0.01	3.965
ZR-2/(GR-2)	100	0.01	2.865
ZR-3/(GR-3)	115	0.01	2.166
ZR-4/(GR-4)	85	0.02	3.965
ZR-5/(GR-5)	100	0.02	2.865
ZR-6/(GR-6)	115	0.02	2.166
ZR-7/(GR-7)	85	0.03	3.965
ZR-8/(GR-8)	100	0.03	2.865
ZR-9/(GR-9)	115	0.03	2.166

注:试件ZR组代表自然养护,GR组代表蒸汽养护。

表2 RPC配合比

Tab.2 Mix proportions of RPC

组分	水泥	硅灰	石英砂	石英粉	减水剂	水
质量比	1.000	0.250	1.100	0.300	0.019	0.2

表3 RPC实测基本力学性能

Tab.3 Measured mechanical properties of RPC

养护条件	自然养护			蒸汽养护		
	1	2	3	1	2	3
$\frac{V_{SF}}{V_{RPC}}/\%$						
f_{cu}/MPa	107.3	119.8	127.1	129.9	141.3	149.7

注: f_{cu} 为RPC立方体抗压强度。

实细砂垫层,并通过变形测量对试件位置和承压板进行微调,以确保对中加载。

试验观测内容包括试件变形、裂缝发展、开裂荷载、极限荷载等。试件变形包括试件整体竖向变形 Δ_c 、楔形体相对外围母体压陷 Δ_{cs} 和核心母体竖向压缩变形 Δ_{cc} (其中 $\Delta_{cc} = \Delta_c - \Delta_{cs}$),采用百分表进行测量。裂缝采用裂缝放大镜进行观测。开裂荷载为试件上第1条可视裂缝所对应的荷载,极限荷载为试验机荷载显示值峰值,达到极限荷载后停止加载。试验测点布置见下页图1。

2 试验结果

2.1 破坏形态

试验中,各试件的破坏模式均为先开裂后破坏,开裂荷载与极限荷载之间有着较为明显的裂缝扩展阶段。卸载后发现:核心混凝土与外围混凝土分离明显,界限清晰;核心母体整体下陷且较为完整,外围母体则被端裂缝分割成数个区域,相对分散;与普通混凝土相比,在达到极限荷载后停止加载,试件并不会出现大面积混凝土剥落或劈裂掉块的现象,完整性较好,说明钢纤维的桥联作用有效地减缓了裂缝发展,并大大增强了试件的整体性。试件典型破坏形态如下页图2所示。

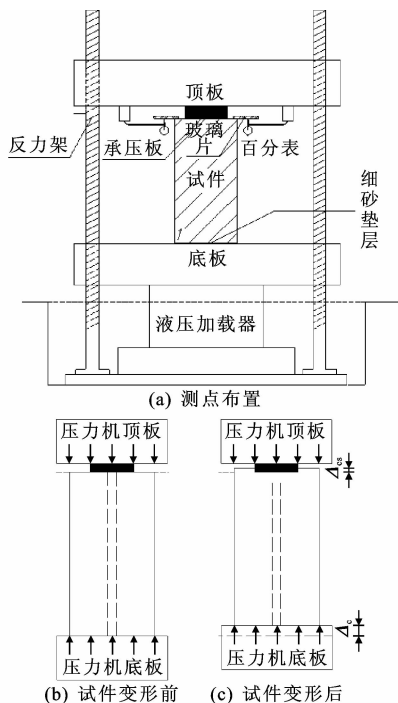


图 1 试验加载及测点布置

Fig.1 Test loading and arrangement of measuring points

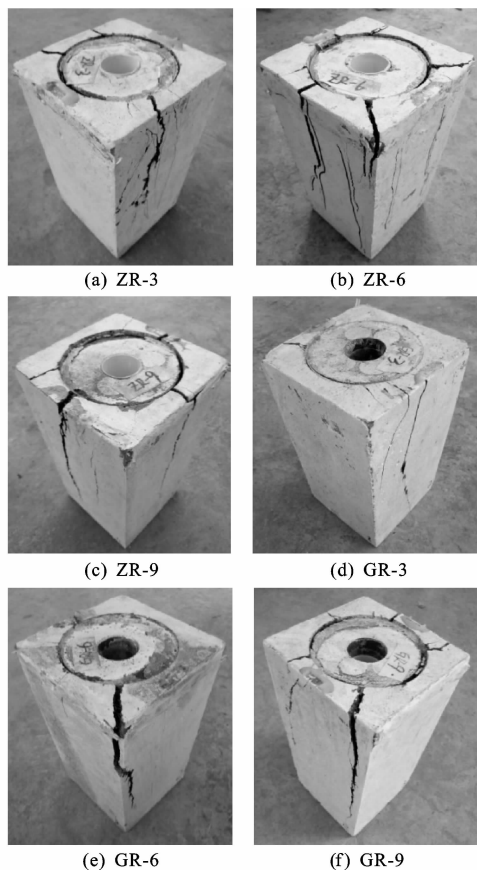


图 2 试件典型破坏形态

Fig.2 Typical failure modes of specimens

2.2 裂缝发展

试件在加载到 45%~75% 的极限荷载之前,除

前期有细砂垫层被压实的微小声响外,试件整体并无明显变化。在加载到开裂荷载时,试件的某个侧面出现一两条纵向裂缝,侧面初始裂缝主要集中在试件顶面向下约承压板直径距离 a 的位置,部分出现在承压板边缘下方。初始裂缝宽度较小,一般不超过 0.04 mm,且沿其走向裂缝宽度较为均匀。继续加载,试件侧面有少量新裂缝产生,已有裂缝沿其走向缓慢延伸,裂缝宽度在开裂荷载后的一两级荷载中发展缓慢,随后发展加快。临近极限荷载时,试件内部不断传出细微开裂声,同时试件侧面已有的不连续裂缝逐渐贯通连接,使裂缝不断加长,甚至贯穿试件全高。最后,伴随着一次或数次沉闷响声,荷载和试件变形都呈现跳跃式下降,试件表面裂缝宽度也突然大幅增加。

通过观察发现,试件上出现的裂缝大致分为 3 种(下页图 3):①竖向劈裂裂缝,主要集中于试件中上部位置,呈“中宽边细”的特点,此类裂缝通常也是作为初始裂缝在试件上首先出现的,并随着荷载增加,向上、下方向发展;②板下纵向裂缝,主要集中于靠近承压板的侧面上,呈“上宽下窄”的特点,此类裂缝的产生相对较晚,通常是在荷载增加到接近极限荷载时才会出现;③加载端面裂缝,主要分布在端面边中间位置,呈“外宽内窄”的特点。3 种裂缝在整个加载过程中交替产生,宽度逐步增大,并不断发展延伸,最后相互贯通,在试件上形成一至数条主裂缝,使试件丧失承载能力。

2.3 荷载-变形关系

局部荷载 P 与试件整体竖向变形 Δ_c 、楔形体相对外围母体压陷 Δ_{cs} 和核心母体竖向压缩变形 Δ_{cc} 的关系曲线如下页图 4 所示。

结合以往普通混凝土局压试验研究^[9-12],可以将试件局部受压过程分为 4 个阶段:压实、楔形体持荷、界面滑移和破坏。

(1) 压实:此阶段位于加载初期。其间 $P-\Delta_c$ 曲线斜率较小,这主要是因为试件内部存在微裂缝,各接触面之间也存在空隙。压实微裂缝与接触面空隙造成试件在较小的荷载作用下产生较大变形,而 $P-\Delta_{cs}$ 曲线斜率较大, $P-\Delta_{cc}$ 曲线斜率较小且与 $P-\Delta_c$ 曲线极为靠近,说明此阶段外围混凝土受剪力约束作用,与承压板下核心混凝土变形协调,试件以压缩变形为主。

(2) 楔形体持荷:此阶段基本位于 75%~90% 的极限荷载之前。其间 $P-\Delta_c$ 、 $P-\Delta_{cs}$ 和 $P-\Delta_{cc}$ 这三条曲线斜率稳定,荷载和变形基本保持线性关系,试件

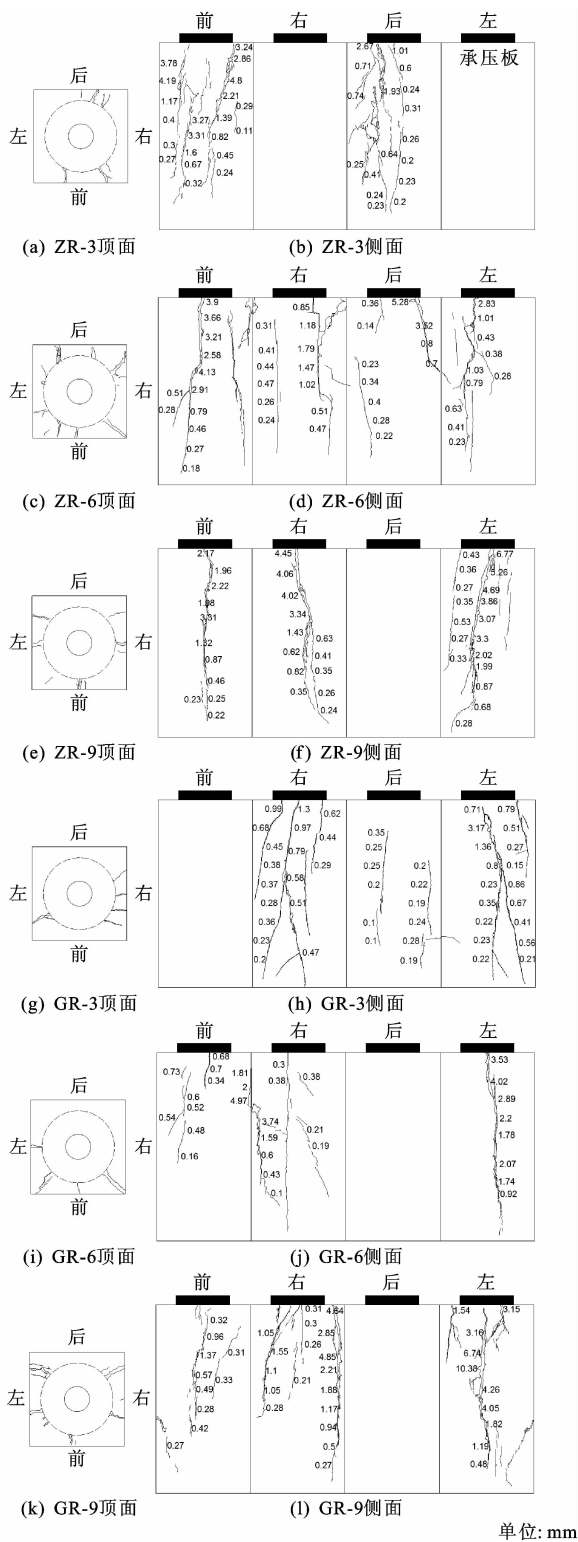


图3 试件裂缝

Fig. 3 Cracks of specimens

进入正常使用阶段, $\Delta_{cs} > \Delta_{cc}$, 说明试件变形以楔形体压缩变形为主。在这一阶段的中后期, 试件表面开始出现微小裂缝, 但在裂缝出现初期开展极为缓慢, 并不影响试件受力性能。

(3) 界面滑移: $P-\Delta_{cs}$ 曲线斜率减小, 变形突然增

大, 说明试件楔形体与外围母体界面受剪屈服, 形成滑移面, 从而造成楔形体相对滑动, 使得承压板下陷突然增大。 $P-\Delta_{cs}$ 曲线斜率相反, 说明核心母体压缩变形减小, 这是因为滑移面形成后楔形体与核心母体间相互作用减弱, 受到压缩的核心母体变形得以稍微恢复, 此阶段试件变形以楔形体滑移为主。

(4) 破坏: 滑移面继续扩展, 楔形体与母体间相互作用大幅减弱, 楔形体嵌入深度迅速增大, 荷载急剧下降, 最终导致试件丧失局压承载能力。

可见, RPC 试件局部受压过程与普通混凝土的破坏规律基本相同, 荷载-位移关系均可大致分为 4 个阶段, 结合 RPC 试件局压破坏形态发现, 两者受力机理均与楔劈理论基本吻合。局压荷载下 RPC 材料与普通混凝土破坏规律的区别主要体现在试件出现初始裂缝后裂缝发展缓慢, 其对试件承载影响较小, RPC 材料楔形体持荷阶段明显延长。

3 局压承载力影响因素分析

3.1 养护条件

ZR 组(自然养护)、GR 组(蒸汽养护)试件的局压承载力实测值 $P_{u,Z}^T$ 、 $P_{u,G}^T$ 如下页表 4 所示。由表 4 可知, 令 $X_1 = P_{u,G}^T / P_{u,Z}^T$, 则其平均值 $\bar{X}_1 = 1.07$, 说明与自然养护相比, 蒸汽养护可以将试件局压承载力提高约 7%。而将表 3 中立方体抗压强度进行对比, 令 $X_2 = f_{cu,G} / f_{cu,Z}$ ($f_{cu,Z}$ 、 $f_{cu,G}$ 分别为 ZR 组、GR 组试件的立方体抗压强度实测值), 则其平均值 $\bar{X}_2 = 1.19$ 。显然, 蒸汽养护对试件的抗压强度提高比例较大, 但对局压承载力的提高并不明显, 其原因主要是由于试件局压承载力同时受材料抗拉、压强度两方面影响, 而养护条件对 RPC 劈裂抗拉强度影响较小。

3.2 钢纤维掺量

下页图 5 给出了钢纤维掺量对试件局压承载力的影响。可以看出, 不论采用自然养护还是蒸汽养护, 钢纤维掺量的增加对试件局压承载力都有一定的增强作用, 结合表 3 及相关研究^[19], 可知提高钢纤维掺量对 RPC 立方抗压强度和劈裂抗拉强度有利。

下页表 5 给出了钢纤维掺量的提高对 RPC 试件立方体抗压强度和局部受压强度的增强作用。从表 5 可以看出: 当钢纤维掺量由 1% 增加到 2% 时, RPC 局压承载力提高较为明显, 其中自然养护和蒸汽养护下试件局压承载力的增幅为 24.6%、29%; 而当钢纤维掺量由 2% 增加到 3% 时, RPC 局压承

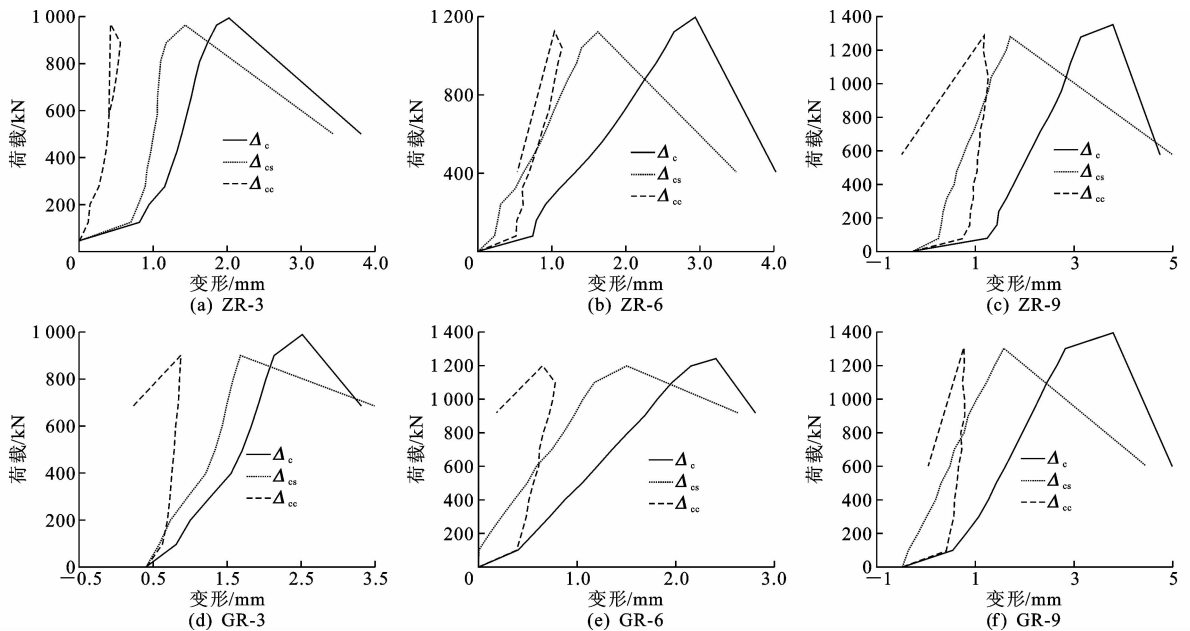


图 4 试件荷载-变形关系曲线

Fig. 4 Load-deformation relationship curves of specimens

表 4 ZR 组与 GR 组试件局压承载力

Tab. 4 Local compressive bearing capacity of specimens of group ZR and group GR

试件编号	$P_{u,z}^T/kN$	$P_{u,g}^T/kN$	$\frac{P_{u,g}^T}{P_{u,z}^T}$
ZR-1/(GR-1)	669	668	0.999
ZR-2/(GR-2)	816	919	1.126
ZR-3/(GR-3)	995	990	0.995
ZR-4/(GR-4)	831	914	1.100
ZR-5/(GR-5)	1 055	1 147	1.087
ZR-6/(GR-6)	1 196	1 242	1.038
ZR-7/(GR-7)	954	1 086	1.138
ZR-8/(GR-8)	1 134	1 258	1.109
ZR-9/(GR-9)	1 354	1 400	1.034

承载力增加幅度不大,自然养护和蒸汽养护下试件局压承载力仅提高了 12.6%、13.7%,钢纤维对 RPC 局压承载力的提高效率降低。可见,对于试件局压承载力而言,并非钢纤维掺量越多越好。这主要是因为钢纤维掺量过高会影响 RPC 混凝土密实度,从而影响其性能发挥。RPC 局压承载力的最佳钢纤维掺量尚有待进一步的试验研究。

从表 5 还可以看出,随着钢纤维掺量的提高,其对 RPC 立方体抗压强度和局部受压强度的影响趋势是一致的,也呈线性关系。因此,RPC 立方体抗压强度随钢纤维掺量的变化可在很大程度上反映钢纤维掺量对其局部受压强度的影响。

3.3 局压面积比

根据普通混凝土的相关研究,局压面积比对试

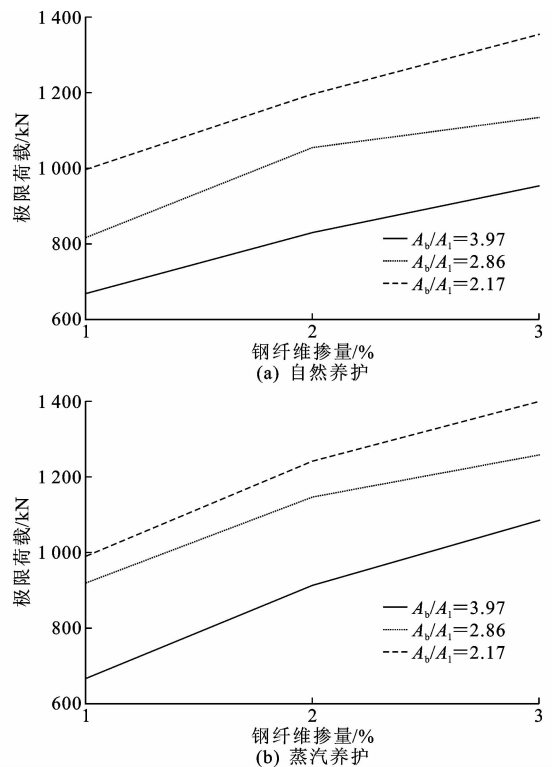


图 5 钢纤维掺量对局压承载力的影响

Fig. 5 Impact of steel fiber contents on local compressive bearing capacity

件局压承载力的影响非常重要,无论是初期的裂缝形成和分布,还是受压过程中的应力应变状态以及破坏时的局压强度和试件形态,都会受到局压面积比的影响。蔡绍怀在套箍强化理论的基础上,用极限平衡法导出了普通混凝土的局压承载力 N_u 为^[9]

表5 钢纤维掺量对RPC强度的影响

Tab. 5 Impact of steel fiber contents on RPC strength %

钢纤维掺量	自然养护		蒸汽养护	
	由1%增至2%	由2%增至3%	由1%增至2%	由2%增至3%
立方体抗压强度增幅	11.6	6.1	8.8	5.9
局压承载力增幅	24.6	12.6	29.0	13.7

$$N_u = \beta^T f_c A_0 \quad (1)$$

$$\beta^T = \frac{1}{1 - \cot(\theta)(1 - \sqrt{A_1/A_b}) / (4K_0)} \quad (2)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度; A_0 为混凝土局部受压面积; β^T 为混凝土局压强度影响系数; θ 为楔形体剪切面角, 按试验实测值取 25° ; K_0 为内力偶臂系数, 按试验结果取 0.55。

对式(2)进行化简可得

$$\beta^T = \sqrt{A_b/A_1}$$

可见混凝土局压承载力与局压面积比的平方根存在着线性关系。

参照局压面积比对普通混凝土局压承载力的影响规律, 对局压试验结果进行数据处理, 以量纲一参数 $\sqrt{A_b/A_1}$ 为横坐标, 以量纲一参数 $\beta^T = N_u / (f_c A_{in})$ 为纵坐标 (A_{in} 为混凝土局部受压净面积), 拟合结果如图6、图7所示。由试验点结果分析不难看出, 与普通混凝土相似, RPC局压承载力与局压面积比的开平方根之间同样存在着线性关系, 说明局压面积比对于局压承载力的影响属于结构层面, 并不会因为材料性能的增强而改变。

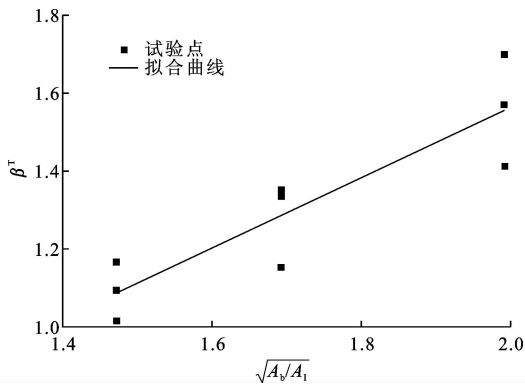


图6 ZR组试件局压强度提高系数拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of magnifying coefficients of local compressive strength of group ZR specimens

4 有限元分析

为进一步验证养护条件等对RPC力学性能的影响, 并与试验结果进行对比, 采用通用有限元软件ABAQUS, 建立局部受压试件的非线性有限元模

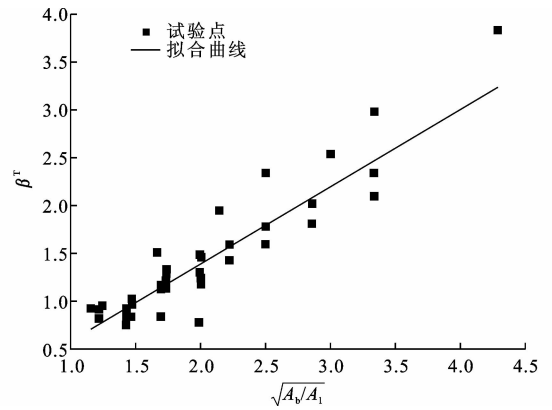


图7 GR组试件局压强度提高系数拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of magnifying coefficients of local compressive strength of group ZR specimens

型, 采用能较好模拟混凝土构件受力变形破坏特征的损伤塑性模型, 模拟试件受力破坏的全过程^[21]。

4.1 RPC本构关系

结合现有对RPC力学性能的研究及本次试验结果可以看出: 与自然养护相比, 蒸汽养护对于RPC胶体水化反应和火山灰反应的充分进行是有利的, 使得基体更为密实, 因而具有更高的抗压强度, 而钢纤维与基体之间的黏结作用主要受钢纤维类型、长径比以及自身抗拉强度等因素的影响, 对养护条件依赖性较小, 从而导致养护条件对RPC抗拉强度影响较小; 钢纤维掺量的改变对抗压强度和抗拉强度都有显著影响。在此基础上, 根据本次试验的立方体抗压强度及文献[21]中所给出的单轴受压应力-应变全曲线本构模型, 可得

$$y = \begin{cases} ax + (5-4a)x^4 + (3a-4)x^5 & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x}{b(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x = \epsilon / \epsilon_{pr}$, $y = \sigma / \sigma_{pr}$, 均为量纲一参数, σ 为应力, σ_{pr} 为峰值应力, ϵ 为应变, ϵ_{pr} 为峰值应力对应的应变, σ_{pr} 、 ϵ_{pr} 根据本次材料性能试验结果取值, 如下页表6所示; a 、 b 均为单轴受压试验拟合系数, $1.1 \leq a \leq 1.4$, $6 \leq b \leq 10$, 本试验按文献[22]取 $a = 1.2$, $b = 8.0$ 。

对于RPC受拉应力-应变曲线, 由于相关研究数据较少, 结合本文中关于养护条件对抗拉强度影响较小的推论以及文献[6]中提出的应变硬化时应力-应变关系模型, 可得

$$y = \begin{cases} \frac{\sigma_{ct}}{\epsilon_{ca}} \epsilon & 0 < \epsilon \leq \epsilon_{ca} \\ \sigma_{ct} & \epsilon_{ca} < \epsilon \leq \epsilon_{pc} \\ \sigma_{ct} \frac{1}{1 + \epsilon} & \epsilon > \epsilon_{pc} \end{cases} \quad (4)$$

表 6 RPC 试件受压和受拉峰值应力及其所对应的应变

Tab. 6 Peak values of compressive and tensile stress and corresponding strain of RPC specimens

试件编号	σ_{pr}/MPa	ϵ_{pr}	σ_{ct}/MPa	ϵ_{ca}	ϵ_{pc}
ZR-1~ZR-3	107.4	0.002 77	7	0.000 854	0.001 94
ZR-4~ZR-6	119.3	0.003 05	12	0.000 902	0.002 05
ZR-7~ZR-9	127.1	0.003 23	14	0.000 924	0.002 10
GR-1~GR-3	129.3	0.003 29	7	0.000 854	0.001 94
GR-4~GR-6	141.8	0.003 58	12	0.000 902	0.002 05
GR-7~GR-9	149.9	0.003 77	14	0.000 924	0.002 10

注: σ_{ct} 、 ϵ_{ca} 分别为试件受拉和本构关系中受拉峰值应力及其所对应的应变; ϵ_{pc} 为 RPC 材料开裂应变。

各组试件受压应力-应变曲线如图 8 所示。养护条件对 RPC 材料抗拉性能的影响较小,本文对钢纤维掺量相同,养护条件不同的 RPC 试件取同样的受拉应力-应变曲线,3 种钢纤维掺量 RPC 受拉应力-应变曲线如图 9 所示。

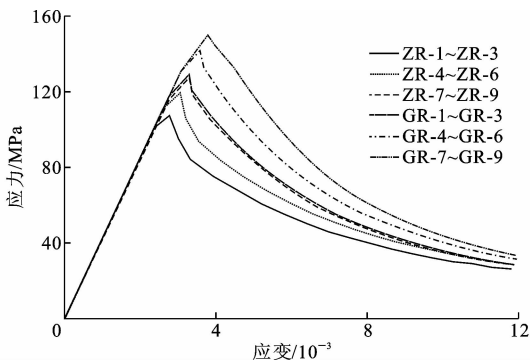


图 8 RPC 试件受压应力-应变曲线

Fig. 8 Compressive stress-strain curves of RPC specimens

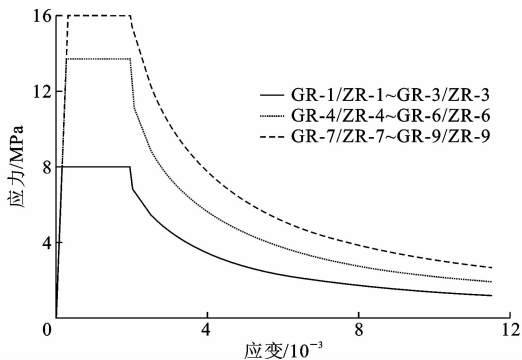


图 9 RPC 试件受拉应力-应变曲线

Fig. 9 Tensile stress-strain curves of RPC specimens

4.2 受力分析

根据试件的布置参数,建立带中心预留孔道的 ABAQUS 局部受压模型,模型网格划分尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,网格单元为 C3D8R,引入上述材料应力-应变数据进行全过程非线性分析。分析时

采用位移控制加载,获得局部受压极限荷载下结构的 Mises 应力云图,如图 10 所示。

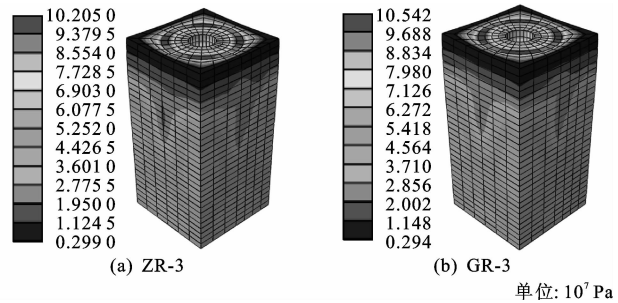


图 10 试件局部受压应力云图

Fig. 10 Stress nephogram of local compressive stress of specimens

由图 10 可知:局部压力在传递到距加载端承压板直径距离时,纵向压应力基本可达到均匀分布;承压板周围在局部压力的作用下会产生较大应力,这主要是因为承压板下楔形体逐渐形成,使其处于多轴受压状态,应力较为集中。

将各组试件在局部压力下的荷载-位移曲线有限元结果与试验结果进行对比,结果如下页图 11 所示。可以看出,有限元结果与试验结果吻合良好。

同时,根据试件的荷载-位移曲线可以得到其局压承载力 P_u^A ,如下页表 7 所示。将局压承载力有限元结果 P_u^A 与试验结果 P_u^T 进行对比,令 $X_3 = P_u^A / P_u^T$,其平均值 $\bar{X}_3 = 1.002$,标准差 $\sigma = 0.052$ 。可见:有限元结果和试验结果吻合非常好,说明模型材料采用的应力-应变关系与本文试验符合,同时也证明了养护条件对 RPC 局压承载力影响较小;但钢纤维掺量对 RPC 局压承载力影响较为明显。

5 局压承载力计算公式推导

中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)给出了普通混凝土的局压承载力计算公式^[23]

$$N_u = \beta_c \beta_l f_c A_{ln} \quad (5)$$

式中: β_c 为混凝土强度影响系数,按规范取值; $\beta_l = \sqrt{A_v/A_l}$,为混凝土局压的强度提高系数。

式(5)通过 f_c 和 β_c 考虑混凝土强度的影响,通过 β_l 考虑局压面积比的影响,较好地反映了部分主要因素的作用,但是随着 RPC 抗拉、压强度的大幅度提高,以及养护方式的变化,定值系数并不能很好地反映各因素影响规律。为此,本文以式(5)为基础,通过系数 β^T 综合考虑 RPC 强度和局压面积比两方面因素影响,建立自然养护和蒸汽养护下 RPC 局压承载力计算公式

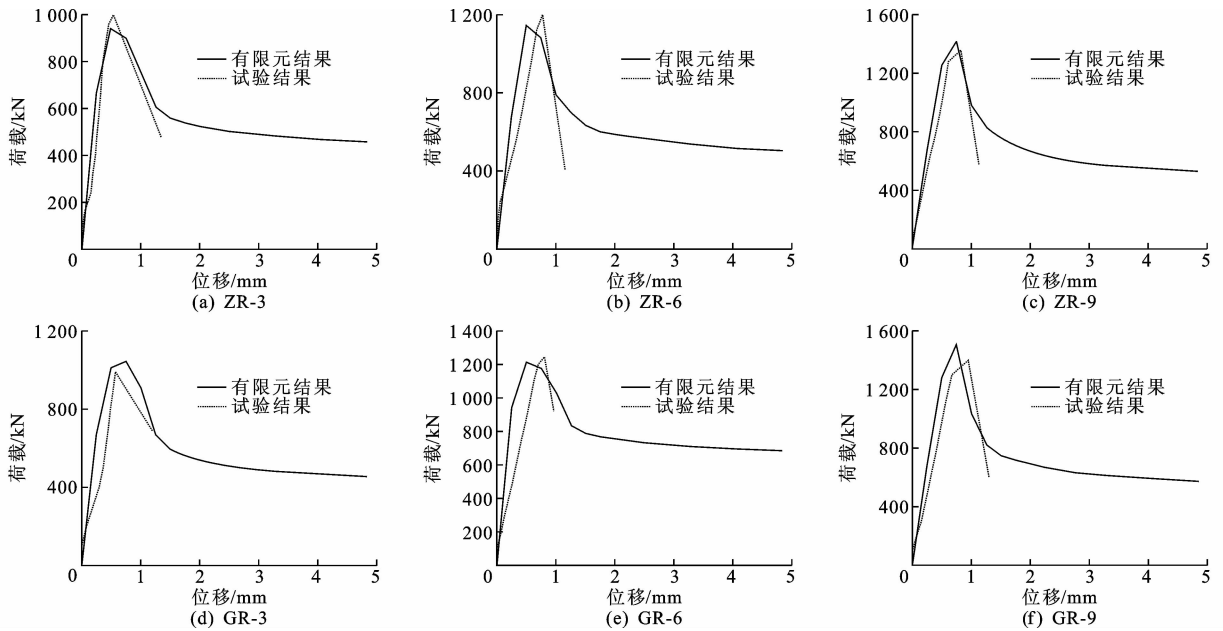


图 11 荷载-位移曲线有限元结果与试验结果对比

Fig. 11 Comparisons of load-displacement curves between finite element results and test results

表 7 局压承载力试验结果与有限元结果对比

Tab. 7 Comparisons of local compressive bearing capacity between test results and finite element results

试件	$P_{u,G}^{\Delta}/kN$	$\frac{P_{u,G}^{\Delta}}{P_{u,G}^T}$	试件	$P_{u,Z}^{\Delta}/kN$	$\frac{P_{u,Z}^{\Delta}}{P_{u,Z}^T}$
GR-1	717	0.932	ZR-1	667	1.003
GR-2	853	1.077	ZR-2	803	1.016
GR-3	1 045	0.947	ZR-3	938	1.061
GR-4	926	0.987	ZR-4	845	0.983
GR-5	1 078	1.064	ZR-5	1 013	1.041
GR-6	1 214	1.023	ZR-6	1 143	1.046
GR-7	1 005	1.081	ZR-7	975	0.978
GR-8	1 316	0.956	ZR-8	1 124	1.009
GR-9	1 503	0.931	ZR-9	1 411	0.960

注: $P_{u,G}^{\Delta}$ 、 $P_{u,Z}^{\Delta}$ 分别为 GR、ZR 组试件局压承载力有限元计算值; $P_{u,G}^T$ 、 $P_{u,Z}^T$ 分别为 GR、ZR 组试件试验值。

$$N_u = \beta^T f_c A_{ln} \quad (6)$$

5.1 自然养护 RPC 局压承载力分析与计算

ZR 组 RPC 试件局压承载力实测值与计算值之比如表 8 所示。试件 ZR1~ZR9 的局压强度影响系数分布见图 6。由图 6 可以看出,各试验结果离散性较大,并由上到下大致分为 3 层,这主要是因为各个试件预留孔道直径是相同的,但是承压板的面积是逐渐变化的,预留孔道对不同试件局压面积的削弱作用是不同的,从而导致局压强度影响系数结果呈分层分布。

根据图 6 还拟合得到自然养护条件下钢纤维 RPC 局压强度影响系数 β_{SF}^T 为

$$\beta_{SF}^T = 0.9 \sqrt{A_b/A_1} - 0.24 \quad (7)$$

表 8 ZR 组试件局压承载力实测值与计算值之比

Tab. 8 Comparison of local compressive bearing capacity of group ZR specimens between test values and calculated values

试件编号	β_1	$P_{u,Z}^C/kN$	$\frac{P_{u,Z}^T}{P_{u,Z}^C}$
ZR-1	1.99	735	0.909
ZR-2	1.69	908	0.898
ZR-3	1.47	1 062	0.936
ZR-4	1.99	821	1.012
ZR-5	1.69	1 014	1.040
ZR-6	1.47	1 186	1.008
ZR-7	1.99	871	1.095
ZR-8	1.69	1 076	1.054
ZR-9	1.47	1 258	1.076

故自然养护下 RPC 局压承载力计算值 $P_{u,Z}^C$ 为

$$P_{u,Z}^C = (0.9 \sqrt{A_b/A_1} - 0.24) f_c A_{ln} \quad (8)$$

按照式(8)计算得到 $P_{u,Z}^C$, 令 $X_4 = P_{u,Z}^T/P_{u,Z}^C$, 可得其平均值 $\bar{X}_4 = 1.003$, 标准差 $\sigma = 0.068$ 。可见计算值与试验值符合较好。

5.2 蒸汽养护 RPC 局压承载力分析与计算

为推导蒸汽养护下 RPC 局压承载力的计算公式,本文还收集了文献[24]~[26]中的 16 个试验结果,其试件也是采用蒸汽养护来制备,试件参数与本文 GR 组试件基本相似,其局压强度影响系数分布如图 11 所示,拟合后得到蒸汽养护条件下钢纤维 RPC 局压强度影响系数 β^T 为

$$\beta^T = 0.92 \sqrt{A_b/A_1} - 0.4 \quad (9)$$

故蒸汽养护下 RPC 局压承载力计算值 $P_{u,G}^C$ 可按下式计算

$$P_{u,G}^C = (0.92 \sqrt{A_b/A_l} - 0.4) f_c A_{ln} \quad (10)$$

令 $X_5 = P_{u,G}^T / P_{u,G}^C$, 计算结果如表 9 所示, 其平均值 $\bar{X}_5 = 1.003$, 标准差 $\sigma = 0.104$ 。由表 9 可知, 计算值与试验值吻合良好。

表 9 GR 组试件局压承载力实测值与计算值对比

Tab. 9 Comparisons of local compressive bearing capacity of group GR specimens between test values and calculation values

试件编号	β^T	$P_{u,G}^T/\text{kN}$	$P_{u,G}^C/\text{kN}$	$\frac{P_{u,G}^T}{P_{u,G}^C}$	试件编号	β^T	$P_{u,G}^T/\text{kN}$	$P_{u,G}^C/\text{kN}$	$\frac{P_{u,G}^T}{P_{u,G}^C}$
GR-1	1.99	668	799	0.836	sh9	1.43	2 100	2 598	0.808
GR-2	1.69	919	986	0.932	C1-1	3.33	1 102	1 303	0.846
GR-3	1.47	990	1 153	0.859	C1-2	3.33	1 151	1 303	0.884
GR-4	1.99	914	870	1.051	C2-1	2.86	1 294	1 497	0.865
GR-5	1.69	1 147	1 073	1.069	C2-2	2.86	1 135	1 497	0.758
GR-6	1.47	1 242	1 254	0.990	C3-1	2.50	1 489	1 685	0.884
GR-7	1.99	1 086	921	1.179	C3-2	2.50	1 691	1 685	1.003
GR-8	1.69	1 258	1 137	1.107	C4-1	2.22	1 686	1 867	0.903
GR-9	1.47	1 400	1 329	1.054	C4-2	2.22	1 321	1 867	0.707
LC-1	1.15	1 943	1 498	1.298	C5-1	1.74	2 191	2 294	0.956
LC-2	1.25	1 700	1 415	1.202	C5-2	1.74	1 880	2 294	0.820
LC-3	1.67	1 518	1 135	1.338	C6-1	1.22	1 584	1 478	1.072
LC-4	2.14	1 182	921	1.284	C6-2	1.22	1 886	1 478	1.276
LC-5	2.50	1 045	806	1.297	D1-1	3.33	1 337	1 416	0.945
LC-6	3.00	787	685	1.149	D1-2	3.33	1 337	1 416	0.945
LC-7	3.33	748	623	1.202	D2-1	2.86	1 571	1 628	0.965
LC-8	4.29	582	494	1.179	D2-2	2.86	1 571	1 628	0.965
sh1	2.00	2 214	2 132	1.039	D3-1	2.50	1 807	1 832	0.987
sh2	1.74	2 477	2 413	1.027	D3-2	2.50	1 807	1 832	0.987
sh3	2.00	1 699	2 024	0.840	D4-1	2.22	2 047	2 030	1.009
sh4	1.74	2 243	2 321	0.966	D4-2	2.22	2 047	2 030	1.009
sh5	1.43	2 726	2 769	0.984	D5-1	1.74	2 660	2 493	1.067
sh6	1.43	2 483	2 769	0.897	D5-2	1.74	2 660	2 493	1.067
sh7	2.00	1 574	1 769	0.890	D6-1	1.22	1 922	1 607	1.197
sh8	1.74	2 373	2 104	1.128	D6-2	1.22	1 922	1 607	1.197

注: LC 系列试件来自文献[24]; sh 系列试件来自文献[25]; C、D 系列试件来自文献[26]。

5.3 两类养护条件 RPC 局压承载力统一计算公式

无论自然养护还是高温蒸汽养护, 钢纤维 RPC 在局部压力作用下的受力机理是相同的, 因此在保证公式准确性的前提下, 统一不同养护条件下的 RPC 局压承载力计算公式, 使其具有更好的适应性和便捷性。

按照上文分析, 钢纤维掺量对 RPC 试件局压承载力和立方体抗压强度的影响趋势大致相同, 因此立方体抗压强度可以在一定程度上反映钢纤维掺量对局压承载力的影响, 并且局压承载力在计算时是以立方体抗压强度为基本参数之一。养护条件对试件局压承载力影响并不明显, 可通过修正系数来反映。因此, 本文通过立方体抗压强度来反映钢纤维掺量的影响, 并通过修正系数 α 来修正养护条件对

RPC 试件局压承载力的影响, 修正后 RPC 局压承载力 P_u^C 为

$$P_u^C = \alpha (0.92 \sqrt{A_b/A_l} - 0.4) f_c A_{ln} \quad (11)$$

式中: 自然养护条件下 $\alpha = 0.95$; 蒸汽养护条件下 $\alpha = 1.0$ 。

按照式(11)计算得到 P_u^C , 令 $X = P_u^T / P_u^C$, P_u^T 为 2 种养护条件下的承载力实测值, 可得其平均值 $\bar{X} = 1.088$, 标准差 $\sigma = 0.126$ 。可见式(11)计算值与试验值吻合良好。

6 结 语

(1) 蒸汽养护和自然养护的 RPC 试件局部受压都是先开裂后破坏的延性破坏形态, 开裂和破坏之间有着明显的裂缝发展阶段。钢纤维的桥联作用能

有效地减缓裂缝发展,增强试件整体性,使得试件延性更为明显。

(2)相对于自然养护,蒸汽养护对局压承载力的提高幅度仅约为7%,改善作用不明显;而参加钢纤维能有效提高RPC局压承载力。

(3)推导并统一了自然养护和蒸汽养护条件下的RPC局压承载力计算公式,计算结果与试验实测值吻合良好。

(4)后张预应力混凝土工程中的结构构件多布置多束预应力筋(密布),存在相邻预应力锚具下混凝土局部受压计算底面积相互重叠的现象,因此下一步可着重开展密布荷载作用下RPC局压性能研究。

参考文献:

References:

- [1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [2] GRAYBEAL B A. Material property characterization of ultra-high performance concrete[R]. Mclean; Federal Highway Administration, 2006.
- [3] HAROON S, YAZDANI N, TAWFIQ K. Posttensioned anchorage zone enhancement with fiber-reinforced concrete[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 11(5): 566-572.
- [4] JO B W, BYUN Y J, TAE G H. Structural behavior of cable anchorage zones in prestressed concrete c[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(1): 171-180.
- [5] 杨克家, 孙林柱, 李 桅, 等. RPC中空柱受压构件截面设计及受力性能研究[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 166-175.
- YANG Ke-jia, SUN Lin-zhu, LI Wei, et al. Cross section design of and mechanical performance investigation into RPC hollow members[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 166-175.
- [6] 张 哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.
- ZHANG Zhe, SHAO Xu-dong, LI Wen-guang, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58.
- [7] 张明波, 阎贵平, 闫光杰, 等. 200 MPa级活性粉末混凝土抗弯性能试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(1): 81-84.
- ZHANG Ming-bo, YAN Gui-ping, YAN Guang-jie,

- et al. Experimental research on the flexing resistance of 200 MPa reactive powder concrete[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(1): 81-84.
- [8] 郑 辉, 方 志, 刘 明. 预应力活性粉末混凝土箱梁抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(6): 51-63.
- ZHENG Hui, FANG Zhi, LIU Ming. Experimental study on shear behavior of prestressed reactive powder concrete box girders[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(6): 51-63.
- [9] 蔡绍怀. 混凝土及配筋混凝土的局部承压强度[J]. 土木工程学报, 1963(6): 1-10, 27.
- CAI Shao-huai. Concrete and reinforced concrete local bearing strength[J]. China Civil Engineering Journal, 1963(6): 1-10, 27.
- [10] 曹声远, 杨熙坤, 钮长仁. 混凝土轴心局部承压破坏及强度的试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1980, 8(4): 61-73.
- CAO Sheng-yuan, YANG Xi-kun, NIU Chang-ren. Experimental research on failure and strength of concrete under concentric local pressure[J]. Journal of Harbin Civil Engineering Institute, 1980, 8(4): 61-73.
- [11] 曹声远, 杨熙坤. 混凝土偏心局部承压强度试验研究及计算方法的建议[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1982(4): 1-11.
- CAO Sheng-yuan, YANG Xi-kun. Experimental research on local compressive strength of eccentric concrete and suggestions for calculation method[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1982, 10(4): 1-11.
- [12] 刘永颐, 关建光, 王传志. 混凝土局部承压强度及破坏机理[J]. 土木工程学报, 1985, 18(2): 53-65.
- LIU Yong-yi, GUAN Jian-guang, WANG Chuan-zhi. Bearing strength of concrete and its failure mechanism[J]. China Civil Engineering Journal, 1985, 18(2): 53-65.
- [13] 蔡绍怀, 薛立红. 高强度混凝土的局部承压强度[J]. 土木工程学报, 1994, 27(5): 52-61.
- CAI Shao-huai, XUE Li-hong. Local bearing capacity of high strength concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 1994, 27(5): 52-61.
- [14] 曹 健, 王元丰, 安小平, 等. 轴心受压粉煤灰混凝土构件徐变系数研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 73-81.
- CAO Jian, WANG Yuan-feng, AN Xiao-ping, et al. Creep coefficient of fly ash concrete member under axial compression[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 73-81.

- [15] 张利娜,巴方,张伟. 活性粉末混凝土的局部抗压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(增1): 939-942.
ZHANG Li-na, BA Fang, ZHANG Wei. The test study on local compressive performance of RPC[J]. Industrial Construction, 2009, 39(S1): 939-942.
- [16] 周威,郑文忠,胡海波. 钢筋网片约束活性粉末混凝土局压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 34(11): 141-150.
ZHOU Wei, ZHENG Wen-zhong, HU Hai-bo. Bearing capacity of reactive powder concrete reinforced by orthogonal ties[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 141-150.
- [17] 周威,胡海波. 预留孔道活性粉末混凝土局压性能与承载力分析[J]. 工程力学, 2014, 31(7): 119-128.
ZHOU Wei, HU Hai-bo. Analysis on bearing capacity and behavior of reactive powder concrete with empty concentric duct under local pressure[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(7): 119-128.
- [18] 周威,胡海波,郑文忠. 高强螺旋筋约束活性粉末混凝土局压承载力试验[J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 63-72.
ZHOU Wei, HU Hai-bo, ZHENG Wen-zhong. Bearing capacity of reactive powder concrete reinforced by high-strength steel spirals[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(8): 63-72.
- [19] 鞠彦忠,于泳,王德弘. 不同养护条件下钢纤维掺量对RPC强度的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(4): 42-44.
JU Yan-zhong, YU Yong, WANG De-hong. Influence of steel fiber content on strength of RPC under different curing conditions[J]. China Concrete and Cement Products, 2015(4): 42-44.
- [20] 史才军,何稳,吴泽媚,等. 纤维对UHPC力学性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2227-2236, 2247.
SHI Cai-jun, HE Wen, WU Ze-mei, et al. Influence of fibers on mechanical properties of UHPC[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(8): 2227-2236, 2247.
- [21] 聂建国,王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 59-67, 82.
NIE Jian-guo, WANG Yu-hang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 59-67, 82.
- [22] 马亚峰. 活性粉末混凝土(RPC200)单轴受压本构关系研究[D]. 北京:北京交通大学, 2006.
MA Ya-feng. Study on constitutive relationship of 200 MPa reactive powder concrete under uni-axial compression[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.
- [23] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for design of concrete structures[S].
- [24] 张利娜. 活性粉末混凝土(RPC)的局部抗压性能试验研究[D]. 北京:北京交通大学, 2008.
ZHANG Lin-a. The test study of local pressure of RPC[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [25] 胡海波. 后张预应力活性粉末混凝土局压承载力试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
HU Hai-bo. Experimental investigation on anchorage zone capacity of post-tensioned reactive powder concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [26] 赵军卫. 预应力锚具下混凝土局部受压基本问题试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
ZHAO Jun-wei. Experimental research on fundamental problems of local compression of concrete under anchorages[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.