2025 年 4月

Apr. 2025

建筑结构

# GFRP 筋+钢筋配置对混凝土构件力学性能研究

Study on the Mechanical Properties of Concrete Members with Hybrid GFRP - Steel Reinforcement

孙佳星1,王 珂1,蔡迎春2

(1. 河南中平交科研究设计院有限公司,平顶山 467000; 2. 郑州大学 水利与土木工程学院,郑州 450000)

摘 要:通过推覆试验,研究采用 GFRP 筋+钢筋梯级配置方式的混凝土构件,在荷载作用下的裂缝扩展规 律、塑性铰分布特征及耗能机制,探讨 GFRP 筋+钢筋混凝土构件的抗震性能。结果表明:GFRP 筋的高强度与 低弹性模量特性结合钢筋的延性优势,可促使构件形成多个可控塑性区,而多塑性区的分级演化有效延缓了结 构刚度退化,使构件在强震下呈现稳定的多级屈服机制;通过 GFRP 筋与钢筋的梯级协同配筋策略,可有效调控 混凝土构件多塑性区的形成,合理控制梯级长度和配筋参数,可使梯级 GFRP 筋+钢筋混凝土构件的抗震性能增 加。研究揭示了梯级配筋对混凝土构件力学性能的增强路径,为新型组合结构抗震理论体系的完善提供了重要 参考价值。

关键词: GFRP 筋 + 钢筋配置; 推覆试验; 多塑性区; 生成机理; 力学性能; 抗震性能
 中图分类号: TU377.9
 文献标志码: A
 文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0091-06
 DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.016

SUN Jiaxing<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, CAI Yingchun<sup>2</sup>

(1. Henan Zhongping Jiaoke Research and Design Institute, Pingdingshan 467000, China;

2. Water Conservancy and Civil Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China) Abstract: Through pushover tests, this study investigates the crack propagation patterns, plastic hinge distribution characteristics, and energy dissipation mechanisms of concrete members with hybrid GFRP bar – steel bar stepped configurations under load, aiming to explore the seismic performance of GFRP – reinforced concrete composite structures. The results show that the high strength and low elastic modulus characteristics of GFRP bars combined with the ductility advantages of steel bars can promote the formation of multiple controllable plastic zones in the members, and the hierarchical evolution of multiple plastic zones effectively delays the degradation of structural stiffness, the multi – level yield mechanism of the members is stable under strong earthquake. The formation of multiple plastic zones in concrete members can be effectively regulated by the strategy of Cascade cooperative reinforcement of GFRP bars and steel bars, and the length and reinforcement parameters of the cascade can be reasonably controlled, it can increase the seismic performance of the cascade GFRP Bars + reinforced concrete members. This reveals the enhancement path of cascade reinforcement on the mechanical properties of concrete members, and provides an important reference value for the improvement of the seismic theory system of new composite structures.

基金项目: 2021 河南省科技攻关项目 (212102310289)。

作者简介:孙佳星(1987—),男,本科,高级工程师,研究方向:公路路面设计、桥梁、景观设计。 通信作者:蔡迎春(1971—),男,博士,教授,研究方向:交通基础设施安全防护理论与技术研究等。 收稿日期: 2024-12-08

**Key words**: GFRP REBAR + rebar configuration; push – over test; multi – plastic zone; generation mechanism; mechanical properties; seismic performance

## 0 引言

钢筋混凝土抗震性能一直是工程建设关注的焦 点,评估混凝土抗震性能的主要指标是构件的塑性 变形性能。改善受弯构件塑性强度需要提高塑性铰 区的配箍率,这是工程项目中常用的方法。

曾梓逸等<sup>[1]</sup>分析了 PVA 纤维高强混凝土柱对塑 性铰抗震性能的影响,试验结果显示, PVA 纤维混 凝土柱的耗能能力及延性明显提高,抗震性能良好, 剪跨比、轴压比对抗震性能的影响较为显著, PVA 纤维掺量越大影响也越大。李腾等<sup>[2]</sup>研究了静态加 载下柔性热塑性聚氨酯层级结构的吸能性与变形模 式,发现增加塑性铰数量后,层级结构的吸能能力 会增强;调整位置后层级结构发生屈曲,层级结构 的吸收能力下降。李永靖等[3]通过在混凝土骨料中 适量掺入耐碱玻璃纤维,提高其拉压比,降低弹强 比,提高混凝土的抗裂性能,使其工作性能达到最 佳。李杰等<sup>[4]</sup>以增量动力法分析了高强钢筋和水泥 基材料桥墩的地震易损性,结果显示高强钢筋和水 泥基复合材料能够有效替代普通钢筋混凝土,并改 善桥墩地震响应。刘沐宇等<sup>[5]</sup>研究了 LUHPC 增强塑 性铰的抗震性能,结果显示增强 LUHPC 后,其延 性、耗能能力及极限承载力也随之增加, 抗震性能 提高。曹周员<sup>[6]</sup>为提高钢筋混凝土柱抗震性能,在 塑性铰区采用纤维增强混凝土,结果显示其破坏模 式在增强屈服后呈剪切破坏,损伤承受力和变形能 力良好,局部应用增强纤维混凝土能够降低剪切箍 筋和约束箍筋的使用数量。蒋羽灵<sup>[7]</sup>以 ECC 水泥基 增强复合材料提高桥墩的塑性铰区抗震性能,结果 显示 ECC 塑性铰区桥墩的延性更优,且 ECC 的应变 硬化特性允许材料在开裂后仍能继续承受荷载,从而 提高了桥墩的耗能能力和延性性能<sup>[8]</sup>。

综上所述,通过强化构件的塑性铰区提高混凝 土抗震性能,且效果较为理想<sup>[9-11]</sup>。然而,塑性铰 转动性能存在相应阈值<sup>[12-13]</sup>,若改变全截面配筋率, 塑性集中区域损伤的发展将影响构件的整体抗震性 能,其塑性铰区纵向配筋率的变化也对桥墩抗震性 能有显著影响<sup>[14-15]</sup>。而当前对多塑性区混凝土构件 的研究相对较少,对构件变形能力、塑性分布及发 展程度等影响的研究更是鲜少,因此,以推覆试验 研究、评估与优化 ECC 塑性铰区抗震性能等方法, 分析多塑性区梯级 GFRP 筋+钢筋梯级配置方式对混 凝土构件抗震性能的影响。

### 1 试验设计与方法

#### 1.1 配筋方案

采用 GFRP 筋和钢筋梯级配置的方案,构建同外 力分布相适配的承载能力梯级分布,以形成多塑性 区。依据相关规范标准要求,优化 ECC 材料的配比, 在普通混凝土桥墩的基础上,模拟制作桥墩受弯试 件,见表1,其中,A、B 试件中均配置通长钢筋及 GFRP 梯级筋,且2个梯级;C 试件3个梯级,配置 有通长钢筋、梯级 GFRP 筋和耐碱玻璃纤维;试件D 为 GFRP 通长筋、GFRP 梯级筋;E 则为 GFRP 梯级 筋、通长钢筋、嵌入式梯级钢筋,GFRP 通长筋、通 长钢筋均在截面四角布置,各边中间布置梯级筋。 且五种试样均有不同的对比参数,包括梯级高度、 配筋种类、配筋量和配筋方式。

表1 各个试件的梯级配筋参数

Table 1      The step reinforcement parameters of each specimen					
试件 编号	梯级	梯级长度 /mm	钢筋型号	配筋率/%	
				钢筋条	GFRP
A	1	< 600	4φ16 钢筋条 + 4φ14GFRP	1.31	0.07
	2	$600\sim 2600$	4φ16 钢筋条	1.31	0.97
В	1	< 900	4φ16 钢筋条 + 4φ14GFRP	1.31	0.97
	2	900 ~ 2600	4φ16 钢筋条	1.31	
С	1	< 400	4&14GFRP + 10&10GFRP	1 31	
	2	400~660	$4\phi14GFRP + 6\phi10GFRP$	1.31	1.27
	3	660 ~ 2600	4φ14GFRP	1.31	0.77
D	1	< 640	4&14GFRP + 10&10GFRP		2 26
	2	640~1300	$4 \pm 14 \text{GFRP} + 6 \pm 10 \text{GFRP}$		1.76
	3	1300 ~ 2600	4φ14GFRP		0.97
Е	1	< 100	4+16 /	1 56	
	1	< 400	4010 州町 + 10010GF NF + 5010 州町	1. 30	1.18
	2	400~900	4φ10 钢肋 + οφ10GFRP + 1φ10 钢筋	1.33	0.72
	3	900 ~ 2600	4016 钢筋	1.21	

混凝土强度为 C45,纵向筋为 HRB400,通长钢筋直径 16 mm,梯级嵌入筋直径 10 mm; GFRP 筋直

径分别为10和14mm, 配比为3:1。混凝土28 d 抗 压强度为48.6 MPa, 嵌入筋抗拉、抗压强度分别为 54.3和88.2 MPa。

1.2 试验方法

试验采用推覆(Pushover)加载方法,通过逐渐 增加侧向力模拟试件的非线性变形过程,各试件多 塑性区梯级配筋结构性能。试件顶部设计安装一个 横向作动器,配以竖向作动器施加轴向荷载,试件 底部用基座固定,位移随试件水平向移动,采用三 分点加载方式,设计加载荷载恒定为20kN,试验试 件配筋模型如图1所示。



Fig. 1 Reinforcement model of each specimen

且裂缝发展较为缓慢。

## 2 混凝土构件塑性区形成机理及效果

#### 2.1 试验结果

通过有限元分析软件 OpenSees 进行加载试验, 得到不同轴压比梯级 GFRP 筋混凝土受弯试件的裂 缝分布情况。试验加载的第一梯级,试件 A 裂缝出 现较快,位移扩展为 90 mm,极限荷载时弯曲裂缝 多而细;试验加载的第二梯级,在 205 mm 位移时 裂缝扩展长度和宽度均大于 90 mm 时,此时试样底 部混凝土被压碎。试件 A 破坏的裂缝集中在距离底 端 0~300、600~800 mm 范围,第二梯级、第一梯级 的底部裂缝宽度均出现峰值。

试件 B 试验过程中,第一梯级试件出现 2 个显 著的裂缝峰值。加载 100 mm 位置出现第一个裂缝宽 度峰值,位移增加到 110 mm 位置出现第二个裂缝宽 度峰值,且随着试验静力往复加载力加大,试件裂 缝宽度幅度扩大,导致 GFRP 筋断裂。

试件 C 试验中,从第一梯级产生裂缝开始,到 第二梯级裂缝的发展加快,宽度加速扩展,直至第 三梯级混凝土裂缝宽度无明显扩展。相比之下,由 于试件 C 在加载第一梯级底部的 GFRP 筋断裂,尽管 第三梯级也有裂缝出现,但它们的宽度相对较小, 在试件 D 的试验中,第一梯级与第二梯级、第 二梯级与第三梯级、第一梯级与第三梯级,三种试 样的破坏过程和裂缝模式也有所不同。第一梯级早 期破坏时受压区混凝土先出现裂缝,位移至 152 mm 时,第三梯级的裂缝宽度比第一梯级宽且发展迅速, 而第二梯级的裂缝分布范围小,数量少,且长度略 短于第一梯级;随着加载位移增加至 272 mm 时,第 二梯级的极限荷载弯曲裂缝多而细,扩展长度和宽 度均小于第一梯级与第三梯级。试件 D 试验位移从 底端到 1450 mm 之间,随着加载位移的增加,三种 试样的裂缝宽度达到峰值,期间第二和第三个梯级 底部裂缝在位移 983 mm 直至 226 mm 处,试件发生 斜向裂缝,塑性损伤随之下移,多塑性区显现不同 的破坏特征。

试件 E 为嵌入钢筋与 GFRP 筋的混合配置,在距底端 983 mm 处先出现裂缝,而后第一和第二梯级时底部相继出现裂缝,且裂缝发展都非常迅速;增加加载位移 226 mm 时,第二和第三梯级的底部裂缝沿着嵌入层延伸至下部,嵌入层出现剥离破坏,多塑性区表现出不同的破坏特征。

2.2 多塑性区的形成与形变

从图2各试件梯级塑性发展弯矩曲率图看出,A 试件塑性区有两个,B试件有一个塑性区,C试件部 分发展形成塑性区,D试件塑性发展非常强大,E试 件形成嵌入层剥离,塑性发展均明显。从5种试件多 塑性区形成的决定条件可知,通过调整梯级长度与 配筋参数,调控各塑性区的发展程度及构件的破坏 位置,使构件中多个梯级所受外弯矩介于其屈服弯 矩与极限弯矩之间,即可促进多塑性区形成。梯级 GFRP筋混凝土受弯构件多塑性区形成机制的研究 表明,合理的梯级配筋方案能够在混凝土受弯构件 中形成多个塑性区,这些塑性区的数量和发展程度 会显著影响构件的抗震行为<sup>[12]</sup>。当受弯构件遭加载 破坏时,B试件底部呈现稍宽的裂缝,第一梯级承 担大部分正截面破坏,而其余4个试件的梯级转角 的塑性区域发展较理想,对试件顶部位移都有贡献。任意第*i*梯级对其试件顶板的位移贡献( $\Delta_i$ )可以描述为:

$$\Delta_i = \delta_i + \varphi_i \left( l - \sum_{i=1}^i h_i \right) - \delta_{i-1} - \varphi_{i-1} \left( l - \sum_{i=1}^{i-l} h_i \right) (1)$$

式中: $\delta_i$ 、 $\delta_{i-1}$ 分别为第*i*梯级的顶端位移和底端位 移; $\varphi_i$ 、 $\varphi_{i-1}$ 分别为转角;*l*为试件总长; $h_i$ 为第*i* 梯级的长度。结构在荷载作用下会发生变形,这种变 形表现为各构件的位移变化和构件截面破坏。通过多 塑性区的变形,可以在已知力的状态下计算出结构的 位移,或者在已知位移状态下计算出力的分布,确保 位移不超过允许的限值,再考虑变形协调条件,便于 结构的制作、架设、养护过程采取相应的施工措施。





## 2.3 荷载位移变化规律

当受弯构件沿剪力最大或弯矩和剪力都较大的 截面破坏时,对比各试件塑性区的形成状况。试件 A、B和C的荷载-位移曲线均呈现明显的屈服特 性。这是由于A、B和C试件均配有通长钢筋和梯级 GFRP筋;试件D仅配有GFRP筋,其位移较高。试 件E嵌入剥离,加载后承载力降低,但各塑性区发 展较为理想。各个试件荷载-位移曲线如图3。

95



图 3 各试件荷载 - 位移变化曲线 Fig. 3 Toad - displacement curve of each specimen

多塑性区的弥散性塑性分布也是构件损伤的一 种,在同侧向的位移中,多塑性构件的损伤程度较 单个塑性区构件损伤小。

### 3 多塑性区的形成机理

实质上,多塑性区主要是构建抗震功能的梯度, 而多塑性区的有效形成需要满足一定的要求,即梯 级 GFRP 筋+钢筋混凝土受弯构件多塑性区的形成要 配以合理的梯级配筋方案,使构件在外力作用下形 成多个塑性区,从而提高其抗震性能。

3.1 外力弯矩与构件抗弯能力适配性

受弯构件在荷载作用下,其承受的外力弯矩与 构件的抗弯能力必须适配,以确保结构安全性和稳 定性。受弯构件的抗弯能力主要取决于其截面尺寸、 材料性质以及配筋情况。在设计过程中,需要计算 构件的抗弯承载力,以确保其能够承受预期的弯矩 而不发生破坏。应用 XTRACT 软件计算出各试件极 限弯矩及屈服弯矩,因梯级筋端传力锚固存在承载 力渐变,需要依据相关规范确定传力锚固的长度。 各梯级截面屈服弯矩(M<sup>i</sup>) 和极限弯矩(M<sup>i</sup>) 分布 呈阶梯状,多塑性区的形成需要第*i*梯级底部承受的 外力弯矩  $(M_a^i)$  满足  $M_a^i < M_a^i < M_a^i$ 条件,说明抗弯 承载力的梯级分布及外力弯矩分布的适配性。此外, 还需满足试件结构材料的屈服强度以及约束条件等 影响因素。从图4试件破坏时塑性区的形成可知, A 试件第一梯级与第二梯级底部承受的外力弯矩接近 其截面的极限弯矩,这种变形对于吸收和耗散地震 能量至关重要。当第一梯级与第二梯级底部至极限 弯矩时,曲率分布曲线呈双峰值,塑性区都得到充 分发展。B 试件在第一梯级出现破坏后, 会在第二梯 级配筋变化的截面发生较大转角和变形,极限弯矩 具有更大的变形能力,其底部区域形成曲率分布的 峰值和一个塑性区。C试件形成了3个塑性区,并因 纤维的存在使混凝土韧性和面积承载能力增强,能 够有效吸收和分散冲击荷载,混凝土的抗冲击性能 提高。延性破坏只存在于钢筋梯级。D试件只有 GFRP 筋,各梯级底部承受的弯矩接近其极限弯矩, 曲率分布均匀,发展充分,形成3个塑性区。E试件 嵌入层剥离也促使各塑性区融合,属性分布呈弥散 形状。





## 3.2 塑性区对塑性发展的调控

为确保各塑性区塑性发展的调控效果,对各梯级的塑性发展程度进行力学调控,第*i*梯级的塑性发展程度进行力学调控,第*i*梯级的塑性发展程度确定公式为:

 $M_a^i = M_y^i + \lambda^i (M_u^i - M_y^i)$ <sup>(2)</sup>

第*i* 梯级的塑性发展程度为 $\lambda^i$ ,且设定其为1时 其余梯级塑性发展程度为 $0.8 \le \lambda^i \le 0.9$ ,此时存在 的冗余度能够应对材料性能离散、荷载偏差带来的

影响,进而提高试件的抗震性能。

破坏梯级直接决定试件破坏模式。从试验结果 看,延性破坏只存在于钢筋梯级,而配置 GFRP 筋的 梯级存在断裂破坏,嵌入钢筋梯级则出现剥落破坏。 调控塑性的发展程度能够利用对梯级长度、配筋参 数的调整来实现。

## 4 结束语

梯级 GFRP 筋 + 钢筋配筋作为一种新的配筋方 式,其多塑性区的形成与应力状态、材料的屈服准 则(如 Tresca 准则、von Mises 准则等)密切相关。 为了验证梯级配筋方案的可行性,制作了5种梯级 GFRP 筋 + 钢筋混凝土桥墩模拟试件。这些试件在低 轴力条件下进行了推覆加载试验,结果显示,梯级 GFRP 筋 + 钢筋混凝土桥墩在承载力、刚度和变形能 力方面表现出更好的抗震性能。尤其在桥墩等关键 受力构件中,受弯构件在外力弯矩下的抗弯能力适 配性是一个复杂的过程,涉及构件的受力特点、计 算其抗弯承载力、合理设计截面和配筋等多个方面, 只有通过科学的设计和计算,以确保构件外弯矩、 抗弯功能等梯级分布的适配性,调整好其参数及梯 级长度,促使多塑性区的形成和发展。

## 参考文献

- [1] 曾梓逸, 缪长青, 孙传智. 塑性铰区采用 PVA 纤维高强混凝土 柱抗震性能 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53
   (2): 242-251.
- [2] 李腾,张晨帆,邓庆田,等. 基于 TPU 材料层级结构的优化设

计及吸能特性 [J]. 高压物理学报, 2022, 36 (6): 103-114.

- [3] 李永靖,潘铖,张镇山,等. 耐碱玻璃纤维砖骨料混凝土力学
  特性试验 [J] 非金属矿, 2019, 42 (2): 87-90.
- [4] 李杰,胡元宏,梁岩,等.采用 ECC 和高强钢筋的刚构墩地震 损性分析 [J].应用基础与工程科学学报,2022,30 (4): 1028-1038.
- [5] 刘沐宇,伍峰,张强,等.采用LUHPC 增强塑性铰的预制拼装 桥墩抗震性能试验 [J].武汉理工大学学报,2021,43 (10): 39-47.
- [6] 曹周员. 塑性铰区中纤维增强混凝土的抗震性能研究 [J]. 合成纤维, 2021, 50 (9): 54-57.
- [7] 蒋羽灵. ECC 增强高墩连续刚构桥桥墩塑性铰区的抗震性能研究[D].成都:西南交通大学,2021.
- [8] 杨巍,赵永伟,闫永亮,等.中小跨径梁桥中组合橡胶支座的减隔震性能分析 [J].粉煤灰综合利用,2024,38 (1):150-154.
- [9] 邓江东,杨思远,郭春泉.梯级 GFRP 筋混凝土受弯构件多塑 性区形成机制 [J].复合材料学报,2023,40 (11):6324-6335.
- [10] 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):55-65,144.
- [11] 周浙红,付连红,陈杰.纤维增强高性能装配式钢筋混凝土梁 柱结构抗震性能分析 [J].粉煤灰综合利用,2022,36 (3): 18-23.
- [12] 许家婧,朱鹏,屈文俊. 钢筋-GFRP 筋增强混凝土梁的疲劳 力学性能 [J]. 复合材料学报,2022,39 (5):2318-2328.
- [13] 贾毅,赵人达,廖平,等. PP-ECC用于墩底塑性铰区域的抗
  震性能试验[J].中国公路学报,2019,32(7):100-110.
- [14] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述・2021[J].中国公路学报,2021,34 (2):1-97.
- [15] 贾毅, 塑性铰区采用 PP ECC 的桥墩模型抗震性能研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.

endre a contraction and the contraction of the cont

## http://www.fmhzhly.com