

DOI:10.11918/202312031

# 功能可恢复 SFCB-ECC-混凝土桥墩抗震性能

白玉磊<sup>1</sup>, 靳晓杰<sup>1</sup>, 张玉峰<sup>1</sup>, 韩世文<sup>2</sup>

(1. 城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124;  
2. 哈尔滨工业大学(深圳) 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:**为实现高耐久功能可恢复结构,设计了钢-FRP 复合筋(steel-FRP composite bar, SFCB)替代钢筋,塑性铰区使用高延性水泥基复合材料(engineered cementitious composites, ECC)替代混凝土的新型组合柱。在 0.13 轴压比下,对 SFCB-ECC-混凝土组合柱进行低周往复荷载试验研究。评估了 SFCB 中 FRP 体积分数(0%, 43.6%, 100%)和塑性铰区基体类型(ECC, 混凝土)对组合柱抗震性能和可恢复性的影响。之后通过 OpenSees 进行了轴压比、SFCB 配筋率和 ECC 强度的参数分析。结果表明:SFCB 可使试件获得稳定的二次刚度,在 2% 位移角前,试件无需修复即可快速恢复原有功能;组合柱残余变形随 SFCB 中 FRP 体积分数增加而减少,但其初始刚度和峰值承载力也相应降低;在塑性铰区使用 ECC 可进一步减少残余位移,同时显著提高峰值承载力和延性;参数分析显示增大轴压比将提高 SFCB-ECC-混凝土组合柱承载力,但会降低延性;随 SFCB 配筋率和 ECC 强度提高,组合柱承载力也相应增大;在实际工程中可合理设计 SFCB 和 ECC 材料特性以满足特定结构刚度、强度和可恢复性的要求。

**关键词:** 桥梁工程; 组合柱; 抗震性能; OpenSees; 钢-FRP 复合筋; 高延性水泥基复合材料; 可恢复

**中图分类号:** U443.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)01-0013-11

## Seismic behavior of resilient SFCB-ECC-concrete bridge piers

BAI Yulei<sup>1</sup>, JIN Xiaojie<sup>1</sup>, ZHANG Yufeng<sup>1</sup>, HAN Shiwen<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China;  
2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

**Abstract:** To achieve highly durable resilient structures, a novel composite column was devised. This column utilized steel-FRP composite bar (SFCB) as an alternative to steel reinforcement, along with the incorporation of engineered cementitious composites (ECC) instead of normal concrete within the plastic hinge region. Quasi-static tests of SFCB-ECC-concrete composite columns were conducted under an axial load ratio of 0.13. The influence of FRP content in SFCB (0%, 43.6%, 100%) and the matrix type in the plastic hinge region (ECC, concrete) on the seismic behavior and resilience of the composite columns was assessed. Subsequently, parameter analyses were conducted through OpenSees, exploring the effect of axial load ratios, SFCB reinforcement ratios and ECC strengths. The research showed that the utilization of SFCB endowed the specimen with post-yield stiffness property, facilitating the swift restoration of its original functionalities without repair until a 2% drift ratio. The residual deformation of the composite column decreased with the increasing FRP content in SFCB, but its initial stiffness and peak bearing capacity correspondingly declined. Substituting ECC for normal concrete in the plastic hinge region can further mitigate residual deformation, coupled with a remarkable increase in both peak bearing capacity and ductility. The parameter analyses revealed that increasing the axial load ratio enhanced the bearing capacity of the SFCB-ECC-concrete composite column, but reduced ductility. Moreover, as the reinforcement ratio of SFCB and the strength of ECC increased, the bearing capacity and ductility correspondingly were amplified. In practical engineering applications, it is possible to rationally design the material properties of SFCB and ECC to meet the specific requirements for structural stiffness, strength, and reparability.

**Keywords:** bridge engineering; composite columns; seismic behavior; OpenSees; steel-FRP composite bar; engineered cementitious composites; resilience

收稿日期: 2023-12-12; 录用日期: 2024-01-16; 网络首发日期: 2024-04-16

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240411.1616.003>

基金项目: 北京市自然科学基金(JQ23036); 国家自然科学基金(51978017)

作者简介: 白玉磊(1985—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 白玉磊, baiyulei@bjut.edu.cn

大量震后调查<sup>[1-2]</sup>显示,传统延性结构虽能在大震中不倒塌,但通常会遭受严重破坏,难以修复。受损严重结构需拆除和重建,这涉及巨额直接损失。此外,具有特殊服务功能建筑(如交通枢纽、医疗设施和电力系统)的破坏还会阻碍紧急救援,引发社会功能崩溃,造成更严重的间接损失<sup>[3-4]</sup>。随着社会经济发展,仅以“生命安全”作为抗震设防的标准已不能完全满足现代建筑的抗震需求,尤其是对重要结构。因此,近年来众多国内外学者对墩柱抗震设计方法的研究正逐渐由延性设计向功能可恢复设计方向发展,提出了“韧性结构”概念<sup>[5-6]</sup>,其特点是保证结构具备充足抗震能力基础上,小震作用下无需修复或简单修复,大震作用下损伤可控且能快速修复恢复原有使用功能。

建造韧性结构的关键是解决墩柱的功能可恢复问题。韩强等<sup>[7]</sup>使用后张预应力法设计了摇摆桥墩,实现了墩柱自复位功能。Bai 等<sup>[8]</sup>对 FRP 布约束传统钢筋混凝土柱的抗震试验发现 FRP 约束作用可有效抑制钢筋屈曲从而使墩柱获得一定可恢复性。Zhang 等<sup>[9]</sup>利用超高强钢筋高屈服应变(约 0.7%)特点,使墩柱获得了二次刚度特征,减小了残余位移和裂缝宽度。值得注意的是这些方法往往面临钢筋锈蚀问题,Li 等<sup>[10]</sup>表明结构后期养护维修成本远高于初期建设成本。Bahramian 等<sup>[11]</sup>对建筑结构生命周期的评估表明下一代建筑的开发应该是同时考虑安全性、环境适应性和耐久性的可持续化设计结构,仅满足其中之一点是远远不够的。

因此,Seyhan 等<sup>[12]</sup>使用了 FRP 筋来增强韧性结构的耐久性。但常用类型的 FRP 筋弹性模量较低,如 GFRP 筋弹性模量只有钢筋的 1/5 ~ 1/4。Bischoff<sup>[13]</sup>研究表明相同配筋率下 GFRP 筋梁的正常使用荷载明显低于传统钢筋混凝土梁。因此,FRP 筋构件设计一般由变形控制,需要大幅提高配筋面积,导致材料利用率偏低从而影响结构适用性。CFRP 筋虽有接近钢筋的弹性模量,但较高的成本使其在土木工程应用中的效益较低。Prajapati 等<sup>[14]</sup>通过采用钢筋和 GFRP 筋混合配筋实现了墩柱功能可恢复性,该方法利用了钢筋的高弹性模量弥补了 GFRP 筋弹性模量不足,从而解决了结构正常使用的变形要求,但本质上钢筋的锈蚀问题依然存在。为解决钢筋锈蚀和 FRP 筋弹性模量低的问题,欧进萍等<sup>[15]</sup>和吴智深等<sup>[16]</sup>开发了一种钢筋作为内芯,外包 FRP 层的钢-FRP 复合筋(steel-FRP composite bar, SFCB)。孙泽阳等<sup>[17]</sup>表明 SFCB 比

FRP 筋明显提高了弹性模量并增强了钢筋的耐腐蚀性和屈服后刚度。配置 SFCB 不仅赋予了墩柱耐腐蚀性,还减少了墩柱损伤,提高了可修复性。

同时,俞可权等<sup>[18]</sup>指出高延性工程水泥基复合材料(engineered cementitious composites, ECC)具有良好的抗拉性能,极限抗拉应变超 3%,这与普通混凝土较小的抗拉应变(0.2%左右)有明显区别。毛维浩<sup>[19]</sup>表明由于 ECC 缺乏粗骨料水泥含量较高,ECC 的收缩变形大于普通混凝土。陈宇等<sup>[20]</sup>提出在 ECC 中掺入硫铝酸钙膨胀剂可明显改善 ECC 的收缩性能。ECC 的韧性非常好,裂缝宽度可控制在 100  $\mu\text{m}$  以下,因此可有效解决混凝土脆性带来的缺陷,提升结构的安全性和耐久性。Yuan 等<sup>[21]</sup>和 Yuan 等<sup>[22]</sup>表明 ECC 的纤维桥联作用可避免基体剥落为纵筋提供稳定有效的约束,从而与纵筋协调变形共同工作。此外,ECC 的峰值压应变也高于普通混凝土,因此构件的变形能力也可相应增加。根据以上介绍不难预料,将 ECC 替代普通混凝土用于墩柱易发生钢筋屈服、混凝土剥落和曲率集中的塑性铰等关键区域可大大提高结构的抗震能力。

基于上述背景,本文提出了一种纵筋采用 SFCB,塑性铰区采用 ECC 的新型耐腐蚀功能可恢复墩柱,目标是研究其抗震性能和可修复性。希望本文工作可为 SFCB-ECC-混凝土组合柱的设计提供一定参考,从而推动此类高耐久功能可恢复结构的工程应用。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试件设计信息见表 1 和图 1。共设计了 4 个截面为 300 mm  $\times$  300 mm 的方形柱试件,包括 3 个 ECC-混凝土组合柱和 1 个混凝土柱。根据 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》<sup>[23]</sup>,将组合柱 ECC 浇筑高度定为基础之上 500 mm 并向下延伸 150 mm 以确保塑性铰发生在 ECC 区域。纵筋采用直径 22 mm 的钢筋、SFCB 和 GFRP 筋以考虑 SFCB 中 GFRP 体积分数(0%, 43.6%, 100%)的影响。箍筋采用直径 10 mm,间距 60 mm 的 GFRP 筋。由于 SFCB 和 GFRP 筋无法弯折,因此采用袁方等<sup>[24]</sup>的方法,用结构胶将筋端部固定于带剪力钉的钢套筒锚具中避免滑移失效破坏。试件编号第一个字母 E/C 代表柱塑性铰区基体类型为 ECC/混凝土,之后的字母 S/SF/F 表示纵筋为钢筋/SFCB/GFRP 筋。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design information of specimens

| 试件编号 | 基体类型    | 纵筋     |      |       | GFRP 箍筋 | 轴压比  |
|------|---------|--------|------|-------|---------|------|
|      |         | 类型     | 数量   | 配筋率/% |         |      |
| C-SF | 混凝土     | SFCB   | 6Φ22 | 2.53  | 10@60   | 0.13 |
| E-SF | ECC-混凝土 | SFCB   | 6Φ22 | 2.53  | 10@60   | 0.13 |
| E-S  | ECC-混凝土 | 钢筋     | 6Φ22 | 2.53  | 10@60   | 0.13 |
| E-F  | ECC-混凝土 | GFRP 筋 | 6Φ22 | 2.53  | 10@60   | 0.13 |

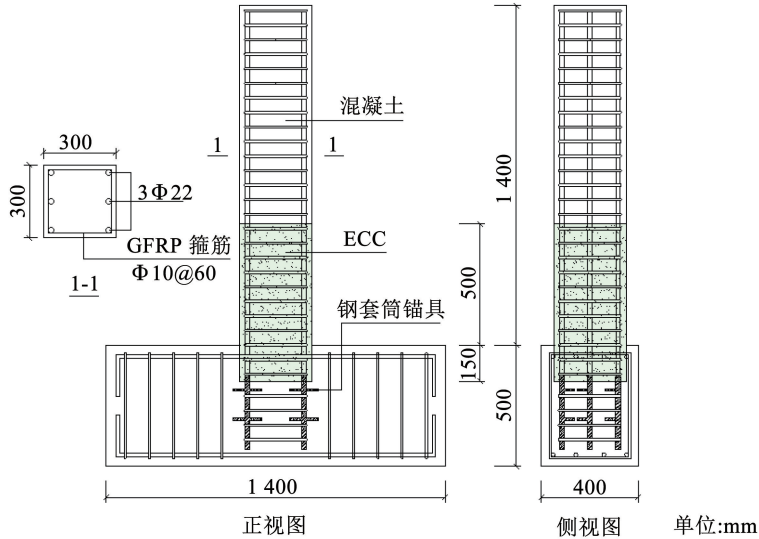


图 1 试件尺寸及配筋

Fig. 1 Specimen details

1.2 材性试验

1.2.1 ECC 和混凝土

ECC 和混凝土的配合比见表 2。采用直径 150 mm, 高度 300 mm 的圆柱测试 ECC 和混凝土的抗压性能。采用尺寸 330 mm × 60 mm × 13 mm 的哑铃形试件测试 ECC 抗拉性能, 其应力-应变曲线见图 2。可看出制备的 ECC 具有典型的应变硬化特点, 满足设计要求。基体力学性能见表 3。

表 2 ECC 和混凝土配合比

Tab. 2 Mix proportions of ECC and concrete kg · m<sup>-3</sup>

| 基体材料 | 水泥  | 石灰石粉 | 硅灰  | 砂   | 粗骨料 | 水   | 减水剂 | PE 纤维 |
|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| ECC  | 583 | 681  | 140 | 583 |     | 400 | 7.4 | 20    |
| 混凝土  | 372 |      |     | 843 | 990 | 169 |     |       |

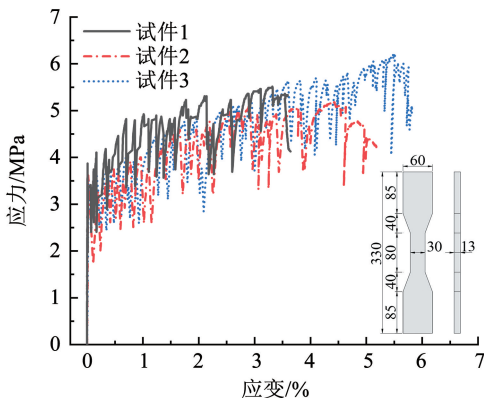


图 2 ECC 拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Tensile stress-strain curves of ECC

表 3 ECC 和混凝土力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of ECC and concrete

| 基体材料 | 极限抗拉强度/MPa | 极限拉应变/% | 峰值抗压强度/MPa | 峰值压应变/% | 压缩弹模/GPa |
|------|------------|---------|------------|---------|----------|
| ECC  | 5.5        | 4.7     | 46.9       | 0.422   | 12.9     |
| 混凝土  |            |         | 37.5       | 0.254   | 25.1     |

1.2.2 钢筋、SFCB 和 GFRP 筋

钢筋、SFCB 和 GFRP 筋的直径都为 22 mm, 其中 SFCB 由内芯直径 16 mm 的带肋钢筋和外部 3 mm 厚的 GFRP 层组成。根据 ASTM A615/A615 M-20<sup>[25]</sup> 对钢筋、SFCB 和 GFRP 筋进行了拉伸测试, 根据 ASTM D695-15<sup>[26]</sup> 对 SFCB 和 GFRP 筋进行了压缩测试。使用的纵筋外观及 SFCB 破坏模式见图 3。纵筋应力-应变曲线和力学性能见图 4 和表 4。在 GFRP 层受压劈裂破坏前, SFCB/GFRP 筋的拉压性能几乎一致, 但平均极限压应变只有 0.6%/1%, 极限抗压强度也明显低于抗拉强度, 这表明 SFCB 和 GFRP 筋为受压破坏控制。此外, 发现 SFCB 具有明显的屈服后刚度, 表明 GFRP 层的引入不仅可防止钢筋腐蚀还可有效改善其力学性能。

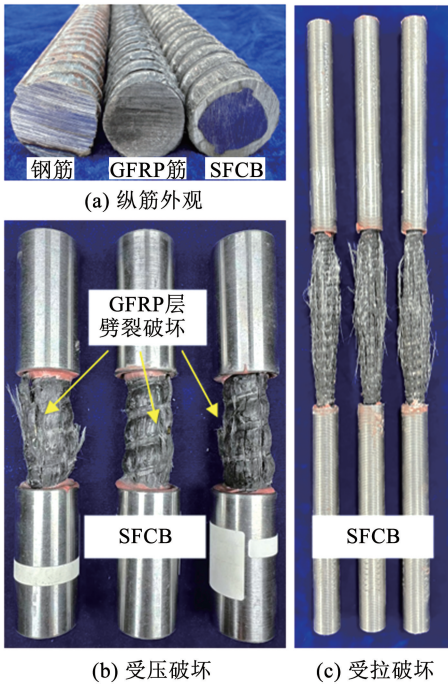


图 3 纵筋和 SFCB 破坏模式

Fig. 3 Samples of reinforcement and failure modes of SFCB

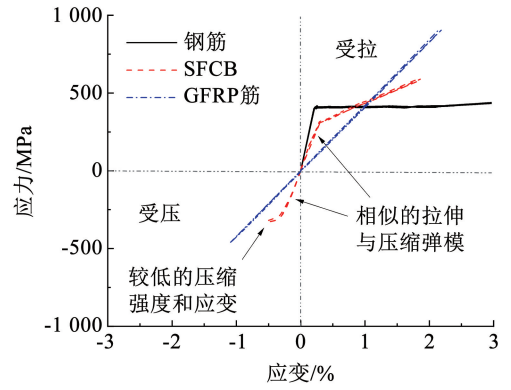


图 4 纵筋拉伸和压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Tensile and compressive stress-strain curves of reinforcement

### 1.3 试验装置和加载制度

加载装置见图 5,所有柱均在恒定轴力下进行低周水平往复荷载加载。柱基础由地锚固定,水平荷载由 100 t 级液压作动器施加,竖向轴力由 100 t 级液压千斤顶作用于柱顶。千斤顶底座与加载梁通过可移动滑轮连接,通过液压控制保证施加稳定的竖向荷载。

表 4 纵筋力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of reinforcement

| 类型     | 直径/mm | GFRP 体积分数/% | 屈服前弹模/GPa | 屈服后弹模/GPa | 屈服强度/MPa | 极限抗拉强度/MPa | 极限抗压强度/MPa |
|--------|-------|-------------|-----------|-----------|----------|------------|------------|
| 钢筋     | 22    | 0           | 196.7     |           | 414.4    | 634.4      | 634.4      |
| SFCB   | 22    | 43.6        | 109.9     | 17.5      | 306.4    | 576.9      | 326.2      |
| GFRP 筋 | 22    | 100.0       | 42.4      | —         | —        | 896.8      | 458.1      |

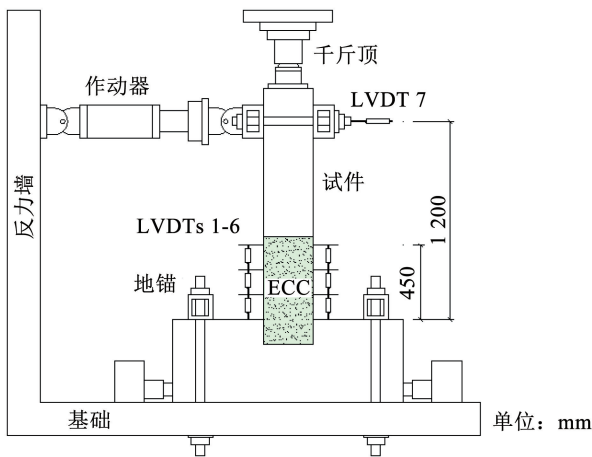


图 5 加载装置

Fig. 5 Schematic diagram of loading device

柱底 450 mm 范围内以 150 mm 间距均匀布置 3 对位移计(LVDTs 1-6)来测量曲率。柱顶位移由位移计 LVDT 7 测量,水平荷载由采集系统直接获得。加载制度见图 6,采用位移加载控制。2% 位移角之前每级加载循环两次,之后每级位移加载循环一次,

直至水平荷载降至峰值力 85% 以下时,试验停止。

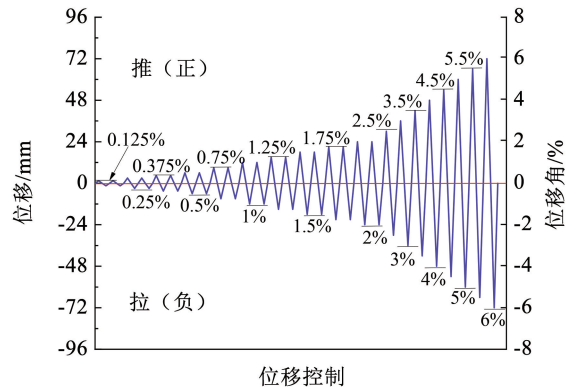


图 6 加载制度

Fig. 6 Loading protocol

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏形态和裂缝模式

4 个柱均发生弯曲破坏,见图 7。在 0.5% 位移角前,加载面出现细小裂缝但卸载后闭合了。这表明 ECC/SFCB/GFRP 筋增加了试件可恢复性。随位

移角增加,加载面的水平裂缝逐渐发展为贯通裂缝。与此同时,侧面上的水平裂缝开始沿斜对角方向拓展并伴随新的水平裂缝产生。2% 位移角时所有试件发现了明显的柱底基体压碎现象,之后混凝土保护层开始剥落,而 ECC 由于纤维桥连作用,即使在 5% 位移角时仍能保持整体,见图 7。因此,ECC 可持续为纵筋提供约束,抑制其屈曲从而提高试件水

平承载力、延性和可恢复性<sup>[21]</sup>。与 C-SF 相比,E-S、E-SF 和 E-F 存在密集的细小裂缝。这是由于混凝土开裂后拉应力为 0,因此需更大的裂缝间距平衡黏结应力。而 ECC 是通过多点开裂模式持续提供应变硬化拉应力,所以 ECC 中的裂缝更密集<sup>[18]</sup>。同理,由于使用的 GFRP 筋黏结性能弱于 SFCB 和钢筋,E-F 的裂缝密度比 E-SF 和 E-S 稀疏<sup>[27]</sup>。

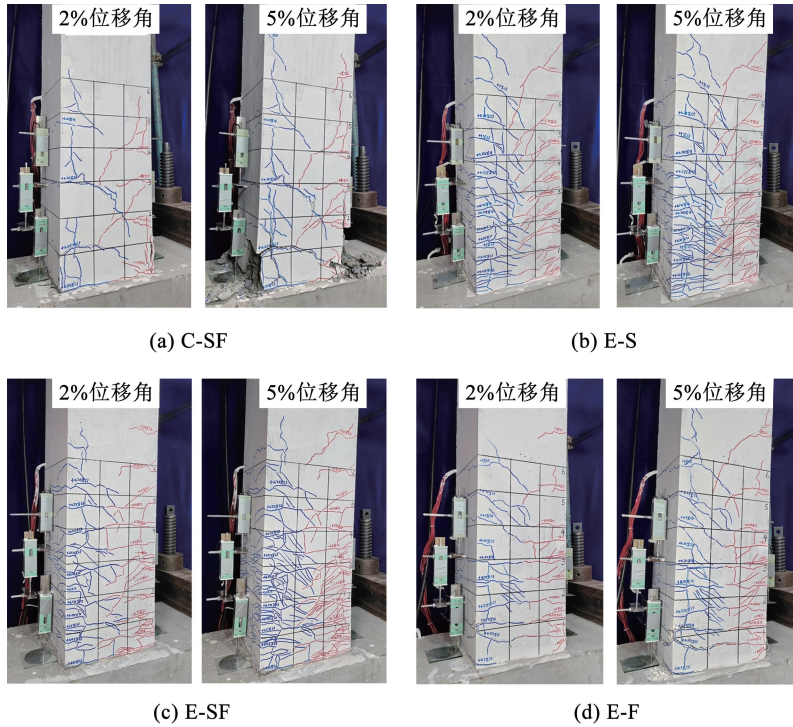


图 7 试件破坏模式

Fig. 7 Failure modes of specimens

## 2.2 滞回曲线

各试件滞回曲线见图 8。曲线特征点值见表 5,其中  $V_c$ 、 $V_y$ 、 $V_p$  和  $V_u$  分别表示开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载和极限荷载, $\Delta_c$ 、 $\Delta_y$ 、 $\Delta_p$  和  $\Delta_u$  代表相应位移。 $\mu$  为位移延性系数,定义为  $\Delta_u/\Delta_y$ 。从图 8 可观察到,C-SF、E-SF 和 E-F 有明显的屈服后二次刚度特征,表明 SFCB 和 GFRP 筋可实现墩柱功能可恢复。E-SF 的峰值承载力和极限位移都比 C-SF 高,即塑性铰区用 ECC 替代混凝土可增强墩柱抗震性能。E-S、E-SF 和 E-F 的比较可看出,随纵筋中 FRP 体积分数增加,滞回曲线捏拢效应越明显,表明试件的耗能能力下降,可恢复能力提升。

## 2.3 骨架曲线

为更直观比较各试件水平承载力和变形,图 9 绘制了试验柱骨架曲线。C-SF 和 E-SF 的比较发现 ECC 的引入对墩柱初始刚度几乎无影响,但平均峰值荷载和极限位移分别提升了 16% 和 24%。原因如前所述,ECC 的纤维桥连作用使其可持续为纵筋

提供约束,从而明显改善墩柱抗震性能。

与传统延性柱不同,Zhang 等<sup>[9]</sup>表明功能可恢复柱的峰值位移更值得关注,其大小决定了墩柱的损伤控制能力和可修复性。从表 5 和图 9 看出 E-SF 和 E-F 的峰值位移比 E-S 分别提升了 83% 和 233%,这凸显了 SFCB 和 GFRP 筋试件优异的功能可恢复性。可是,随纵筋中 FRP 体积分数提升,试件的初始刚度和水平承载力下降。E-SF 和 E-F 分别比 E-S 的平均峰值承载力下降了 14% 和 28%。因此,工程中不应只关注墩柱的功能可恢复性,还应考虑墩柱的刚度和强度以满足正常使用要求。E-SF 的极限位移角(5%)虽小于 E-S 和 E-F(8%),但已远超 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[28]</sup>规定的最大位移角限值 2%,有充分的安全保障。此外,还可根据欧进萍等<sup>[29]</sup>提出的等刚度法设计 SFCB 配筋从而解决试件初始刚度和强度下降问题。因此 SFCB 在高耐久韧性结构方面有广阔的应用前景。

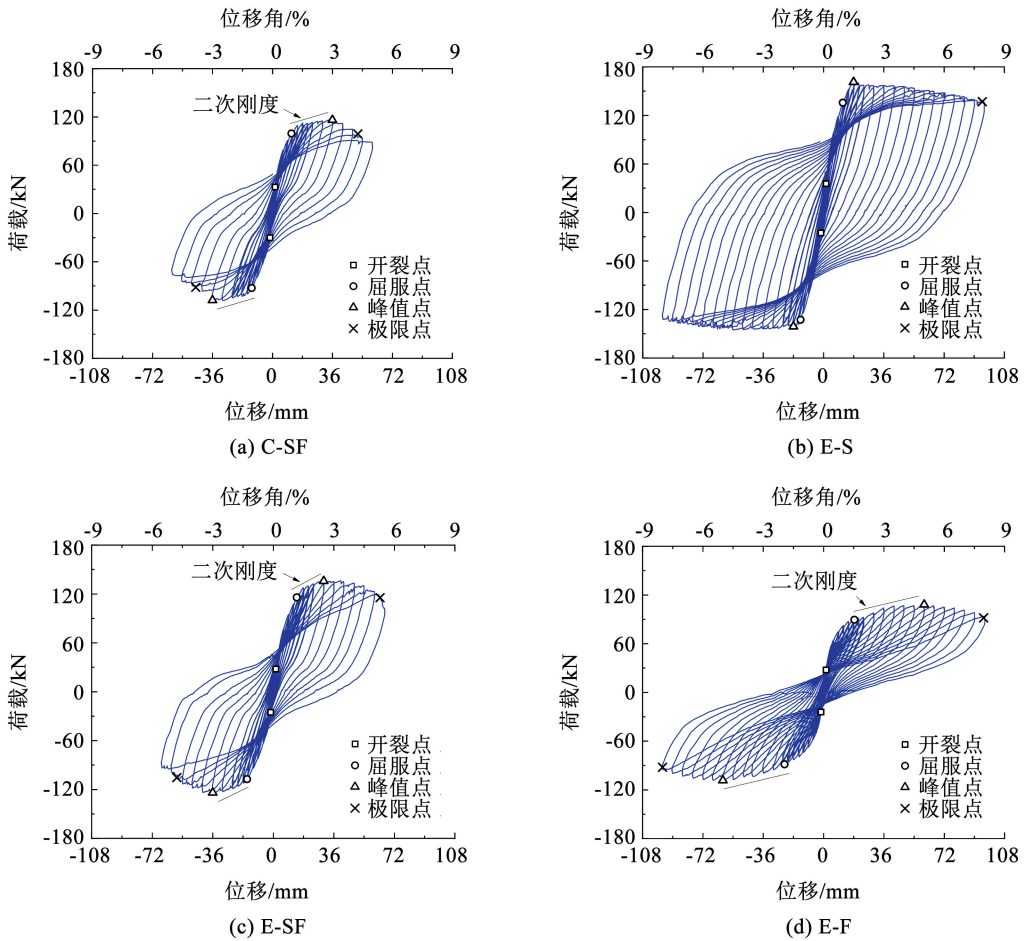


图 8 滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves

表 5 试验结果汇总

Tab. 5 Summary of test results

| 试件   | 加载方向 | 开裂点           |          | 屈服点           |          | 峰值点           |          | 极限点           |          | $\mu$ |
|------|------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|-------|
|      |      | $\Delta_c/mm$ | $V_c/kN$ | $\Delta_y/mm$ | $V_y/kN$ | $\Delta_p/mm$ | $V_p/kN$ | $\Delta_u/mm$ | $V_u/kN$ |       |
| E-S  | +    | 1.52          | 35.5     | 11.51         | 135.9    | 18.00         | 161.2    | 94.80         | 137.1    | 8.23  |
|      | -    | 1.52          | 25.3     | 13.78         | 132.7    | 18.00         | 141.2    | —             | —        | —     |
|      | 平均   | 1.52          | 30.4     | 12.65         | 134.3    | 18.00         | 151.2    | 94.80         | 137.1    | 8.23  |
| C-SF | +    | 1.52          | 33.0     | 11.36         | 99.6     | 36.00         | 116.3    | 51.28         | 98.8     | 4.51  |
|      | -    | 1.49          | 30.0     | 12.50         | 92.5     | 36.00         | 107.9    | 46.01         | 91.7     | 3.68  |
|      | 平均   | 1.51          | 31.5     | 11.93         | 96.1     | 36.00         | 112.1    | 48.65         | 95.3     | 4.10  |
| E-SF | +    | 1.54          | 27.8     | 13.94         | 115.9    | 30.00         | 135.8    | 63.51         | 115.4    | 4.56  |
|      | -    | 1.52          | 25.2     | 15.65         | 107.2    | 36.00         | 124.0    | 57.34         | 105.4    | 3.67  |
|      | 平均   | 1.53          | 26.5     | 14.79         | 111.6    | 33.00         | 129.9    | 60.43         | 110.4    | 4.11  |
| E-F  | +    | 1.52          | 27.6     | 18.37         | 89.5     | 60.00         | 108.0    | 95.50         | 91.8     | 5.20  |
|      | -    | 1.52          | 24.2     | 23.34         | 88.5     | 60.00         | 108.4    | 95.60         | 92.2     | 4.10  |
|      | 平均   | 1.52          | 25.9     | 20.86         | 89.0     | 60.00         | 108.2    | 95.55         | 92.0     | 4.65  |

2.4 曲率分析

5% 位移角前曲率分布见图 10, 其中纵坐标表示距柱底高度, 虚线表示推侧, 实线表示拉侧。每一级位移角 E-SF 的柱底曲率都比 C-SF 小, 这表明

ECC 的持续约束作用可减小柱底截面曲率需求, 从而减小 SFCB 内芯钢筋的塑性应变。E-S 在距柱底 225 mm 处的曲率明显收缩, 说明其塑性铰集中在该高度以下。相比之下, C-SF、E-SF 和 E-F 的曲率分

布更加均匀,在距柱底 225 mm 处的曲率明显大于 E-S。即 SFCB 和 GFRP 筋使试件在一个更长区域内实现曲率的较均匀分布。

孙泽阳等<sup>[17]</sup>指出在相同位移角下,有较高屈服后刚度的试件柱底曲率需求较小,但可发现 E-SF 和 E-F 的柱底曲率与 E-S 接近甚至偏大。这是因为孙泽阳等<sup>[17]</sup>分析的为弯曲曲率规律,而试验测量的为柱底总曲率,包含了纵筋滑移和试件弯曲造成的曲率。由于使用的 SFCB 和 GFRP 筋滑移大于钢筋,造成了柱底总曲率相似现象。因此,在有限元分析中应考虑 SFCB 和 GFRP 筋滑移影响,否则将降低预测精度。

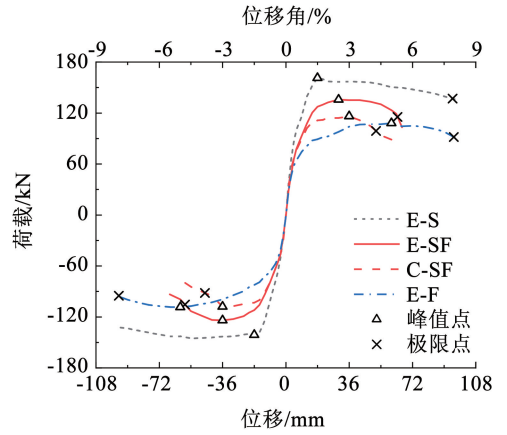


图 9 骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves

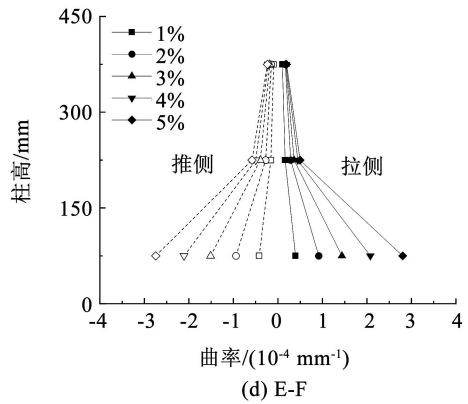
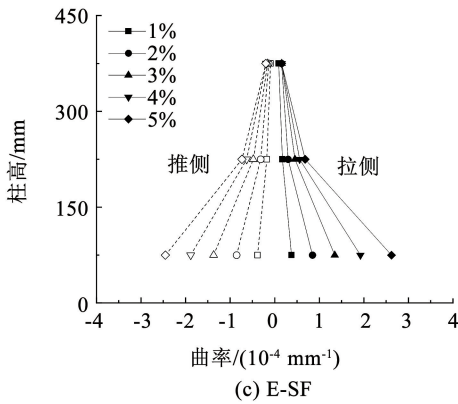
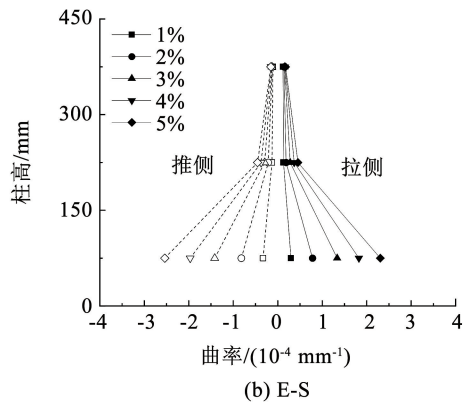
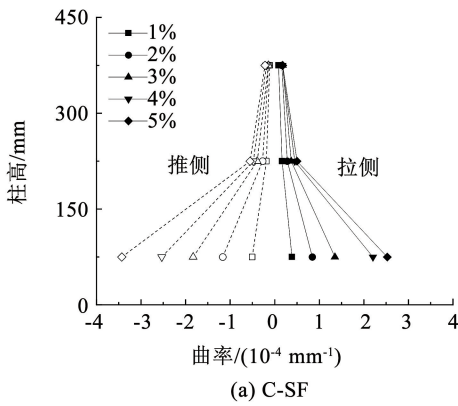


图 10 曲率分布

Fig. 10 Curvature distribution

### 2.5 可恢复性评估

表 6 根据日本、美国和中国规范<sup>[28,30-31]</sup>总结了墩柱损伤状态对应的残余位移角限值,以此来评估试验柱的可修复性,见图 11。从图 11 看出,1.5% 位移角前各试件残余位移基本相同。之后相同位移角下试件残余位移由大到小排序为 E-S > C-SF > E-SF > E-F,其中 C-SF 和 E-SF 在 3% 位移角后有明显区别。残余位移角超越 1% 时表明墩柱严重损伤不可修复,此时 C-SF 和 E-SF 对应的位移角分别为

3.3% 和 3.8%,即塑性铰区用 ECC 代替混凝土后,墩柱的可修复能力提升 15%。E-S 在 2.8% 位移角时达到了最大可修复限值,此时 E-SF 和 E-F 的残余位移角小于 0.5%,处于损伤可控的易修复阶段。E-SF 和 E-F 的最大可修复位移角为 3.8% 和 7%,分别比 E-S 提升了 36% 和 150%。虽然 E-F 有最大的可修复性,但如前所述 GFRP 筋会明显减小试件刚度和强度,过大的位移角还会导致结构其他组件严重破坏,此时墩柱的可修复性将无意义。因此工

程设计应综合考虑刚度、强度和可修复性要求以满足结构正常使用。此外,在 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[28]</sup>规定的 2% 最大位移角前, E-SF 的残余位移小于 0.2%, 即墩柱无需修复即可恢复原有功能, 这突出了 SFCB-ECC-混凝土组合柱的应用前景。

表 6 可恢复性指标

Tab. 6 Reparability indexes

| 损伤状态                  | 无需修复                | 易修复                       | 可修复                       | 不可修复             |
|-----------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|
| 残余位移角 $\theta_r / \%$ | $\theta_r \leq 0.2$ | $0.2 < \theta_r \leq 0.5$ | $0.5 < \theta_r \leq 1.0$ | $1.0 < \theta_r$ |

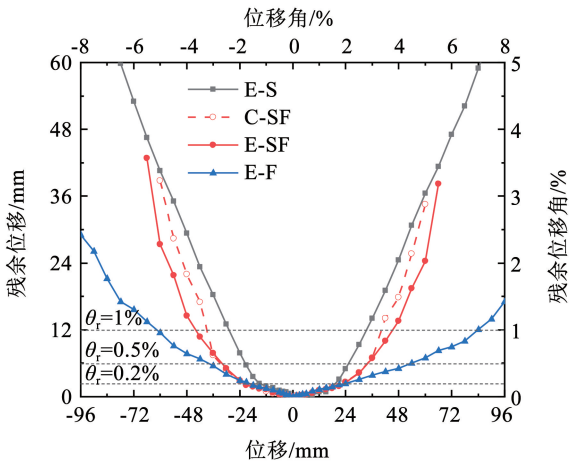


图 11 可恢复性评估

Fig. 11 Resilience assessment

### 3 有限元分析

#### 3.1 数值模型

采用 OpenSees 对试验柱抗震性能进行模拟, 见图 12。将试件划分为 2 个非线性梁柱单元, 截面采用纤维单元分别划分为纵筋纤维、核心区基体纤维和保护层基体纤维。SFCB 根据 FRP 体积分数采用相应面积的钢筋纤维和 FRP 纤维考虑, 其中钢筋采用 Reinforcing Steel 模型<sup>[32]</sup>, FRP 采用 Elastic Uniaxial 模型<sup>[33]</sup>。核心区和保护层根据基体类型, 混凝土采用 Concrete02 模型<sup>[34]</sup>, ECC 采用 Engineered Cementitious Composites 模型<sup>[35]</sup>。各材料参数取值见表 3 和表 4。柱底设置零长度单元, 采用 Bond\_SP01 模型<sup>[36]</sup>考虑纵筋滑移影响。纵筋滑移主要计算参数为纵筋屈服强度  $f_y$ , 极限强度  $f_u$  及对应的滑移  $s_y$  和  $s_u$ 。纵筋屈服时界面滑移计算公式为

$$s_y = \beta \left[ 2.54 \left( \frac{d_b}{8437} \frac{f_y}{\sqrt{f_c}} (2\alpha + 1) \right)^{1/\alpha} + 0.34 \right] \quad (1)$$

式中:  $d_b$  为纵筋直径; 由于 GFRP 筋没有屈服点, 其  $f_y$  取应变 0.2% 时的应力计算;  $f_c$  为混凝土抗压强度;  $\alpha$  是局部黏结-滑移关系中的参数, 取 0.4;  $\beta$  是滑移系数, 对于钢筋、SFCB 和 GFRP 筋分别取 1.0、1.5 和 2.0; 纵筋极限强度对应的滑移  $s_u$  一般取 (30 ~ 40)  $s_y$ 。图 13 对比了模拟和试验滞回曲线。比较表明, 通过考虑钢筋、SFCB 和 GFRP 筋滑移的影响, 模拟结果与试验结果基本吻合, 表明建立的有限元模型可较好地预测试验柱抗震性能。

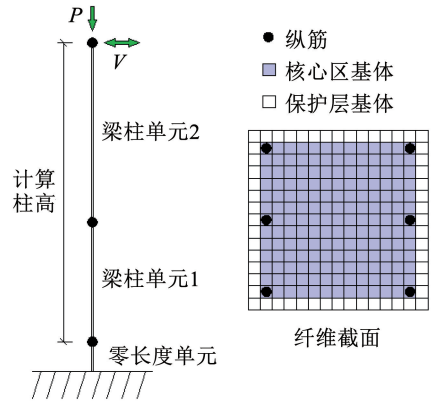


图 12 OpenSees 模型

Fig. 12 OpenSees model

#### 3.2 参数分析

基于上述 OpenSees 模型, 以 E-S 为对比试件, 进行参数分析。模型柱高为 1 200 mm, 截面尺寸为 300 mm × 300 mm, 长细比为 4。分别考虑了轴压比 (0.07/0.13/0.28)、SFCB 纵筋配筋率 (1.71%/2.53%/3.01%) 和 ECC 强度 (30 MPa/45 MPa/60 MPa) 3 个参数对墩柱滞回曲线的影响, 见图 14。

可看出随轴压比增加, 试件的峰值承载力提高, 延性下降。例如轴压比 0.28 与 0.13 相比, 试件的峰值承载力增加了 11%, 极限位移减少了 13%。SFCB 配筋率从 1.71% 增加到 2.53% 和 3.01% 时, 试件峰值承载力分别提升了 24% 和 39%。试件在 5.4% 位移角时柱底 ECC 压碎破坏明显, 承载力迅速下降。此时为超筋破坏模式, 即试件失效受基体控制, 因此极限位移无提升。ECC 强度从 30 MPa 增加到 45 MPa 和 60 MPa 时, 峰值承载力分别提升了 4% 和 11%, 影响幅度明显小于配筋率。增加 ECC 强度可充分发挥 SFCB 性能, 45 MPa 与 30 MPa 相比, 极限位移提升了 44%。因此, 工程中应合理考虑 SFCB 配筋率和 ECC 强度确保墩柱发生超筋破坏, 充分发挥两种材料性能。

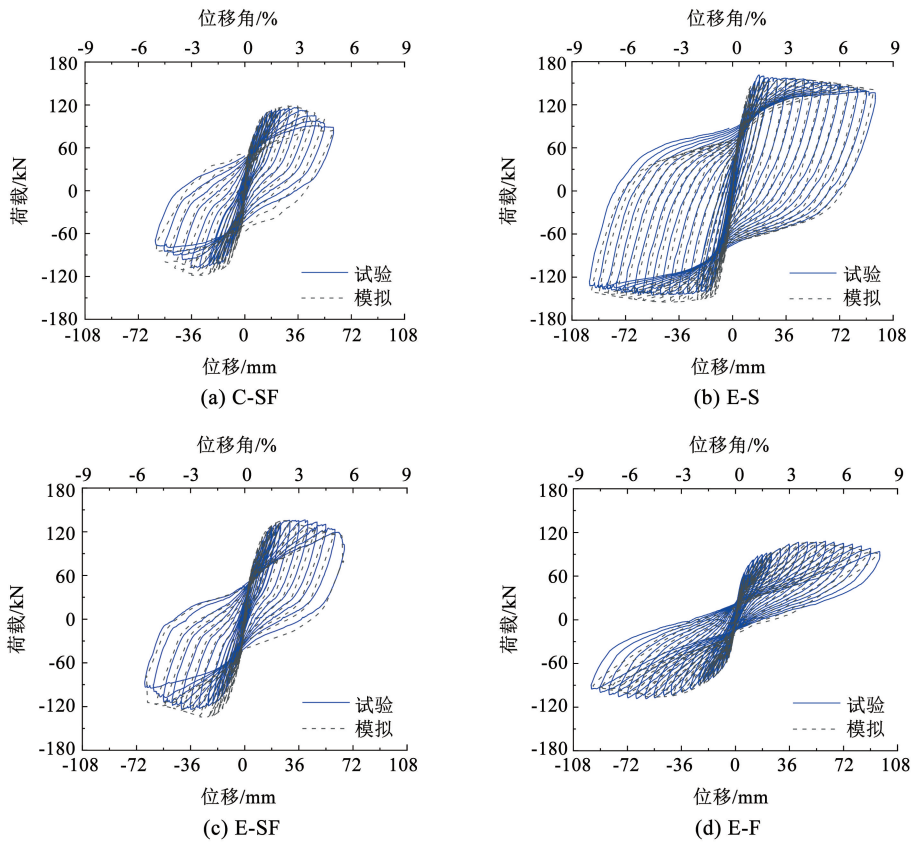


图 13 模拟与试验滞回曲线比较

Fig. 13 Comparison between simulated and test hysteretic curves

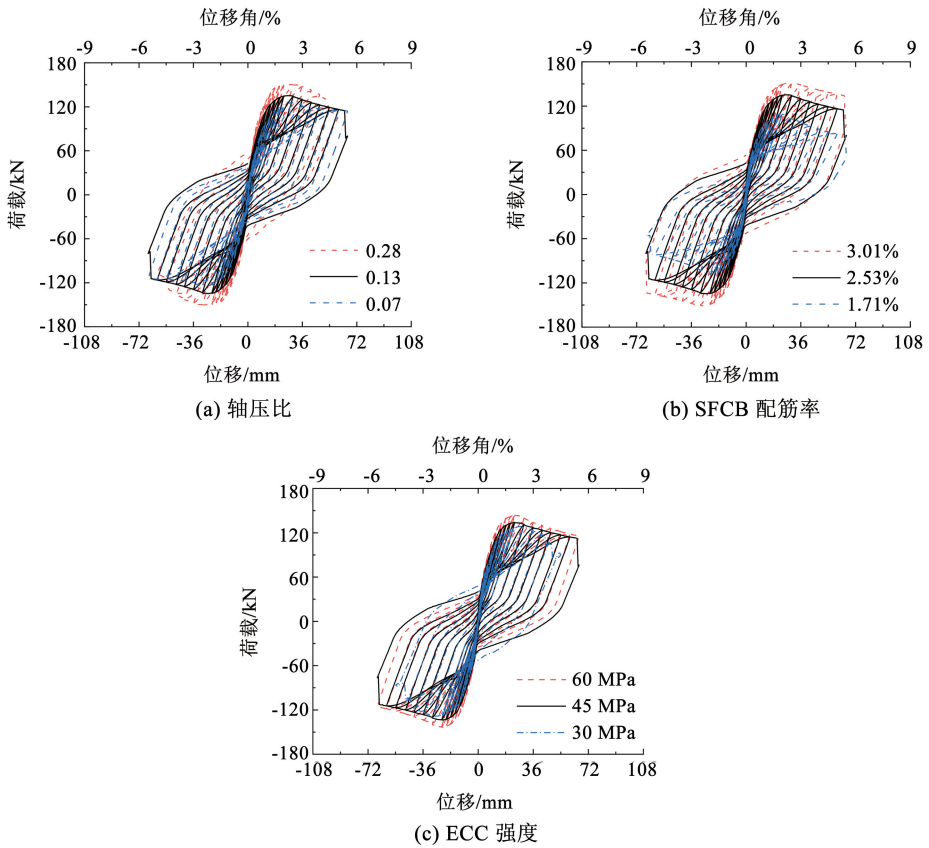


图 14 参数分析

Fig. 14 Parameter analyses

## 4 结 论

研究了 SFCB-ECC-混凝土组合柱的抗震性能和可修复性,分析了 SFCB 中 FRP 体积分数和塑性铰区基体类型的影响,在试验基础上进行了 OpenSees 有限元分析,得出以下结论:

1) SFCB 替代钢筋使试件表现出二次刚度特点,外部 FRP 层在钢筋屈服后可继续承担荷载,避免了柱脚小范围内集中转动形成过大塑性变形,从而减小基体损伤,提升可恢复性。

2) 塑性铰区 ECC 替代混凝土可进一步提升可恢复性,ECC 优异的损伤容限能力可持续为纵筋提供约束,从而抑制纵筋屈曲并降低残余位移。ECC 对墩柱初始刚度几乎无影响,E-SF 比 E-S 的平均峰值荷载和极限位移分别提升了 16% 和 24%。

3) SFCB 中 FRP 体积分数越高,试件可恢复性越大,但刚度和承载力越小。E-SF 在 2% 位移角前无需修复即可恢复正常使用。E-SF 和 E-F 的最大可修复位移角比 E-S 分别提升了 36% 和 150%,峰值承载力分别降低了 14% 和 28%。

4) 建立的有限元模型可较好地预测试验柱抗震性能。参数分析显示随轴压比增加,试件的峰值承载力提高,但极限位移下降。增加 SFCB 配筋率,试件峰值承载力提高,但发生基体失效控制的超筋破坏时,极限位移无提升。提高 ECC 强度可适当增加试件峰值承载力并提升 SFCB 利用率从而增加延性。因此工程结构应综合考虑刚度、强度和可修复性要求来设计和配置 SFCB 与 ECC。

## 参 考 文 献

- [1] 文鑫涛,李华玥,段乙好,等. 2020 年中国大陆地震灾害损失述评[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(4): 651  
WEN Xintao, LI Huayue, DUAN Yihao, et al. Earthquake disasters loss on Chinese mainland in 2020 [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021, 16(4): 651. DOI: 10.11899/zzyf20210406
- [2] NORIO O, YE T, KAJITANI Y, et al. The 2011 eastern Japan great earthquake disaster: Overview and comments [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2011, 2: 34. DOI: 10.1007/s13753-011-0004-9
- [3] CARDONE D, FLORA A, PICIONE M D L, et al. Estimating direct and indirect losses due to earthquake damage in residential RC buildings [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105801. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105801
- [4] WU Jidong, LI Ning, HALLEGATTE S, et al. Regional indirect economic impact evaluation of the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65: 161. DOI: 10.1007/s12665-011-1078-9
- [5] LU Xilin, MAO Yuanjun, CHEN Yun, et al. New structural system for earthquake resilient design [J]. Journal of Earthquake and tsunami, 2013, 7(3): 1350013. DOI: 10.1142/S1793431113500139
- [6] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: A review [J]. Landscape and urban planning, 2016, 147: 38. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.11.011
- [7] 韩强,贾振雷,何维利,等. 自复位双柱式摇摆桥梁抗震设计方法及工程应用 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 169  
HAN Qiang, JIA Zhenlei, HE Weili, et al. Seismic design method and its engineering application of self-centering double-column rocking bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 169. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2017.12.018
- [8] BAI Yulei, ZHANG Yufeng, SUN Pengxuan, et al. Experimental and numerical study on seismic performance of PEN FRP-jacketed circular RC columns [J]. Journal of Composites for Construction, 2023, 27(2): 04023001. DOI: 10.1061/JCCOF2.CCENG-3983
- [9] ZHANG Jianwei, LIU Xiao, LIU Juan, et al. Seismic performance and reparability assessment of recycled aggregate concrete columns with ultra-high-strength steel bars [J]. Engineering Structures, 2023, 277: 115426. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115426
- [10] LI Chen, LI Jiaqi, REN Qiang, et al. Durability of concrete coupled with life cycle assessment: Review and perspective [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 105041. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105041
- [11] BAHRAMIAN M, YETILMEZSOY K. Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995—2018) [J]. Energy and Buildings, 2020, 219: 109917. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109917
- [12] SEYHAN E C, GOKSU C, SARIBAS I, et al. Hybrid use of externally embedded FRP reinforcement for seismic retrofitting of substandard RC columns [J]. Journal of Composites for Construction, 2023, 27(3): 04023022. DOI: 10.1061/JCCOF2.CCENG-3906
- [13] BISCHOFF P H. Reevaluation of deflection prediction for concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars [J]. Journal of structural engineering, 2005, 131(5): 752. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:5(752)
- [14] PRAJAPATI G N, FARGHALY A S, BENMOKRANE B. Performance of concrete columns longitudinally reinforced with steel and GFRP bars and confined with GFRP spirals and cross ties under reversed cyclic loading [J]. Engineering Structures, 2022, 270: 114863. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114863
- [15] 欧进萍,张志春,周智,等. 纤维增强塑料钢绞线复合筋; CN1896436 [P]. 2007-01-17  
OU Jinping, ZHANG Zhichun, ZHOU Zhi, et al. Fibre-reinforced plastic steel twisting-wire composite rib; CN1896436 [P]. 2007-01-17
- [16] 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; CN1936206 [P]. 2007-03-28  
WU Zhishen, WU Gang, LV Zhitao. Steel-continuous-fiber composite-rib reinforced concrete earthquake-resisting structure; CN1936206 [P]. 2007-03-28
- [17] 孙泽阳,吴刚,吴智深,等. 钢-连续纤维复合筋增强混凝土柱抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 24  
SUN Zeyang, WU Gang, WU Zhishen, et al. Experimental study on seismic performance of concrete columns reinforced by steel-FRP

- composite bars [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(11): 24. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.11.017
- [18] 俞可权, 余江滔, 李凌志, 等. 可用于无筋建造的超高延性水泥基复合材料力学性能研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(2): 29
- YU Kequan, YU Jiangtao, LI Lingzhi, et al. Research on mechanical property of ultra-high ductility cementitious composites in construction without steel reinforcement[J]. *Building Structure*, 2019, 49(2): 29. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.02.006
- [19] 毛维浩. 钢-聚乙烯混杂纤维水泥基材料及其在梁柱节点中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2023
- MAO Weihao. Research on steel-polyethylene hybrid fiber engineered cementitious composites and its application in beam-column joints[D]. Chongqing: Chongqing University, 2023
- [20] 陈宇, 林熙杰, 李长辉, 等. 抗收缩工程水泥基复合材料力学性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(5): 1599
- CHEN Yu, LIN Xijie, LI Changhui, et al. Mechanical performance of anti-shrink engineering cementitious composites[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(5): 1599. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20230324.003
- [21] YUAN Fang, CHEN Mengcheng, PAN Jinlong. Experimental study on seismic behaviours of hybrid FRP-steel-reinforced ECC-concrete composite columns[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 176: 107272. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107272
- [22] YUAN Wanying, HAN Qiang, BAI Yulei, et al. Compressive behavior and modelling of engineered cementitious composite (ECC) confined with LRS FRP and conventional FRP [J]. *Composite Structures*, 2021, 272: 114200. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114200
- [23] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020
- Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020
- [24] 袁方, 赵修远. FRP 筋-钢筋增强 ECC-混凝土组合柱抗震性能研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(8): 55
- YUAN Fang, ZHAO Xiuyuan. Seismic behaviors of hybrid FRP-steel reinforced ECC-concrete composite columns[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(8): 55. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.08.0532
- [25] Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement: ASTM A615/A615M-20 [S]. West Conshohocken: American Society for Test and Materials, 2020
- [26] Standard test method for compressive properties of rigid plastics: ASTM D695-15 [S]. West Conshohocken: American Society for Test and Materials, 2015
- [27] ZHAO Debo, PAN Jun, ZHOU Yingwu, et al. New types of steel-FRP composite bar with round steel bar inner core: Mechanical properties and bonding performances in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242: 118062. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118062
- [28] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015
- Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015
- [29] 欧进萍, 韩世文, 白石. FRP-钢筋复合筋及其增强混凝土构件的等效刚度设计法[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(2): 1
- OU Jinping, HAN Shiwen, BAI Shi. FRP-steel composite bar and the equal-stiffness design method for its reinforced concrete members[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(2): 1. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.02.001
- [30] FEMA P-58. Seismic performance assessment of buildings [S]. Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2018
- [31] JSCE. Earthquake resistant design codes in Japan [S]. Tokyo: JSCE Earthquake Engineering Committee, 2000
- [32] CHANG G A, MANDER J B. Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns: Part I-Evaluation of seismic capacity [R]. Buffalo, NY: National Center for Earthquake Engineering Research, 1994
- [33] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. Open system for earthquake engineering simulation user command-language manual [M]. Berkeley, US: Pacific Earthquake Engineering Center, University of California, 2009
- [34] YASSIN M H M. Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cycling loads [D]. Berkeley: University of California, 1994
- [35] HAN T S, FEENSTRA P H, BILLINGTON S L. Simulation of highly ductile fiber-reinforced cement-based composite components under cyclic loading[J]. *ACI Structural Journal*, 2003, 100(6): 749. DOI: 10.14359/12841
- [36] ZHAO Jian, SRITHARAN S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures[J]. *ACI structural journal*, 2007, 104(2): 133. DOI: 10.14359/18525

(编辑 赵丽莹)