

# 复合筋SFCB及RPC在人防工程中的应用的研究

余伟民<sup>1</sup>, 姚 山<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>甘肃省工程设计研究院有限责任公司, 甘肃 兰州

<sup>3</sup>东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京

收稿日期: 2025年11月18日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月23日

## 摘 要

人防工程的净空要求是影响平战结合的突出问题, 现有设计存在造价较高且施工不便等缺点。通过介绍钢-连续纤维复合筋(Steel-FRP Composite Bar, 简称SFCB)和活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, 简称RPC)的材料特性, 推算两种材料的强度设计值及材料提高系数, 为人防工程设计中采用SFCB和RPC提供了理论依据。结合实际工程, 就框架梁采用传统的HRB400级钢筋和C40级混凝土同采用SFCB和RPC进行配筋和截面的对比, 结果表明: 在梁宽和配筋不变的条件下, 新材料可以有效减小梁高。SFCB和RPC这两种高新材料的结合, 在人防工程中具有良好应用价值。

## 关键词

新型钢-FRP复合筋, RPC, 人防工程, 框架梁, 净空

# Research on the Application of Steel-FRP Composite Bar and Reactive Powder Concrete in Civil Defense Engineering

Weimin Yu<sup>1</sup>, Shan Yao<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>China United Northwest Institute for Engineering Design and Research Co. Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Gansu Engineering Design & Research Institute Limited Liability Company, Lanzhou Gansu

<sup>3</sup>Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Received: November 18, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 23, 2025

## Abstract

The clearance requirement of civil defense engineering is a critical factor affecting the integration

文章引用: 余伟民, 姚山. 复合筋 SFCB 及 RPC 在人防工程中的应用的研究[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 3031-3039.  
DOI: 10.12677/hjce.2025.1412325

of peacetime and wartime functions. Current design schemes often result in high construction costs and reduced constructability. This study introduces the material properties of Steel-FRP Composite Bar (SFCB) and Reactive Powder Concrete (RPC), and calculates their design strength values and enhancement coefficients, providing a theoretical basis for the application of SFCB and RPC in civil defense engineering. Based on a practical project, a comparative analysis is conducted on frame beams reinforced with conventional HRB400 steel bar and C40 concrete versus beams using SFCB and RPC. The results show that, under identical beam width and reinforcement conditions, the use of these new materials can effectively reduce beam height. The combination of SFCB and RPC demonstrates promising applicability and engineering value in civil defense structures.

## Keywords

Steel-FRP Composite Bar, RPC, Civil Defense Engineering, Frame Beam, Clearance Requirement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

结构工程是使用工程材料的艺术, 工程结构材料的发展是工程结构技术和理论发展的基础。在目前和未来相当长时期内, 土木工程结构的主要材料将仍然是混凝土和钢材, 而减轻结构自重、增强结构的承载能力、延长结构的服役性能是当今配筋混凝土结构发展中备受关注的重大研究课题, 对于处于抗爆破冲击环境中的人防工程结构更是如此。

钢-连续纤维复合筋(SFCB)和活性粉末混凝土(RPC)是土木工程领域极具应用前景的新型建筑材料。SFCB 和 RPC 均具有优异的性能, 如高强度、延性好等。把 SFCB 和 RPC 结合起来, 可形成一种新型的配筋水泥基结构, 在提高强度的同时增大延性, 提高结构抵抗使用荷载的有效性, 最终解决人防工程的净高问题, 同时, SFCB 和 RPC 的引入和应用期望能进一步减小结构的几何尺寸, 使结构的自重进一步减轻。此外, 长期以来, 在工程结构中使用的混凝土材料和钢材随强度增高, 伴随着显著的脆性受力特征。这种工程材料的力学性能已经不能满足现在新型人防工程结构的要求。

另一方面, 传统的配筋混凝土结构属于地下或半地下工程, 普遍面临由于混凝土受到侵蚀导致钢筋的锈蚀老化, 进而影响到人防工程耐久性的问题。因此寻求一种更为有效合理的配筋混凝土结构形式对于提高人防工程的有效性和耐久性亦有意义。

## 2. 材料

### 2.1. SFCB 复合筋

#### 2.1.1. SFCB 复合筋的发展

新型纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, 简称 FRP)具有轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳等优良性能[1]。近年来, 对 FRP 材料性能及 FRP 混凝土结构的研究开展很多, 制定了一系列技术规程[2]-[4], 并在实际工程中得到了应用[5] [6]。国家自然科学基金委员会-中国科学院 2011~2020 学科发展战略研究报告《建筑、环境与土木工程》[7]指出“高性能、多功能、高耐久的新型结构材料的研究”是未来十年结构工程学科的研究前沿之一; 报告指出“FRP 复合材料因其良好的力学性能和耐久性, 已成为继钢材和混凝土材料之后的第三类结构材料”。

但是, 单纯的 FRP 材料为线弹性, 不存在类似于钢筋的屈服平台, 所以 FRP 混凝土结构的破坏表现为脆性破坏, 延性较差。故配置 FRP 筋的混凝土结构延性取决于本身塑性性能较差的混凝土的受压塑性, 并希望结构发生混凝土压碎的破坏模式。设计规范和指南一般建议将 FRP 混凝土构件设计为超筋构件, 利用受压区混凝土的塑性变形来获得构件的延性。为了使 FRP 筋混凝土结构具有较好的延性性能, 在提高混凝土强度的同时, 必须采取有效措施提高混凝土的极限压应变以增强其塑性性能。

钢-连续纤维复合筋(Steel-FRP Composite Bar, 简称 SFCB)是一种以钢筋为内芯外包纵向连续纤维的新型纤维增强复合材料[8]-[10], 它同时具有强度高、延性好、弹性模量较高、稳定的二次刚度及优异的耐腐蚀性能等特点, 其截面见图 1。由于钢筋内芯外包 FRP 形成钢-FRP 复合筋, 在外包纤维拉断前, SFCB 应力 - 应变曲线呈现出明显的双折线特征, 在内芯钢筋屈服前 SFCB 具有相对于 FRP 筋更高的弹性模量, 内芯钢筋屈服后外包纤维为 SFCB 提供了稳定的屈服后拉伸模量和较高的抗拉强度。SFCB 兼具钢筋和 FRP 筋的优点, 具有良好的力学性能, 可以满足混凝土结构工程对高强度钢筋的需求。



(1) 玄武岩纤维 SFCB (2) 玻璃纤维 SFCB

Figure 1. SFCB section  
图 1. SFCB 截面

2.1.2. SFCB 复合筋的拉伸试验

不同筋材拉伸应力 - 应变曲线和性能见表 1 和图 2。A 为普通钢筋, B、C、D 为 SFCB, E 为 FRP。

Table 1. Mechanical properties of SFCB  
表 1. SFCB 的力学性能

| No. | 屈服强度<br>$f_{iy}$ (MPa) | 抗拉强度<br>$f_{iu}$ (MPa) | 弹性模量<br>$E_{It}$ (GPa) | 屈服后刚度<br>$E_{Itt}$ (GPa) |
|-----|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| A   | 524.0                  | 642.0                  | 198.0                  | 1.7                      |
| B   | 150.2                  | 798.5                  | 72.3                   | 25.7                     |
| C   | 230.0                  | 704.3                  | 112.9                  | 30.6                     |
| D   | 150.1                  | 688.9                  | 67.3                   | 25.8                     |
| E   | —                      | 1002.3                 | 46.1                   | —                        |

可以看出, FRP (E)的抗拉强度最高, 钢筋(A)的抗拉强度最低, 而 SFCB (B, C 和 D)的抗拉强度介于 FRP 和钢筋之间。对于 SFCB, 加载初期由内芯和外包纤维共同承担荷载, 随着荷载的持续增加, 越来越多的荷载由外包纤维承担, 当外包连续纤维断裂时, 荷载达到峰值。

SFCB 截面中内芯面积占比越高, 弹性模量和屈服后刚度就越高, 外包纤维面积占比越高, 受拉强度就越高, 因此, 对于人防工程, 可以通过研究内芯和外包纤维面积占比关系, 找到高强度和高延性的平衡, 从而改善现有设计中钢筋用量大, 梁、柱节点和柱中钢筋拥挤的现象, 还可以保证结构实现预期的耗能机制, 满足人防工程的要求。

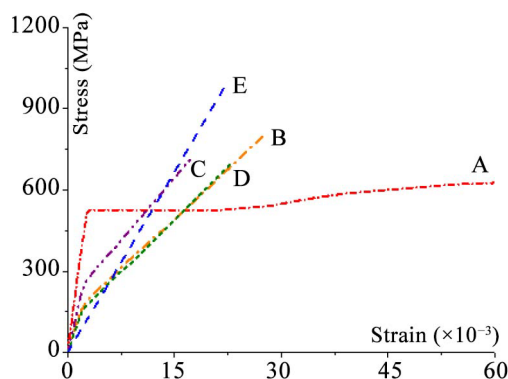


Figure 2.  $\sigma - \varepsilon$  curves of steel rebars (A), SFCB (B, C, D), and FRP (E)

图 2. 钢筋(A)、SFCB (B、C、D)、FRP (E)的  $\sigma - \varepsilon$  曲线

### 2.1.3. 腐蚀环境下 SFCB 复合筋的拉伸试验

采用 3.5% 氯化钠溶液模拟腐蚀环境, 浸泡 180 天后进行拉伸试验, 其破坏模式见图 3。从图中可以看出, 钢筋经过 180 天的腐蚀后, 有效截面减小, 受拉强度降低。SFCB 和 FRP 的失效是由于纤维和基体之间突然离析, 随后纤维断裂, 断裂的纤维呈扇形发散。SFCB 的内部钢筋(钢筋 B, C 和 D)几乎没有被腐蚀, 并呈现出原始的金属光泽, 说明了 SFCB 优异的耐腐蚀性。

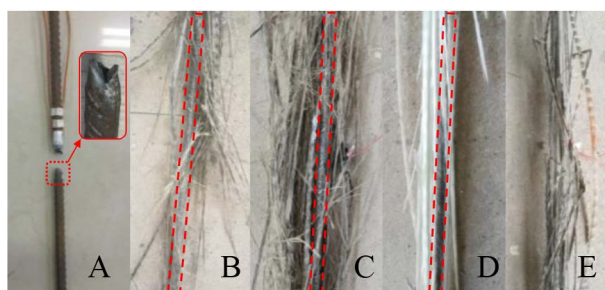


Figure 3. Failure modes of tensile tests for corroded specimens: Rebar (A), SFCB (B, C, D), FRP (E)

图 3. 钢筋(A)、SFCB (B、C、D)、FRP (E)腐蚀试样拉伸试验的破坏模式

## 2.2. 活性粉末混凝土(RPC)

### 2.2.1. 活性粉末混凝土(RPC)的组成和性能

RPC 的制备原理基于细观力学[11]和最大密实度理论[12], 细观力学主要研究纤维界面与水泥基材料间的关系, 通过改变纤维类型获得不同的增韧抗裂效果; 最大密实度理论则通过提高组分的细度与活性, 使材料内部的缺陷(孔隙与微裂缝)减小到最少, 以获得由其组分材料所决定的最大承载力及最高耐久性。

以下就 RPC 组分做简要分析:

(1) 纤维的加入可以提高水泥基材的抗拉强度和极限变形能力, 同时限制混凝土早期(塑性期和硬化初期)由于离析、泌水、收缩等因素形成的原生微裂缝的产生和扩展, 阻止硬化混凝土破坏时裂缝扩展, 使硬化混凝土在开裂后仍能保持一定的抗拉强度, 具有较高的荷载传递能力。

(2) 粉煤灰在 RPC 组成中具有举足轻重的地位, 比表面积  $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ , 颗粒均匀细致的一级粉煤灰会有形态效应、活性效应、微集料效应, 其中形态效应是物理效应, 活性效应是化学效应, 而微集料效应既有物理效应又有化学效应。这三种效应相互关联, 互为补充。粉煤灰的品质越高, 效应越大。所配制的 RPC 工作性能更好。

(3) 增稠剂可与水泥形成“黄金搭档”，从而改善水泥浆体的微级配，能进一步“挤出”水泥颗粒间空隙中的水分，提高水泥浆体的粘聚性和保水性，同时增稠剂中的高活性矿物成分能把低强度的氢氧化钙转化成高强度的水化硅酸钙，减弱了氢氧化钙结晶发育，同时提高了纤维界面和基材的致密程度和强度。

(4) 硅灰在水泥基材中不但起填充作用，使水泥基材的密度增强以提高强度，同时也有一定的活性，可以参与水化反应。

RPC 作为一种性能十分优异的新型水泥基复合材料、具有优异的力学行为、动态效应、高耐久性能和施工性能的新型高性能水泥基复合材料，能满足人防工程高抗力、高韧性的特殊要求[13]，其制备见图 4，其力学性能见表 2。

此外，在 RPC 的组成材料中，不同粒径的颗粒以较好的级配结合，使得 RPC 内部密实度更高，耐久性更强，能够较好服役于长期处于潮湿、腐蚀环境下的人防工程。



(1) 超细镀铜钢纤维

(2) 搅拌后 RPC 成品

Figure 4. RPC preparation  
图 4. RPC 制备

Table 2. Mechanical properties of RPC  
表 2. RPC 的力学性能

| 抗压强度标准值<br>$f_{cu,k}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 弹性模量<br>$E_c$ (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> ) | 泊松比<br>(%) | 抗弯强度<br>(%) | 极限拉应变<br>(%) | 极限压应变<br>(%) |
|--|---|------------|-------------|--------------|--------------|
| 100~300                                    | 40~60   | 0.22~0.24  | 20~40       | 0.7          | 0.3          |

2.2.2. RPC 的抗折强度和抗压强度试验

钢纤维掺量的变化对 RPC 抗折强度和抗压强度有较大影响，当钢纤维体积分数分别为 0、0.5%、1%、1.5%、2%时，RPC 的 3 d、7 d、28 d 抗折强度和抗压强度如表 3 和表 4 所示，可以看出，在 RPC 中加入钢纤维可以大幅提升抗折强度和抗压强度，随着钢纤维掺量的不断增加，RPC 的 3 d、7 d、28 d 抗折强度和抗压强度不断提高，其中钢纤维对 RPC 抗压强度的提升尤为明显，但随其掺量的增加，其抗压强度增长有限。所以在纤维掺量的选择上，要综合考虑抗折强度和抗压强度两个因素，同时兼顾经济指标。

Table 3. Effect of steel fiber content on the flexural strength of RPC  
表 3. 钢纤维掺量对 RPC 抗折强度的影响

| 试件编号 | 钢纤维体积分数(%) | 抗折强度(MPa) |       |       |
|------|------------|-----------|-------|-------|
|      |            | 3 d       | 7 d   | 28 d  |
| 1    | 0          | 11.39     | 16.41 | 21.22 |
| 2    | 0.5        | 13.56     | 16.58 | 21.52 |



续表

|   |     |       |       |       |
|---|-----|-------|-------|-------|
| 3 | 1   | 14.87 | 17.41 | 22.78 |
| 4 | 1.5 | 20.00 | 21.90 | 22.95 |
| 5 | 2   | 21.22 | 23.08 | 23.29 |

**Table 4.** Effect of steel fiber content on the compressive strength of RPC

**表 4.** 钢纤维掺量对 RPC 抗压强度的影响

| 试件编号 | 钢纤维体积分数(%) | 抗压强度(MPa) |        |        |
|------|------------|-----------|--------|--------|
|      |            | 3 d       | 7 d    | 28 d   |
| 1    | 0          | 78.26     | 97.57  | 122.85 |
| 2    | 0.5        | 94.37     | 119.64 | 155.81 |
| 3    | 1          | 104.37    | 130.32 | 173.74 |
| 4    | 1.5        | 117.55    | 137.46 | 179.75 |
| 5    | 2          | 122.39    | 143.95 | 191.91 |

### 3. SFCB 和 RPC 在人防工程中的应用

#### 3.1. 人防工程结构设计的特点

人防工程结构设计和普通民用建筑设计有所不同, 人防荷载属于偶然的瞬间作用, 作用次数通常只有一次, 荷载值却特别大, 但很不确定。因此设计的安全度或者承载力储备可以降低要求, 材料设计强度可提高, 允许结构在达到设计荷载时进入塑性屈服状态, 出现较大的变形和裂缝, 甚至是局部破坏, 但是必须防止倒塌和具备必要的维护功能。因此, 人防工程对建筑材料的要求不但要高强, 而且要求高延性、高耗能能力和抗冲击性。

#### 3.2. 材料强度综合调整系数 $\gamma_d$

《人防地下室设计规范》(GB50038-2005) [14]规定: 材料强度综合调整系数是考虑了普通工业与民用建筑规范中材料分项系数、材料在快速加载作用下的动力强度提高系数和对人防结构构件进行可靠度分析后综合确定的。事实上材料的强度设计值中已考虑过材料的分项系数, 而防空地下室结构构件的可靠度分析和人防等级相关, 最终在人防荷载反映, 因此, 从数值角度来说, 动力强度提高系数是决定综合调整系数的主要因素。

#### 3.3. SFCB 的材料综合调整系数

实验证明[15], 随着应变速率的增加, 具有明显屈服台阶的各种钢筋的屈服强度均有不同程度的提高。其静屈服强度低的, 快速变形下提高得多, 反之则少。SFCB 的静屈服强度较高, 接近 680 MPa, 在快速变形下强度的提高有限, 综合调整系数建议取 1。

#### 3.4. RPC 的材料综合调整系数

快速加载下混凝土的抗压强度和弹性模量已有不少试验研究成果[15]-[17], 它们给出了总体一致的变化规律, 具体数值有较大的离散度。但近似可以认为提高比值在 1.2 左右。混凝土抗压强度会随龄期的增长而增长。普通混凝土一年后的抗压强度至少可比 28 d 的标准强度提高 30%。人防工程可以考虑混凝土后期的强度提高, 其提高比值可以取 1.2~1.3 [15]。综合上述理论, 结合人防地下室设计规范, RPC 综合调整系数建议取 1.2。

3.5. 弹性模量

试验证明, 动荷载作用下钢筋弹性模量与静荷载作用下相同; 混凝土和砌体弹性模量是静荷载作用下的 1.2 倍[14]。

3.6. 算例

本工程为一层地下车库, 层高 5 m, 柱距 8.4 m, 顶部覆土 0.8 m, 工程设计使用年限为 50 年, 按核 6 级甲类防空地下室设计。结构平面图见图 6, 顶板静荷载标准值 23.6 kN/m<sup>2</sup>, 核武器等效静荷载标准值 65 kN/m<sup>2</sup>, 常规武器等效静荷载标准值 34 kN/m<sup>2</sup>, 梁柱材料分别使用 C40 级普通混凝土、HRB400 级钢筋和 RPC、SFCB, 材料强度调整系数见表 5。

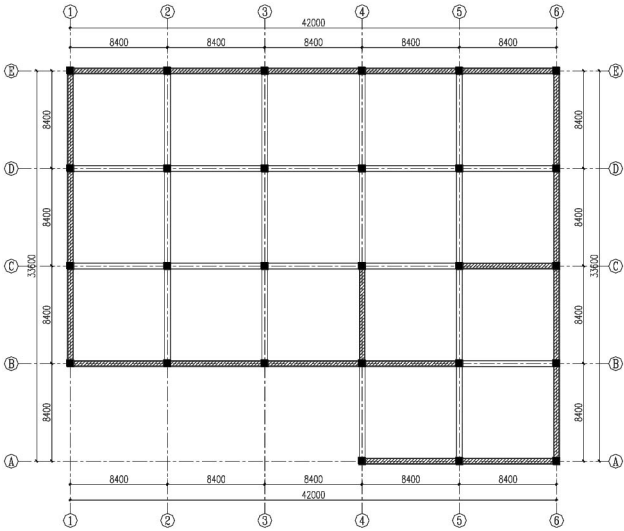


Figure 6. Structural layout plan  
图 6. 结构平面布置图

Table 5. Adjustment coefficient  
表 5. 调整系数

| 材料种类 |        | 材料强度综合调整系数 | 弹性模量调整系数 |
|------|--------|------------|----------|
| 钢筋   | HRB400 | 1.20       | 1.0      |
|      | SFCB   | 1.00       | 1.0      |
| 混凝土  | C40    | 1.50       | 1.2      |
|      | RPC    | 1.2        | 1.2      |

Table 6. Section design under civil air defense load combination  
表 6. 人防荷载组合下的截面设计

| 混凝土类型 | 钢筋类型   | 宽 × 高(mm)  | 支座钢筋(mm <sup>2</sup> ) | 跨中钢筋(mm <sup>2</sup> ) |
|-------|--------|------------|------------------------|------------------------|
| RC    | HRB400 | 500 × 1000 | 6922                   | 5650                   |
| RPC   | SFCB   | 500 × 1000 | 4952                   | 4106                   |
| RPC   | SFCB   | 500 × 900  | 5576                   | 4950                   |
| RPC   | SFCB   | 500 × 850  | 5960                   | 4879                   |
| RPC   | SFCB   | 500 × 800  | 6406                   | 5209                   |
| RPC   | SFCB   | 500 × 750  | 6391                   | 5591                   |
| RPC   | SFCB   | 500 × 700  | 7560                   | 6040                   |

计算分析采用 ETABS 建筑结构分析与设计软件, 在定义材料时将强度设计值(标准值)和弹性模量乘以表 4 的调整系数, 在荷载工况中加入核武器爆炸等效静荷载和常规武器爆炸等效静荷载, 在荷载组合中加入战时常规武器爆炸等效静荷载与静荷载同时作用组合及战时核武器爆炸等效静荷载与静荷载同时作用组合。以①+③~④处框架梁为研究对象, 以战时核荷载组合为控制荷载, 表 6 是使用新材料后不同截面高度梁的配筋情况, 和常规设计做比较, 可以得出:

(1) 相同截面下, RPC/SFCB 框架梁的支座钢筋和跨中钢筋较 RC/HRB400 框架梁分别减少 28.5% 和 27.3%; 减小 RPC/SFCB 框架梁的高度, 则支座钢筋和跨中钢筋用量开始增大, 当 RPC/SFCB 框架梁梁高为 750 mm 时, 支座钢筋和跨中钢筋的总量和 RC/HRB400 框架梁梁高为 1000 mm 相等, 新材料在同等配筋量的条件下, 可使原有梁高降低 25%, 其背后的力学机制是 RPC 和 SFCB 两种材料的高强度, 即在框架梁的控制截面处, RPC 受到的较高压应力和 SFCB 受到的较高拉应力相互匹配, 避免选用高强度筋材导致梁截面上中心轴偏移, 出现受压区面积过大的情况。

(2) 算例分析中, SFCB 的材料综合调整系数取 1, 一方面是内芯和外包纤维面积占比关系影响高强度和高延性的平衡, 导致材料综合调整系数是大于 1 的变量, 不易确定, 取 1 偏安全; 另一方面, 限制 SFCB 在人防荷载作用下的受拉强度, 等同增大配筋量, 利用受压区混凝土的塑性变形来获得构件的延性, 延性比愈大, 则吸收动能的能力愈强, 愈有利于抵抗动荷。

(3) 上述算例分析了 RPC/SFCB 人防框架梁在受弯情况下的截面大小和受拉钢筋, SFCB 不易弯折, 在箍筋的应用上受限, 因此, 受剪承载力的提高, 依赖 RPC 的受拉强度, 这还需要进一步研究验证; 此外, SFCB 的造价较 HRB400 要高, 且和内芯和外包纤维面积占比相关, 一般认为, 高延性 SFCB > 高强度 SFCB > HRB400; 再者, 现行规范不包含 RPC/SFCB 的设计参数, 这在实际工程的应用中存在挑战, 需要更多的试验研究和试点工程, 推动相应规范标准的立项。

## 4. 结论

通过 SFCB 和 RPC 两种材料力学性能的研究和 RPC/SFCB、RC/HRB400 框架梁算例分析, 得出以下结论:

(1) SFCB 具有强度高、延性好、弹性模量较高、稳定的二次刚度及优异的耐腐蚀性能等特点; RPC 具有优异的力学行为、动态效应、高耐久性能和施工性能。

(2) SFCB 的材料综合调整系数建议取 1; RPC 的材料综合调整系数建议取 1.2。

(3) 在相同人防荷载作用下, SFCB 和 RPC 可以较好地匹配, 在钢筋用量基本不变的前提下减小构件截面、增加净空, 材性的提高可以带来承载力的提高; SFCB 的材料综合调整系数取 1, 可与 RPC 共同增加构件延性, 进一步提高战时人防能力, 有效保障人民生命安全。

## 参考文献

- [1] Malvar, L.J. (1995) Tensile and Bond Properties of GFRP Reinforcing Bars. *ACI Materials Journal*, **92**, 54-59.
- [2] Institution of Structural Engineers (ISE) (1999) Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures Using Fiber Composite Reinforcement.
- [3] 中国标准化协会. 碳纤维布补强加固混凝土结构规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] ACI Committee ACI440 (2006) Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI440.1R-06).
- [5] 吕志涛, 梅葵花. 国内首座 CFRP 索斜拉桥的研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(1): 54-59.
- [6] Hollaway, L.C. (2010) A Review of the Present and Future Utilisation of FRP Composites in the Civil Infrastructure with Reference to Their Important In-Service Properties. *Construction and Building Materials*, **24**, 2419-2445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062>



- 
- [7] 茹继平, 刘加平, 曲久辉, 李杰. 国家自然科学基金委员会-中国科学院 2011-2020 学科发展战略研究专题报告集: 建筑、环境与土木工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [8] 吴智深, 吴刚, 吕志涛. 钢-连续纤维复合筋增强混凝土抗震结构[P]. 中国专利, CN1936206A, 2006.
- [9] Wu, G., Wu, Z., Luo, Y., Sun, Z. and Hu, X. (2010) Mechanical Properties of Steel-FRP Composite Bar under Uniaxial and Cyclic Tensile Loads. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **22**, 1056-1066.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000110](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000110)
- [10] 吴刚, 罗云标, 吴智深, 等. 钢-连续纤维复合筋(SFCB)力学性能试验研究与理论分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 53-61.
- [11] Li, V.C., Wang, S. and Wu, C. (2001) Tensile Strain-Hardening Behavior of PVA-ECC. *ACI Materials Journals*, **98**, 483-492.
- [12] 吕志涛. 高性能材料 FRP 应用与结构工程创新[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 1-5.
- [13] 孙伟, 赖建中. 超高性能水泥基复合材料的动态力学性能研究[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(5): 443-453.
- [14] 中国建筑标准设计研究院. GB50038-2005 人民防空地下室设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [15] 过镇海. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [16] 曹继勇, 张尚根. 人民防空地下室结构设计[M]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [17] 陈肇元, 阚永魁. 高强混凝土用于抗爆结构的若干问题意见; 钢筋混凝土结构在冲击荷载下的性能[C]//清华大学抗震抗爆工程研究室主编. 科学研究报告集第 4 集. 北京: 清华大学出版社, 1986: 63-72.