

文章编号:1673-2049(2017)05-0059-09

超高性能混凝土结构的设计方法

方志¹, 郑辉², 杨剑³, 苏捷¹, 黄政宇¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007;
3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410012)

摘要: 鉴于中国有关活性粉末混凝土 RPC 制品方面的国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)已于2015年颁布执行,但目前尚无活性粉末混凝土结构设计规程,结合湖南省工程建设地方标准《活性粉末混凝土结构技术规程》(简称规程)的编制,对超高性能活性粉末混凝土结构的主要设计方法进行了讨论,并介绍了《规程》主要内容及若干设计考虑,通过分别引入钢纤维影响系数 $\beta_v, \beta_p, \beta_w, \beta_B$,并基于可靠度分析得到了RPC构件抗剪承载力、抗冲切承载力、裂缝宽度、刚度计算公式。研究表明:RPC轴心抗压强度及轴心抗拉初裂强度标准值分别为对应立方体抗压强度的0.7倍及0.047倍;轴心抗拉强度与纤维体积掺量、纤维形状参数相关,钢纤维对轴心抗拉强度的影响系数为0.15;RPC100~RPC180弹性模量取值在40.0~48.6 GPa之间;《规程》偏安全地不考虑受拉区活性粉末混凝土抗拉作用对抗弯承载能力的贡献。

关键词: 超高性能混凝土;活性粉末混凝土;结构设计;技术规程;设计方法

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Design Principles for Ultra-high Performance Concrete Structures

FANG Zhi¹, ZHENG Hui², YANG Jian³, SU Jie¹, HUANG Zheng-yu¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: The national standard about reactive powder concrete (RPC) products, *Reactive Powder Concrete* (GB/T 31387—2015), has been issued in 2015, but there is no any technical specification about the structural design of RPC structures in present China. With the compiling of Hunan provincial standard of *Technical Specification for Reactive Powder Concrete Structures*, the main design methods of Ultra-high performance RPC structures were discussed, and the main contents and some design consideration were introduced. By introducing the influence coefficient about steel fiber $\beta_v, \beta_p, \beta_w, \beta_B$ respectively and based on the reliability, the shear bearing capacity, punching shear capacity, crack width and deflection calculation formula were acquired. The results show that the standard values of axial compressive strength and initial crack strength of the RPC are 0.7 times and 0.047 times of cube compressive strength respectively. The tensile strength is related to fiber volume and fiber shape parameters, and the influence coefficient of steel fiber on axial tensile strength is 0.15. Elastic moduli of RPC100~RPC180 are between 40.0~48.6 GPa. Due to safety, the rules about flexural bearing capacity

收稿日期:2017-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51608189,51078134);湖南工程建设地方标准制(修)订项目(BZ201509)

作者简介:方志(1963-),男,湖北黄冈人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:fangzhi@hnu.edu.cn.

don't consider the tensile contribution of RPC in the tension zone.

Key words: ultra high-performance concrete; reactive powder concrete; structural design; technical standard; design method

0 引言

1993 年,法国 Bouygues 公司 Richard 等^[1]率先研制出一种新的超高性能水泥基复合材料——活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)。活性粉末混凝土是以水泥、矿物掺和料等活性粉末材料以及细骨料、外加剂、高强度微细钢纤维或有机合成纤维和水等原料生产的高强、高致密纤维增强细骨料混凝土,依其特性可归于超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)范畴。RPC 一经问世,就以其优异的力学性能和耐久性能而被土木工程界所瞩目,并已在工程建设领域里获得了较多应用^[2-5]。RPC 的应用可使结构自重大幅减轻,结构的耐久性能显著提高。由于 RPC 的力学性能与普通混凝土间存在明显差别,因此其结构设计方法亦应特别考虑。

目前,已有几个国家制定了专门针对 RPC 或者 UHPC 的设计规程或建议^[6-10],中国有关 RPC 材料制品方面的国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)已于 2015 年颁布执行,但目前尚无有关活性粉末混凝土结构设计与施工方面的技术规程和质量检验评定标准,已严重制约这种高性能材料的推广应用,因此有必要针对活性粉末混凝土的特点制定相应的技术规程。

湖南省住房和城乡建设厅将《活性粉末混凝土结构技术规程》(以下简称《规程》)列入了 2015 年度湖南省工程建设地方标准制定计划,由湖南大学会同相关单位编写。2017 年 3 月,《规程》(征求意见稿 V1.0)由湖南省住房和城乡建设厅组织进行了为期 1 个月的通讯评审,向省内外专家和地市住建局征求了意见,编制单位根据返回意见修改后形成了《规程》(征求意见稿 V2.0);2017 年 4 月,召开了《规程》(征求意见稿 V2.0)专家咨询会,根据专家意见对《规程》进行修改后形成了《规程》(送审稿);2017 年 6 月,依据《规程》(送审稿)评审意见,形成了《规程》(报批稿)而进入《规程》的最后报批阶段。

1 《规程》的适用范围及主要内容

《规程》规定 RPC 结构的设计方法采用以概率理论为基础的极限状态设计法,并按分项系数的设

计表达式进行设计。此外,《规程》只对活性粉末混凝土结构不同于普通混凝土结构设计、施工及质量验收的专门要求做出规定,未明确规定的可依据结构所属工程类别分别参照相应的国家和行业现行规范及规程要求。

1.1 适用范围

就适用的工程类别而言,为更好地促进活性粉末混凝土这种高性能材料的推广应用,《规程》编制时兼顾了公路桥梁、城市桥梁和建筑工程的可靠度需求。考虑到目前相关规范桥梁结构设计的可靠性指标高于建筑结构,而《规程》编制时,基于就高不就低的原则,确定了相应的分项系数及相关设计计算公式中的参数取值。因此,《规程》应用于建筑设计时,将偏于安全。RPC 这种新型材料在中国的应用尚属开始,如此考虑亦较合理。就适用的材料而言,规定《规程》适用于采用高强度微细钢纤维增强且钢纤维体积掺量在 1.5%~4.0%、强度等级在 RPC100~RPC180 之间的活性粉末混凝土结构的设计、施工及质量检验评定。试验研究表明:当钢纤维体积掺量小于 1.5%时,活性粉末混凝土表现出拉伸软化^[11];当钢纤维体积掺量小于 1.0%时,单轴受压疲劳荷载作用下,活性粉末混凝土棱柱体一般表现出没有明显预兆的劈裂破坏,而当钢纤维体积掺量大于 1.0%时,则为有一定预兆的剪切破坏^[12];当钢纤维体积掺量大于 4.0%时,活性粉末混凝土难以搅拌均匀,施工不便且可收集到的钢纤维体积掺量大于 4.0%的研究样本数据亦较少。另有研究表明:活性粉末混凝土中钢纤维的最佳体积掺量为 2%~3%^[13-14]。因此,《规程》规定钢纤维的合适体积掺量为 1.5%~4.0%。

《规程》适用的活性粉末混凝土强度等级限制在 RPC100~RPC180,主要考虑与国家标准《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)的规定一致,以方便材料的规范配制及质量评定。

就适用的抗震设防标准而言,《规程》只对抗震设防烈度低于 8 度的活性粉末混凝土结构的设计做出了规定。配筋混凝土构件的抗震性能主要取决于活性粉末混凝土材料和钢材的性能。试验结果表明活性粉末混凝土变形性能(极限压应变为 $4\ 143 \times 10^{-6} \sim 5\ 270 \times 10^{-6}$,极限轴拉应变为 $1\ 000 \times 10^{-6} \sim$

$2\,000\times10^{-6}$), 优于普通混凝土和高强混凝土, 在配筋条件及构造相同时, 活性粉末混凝土构件的延性和耗能能力应优于普通混凝土构件和高强混凝土构件, 因此其抗震性能也会更好。由于目前对活性粉末混凝土结构抗震性能的研究尚不充分, 因此《规程》仅对抗震设防烈度低于 8 度的活性粉末混凝土结构设计做出规定。

1.2 主要内容

《规程》除前言外, 共分为 9 章, 包括总则、术语、符号、材料、承载能力极限状态计算、正常使用极限状态验算、构造要求、抗震设计及构造、施工、施工质量验收。

《规程》第 3 章“材料”部分对活性粉末混凝土的材料制备、强度取值、弹性模量、泊松比、本构模型、热工系数、收缩和徐变等关键设计参数的取值进行了规定。

《规程》第 4 章“承载能力极限状态计算”部分详细规定了正截面承载力、斜截面受剪承载力、正截面受压承载力、正截面受拉承载力、抗冲切承载力、局部受压承载力、疲劳以及预制构件结合部承载力等的计算方法。

《规程》第 5 章“正常使用极限状态验算”对裂缝及挠度验算的原则和方法进行了规定。

《规程》第 6 章“构造要求”对最小保护层厚度、钢筋选用及净距、最小配筋率、钢筋的锚固、钢筋的接头、结构构件的基本构造、预制构件的结合面等构造要求进行了规定。

《规程》第 7 章“抗震设计及构造”对结构的抗震设计进行了规定。

《规程》第 8 章“施工”对活性粉末混凝土结构施工的材料配合比设计、浇筑、养护及预制构件施工等要求进行了规定。

《规程》第 9 章“施工质量验收”对活性粉末混凝土的原材料质量、拌和物质量、硬化活性粉末混凝土性能以及活性粉末混凝土工程的质量验收等进行了规定。

2 设计方法解读

2.1 活性粉末混凝土材料性能

《规程》规定活性粉末混凝土的强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。立方体抗压强度标准值系指按标准方法制作、养护的边长为 100 mm 立方体试件在 28 d 或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度标准值。

采用边长 100 mm 立方体试件主要基于以下考虑:

(1) 活性粉末混凝土立方体抗压强度的尺寸效应不明显。国内外研究机构总计 36 组、立方体抗压强度为 86.2~151.1 MPa、钢纤维体积掺量为 1.5%~3% 的活性粉末混凝土立方体抗压强度尺寸效应试验结果表明: 边长 150 mm 立方体试件的抗压强度为边长 100 mm 立方体试件的 96%~99%^[15-16]。

(2) 《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015) 规定立方体抗压强度标准值的测定采用边长 100 mm 的立方体试件作为标准试件。

(3) 采用边长 150 mm 的立方体试件, 常用的 2 000 kN 压力机可能会超量程。

《规程》中活性粉末混凝土材料取值包括抗压强度取值、抗拉强度取值, 因活性粉末混凝土抗拉强度受钢纤维影响明显, 采用抗拉初裂强度及轴心抗拉强度 2 个指标定义抗拉强度。

2.1.1 抗压强度

活性粉末混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 由立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 经计算确定。活性粉末混凝土轴心抗压强度 f_{ck} 按式(1)计算

$$f_{ck}=0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k}\tag{1}$$

式中: 系数 0.88 为考虑实际工程构件与立方体试件活性粉末混凝土强度之间的差异而取用的折减系数; α_{c1} 为棱柱体强度与立方体强度的比值; α_{c2} 为脆性折减系数。

湖南大学及国内外研究机构总计 124 组强度范围 103.1~188.9 MPa 的活性粉末混凝土立方体抗压强度和棱柱体抗压强度实测值的比较结果表明^[17-36]: α_{c1} 在 0.74~0.99 之间, 平均值为 0.887, 标准差为 0.053, 因而《规程》 α_{c1} 偏安全取为 0.80。由于钢纤维的掺入, 使得活性粉末混凝土的脆性会明显低于普通混凝土, 且《规程》规定活性粉末混凝土中钢纤维的体积掺量不低于 1.5%, 故脆性折减系数 α_{c2} 取为 1.0。将所确定的各系数代入式(1), 即可得到轴心抗压强度标准值计算式为

$$f_{ck}=0.7f_{cu,k}\tag{2}$$

计算得到活性粉末混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 及设计值 f_c 见表 1, 其中设计值由标准值除以材料分项系数 1.45 得到。活性粉末混凝土轴心抗压强度实测值与《规程》取值比较如图 1 所示。

2.1.2 抗拉强度

《规程》规定活性粉末混凝土轴心抗拉时基体的

表 1 活性粉末混凝土轴心抗压强度

Tab. 1 Axial Compressive Strength of RPC

强度等级	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
f_{ck}/MPa	70	84	98	112	126
f_c/MPa	48	58	68	77	87

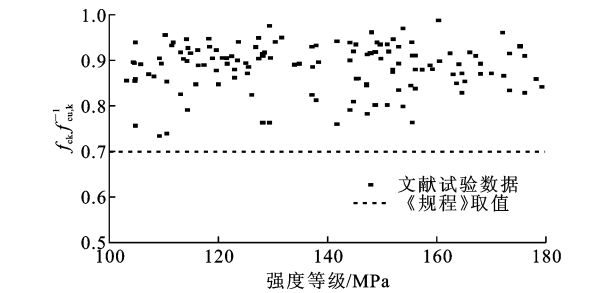


图 1 轴心抗压强度与立方体抗压强度实测值比较

Fig. 1 Comparison of Measured Values Between Axial Compressive Strength and Cube Compressive Strength

抗拉强度为其抗拉初裂强度,峰值强度为其轴心抗拉强度。

活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度标准值 $f_{t0,k}$ 宜由试验确定,当无试验数据时,可按表 2 确定。活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度设计值 f_{t0} 由标准值除以材料分项系数 1.45 得到。

表 2 活性粉末混凝土轴心抗拉初裂强度

Tab. 2 Axial Tensile Initial Crack Strength of RPC

强度等级	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
$f_{t0,k}/\text{MPa}$	4.7	5.6	6.6	7.5	8.5
f_{t0}/MPa	3.2	3.9	4.5	5.2	5.8

根据国内外 96 组立方体抗压强度分布区间为 98.7~198.0 MPa、轴心抗拉强度分布区间为 4.6~14.9 MPa、钢纤维体积掺量为 0%~6% 的活性粉末混凝土轴拉试验结果^[34-40],活性粉末混凝土试件轴心抗拉初裂强度 μ_{t0} 与边长 100 mm 立方体试件抗压强度平均值 μ_{f100} 之间的统计关系可取为

$$\mu_{t0} = 0.053\mu_{f100} \quad (3)$$

实测轴心抗拉初裂强度与《规程》建议值的比较如图 2 所示。考虑 95% 的保证率之后,轴心抗拉初裂强度标准值为对应立方体抗压强度的 0.047 倍。

活性粉末混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 宜由试验确定,设计值由标准值除以材料分项系数 1.45 得到,当无试验数据时, f_{tk} 可按式(4)计算

$$f_{tk} = f_{t0,k}(1 + \alpha_l \lambda_l) \quad (4)$$

式中: α_l 为钢纤维对轴心抗拉强度的影响系数; λ_l 为钢纤维含量特征参数, $\lambda_l = \rho_l l_f / d_f$, ρ_l 为钢纤维掺量体积率, l_f / d_f 为钢纤维的长径比。

基于国内外研究机构的 121 组活性粉末混凝土

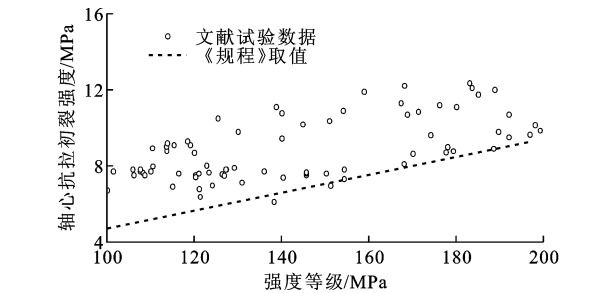


图 2 RPC 实测轴心抗拉初裂强度与《规程》建议值的比较

Fig. 2 Comparison Between Experimental Values and Recommended Values of Axial Tensile Initial Crack Strength of RPC

抗拉试验数据^[34-41],经统计并偏安全取 α_l 为 0.15。实测轴心抗拉强度与《规程》建议值的比较如图 3 所示。

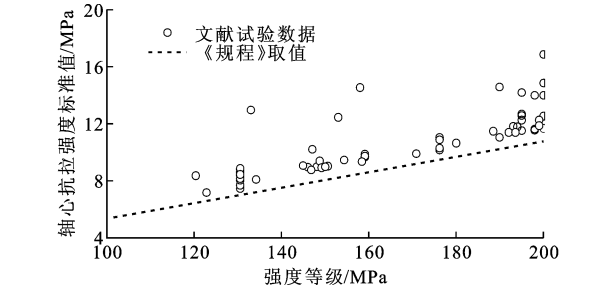


图 3 RPC 实测轴心抗拉强度与《规程》建议值的比较

Fig. 3 Comparison Between Experimental Values and Recommended Values of Axial Tensile Strength of RPC

2.1.3 弹性模量

活性粉末混凝土受压和受拉的弹性模量 E_c 按式(5)计算或按表 3 取值。

$$E_c = 10^5 / (1.5 + \frac{100}{f_{cu,k}}) \quad (5)$$

表 3 活性粉末混凝土的弹性模量

Tab. 3 Elasticity Moduli of RPC

强度等级	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
$E_c / 10^4 \text{ MPa}$	4.00	4.29	4.52	4.71	4.86

湖南大学及国内外研究机构的 88 组试验数据^[18,23,33-37](抗压强度分布区间为 91.8~234.9 MPa,弹性模量分布区间为 38~57 GPa,养护条件为湿热养护,水胶比为 0.16~0.24,钢纤维体积掺量为 1.5%~4%)表明:钢纤维体积掺量对活性粉末混凝土的弹性模量 E_c 影响很小,故《规程》不考虑这一影响,仅根据强度等级 $f_{cu,k}$ 按式(5)进行计算。图 4 为实测弹性模量与《规程》建议值的对比。

2.2 正截面承载力计算

为设计人员应用方便,《规程》中采用的构件正

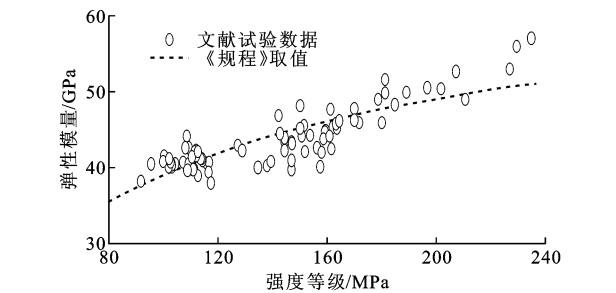


图 4 RPC 实测弹性模量与《规程》建议值的比较

Fig. 4 Comparison Between Experimental Values and Recommended Values of Elasticity Modulus of RPC

截面承载力计算模式与既有《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)保持一致,为此本文做基本假设如下:

- (1)截面应保持平面。
- (2)不考虑受拉区活性粉末混凝土的抗拉作用。虽然国外有关活性粉末混凝土方面的规范或建议考虑了活性粉末混凝土抗拉强度的作用,但《规程》在对比分析国内外正截面破坏试验结果后发现:活性粉末混凝土的抗拉强度对受弯构件正截面受弯承载力影响较小,一般不超过 10%,因此为计算方便,偏安全地不考虑截面受拉区活性粉末混凝土的抗拉强度对承载能力的贡献。

(3)活性粉末混凝土的应力与应变关系给定。受弯构件、偏心受力构件正截面承载力计算时,为应用方便,可将受压区混凝土的压应力分布简化为等效的矩形应力图块。受压区等效矩形应力图块系数 α_1, β_1 见表 4。该系数与普通混凝土结构存在较大区别。

表 4 受压区等效矩形应力图块系数					
Tab. 4 Coefficients of Equivalent Rectangular Stress Block in Compression Zone					
强度等级	RPC100	RPC120	RPC140	RPC160	RPC180
α_1	0.95	0.93	0.92	0.90	0.87
β_1	0.77	0.76	0.73	0.71	0.70

2.3 斜截面抗剪承载力计算

活性粉末混凝土受弯构件斜截面受剪承载能力计算沿用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38: 2004)的计算模式。

矩形、T 形、I 形及箱形截面受弯构件的受剪截面应符合下列条件

$$V \leq 0.1 f_c (1 + 0.15 \lambda_f) b h_0 \quad (6)$$

式中: V 为构件斜截面上的最大剪力设计值; b 为矩形截面的宽度或 T 形截面和箱形截面的腹板宽度;

h_0 为截面有效高度。

当活性粉末混凝土强度等级由 RPC100 变化至 RPC200 时,不同规范规定的受剪截面承载能力上限值[这里以限值应力 $V/(bh_0)$ 表示]对比如图 5 所示。由图 5 可知:各规范的截面限制条件取值范围相差较大。若钢纤维体积掺量为 2%,钢纤维含量特征参数取为 60,采用式(6)可得立方体抗压强度为 80 MPa 的活性粉末混凝土受弯构件受剪截面应力上限值为 4.6 MPa,这与采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)计算得到的 4.6 MPa 基本一致。此外,考虑到活性粉末混凝土尚未广泛应用,积累经验不多,并兼顾《规程》要适用于桥梁工程和建筑工程,故偏严控制,取系数为 0.1。

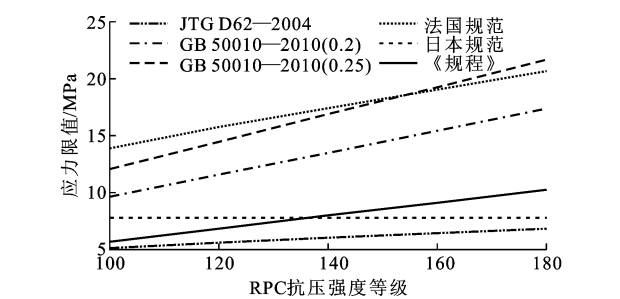


图 5 不同规范受剪截面的应力限值比较

Fig. 5 Comparison of Shear Stress Limit of Different Codes

当仅配置箍筋时,矩形、T 形、I 形截面受弯构件的斜截面受剪承载力应符合下列条件

$$\left. \begin{aligned} V &\leq V_{fc} + V_s + V_p \\ V_{fc} &= \alpha_{cv} f_{t0} (1 + \beta_v \lambda_f) b h_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: V_{fc} 为活性粉末混凝土所提供的抗剪承载力; V_s 为箍筋所提供的抗剪承载力; V_p 为由预加力提供的抗剪承载力,计算方法同《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010); α_{cv} 为斜截面活性粉末混凝土抗剪承载力系数,对于一般受弯构件取 $\alpha_{cv} = 0.6$,对于集中荷载作用下的独立梁取 $\alpha_{cv} = 1.5/(\lambda + 1)$, λ 为剪跨比,当 λ 小于 1.5 时,取 1.5,当 λ 大于 3.0 时,取 3.0; $1 + \beta_v \lambda_f$ 为活性粉末混凝土中钢纤维对抗拉强度的提高系数,可取 $\beta_v = 0.6$ 。

对国内外其他研究机构完成的 37 组活性粉末混凝土(部分文献将活性粉末混凝土称为超高性能混凝土)受剪破坏试验梁^[42-46]试验结果进行了分析。试验梁剪跨比为 1.52~3.33,活性粉末混凝土的立方体抗压强度为 107~187 MPa,钢纤维体积掺量为 0.9%~2.5%,纤维长径比为 60~125,截面有效高度为 260~820 mm,腹板宽度为 47~120 mm。分

析表明:当式(7)中系数 β_v 的取值由 0.4 变化至 0.8,即 β_v 增大 1 倍时,试验梁抗剪承载力的试验值与理论值之比的均值由 3.34 降低至 2.68,仅降低 19.7%,可见 β_v 的取值变化对梁抗剪承载能力的影响并不敏感。当 β_v 取值为 0.6 时,梁抗剪承载力试验值与理论值比值的变化范围为 2.27~4.52,均值为 2.97,方差为 0.26。可靠度分析表明: α_{cv} 取 0.6 时,不同荷载效应比时受弯构件斜截面受剪承载力的可靠指标均不低于目标可靠指标 4.7。

由于混凝土的剪压强度与剪压比有关,确定较复杂,若在公式中体现,则公式应用不便。此外,配筋混凝土梁的受剪破坏机理复杂,迄今尚无公认统一的计算模式,国内外规范相应的抗剪承载力计算公式均为经验公式。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中也是简单地借助混凝土的抗拉强度来表达,考虑到其已为广大设计人员所熟悉,故《规程》也采用相同的处理方式。

2.4 抗冲切承载力计算

在局部荷载或集中反力作用下,不配置箍筋或弯起钢筋活性粉末混凝土板的抗冲切承载力 F_1 应按式计算

$$F_1 \leq 0.7\beta_h f_{t0} (1 + \beta_p \lambda_f) \eta u_m h_0 \quad (8)$$

式中: β_h 为截面高度影响系数; η 为系数; u_m 为计算截面的周长; β_p 为钢纤维对活性粉末混凝土板抗冲切能力的影响系数,可取 $\beta_p = 0.4$ 。

钢纤维对抗冲切承载力的影响系数 β_p 通过试验结果进行统计回归。湖南大学完成的 10 组 RPC 试验板^[47]板厚为 60~100 mm,活性粉末混凝土的立方体抗压强度为 135~162 MPa。考虑到与梁的受剪破坏相比,板的受冲切破坏一般为局部破坏,当取 $\beta_p = 0.4$ 时,试验值与理论值比值的变化范围为 1.54~1.99,均值为 1.78,对抗冲切承载力计算而言,安全储备尚属合理。结合可靠度分析结果亦表明取 $\beta_p = 0.4$ 满足可靠指标不小于 4.7 的要求。

局部荷载或集中反力作用下,当板的抗冲切承载力不满足式(8)的要求时,应配置抗冲切箍筋或弯起钢筋。

2.5 裂缝宽度计算

《规程》引入钢纤维影响系数 β_w 和钢纤维含量特征参数 λ_f 来考虑钢纤维对活性粉末混凝土构件裂缝宽度的影响。按荷载效应的标准组合并考虑长期作用影响的活性粉末混凝土构件最大裂缝宽度 w_{fmax} 可按下列公式计算

$$w_{fmax} = w_{max} (1 - \beta_w \lambda_f) \quad (9)$$

式中: w_{max} 为不考虑钢纤维影响的普通钢筋混凝土受弯构件的最大裂缝宽度,按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)相应公式进行计算; β_w 可取为 0.4。

湖南大学对配筋活性粉末混凝土梁裂缝宽度进行了试验研究^[43-44,48-49],对 20 组 RPC 箱梁或工字梁的实测结果与式(9)的计算值进行了比较,结果表明:式(9)计算值与试验值的均值为 1.18,标准差为 0.22,吻合较好且偏于安全。

2.6 截面刚度计算

《规程》引入钢纤维影响系数 β_B 和钢纤维含量特征参数 λ_f 来考虑钢纤维对活性粉末混凝土构件刚度的影响。

在活性粉末混凝土开裂前的弹性工作阶段,取其截面的短期抗弯刚度 $B_{fs} = E_c I_0$, E_c 为活性粉末混凝土的弹性模量, I_0 为换算截面惯性矩。

使用阶段受拉区出现裂缝的受弯构件短期刚度应按式(10)计算

$$B_{fs} = B_s (1 + \beta_B \lambda_f) \quad (10)$$

式中: B_s 为不考虑钢纤维影响的普通钢筋混凝土受弯构件的短期刚度,可按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)相应公式进行计算; β_B 可取 0.2。

湖南大学对 11 根配筋活性粉末混凝土梁的变形进行了试验研究^[48-49],挠度实测值与式(10)计算值比值的均值为 0.963,标准差为 0.07,吻合较好且略偏于安全。

3 结 语

《规程》虽基于目前的研究成果对有关活性粉末混凝土结构设计与施工方面的技术要求和质量检验评定标准进行了规定,但仍存在以下问题值得深入研究:

(1)因目前有关活性粉末混凝土构件或结构的抗震性能研究成果较少,《规程》适用于抗震设防烈度低于 8 度的建筑工程、公路和城市桥梁工程钢筋活性粉末混凝土、预应力活性粉末混凝土结构的设计、施工及质量验收。这一定程度上限制了活性粉末混凝土的应用推广,因此,活性粉末混凝土结构的抗震性能迫切需要进一步研究。

(2)活性粉末混凝土构件更适用于预制装配式结构,《规程》仅对抗剪传力机构采用钢筋销栓或剪力键抗剪时的接合部抗剪承载力进行了规定,而预制构件结合部构造众多,不同构造形式的预制构件结合部计算模式及构造措施亦值得深入研究。

参考文献:

References:

- [1] RICHARD P, CHEYREZY M. Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength[J]. ACI Special Publication, 1997, 144:507-518.
- [2] FEHLING E, SCHMIDT M, WALRAVEN J, et al. Ultra-high Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples[M]. New York: John Wiley & Sons, 2014.
- [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, 36(10): 44-58.
ZHENG Wen-zhong, LU Xue-yuan. Literature Review of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 44-58.
- [4] GRAYBEAL B A. Material Property Characterization of Ultra-high Performance Concrete [R]. McLean: Federal Highway Administration, 2006.
- [5] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A Review on Ultra High Performance Concrete: Part I. Raw Materials and Mixture Design[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 741-751.
- [6] BJEGOVIC D, RADIC J, CANDRLIC V, et al. Ultra High Performance Fibre-reinforced Concretes — Interim Recommendations[R]. Paris: AFGC, 2013.
- [7] NF P 18-710, National Addition to Eurocode 2: Design of Concrete Structures; Specific Rules for Ultra-high Performance Fibre-reinforced Concrete (UHPFRC) [S].
- [8] GOWRIPALAN N, GILBERT R I. Design Guidelines for RPC Prestressed Concrete Beams [R]. Sydney: University of New South Wales, 2000.
- [9] JSCE Concrete Committee. Recommendations for Design and Construction of High Performance Fibre Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks[R]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [10] BRUHWILER E. Recommendation: Ultra-high Performance Fibre Reinforced Cement-based Composites (UHPFRC)[R]. Lausanne, Swiss Federal Institute of Technology, 2016.
- [11] 安明喆, 杨志慧, 余自若, 等. 活性粉末混凝土抗拉性能研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 54-58.
AN Ming-zhe, YANG Zhi-hui, YU Zi-ruo, et al. Experimental Study on the Tensile Performance of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 54-58.
- [12] 方志, 向宇, 匡镇, 等. 钢纤维含量对活性粉末混凝土抗疲劳性能的影响[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(6): 6-12.
FANG Zhi, XIANG Yu, KUANG Zhen, et al. Fatigue Properties of Reactive Powder Concrete with Different Steel Fiber Ratios [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(6): 6-12.
- [13] 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, 26(3): 254-260.
JU Yan-zhong, WANG De-hong, LI Qiu-chen, et al. On the Influence of Steel Fiber Volume Fraction on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3): 254-260.
- [14] 马恺泽, 阙昂, 刘超. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能影响分析[J]. 混凝土, 2016(3): 76-79, 83.
MA Kai-ze, QUE Ang, LIU Chao. Impact Analysis of Fibers on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete[J]. Concrete, 2016(3): 76-79, 83.
- [15] 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, 43(1): 35-37.
HAO Wen-xiu, XU Xiao. Experimental Study on the Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete with Steel Fiber[J]. Architecture Technology, 2012, 43(1): 35-37.
- [16] AN M Z. Size Effect on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 8(2): 279-282.
- [17] 屈文俊, 邹生吉, 秦宇航. 活性粉末混凝土力学性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(4): 13-18.
QU Wen-jun, WU Sheng-ji, QIN Yu-hang. Mechanical Property Tests of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(4): 13-18.
- [18] 吴炎海, 林震宇, 孙士平. 活性粉末混凝土基本力学性能试验研究[J]. 山东建筑工程学院学报, 2004, 19(3): 7-11.
WU Yan-hai, LIN Zhen-yu, SUN Shi-ping. Experimental Research on Mechanical Properties of RPC [J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2004, 19(3): 7-11.
- [19] 吴炎海, 何雁斌, 杨幼华. 活性粉末混凝土(RPC200)的力学性能[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2003, 31(5): 598-602.
WU Yan-hai, HE Yan-bin, YANG You-hua. Investigation on RPC200 Mechanical Performance[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition,

- 2003,31(5):598-602.
- [20] 柯开展,周瑞忠. 掺短切碳纤维活性粉末混凝土的受压力学性能研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2006,34(5):739-744.
- KE Kai-zhan, ZHOU Rui-zhong. Compressive Mechanics Properties of Carbon Fiber RPC[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2006, 34(5):739-744.
- [21] 王震宇,李俊. 掺纳米二氧化硅的 RPC 单轴受压力学性能[J]. 混凝土,2009(10):88-91,95.
- WANG Zhen-yu, LI Jun. Uniaxial Compressive Behavior of Reactive Powder Concrete Adding Nano-silicon Dioxide[J]. Concrete, 2009(10):88-91,95.
- [22] 曾建仙,吴炎海,林清. 掺钢纤维活性粉末混凝土的受压力学性能研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2005,33(增):132-137.
- ZENG Jian-xian, WU Yan-hai, LIN Qing. Researches on the Compressive Mechanics Properties of Steel Fiber RPC[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2005, 33(S):132-137.
- [23] 刘红彬,鞠杨,叶光莉. 活性粉末混凝土的制备技术与力学性能研究[J]. 工业建筑,2008,38(6):74-78.
- LIU Hong-bin, JU Yang, YE Guang-li. Preparation Technology and Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete[J]. Industrial Construction, 2008, 38(6):74-78.
- [24] 吕雪源,王英,符程俊,等. 活性粉末混凝土基本力学性能指标取值[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014,46(10):1-9.
- LU Xue-yuan, WANG Ying, FU Cheng-jun, et al. Basic Mechanical Property Indexes of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(10):1-9.
- [25] 毕巧巍,汪辉,杨兆鹏. 不同弹性模量的纤维对矿渣 RPC 力学性能的影响[J]. 大连交通大学学报,2009,30(5):23-26.
- BI Qiao-wei, WANG Hui, YANG Zhao-peng. Mechanics Properties of Slag RPC with Different Elasticity Modulus of Fibers[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2009, 30(5):23-26.
- [26] 徐强,杜进生,张劲泉. 活性粉末混凝土受压力学性能试验[J]. 公路交通科技,2011,28(7):8-13.
- XU Qiang, DU Jin-sheng, ZHANG Jin-quan. Experiment of Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete in Compression[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(7):8-13.
- [27] 何峰,黄政宇. 原材料对 RPC 强度的影响初探[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2001,28(2):89-94.
- HE Feng, HUANG Zheng-yu. Study on the Effect of Materials on RPC Strength[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2001, 28(2):89-94.
- [28] 安明喆,宋子辉,李宇,等. 不同钢纤维含量 RPC 材料受压力学性能研究[J]. 中国铁道科学,2009,30(5):34-38.
- AN Ming-zhe, SONG Zi-hui, LI Yu, et al. Study on Mechanical Performance of Reactive Powder Concrete with Different Steel Fiber Contents Under Uniaxial Compression[J]. China Railway Science, 2009, 30(5):34-38.
- [29] 刘娟红,宋少民,梅世刚. RPC 高性能水泥基复合材料的配制与性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2001,23(11):14-18.
- LIU Juan-hong, SONG Shao-min, MEI Shi-gang. Research for Compounding and Performance of RPC Super High Performance Cement Based Compound Materials[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001, 23(11):14-18.
- [30] 吴炎海,何雁斌. 活性粉末混凝土(RPC200)的配制试验研究[J]. 中国公路学报,2003,16(4):44-49.
- WU Yan-hai, HE Yan-bin. Experimental Research on Proportion of Reactive Powder Concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4):44-49.
- [31] 闫光杰. 活性粉末混凝土单轴受压强度与变形试验研究[J]. 华北科技学院学报,2007,4(2):36-40.
- YAN Guang-Jie. Experimental Study on Strength and Deformation of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2007, 4(2):36-40.
- [32] 黄政宇,谭彬. 活性粉末钢纤维混凝土受压应力-应变全曲线的研究[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2007,29(5):415-420.
- HUANG Zheng-yu, TAN Bin. Research on Stress-strain Curves of Reactive Powder Concrete with Steel-fiber Under Uniaxial Compression[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2007, 29(5):415-420.
- [33] TAI Y S. Uniaxial Compression Tests at Various Loading Rates for Reactive Powder Concrete[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, 52(1):14-21.
- [34] XIA H Y, WANG W B, ZHONG Q. Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2015, 67(6):308-316.

- [35] AYDIN S, YAZICI H, YARDIMCI M Y, et al. Effect of Aggregate Type on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2010, 107(5): 441-449.
- [36] 原海燕, 安明喆, 贾方方, 等. 钢纤维增强 RPC 受拉应力-应变曲线试验[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2015, 40(4): 921-927.
YUAN Hai-yan, AN Ming-zhe, JIA Fang-fang, et al. Tensile Stress-strain Curve of Steel Fiber Reinforced RPC[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2015, 40(4): 921-927.
- [37] 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.
- [38] YOO D Y, LEE J H, YOON Y S. Effect of Fibre Content on Mechanical and Fracture Properties of Ultra High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites[J]. Composite Structures, 2013, 106: 742-753.
- [39] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile Behavior of Ultra High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(2): 172-184.
- [40] JUNGWIRTH J, MUTTONI A. Structural Behavior of Tension Members in Ultra High Performance Concrete[J]. Materials and Structures, 2004, 41(1): 57-69.
- [41] YAZICI H, YARDIMCI M Y, AYDIN S. Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Containing Mineral Admixtures Under Different Curing Regimes[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1223-1231.
- [42] FEHLING E, SCHMIDT M, WALRAVEN J, et al. Ultra-high Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples[M]. New York: John Wiley & Sons, 2014.
- [43] ZHENG H, FANG Z. Experimental Study on Shear Behavior of Prestressed Ultra-high Performance Concrete I-girders[C]//IABSE. IABSE Symposium Report, Guangzhou: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2016: 775-785.
- [44] 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, 46(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, 46(6): 51-63.
- [45] VOO Y L, POON W K, FOSTER S J. Shear Strength of Steel Fibre-reinforced Ultrahigh-performance Concrete Beams Without Stirrups[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(11): 1393-1400.
- [46] VOO Y L, FOSTER S J, GILBERT R I. Shear Strength of Fibre Reinforced Reactive Powder Concrete Prestressed Girders Without Stirrups[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1): 123-132.
- [47] 曹清. 混凝土箱梁顶板受力性能的理论及试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
CAO Qing. Theoretical and Experimental Investigation on Mechanical Performance of Top Slabs in Concrete Box Girder[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [48] 杨剑. CFRP 预应力筋超高性能混凝土梁受力性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
YANG Jian. Flexural Behavior of Ultra-high Performance Concrete Beams Prestressed with CFRP Tendons[D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [49] 方志, 刘明, 郑辉. 预应力活性粉末混凝土箱梁抗弯性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(6): 8-16.
FANG Zhi, LIU Ming, ZHENG Hui. Experiment on Flexural Behaviors of Prestressed Reactive Powder Concrete Box Girders[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(6): 8-16.