

活性粉末混凝土基本力学性能指标取值

吕雪源, 王 英, 符程俊, 郑文忠

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

摘 要:为促进活性粉末混凝土在工程中的应用,收集整理与活性粉末混凝土相关的文献.提出以边长 70.7 mm 立方体抗压强度标准值为依据的活性粉末混凝土强度等级划分方法.对活性粉末混凝土立方体抗压强度尺寸效应、轴心抗压强度、轴心抗拉强度、弹性模量、峰值压应变和极限压应变等基本力学性能指标进行分析,获得了活性粉末混凝土相关力学性能指标之间的换算关系,并基于一次二阶矩法推导出活性粉末混凝土的材料分项系数.

关键词:活性粉末混凝土;强度等级;基本力学指标;一次二阶矩法;材料分项系数

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)10-0001-09

Basic mechanical property indexes of reactive powder concrete

LÜ Xueyuan, WANG Ying, FU Chengjun, ZHENG Wenzhong

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To promote engineering application of reactive powder concrete, relative research literatures published are summarized and studied. The method of classifying strength grade of reactive powder concrete is proposed according to characteristic value of 70.7 mm side length cube compressive strength. Reactive powder concrete mechanical property indexes on size effect of compressive strength, axial compressive strength, axial tensile strength, elastic modulus, peak compressive strain and ultimate compressive strain are analyzed, and the conversion relation of these mechanical property indexes are obtained. The material partial factor of reactive powder concrete is calculated based on first-order second-moment theory.

Keywords: reactive powder concrete; strength grade; basic mechanical property index; first-order second-moment theory; material partial factor

活性粉末混凝土(reactive powder concrete,简称 RPC)是上世纪 90 年代初,由法国 BOUYGUES 公司研制出的一种新型水泥基复合材料^[1].RPC 一般由级配石英砂、水泥、活性掺合料、超塑化剂与水拌合后,经湿热养护而成^[2],其抗压强度可达 200~800 MPa,抗折强度 20~60 MPa^[3],是性能优良建筑材料.国外具有代表性的工程如加拿大的 Sherbrook 桥^[4],韩国的 Seonyu 桥^[5]和法国的 Jean Bouin 体育场^[6]等.中国对 RPC 也已开展

研究,掌握了 RPC 的配制技术^[7-8].在构件研究方面,哈尔滨工业大学^[9],北京交通大学^[10-12],福州大学^[7,13]和湖南大学^[14]等高校考察了 RPC 梁、板和柱的受力性能,提出了相关设计计算公式.在工程实践中,RPC 超低高度 T 型梁已应用于蕪港铁路(跨度 32 m)和迁曹铁路(跨度 20 m),有效解决了线路净高受限问题^[15].

综上所述,从 RPC 材料的力学性能到构件设计已有大量研究,但有关 RPC 的基本力学性能指标的取值研究仍比较零散,且尚未给出 RPC 的强度分级方法和材料分项系数,限制了 RPC 在工程中的推广应用.为提出适合中国的 RPC 力学性能指标取值,本文在对国内研究成果进行分析的基础上,提出以边长 70.7 mm 立方体抗压强度标准值为依据的 RPC 的强度等级划分方法,对 RPC

收稿日期: 2013-11-08.

基金项目: 国家教育部长江学者奖励计划资助项目(2009-37);哈尔滨工业大学“985 工程”优秀科技创新团队建设项目(2011);黑龙江省自然科学基金资助项目(E200916).

作者简介: 吕雪源(1983—),男,博士研究生;

郑文忠(1965—),男,博士生导师,长江学者特聘教授.

通信作者: 郑文忠, zhengwenzhong@hit.edu.cn.

的轴心抗压强度、轴心抗拉强度、弹性模量、峰值应变和材料分项系数等指标进行梳理.提出与中国建筑工程标准体系相协调的 RPC 基本力学性能指标取值建议.

1 RPC 强度等级划分

1.1 划分依据

中国现行标准 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》以边长 150 mm 立方体抗压强度标准值作为普通混凝土强度等级划分依据.考虑到 RPC 相对于普通混凝土强度更高,为兼顾试验设备的适用性,以边长 70.7 mm 立方体抗压强度标准值作为 RPC 强度等级划分依据.

1.2 强度标准值及变异系数

将文献 [7, 13, 16 – 19] 中的数据按边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度分别归入相应级别中,计算每一级边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度平均值和变异系数.边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度平均值 $f_{cu,70.7}^f$ 与变异系数 δ_c 关系如图 1 所示.

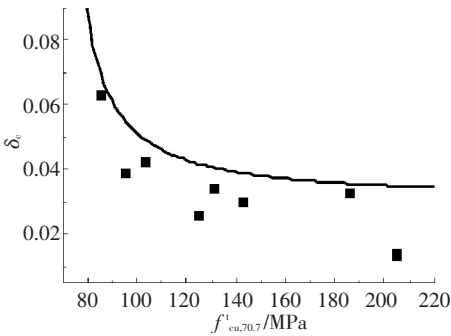


图 1 RPC 立方体抗压强度平均值与变异系数

按 10 MPa 为一级,将 RPC 立方体抗压强度划分为 90 ~ 100 MPa、100 ~ 110 MPa、…、200 ~ 210 MPa 共 12 级.从图 1 可见,RPC 立方体抗压强度变异系数随强度的提高而降低,这是因为 RPC 抗压强度越高,其均匀度也越高.为偏于安全,以数据点的上包线作为边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度变异系数的函数,其表达式为

$$\delta_c = \frac{2}{3f_{cu,70.7}^f - 205} + 0.03. \tag{1}$$

RPC 力学性能的离散性受其微观结构、缺陷尺寸、组分和均匀性等多种独立因素共同影响,其中没有起决定作用的单独因素,故假定边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度服从正态分布.为与中国现行规范 [20] 相协调,边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k,70.7}$ 可按式 (2) 计算:

$$f_{cu,k,70.7} = f_{cu,70.7}^f - 1.645\sigma = (1 - 1.645\delta_c)f_{cu,70.7}^f. \tag{2}$$

联立 (1)、式 (2),即可求得与不同 RPC 强度等级对应的边长 70.7 mm 立方体抗压强度平均值和变异系数,计算结果见表 1.

表 1 RPC 强度等级与性能指标

强度等级	抗压强度标准值/ MPa	抗压强度平均值/ MPa	变异系数
RPC90	90	99	0.051 7
RPC100	100	109	0.046 4
RPC110	110	119	0.043 2
RPC120	120	129	0.041 0
RPC130	130	140	0.039 3
RPC140	140	150	0.038 2
RPC150	150	160	0.037 3
RPC160	160	171	0.036 5
RPC170	170	181	0.035 9
RPC180	180	192	0.035 4
RPC190	190	202	0.035 0
RPC200	200	213	0.034 6
RPC210	210	223	0.034 3

2 立方体抗压强度尺寸效应

为便于工程应用,不考虑钢纤维掺量和强度等因素对 RPC 立方体抗压强度尺寸效应的影响,分别将边长 70.7 mm RPC 立方体与同条件下边长 100 mm 和 150 mm RPC 立方体抗压强度数据进行整理,见图 2、3.

边长 100、150 mm RPC 立方体抗压强度与边长 70.7 mm 立方体抗压强度间存在明显线性关系,将图 2 和图 3 的数据分别进行线性回归可得:

$$f_{cu,100}^f = 0.959f_{cu,70.7}^f, \tag{3}$$

$$f_{cu,150}^f = 0.888f_{cu,70.7}^f. \tag{4}$$

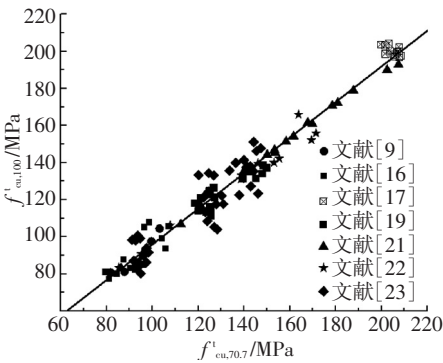


图 2 边长 70.7、100 mm RPC 立方体抗压强度

比较式 (3)、(4) 可知,边长 100 mm RPC 立方体试件到边长 150 mm RPC 立方体试件尺寸换算系数为 0.888/0.959 = 0.926,比普通混凝土的尺寸换算系数 0.95 略小 [24].

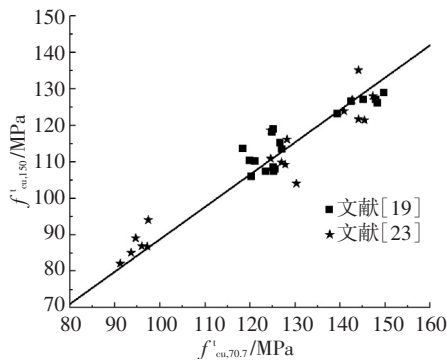


图 3 边长 70.7、150 mm RPC 立方体抗压强度

3 轴心抗压强度

RPC 的轴心抗压强度由棱柱体试件测得,在所收集的文献中, RPC 棱柱体试件尺寸分为 70.7 mm×70.7 mm×210 mm 和 100 mm×100 mm×300 mm 两种.考虑到 RPC 中无粗骨料,其棱柱体抗压强度尺寸效应应可忽略不计,故将文献中边长 100 mm 立方体抗压强度换算为边长 70.7 mm 立方体抗压强度计算值 $f_{cu,70.7}^t$, 可得 RPC 轴心抗压强度与立方体抗压强度 $f_{cu,70.7}^t$ 的关系见图 4.

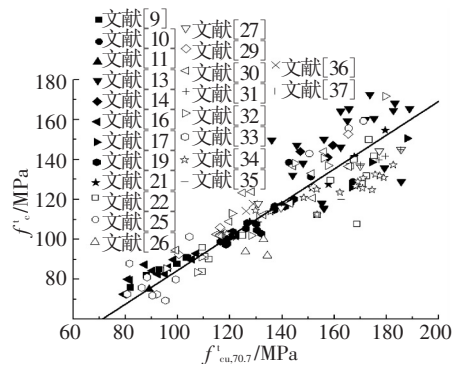


图 4 边长 70.7 mm RPC 的立方体与轴心抗压强度

与普通混凝土相似, RPC 轴心抗压强度与立方体抗压强度基本符合线性关系,经线性回归可得

$$f_c^t = 0.845 f_{cu,70.7}^t \tag{5}$$

式中 f_c^t 为 RPC 棱柱体抗压强度. RPC 棱柱体与立方体抗压强度换算系数 $f_c^t / f_{cu,70.7}^t$ 为 0.845, 高于普通混凝土的强度换算系数 0.76~0.82^[20].

4 轴心抗拉强度

文献中多以自行设计的试件进行 RPC 轴心抗拉强度试验;其形状和尺寸均有一定差别.为研究 RPC 轴心抗拉强度 f_t^t 与立方体抗压强度的关系,忽略试件差异造成的影响,并以上文提出的式(3)和(5)将文献中对应的 RPC 抗压强度换算为轴心抗压强度计算值 f_c^t , 见图 5.

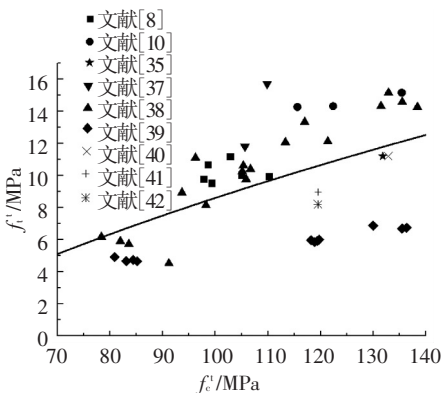


图 5 RPC 轴心抗拉强度与轴心抗压强度

对图 5 中的数据进行拟合,可得 RPC 轴心抗压强度与轴心抗压强度关系的表达式

$$f_t^t = 2.14 \sqrt{f_c^t} - 12.8 \tag{6}$$

为方便计算,以上文提出的公式将 RPC 轴心抗压强度换算为边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度,则式(6)可变为

$$f_t^t = 1.79 \sqrt{f_{cu,70.7}^t} - 11.8 \tag{7}$$

按 RPC 轴心抗拉强度变异系数与边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度变异系数相同考虑, RPC 轴心抗拉强度标准值可按式(8)计算:

$$f_{tk} = f_t^t (1 - 1.645 \delta_c) \tag{8}$$

则 RPC 轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k,70.7}$ 的关系式为

$$f_{tk} = 1.88 \sqrt{f_{cu,k,70.7}^t} - 11.7 \tag{9}$$

5 弹性模量

在所收集的文献中, RPC 的弹性模量由 70.7 mm×70.7 mm×210 mm、100 mm×100 mm×300 mm 两种尺寸的棱柱体试件测得.将 RPC 的轴心抗压强度与对应的弹性模量数据进行整理,见图 6.

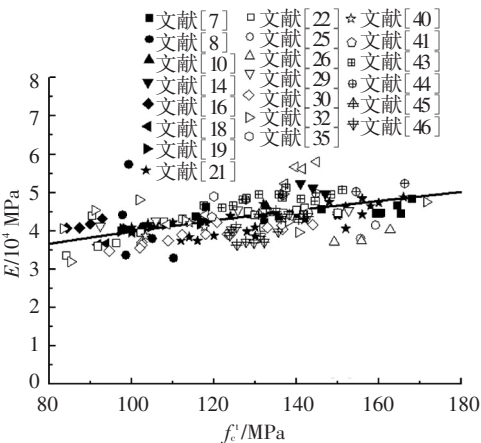


图 6 RPC 弹性模量与棱柱体抗压强度

选用根式函数对图 6 数据进行拟合,可得 RPC 弹性模量与棱柱体抗压强度关系式

$$E = 3\,027\sqrt{f_c} + 9\,533. \tag{10}$$

为方便设计计算,利用式(1)、(2)和(5)将 RPC 棱柱体试件抗压强度换算成边长 70.7 mm 立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k,70.7}$,则弹性模量与 $f_{cu,k,70.7}$ 关系式为

$$E = 2\,055\sqrt{f_{cu,k,70.7}} + 18\,897. \tag{11}$$

6 峰值和极限应变

6.1 峰值压应变

在所收集的文献中,RPC 峰值压应变由 70.7 mm×70.7 mm×210 mm 和 100 mm×100 mm×300 mm 两种尺寸的棱柱体试件测得.为研究 RPC 峰值压应变与轴心抗压强度的关系,将 RPC 的峰值压应变与对应的轴心抗压强度数据进行整理,结果见图 7.

由图 7 可见,RPC 的峰值压应变随轴心抗压强度提高而提高,对图 7 中的数据进行拟合,可得

$$\varepsilon_0^1 = (377\sqrt{f_c} - 923) \times 10^{-6}. \tag{12}$$

式中 ε_0^1 为 RPC 的峰值压应变.

为研究峰值压应变与边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k,70.7}$ 的关系,利用式(1)、(2)和(5)将 RPC 轴心抗压强度 f_c 进行换算,可

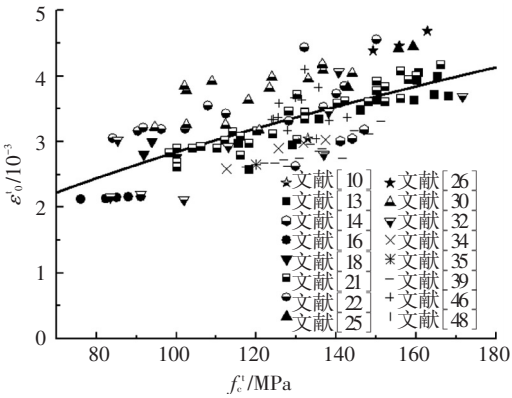


图 7 RPC 峰值压应变与轴心抗压强度

得峰值压应变与边长 70.7 mm RPC 抗压强度标准值之间的关系为

$$\varepsilon_0^1 = (345\sqrt{f_{cu,k,70.7}} - 775) \times 10^{-6}. \tag{13}$$

6.2 极限压应变

极限压应变 ε_{cu} 是以平截面假定计算混凝土受弯和偏心受压构件相对界限受压区高度 ξ_b 的重要依据.与普通混凝土相比,RPC 强度更高,且掺入钢纤维后具有良好的变形性能,应针对 RPC 的特点探索其极限压应变 ε_{cu} 的变化规律.文献[9,12,28]分别通过 RPC 矩形梁受弯性能试验对 RPC 受弯构件受压边缘的极限压应变进行研究,数据见表 2.

表 2 RPC 峰值与极限压应变

文献	钢纤维 体积掺量/ %	棱柱体 抗压强度/ MPa	立方体 抗压强度标准值/ MPa	峰值压应变 实测值/ 10 ⁻⁶	极限压应变 实测值/ 10 ⁻⁶	RPC 极限压应变 本文建议值/ 10 ⁻⁶
[9]	0	84.5	92	2 150	2 923~3 136	3 000
[28]	2	102.3	113	3 560	5 500~7 300	5 340
[12]	2	130	144	4 000	6 000~8 500	6 000

注:文献中均采用表面镀铜的光圆钢纤维,直径 0.22 mm,长径比 60~65;立方体抗压强度标准值指根据文献中棱柱体抗压强度,利用公式(1)、(2)和(5)换算得到的边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度标准值.

由文献[9]数据可知,不掺钢纤维时,RPC 立方体抗压强度标准值为 92 MPa 的受弯构件受压边缘的极限压应变约为 3×10^{-3} .

掺入钢纤维后,RPC 受弯构件受压边缘极限压应变明显提高,经分析,当上述钢纤维体积掺量为 2%(约 160 kg/m³),RPC 立方体抗压强度标准值为 92~144 MPa 时,本文建议取 RPC 受弯构件受压边缘的极限压应变计算公式为

$$\varepsilon_{cu}^1 = 1.5 \times \varepsilon_0^1. \tag{14}$$

结合式(1)、(2)和(5),可得 RPC 受弯构件受压边缘的极限压应变与边长 70.7 mm 立方体

抗压强度标准值关系为

$$\varepsilon_{cu}^1 = (518\sqrt{f_{cu,k,70.7}} - 1\,163) \times 10^{-6}. \tag{15}$$

式中 $f_{cu,k,70.7}$ 边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度标准值.

得出 RPC 的极限压应变后,即可按文献[8,20,47]的方法建立 RPC 受弯与大、小偏心受压构件的正截面承载力计算公式.

6.3 轴拉开裂应变

研究 RPC 轴拉开裂应变的文献较少,且试件外形、尺寸和试验方法也有所差异,为初步探索 RPC 轴拉开裂应变与轴心抗拉强度的关系,将相

关文献中 RPC 轴心抗拉强度与轴拉开裂应变的数据汇总, 获得图 8 所示轴拉开裂应变 ε_t 与轴心抗拉强度的关系。

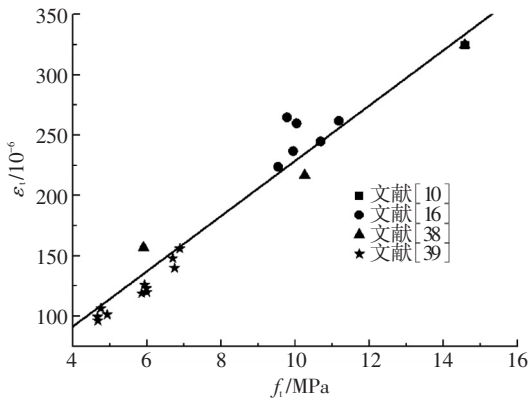


图 8 RPC 轴拉开裂应变与抗拉强度

从图 8 可见, RPC 轴拉开裂应变与轴心抗拉强度有明显的线性关系, 经线性回归可得

$$\varepsilon_t^I = 22.9 f_t^I \times 10^{-6}, \quad (16)$$

式中 ε_t^I 为 RPC 的轴拉开裂应变。

结合式(1)、式(2)和式(5), 可得 RPC 轴拉开裂应变与边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度标准值的关系式为

$$\varepsilon_t^I = (44.7 \sqrt{f_{cu,k,70.7}} - 270) \times 10^{-6}. \quad (17)$$

6.4 弯曲开裂应变和截面塑性影响系数

由于 RPC 中掺有钢纤维且匀质性高, 其弯曲开裂应变得到明显提高。文献[28, 47]分别对 RPC 轴心抗压强度为 102 MPa 的 6 根普通钢筋 RPC 梁和 8 根 GFRP 筋 RPC 梁进行研究, 获得矩形梁 RPC 的弯曲开裂应变为 750×10^{-6} 。文献[49]对 RPC 轴心抗压强度为 137 MPa 的 4 根矩形梁和 3 根 T 形梁进行的抗弯性能试验, 其中 RPC 矩形梁开裂时应变为 $705 \sim 778 \times 10^{-6}$, 平均为 749×10^{-6} ; T 形梁的开裂应变为 $719 \sim 864 \times 10^{-6}$, 平均为 792×10^{-6} 。为偏安全和方便计算, 当 RPC 轴心抗压强度为 102~137 MPa (边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度标准值 112~152 MPa), 钢纤维体积掺量为 2% 时, RPC 矩形梁的弯曲开裂应变可取为 750×10^{-6} 。

RPC 梁在超过受拉弹性阶段后, 受拉区材料即开始进入塑性, 应力分布呈曲线形, 按弹性体计算其开裂弯矩时需引入截面塑性影响系数 γ 。文献[12, 28]分别推导并拟合出 RPC 矩形梁截面塑性影响系数基本值 γ_m 与普通钢筋配筋率 ρ 的关系式。文献[47]则推导并拟合出 RPC 矩形梁 γ_m 与 GFRP 筋配筋率的计算公式。文献[12, 28, 47]中 γ_m 的推导值与拟合值数据见图 14。

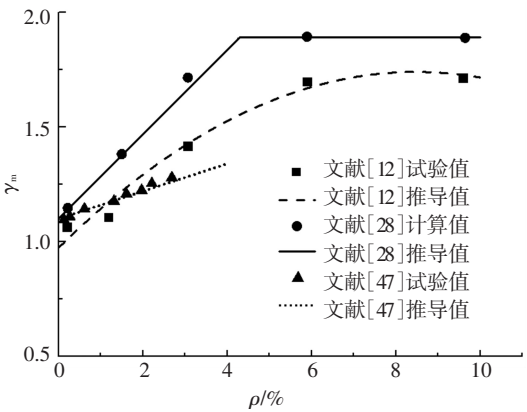


图 9 γ_m 与配筋率关系

由图 9 可见, 文献[12, 28]中的数据变化规律基本一致: 当配筋率不高于 4% 时, γ_m 随配筋率提高而线性增大; 当配筋率超过 4% 后, γ_m 随配筋率提高而趋于定值。由文献[28]中 γ_m 的推导值得到的计算开裂 M_{cr}^c 与实测开裂弯矩 M_{cr}^I 的比值 M_{cr}^c/M_{cr}^I 为 0.960, 与实测开裂弯矩基本相同; 而由文献[12]中 γ_m 的推导值计算得到的 M_{cr}^c/M_{cr}^I 为 0.912, 较实测开裂弯矩偏小。因此, 本文建议以文献[28]中公式计算 RPC 矩形梁截面的 γ_m :

$$\begin{cases} \gamma_m = 1.1 + 18.4\rho, & \rho < 4.3; \\ \gamma_m = 1.89, & \rho \geq 4.3. \end{cases} \quad (18)$$

GFRP 筋 RPC 矩形梁的 γ_m 可按式(19)计算^[47],

$$\gamma_m = 1.1 + 6\rho_f, \quad (19)$$

式中 ρ_f 为 GFRP 筋的配筋率。

上述研究均采用直径 0.22 mm, 长径比 65 左右的圆形表面镀铜钢纤维, 且体积掺量为 2% (约 160 kg/m^3) 的 RPC 配比, 其他配比条件下的 RPC 受弯构件 γ_m 计算方法仍有待研究。

随着构件截面高度增大, 拉区 RPC 应变梯度降低, 使得截面塑性影响系数 γ 有减小趋势。当考虑截面高度变化时, γ 可按式(20)计算,

$$\gamma = \left(0.7 + \frac{120}{h}\right) \gamma_m, \quad (20)$$

式中: h 为截面高度 (mm)。当 $h < 400$ 时, 取 $h = 400$; 当 $h > 1\,600$ 时, 取 $h = 1\,600$ 。

7 泊松比

将文献中的泊松比与相应的 RPC 轴心抗压强度数据进行汇总, 见图 10。可以发现 RPC 的泊松比不随轴心抗压强度变化而改变, 其值大多分布在 0.18~0.22, 故以图中数据点的平均值作为 RPC 的泊松比, 经计算得 $\bar{\nu} = 0.205$, 设计时可近似取 $\nu = 0.2$, 与普通混凝土的泊松比相同^[20]。

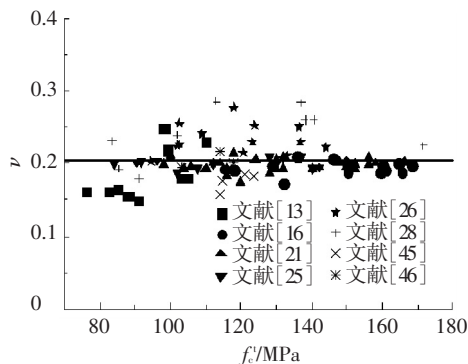


图 10 RPC 泊松比与轴心抗压强度

8 材料分项系数

8.1 分析方法

普通混凝土的材料分项系数由对轴压状态混凝土试件的分析而确定,本文将使用相同的方法确定 RPC 材料分项系数。

采用一次二阶矩理论的验算点法计算 RPC 的材料分项系数.考虑处于轴压状态的 RPC 试件,结合工程实际荷载情况,其功能函数的极限状态方程表达式为

$$Z = R - S_G - S_Q = 0, \quad (21)$$

式中: Z 为极限状态函数, R 、 S_G 和 S_Q 分别为抗力、恒载效应和活载效应的随机变量. 根据文献 [50],仅考虑简单荷载组合情况,式(18)可写为

$$R_k/\gamma_R = \gamma_G S_{GK} + \gamma_Q \psi S_{QK}, \quad (22)$$

式中: R_k 为抗力标准值, γ_R 为抗力分项系数, S_{GK} 和 S_{QK} 分别为恒载效应和活载效应标准值, γ_G 和 γ_Q 分别为恒载效应和活载效应分项系数, ψ 为可变荷载组合值系数. 当 $S_{GK}/S_{QK} \leq 2.8$ 时,取 $\gamma_G = 1.2$, $\gamma_Q = 1.4$, $\psi = 1$; 否则,取 $\gamma_G = 1.35$, $\gamma_Q = 1.4$, $\psi = 0.7$.

令构件截面积为 1,则在轴压状态下, $R_k = f_{c,k}$,式(22)中的抗力项可变为

$$R_k/\gamma_R = f_{c,k}/\gamma_R, \quad (23)$$

式中: $f_{c,k}$ 为 RPC 轴心抗压强度标准值. 可见, γ_R 即为 RPC 材料分项系数. 由文献 [51] 可知,对于某一特定的构件满足关系式 $R^* = R_k$,则抗力分项系数表达式为

$$\gamma_R = R^*/(\gamma_G S_{GK} + \gamma_Q \psi S_{QK}), \quad (24)$$

式中 R^* 为抗力验算点.

经当量正态化后,抗力与荷载效应验算点在正态坐标系中的坐标为

$$\begin{cases} R^* = \mu_R + \alpha_R \beta \sigma_R, \\ S_G^* = \mu_{SG} + \alpha_{SG} \beta \sigma_{SG}, \\ S_Q^* = \mu_{SQ} + \alpha_{SQ} \beta \sigma_{SQ}. \end{cases} \quad (25)$$

式中: μ_R 、 μ_{SG} 和 μ_{SQ} 分别为抗力、恒载效应和活载效应的平均值; σ_R 、 σ_{SG} 和 σ_{SQ} 分别为抗力、恒载效应和活载效应的标准差; α_R 、 α_{SG} 和 α_{SQ} 为系数,可由式(26)确定; β 为目标可靠指标,根据定义, β 可由式(27)表示.

$$\begin{cases} \alpha_R = -\frac{\partial Z}{\partial R} \frac{\sigma_R}{\sigma} = -\frac{\sigma_R}{\sigma}, \\ \alpha_{SG} = -\frac{\partial Z}{\partial S_G} \frac{\sigma_{SG}}{\sigma} = \frac{\sigma_{SG}}{\sigma}, \\ \alpha_{SQ} = -\frac{\partial Z}{\partial S_Q} \frac{\sigma_{SQ}}{\sigma} = \frac{\sigma_{SQ}}{\sigma}. \end{cases} \quad (26)$$

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_{SG} - \mu_{SQ}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{SG}^2 + \sigma_{SQ}^2}} = \frac{1 - \frac{\mu_{SG}}{\mu_R} - \frac{\mu_{SQ}}{\mu_R}}{\sqrt{\delta_R^2 + \delta_{SG}^2 \left(\frac{\mu_{SG}}{\mu_R}\right)^2 + \delta_{SQ}^2 \left(\frac{\mu_{SQ}}{\mu_R}\right)^2}}. \quad (27)$$

对于一般结构而言,荷载效应与荷载符合线性关系 [52],定义荷载效应比:

$$\rho = S_{QK}/S_{GK} = Q_K/G_K. \quad (28)$$

荷载效应比反映活荷载与恒荷载标准值间的比例关系.中国在研究钢筋混凝土构件的可靠度时,荷载效应比一般取 $\rho = 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0$ [53]. 为方便计算,定义荷载、抗力均值与标准值之间的关系:

$$k_R = \frac{\mu_R}{R_K}; \quad k_G = \frac{\mu_G}{G_K}; \quad k_Q = \frac{\mu_Q}{Q_K}. \quad (29)$$

式中 k 表示荷载、抗力的标准值与均值的比值. 对于活荷载,本文考虑住宅活载与办公室活载两种情况. 由文献 [54] 可知,比例系数 k 与荷载变异系数 δ 如表 3 所示.

表 3 荷载统计信息 [54]

荷载类型	恒载	住宅楼面活载	办公室楼面活载
k	1.060	0.523	0.441
δ	0.070	0.322	0.369

由式(28)和式(29)可得

$$\frac{(\mu_{SQ}/\mu_R)}{(\mu_{SG}/\mu_R)} = \frac{k_Q}{k_G} \rho, \quad (30)$$

考虑式(30),式(22)的荷载效应项和式(25)可分别写成:

$$\gamma_G S_{GK} + \gamma_Q \psi S_{QK} = \gamma_G k_G \left(\frac{\mu_G}{\mu_R}\right) + \gamma_Q k_Q \left(\frac{\mu_Q}{\mu_R}\right), \quad (31)$$

$$R^* = \mu_R \left[1 - \frac{\beta \delta_R^2}{\sqrt{\delta_R^2 + \delta_{SG}^2 \left(\frac{\mu_{SG}}{\mu_R} \right)^2} + \delta_{SQ}^2 \left(\frac{\mu_{SQ}}{\mu_R} \right)^2} \right]. \quad (32)$$

联立式(27)、(30)和(32)即可求得 γ_R .

8.2 影响 RPC 强度的不确定因素

RPC 材料分项系数的确定可考虑 3 个独立的随机变量^[52]: 材料性能不确定性 X_m , 构件几何参数不确定性 X_A 和构件计算模式不确定性 X_p .

8.2.1 材料性能不确定性

原料品质、成型工艺、养护条件、加载速率、截面应变梯度等因素都会引起 RPC 材料性能的不确定性,其随机变量 X_m 为

$$X_m = \frac{f_c}{f_k}, \quad (33)$$

式中: f_c 为结构构件实际的材料性能值; f_k 为规范规定的材料性能标准值(取各级 RPC 立方体抗压强度标准值).

令

$$X_0 = \frac{f_c}{f_s}; \quad X_f = \frac{f_s}{f_k}. \quad (34)$$

式中: f_s 为试件材料性能值(取各级 RPC 立方体抗压强度平均值); X_0 为反映结构构件材料性能与试件材料性能差别的随机变量,普通混凝土为 0.88^[20],但考虑到 RPC 构件一般由构件厂生产,其条件与实验室相当,故认为 RPC 的结构构件材料性能与试件材料性能相同,则 $\mu_{X_0} = 1, \delta_{X_0} = 0$. X_f 为反映试件材料性能不定性的随机变量($X_f = \delta_c$),可由式(1) 计算得到.

由式(33)和式(34),可得 X_m 的统计参数为: 均值

$$\mu_{X_m} = \mu_{X_0} \mu_{X_f}, \quad (35)$$

变异系数

$$\delta_{X_m} = \sqrt{\delta_{X_0}^2 + \delta_{X_f}^2}. \quad (36)$$

8.2.2 构件几何参数不确定性

构件几何参数不确定性是指由于制作和安装方面的原因引起的构件几何参数的变异性,用随机变量 X_A 表示:

$$X_A = a/a_k, \quad (37)$$

式中 a 和 a_k 分别为构件几何参数实际值和标准值. 考虑到 RPC 构件成型和安装工艺与普通钢筋混凝土构件相同,取 $\mu_{X_m} = 1.0, \delta_{X_A} = 0.03$ ^[52].

8.2.3 构件计算模式不确定性

构件计算模式不确定性是指抗力计算中所采用的基本假定不完全符合实际和计算公式的近似

等引起的变异性,用随机变量 X_p 表示:

$$X_p = R_0/R_c,$$

式中 R_0 和 R_c 分别为构件实际抗力值和按规范公式计算构件抗力值.

X_p 的统计参数为:

均值

$$\mu_{X_p} = \mu_{R_0}/\mu_{R_c}, \quad (38)$$

变异系数

$$\delta_{X_p} = \delta_{R_0}. \quad (39)$$

由于缺少相关统计资料,按普通钢筋混凝土轴压构件考虑,取 $\mu_{X_p} = 1.0, \delta_{X_p} = 0.05$ ^[52].

8.2.4 构件抗力的统计特征

RPC 轴压构件的抗力可写为:

$$R = X_p R_p = X_p (X_m f_k) (X_A a_k), \quad (40)$$

均值

$$\mu_R = \mu_{X_p} \mu_{X_f} \mu_{X_A} (f_k a_k), \quad (41)$$

令

$$R_k = f_k a_k, \quad (42)$$

$$\eta_p = \mu_R/R_k = \mu_{X_p} \mu_{X_f} \mu_{X_A}/R_k, \quad (43)$$

抗力变异系数

$$\delta_R = \sqrt{\delta_{X_m}^2 + \delta_{X_A}^2 + \delta_{X_p}^2}. \quad (44)$$

8.3 抗力分项系数的确定

构件的失效概率 p_f 是可靠指标 β 的函数. 对于不同的安全等级和破坏类型,根据文献[50],目标可靠指标可按表 4 取值.

表 4 目标可靠指标^[50]

构件破坏类型	一级	二级	三级
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2

根据实际设计中常用的安全等级和 RPC 轴压构件的破坏形态,取目标可靠指标 $\beta = 3.7$.

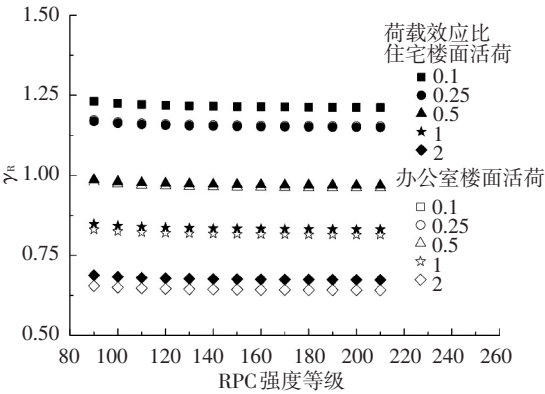


图 11 RPC 材料分项系数

按上述讨论的计算方法和参数取值,编制程序对 RPC 的材料分项系数进行计算,结果如图 11 所示.抗力分项系数受荷载效应比影响较大,与 RPC 强度等级和活荷载类型关系不大.由于活载

平均值/标准值的比值较小,故荷载效应比越高,抗力分项系数越小.

根据计算,在已讨论的 RPC 强度等级和荷载效应比范围内,RPC 材料分项系数最大值约为 1.23.偏于安全考虑,将 RPC 的材料分项系数取为 1.3,比普通混凝土材料分项系数 1.4^[20]略小.

表 5 各强度等级 RPC 基本力学性能取值

强度等级	抗压强度/MPa		抗拉强度/MPa		弹性模量/ 10 ⁴ MPa	峰值压应变/ 10 ⁻⁶	梁受压边缘极限压应变/ 10 ⁻⁶	轴拉开裂应变/ 10 ⁻⁶
	标准值	设计值	标准值	设计值				
RPC90	90	58.9	5.95	4.58	3.60	2 364	3 751	130
RPC100	100	65.4	6.86	5.27	3.75	2 544	4 017	152
RPC110	110	71.9	7.71	5.93	3.88	2 710	4 269	173
RPC120	120	78.2	8.52	6.56	4.01	2 868	4 511	192
RPC130	130	85.1	9.38	7.21	4.14	3 033	4 742	213
RPC140	140	91.4	10.12	7.79	4.25	3 176	4 966	230
RPC150	150	97.6	10.85	8.34	4.36	3 315	—	248
RPC160	160	104.5	11.61	8.93	4.48	3 461	—	266
RPC170	170	110.7	12.29	9.45	4.59	3 590	—	282
RPC180	180	117.5	13.01	10.01	4.70	3 728	—	299
RPC190	190	123.7	13.64	10.50	4.79	3 850	—	314
RPC200	200	130.6	14.33	11.02	4.90	3 980	—	330
RPC210	210	136.8	14.93	11.49	4.99	4 095	—	344

注:RPC 泊松比 $\nu = 0.2$

10 结 论

1) 以边长 70.7 mm RPC 立方体抗压强度标准值为依据,将 RPC 划分为 RPC90~RPC210 共 12 个强度等级.给出不同强度等级的 RPC 立方体抗压强度平均值和变异系数取值.

2) 基于试验资料和可靠性分析,RPC 材料分项系数可取为 1.3.给出不同强度等级 RPC 抗压强度标准值和设计值,抗拉强度标准值和设计值,及弹性模量的具体取值.

3) 给出不同强度等级 RPC 峰值压应变、受压边缘极限压应变、轴拉开裂应变、弯曲开裂应变及泊松比的具体取值.

4) 在确定不同强度等级的 RPC 基本力学性能指标具体取值之后,即可应用文献[8,20,47]的方法进行 RPC 构件设计.

参考文献

[1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.

[2] YAZICI H, YARDIMCI M Y, AYDIN S, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete

9 RPC 基本力学性能指标取值

获得 RPC 的材料分项系数,即可计算得到各强度等级下 RPC 材料强度设计值.为方便应用,将不同强度等级下 RPC 的基本力学性能指标取值列于表 5.

containing mineral admixtures under different curing regimes [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1223-1231.

[3] RICHARD P, CHEYREZY M. Reactive powder concrete with high ductility and 200 MPa-800 MPa compressive strength [J]. ACI Materials Journal, 1994, 144(3): 507-518.

[4] BLAIS P Y, COUTURE M. Prestressed pedestrian bridge-world's first reactive powder concrete structure [J]. PCI, 1999, 44: 60-71.

[5] BEHLOUL M, LEE K C. Ductal(R) Seonyu footbridge [J]. Structural Concrete, 2003, 4(4): 195-201.

[6] MAZZACANE P, RICCIOTTI R, LAMOREUX G, et al. Roofing of the stade jean bouin in UHPFRC [C]// Symposium on ultra-high performance fibre-reinforced concrete. Marseille: RILEM, 2013:59-68.

[7] 何雁斌.活性粉末混凝土(RPC)的配制技术与力学性能试验研究[D].福州:福州大学,2003.

[8] 李莉.活性粉末混凝土梁受力性能及设计方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

[9] 郑文忠,卢姗姗,张明辉.掺粉煤灰和矿渣粉的活性粉末混凝土梁受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(3):62-70.

[10] 张明波.基于承载力控制的预应力 RPC 梁设计理论研究[D].北京:北京交通大学,2009.

- [11] 罗华.圆钢管活性粉末混凝土短柱轴压受力性能研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [12] 陆小吕.活性粉末混凝土矩形截面配筋梁正截面受弯的计算方法[D].北京:北京交通大学,2011.
- [13] 张静.钢管活性粉末混凝土短柱轴压受力性能试验研究[D].福州:福州大学,2005.
- [14] 马远荣.活性粉末混凝土(RPC)预应力叠合梁试验研究[D].长沙:湖南大学,2002.
- [15] 贾方方.钢筋与活性粉末混凝土粘结性能的试验研究[D].北京:北京交通大学,2013.
- [16] 卢姗姗.配置钢筋或 GFRP 筋活性粉末混凝土梁受力性能试验与分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [17] 单波.活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D].长沙:湖南大学,2002.
- [18] 余清河.活性粉末混凝土的性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.
- [19] 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.
- [20] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [21] 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.
- [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(Z1):132-137.
- [23] AN Mingzhe, ZHANG Lijun, YI Quanxin. Size effect on compressive strength of reactive powder concrete [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18(2):279-282.
- [24] GB50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [25] 李海燕.活性粉末混凝土高温爆裂及高温后力学性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [26] 徐飞.钢纤维活性粉末混凝土抗火性能试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [27] 冯建文.钢管活性粉末混凝土柱的力学性能研究[D].北京:清华大学,2008.
- [28] 郑文忠,李莉,卢姗姗.钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(6):62-70.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 刘数华,阎培渝,冯建文.超高强混凝土 RPC 强度的尺寸效应[J].公路,2011,(3):123-127.
- [32] 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.
- [33] 吴捧捧.自密实钢管 RPC 柱基本力学性能研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [34] 石秋君.碎石活性粉末混凝土抗压力学性能试验研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [35] 余自若,安明喆.活性粉末混凝土的疲劳损伤研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2009,37(3):114-119.
- [36] 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.
- [37] 方志,向宇,刘传乐.配置碳纤维预应力筋的钢纤维活性粉末混凝土无腹筋梁疲劳性能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(1):101-107,116.
- [38] 杨志慧.不同钢纤维掺量活性粉末混凝土的抗拉力学特性研究[D].北京:北京交通大学,2006.
- [39] 原海燕.配筋活性粉末混凝土受拉性能试验研究及理论分析[D].北京:北京交通大学,2009.
- [40] 闫光杰,阎贵平.活性粉末混凝土双向抗压强度试验研究[J].中国安全科学学报,2007,17(3):162-165.
- [41] 金凌志,祁凯能,刘潘,等.预应力 RPC 吊车梁正截面静载承载力试验研究[J].建筑科学,2013,29(3):40-45.
- [42] 刘畅.活性粉末混凝土偏心受压构件破坏机理的试验研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [43] 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.
- [44] 鞠杨,刘红彬,陈健,等.超高强度活性粉末混凝土的韧性与表征方法[J].中国科学(E 辑),2009,39(4):793-808.
- [45] 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.
- [46] 谭彬.活性粉末混凝土受压应力应变全曲线的研究[D].长沙:湖南大学,2007.
- [47] 卢姗姗,郑文忠.GFRP 筋活性粉末混凝土梁正截面抗裂度计算方法[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(4):536-540.
- [48] 杨剑,方志.超高性能混凝土单轴受压应力应变关系研究[J].混凝土,2008(7):11-15.
- [49] 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:自然科学版,2006,30(1):40-43.
- [50] GB50086—2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [51] 李欣,武岳,沈世钊.钢拉杆与钢绞线的抗力分项系数研究[J].土木工程学报,2008,41(9):8-13.
- [52] 李国强,黄宏伟,吴迅,等.工程结构荷载与可靠度设计原理[M].3 版.北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [53] 李继华,林忠民.建筑结构概率极限状态[M].北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [54] GBJ 68—84 建筑结构设计统一标准(试行)[S].北京:中国建筑工业出版社,1984.