

塑性铰区 ECC-钢管混凝土组合截面柱抗震性能研究

汪潮源, 李 晰

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要:为研究塑性铰区 ECC-钢管混凝土组合截面柱的抗震性能,完成了 2 根 ECC-钢管混凝土组合截面柱和 1 根普通钢筋混凝土柱对比的低周反复水平荷载试验,并对试验结果得到的滞回曲线、骨架曲线、延性系数、残余位移、耗能能力等抗震性能指标进行量化分析。试验结果表明,与普通钢筋混凝土柱相比,塑性铰区 ECC-钢管混凝土组合截面柱的承载力、刚度及耗能能力均有较大程度提高,残余位移也得到有效控制,ECC 材料能够与钢管及钢管内部填充材料协同工作和共同变形。

关键词:塑性铰区;ECC;组合截面桥墩;抗震性能;低周反复水平荷载

中图分类号:U443.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)05-0010-08

Study on the seismic behavior of reinforced concrete columns with ECC-CFST composite sections in plastic hinge region

WANG Chaoyuan, LI Xi

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to study the seismic behavior of reinforced concrete columns with ECC-CFST composite sections in plastic hinge region, two reinforced concrete columns with ECC-CFST composite sections in plastic hinge region and one normal steel-reinforced concrete comparison column were subjected to low cyclic horizontal loading tests. The seismic performance index obtained from the test results including hysteresis curves, skeleton curves, ductility coefficients, residual displacements and energy dissipation capacities were quantitatively analyzed. The test results showed that compared with the normal steel-reinforced concrete column, the bearing capacity, stiffness and energy dissipation capacity of reinforced concrete columns with ECC-CFST composite sections in plastic hinge region were greatly improved, and the residual displacements were also effectively controlled. In addition, ECC material can work and deform collaboratively with steel pipe and the filling material inside the steel pipe.

Key words: plastic hinge region; ECC; composite section bridge pier; seismic performance; low cyclic horizontal loading

在强震作用下桥梁墩柱会发生不同程度的损坏^[1],结构破坏时会造成交通中断,也会给震后的桥梁修

收稿日期:2023-06-04

基金项目:山东省自然科学基金重点项目(ZR2021ME094)

作者简介:汪潮源(1998—),男,安徽舒城人。硕士,研究方向为桥梁结构抗震。E-mail:1056092235@qq.com。

复带来技术困难^[2],因此有必要加强对桥梁墩柱抗震性能和韧性^[3]的研究。为此,有学者通过研究钢管混凝土这一新型组合截面以提高传统钢筋混凝土柱的抗震性能。康洪震等^[4]进行了钢管混凝土叠合柱轴心受压试验,试验结果表明钢管可有效提高核心混凝土受压承载力;赵国藩等^[5]在国内首次开展了以 C80 高强混凝土为核心的钢管混凝土柱抗震性能试验,试验结果表明高强混凝土材料能够与钢管材料协同有效工作;李惠、HAN 等^[6-7]研究了水平荷载作用下钢管混凝土柱中核心混凝土与外包混凝土之间的荷载分配关系以及钢管混凝土柱在地震作用下的受力机理;DONG 等^[8]通过试验研究了不同内部构造对钢管混凝土抗震性能的影响;LIU 等^[9]研究了尺寸效应对方形钢管混凝土柱抗震性能的影响,试验结果表明在进行方形钢管混凝土柱结构设计时需要考虑尺寸效应;袁辉辉、JI、WANG、TIAN 等^[10-13]对钢管混凝土柱进行了抗震性能研究,试验结果表明与普通钢筋混凝土柱相比钢管混凝土柱在承载力、延性、刚度退化、耗能性能等方面均有较大程度提升,且轴压比、体积配箍率、组合截面形式、截面尺寸、剪跨比、混凝土强度等是影响钢管混凝土柱抗震性能和破坏模式的重要因素。然而,普通混凝土在水平荷载作用下易产生裂缝和发生剥落,且与钢管力学性能相差较大,在试验的加载过程中钢管外包混凝土易过早发生压溃和剥落,于是有学者提出采用高延性水泥复合材料(Engineered Cementitious Composites,ECC)材料替代钢管外包混凝土。ECC 高延性混凝土是一种基于细观力学设计原理,以水泥、石英砂等为基体的纤维增强复合材料,与普通混凝土相比,具有高强度、高韧性、高抗裂性能和高耐损伤等特点,由 LI^[14]在 1992 年提出。徐梁晋等^[15]进行了预制 ECC 套管混凝土柱抗震性能试验,试验结果表明 ECC 材料在地震作用下能有效提高钢筋混凝土柱的抗震性能和变形能力;CAI 等^[16]采用 ECC 材料外包钢管并进行低周反复水平荷载试验,试验结果表明外包 ECC 材料能有效地与内部钢管协同工作和共同变形,使得外包 ECC 钢管混凝土柱在承载力、抗震性能等方面均有较大程度提升。ECC 材料价格昂贵,实际工程中若大规模使用会提高工程造价,有必要提出一种仅在塑性铰区使用 ECC 外包钢管,而塑性铰以外区域仍使用普通混凝土外包钢管的新型组合截面柱,在提高普通钢筋混凝土柱抗震性能的基础之上减少 ECC 材料的使用量和使用区域,进而降低工程造价。为此,本文设计了 2 根塑性铰区 ECC-钢管混凝土组合截面柱和 1 根普通钢筋混凝土对比柱进行低周反复水平荷载试验,以研究塑性铰区 ECC-钢管混凝土组合截面柱的抗震性能。

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验共设计了 2 根塑性铰区 ECC-钢管混凝土组合截面柱和 1 根普通钢筋混凝土对比柱,其中塑性铰区 ECC-钢管混凝土柱编号分别为 ECC-1 和 ECC-2,普通钢筋混凝土对比柱编号为 RC。钢管尺寸及填充材料如表 1 所示。试件截面尺寸及配筋如图 1 所示,试件柱身高度均为 1400 mm,柱身水平截面尺寸均为 300 mm×300 mm,试件 ECC-1、ECC-2 钢管外径均为 203 mm,壁厚为 6 mm,高度与塑性铰区高度相同。人为规定距离柱底高度 0~400 mm 范围内为塑性铰区,距离柱底高度 400 mm 截面为组合截面叠合处,柱身与水平荷载加载方向平行的两侧为南北侧,垂直的两侧为东西侧。

表 1 试件设计参数

试件编号	钢管外径/mm	钢管内填充材料	钢管壁厚/mm	钢管外填充材料
RC	—	—	—	—
ECC-1	203	C60 混凝土	6	ECC
ECC-2	203	超高性能混凝土(UHPC)	6	ECC

1.2 材料力学性能

1.2.1 钢筋与钢管材料力学性能

纵筋直径为 12 mm,箍筋直径为 8 mm,所用钢筋均采用 HRB400 级,力学性能指标如表 2 所示;钢管采用优质碳素结构钢 20 号碳素钢无缝钢管,力学性能指标如表 3 所示。

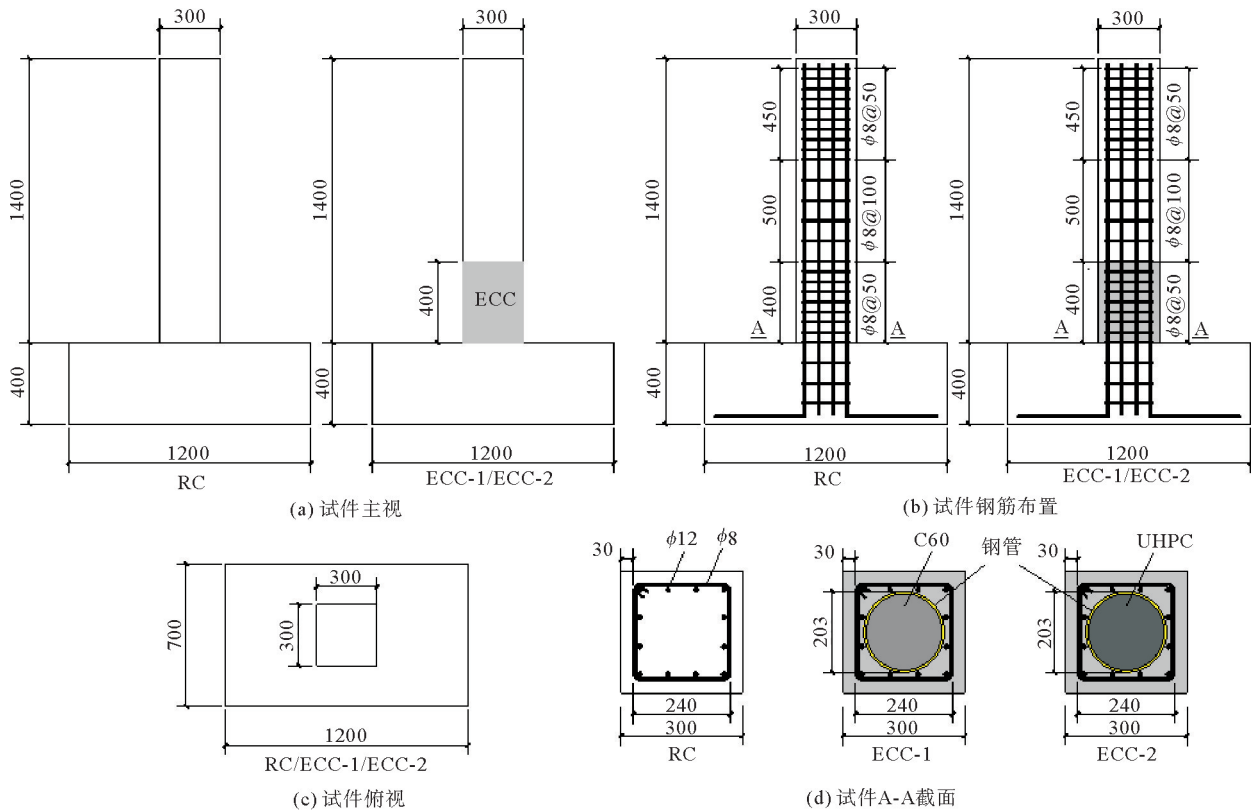


图1 试件截面尺寸及配筋(单位:mm)

1.2.2 ECC、UHPC 与混凝土材料力学性能

试件 RC 和试件 ECC-1、ECC-2 的承台及非塑性铰区采用普通商用 C30 混凝土浇筑;塑性铰区内,试件 ECC-1、ECC-2 的钢管外部均采用 ECC 浇筑,钢管内部,试件 ECC-1 采用普通商用 C60 混凝土浇筑,ECC-2 采用 UHPC 浇筑。ECC 和 UHPC 材料配合比见表 4—5; ECC、UHPC 与混凝土材料力学性能见表 6。

表 2 钢筋材料力学性能

钢筋用途	直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
箍筋	8	444.16	586.87
纵筋	12	428.54	574.93

表 3 钢管材料力学性能

材料种类	壁厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
20号碳素钢	6	298.17	458.03

表 4 ECC 材料配合比 kg/m³

水泥	粉煤灰	石英砂	水	减水剂	PVA 纤维
467	933	504	378	2	3

表 5 UHPC 材料配合比 kg/m³

水泥	水	硅灰	石英砂	膨胀剂	钢纤维	减水剂
1025	226	315	766	27	202	11

表 6 ECC、UHPC 与混凝土材料力学性能 MPa

材料	立方体抗压强度	轴心抗压强度	弹性模量
C30	50.21	38.16	20 600
C60	58.55	46.84	32 828
ECC	51.24	38.54	17 100
UHPC	115.75	107.88	47 442

1.3 加载及测量方法

低周反复水平荷载试验在青岛理工大学土木工程防灾减灾综合实验中心进行,试验加载装置如图 2 所示。试验中竖向荷载由 100 t 的液压千斤顶提供,试件轴压比均为 0.1;水平反复荷载由 50 t 的 MTS 水平作动器提供,加载高度为 1200 mm,水平荷载采用位移控制,每级增加位移 6 mm,每级位移循环 3 次,水平位移计和钢筋应变片布置如图 3 所示。

2 试验现象及破坏形态

试件 RC、ECC-1 和 ECC-2 的主要试验现象如表 7 所示,最终破坏现象如图 4 所示。加载过程中,试件 RC 的开裂荷载约为 54 kN,位移比为 $\pm 1.0\%$,裂缝距离柱底约为 120 mm,裂缝长度约为 20 mm,卸载时可观察到裂缝闭合现象;出现第 1 条水平贯穿裂缝时的荷载约为 80 kN,位移比为 $\pm 2.0\%$,裂缝距离柱底约为 150 mm,裂缝长度约为 350 mm;纵筋屈服时,水平裂缝逐渐增多并开始向两侧斜向延伸,在距离柱底 150 mm 范围内出现多条细小斜裂缝;当位移比增加至 $\pm 3.0\%$ 时,距离柱底高度 100 mm 范围内混凝土表面开始剥落,纵筋外露并有明显屈曲行为;当位移比增加至 $\pm 3.5\%$ 时,柱底两侧混凝土大面积剥落,钢筋进一步外露,柱底东西侧箍筋明显外鼓,试件破坏,停止加载。

试件 ECC-1 的开裂荷载约为 45 kN,位移比为 $\pm 0.5\%$,裂缝距离柱底约为 210 mm,裂缝长度约为 30 mm;第 1 条水平贯穿裂缝出现在东西侧的组合截面叠合处,荷载约为 92 kN,位移比为 $\pm 1.0\%$,长度约为 350 mm;当位移比增加至 $\pm 1.5\%$ 时,东西侧出现大量水平贯穿裂缝,并向南北侧延伸;当位移比增加至 $\pm 2.0\%$ 时,南北侧裂缝由两边向内侧斜向下约 45° 发展,长度由上至下逐渐增加;混凝土保护层首次剥落同样出现在组合截面叠合处,并且上下 50 mm 区域内水平裂缝数量迅速增加,混凝土保护层开始出现剥落,此时位移比为 $\pm 3.0\%$,荷载约为 132 kN;当位移比增加至 3.5% 时,组合截面叠合处出现压溃区,压溃区内混凝土退出工作,钢筋开始外露;当位移比增加至 4.0% 时,压溃区混凝土加速剥落,钢筋大面积外露,东西侧箍筋发生断裂并伴有颈缩现象,试件破坏,停止加载。

试件 ECC-2 的开裂荷载约为 62 kN,位移比为 $\pm 0.5\%$,裂缝距离柱底约为 470 mm,裂缝长度约为 180 mm;第 1 条水平贯穿裂缝出现时的荷载约为 105 kN,位移比为 $\pm 1.0\%$,裂缝距离柱底约为 470 mm,

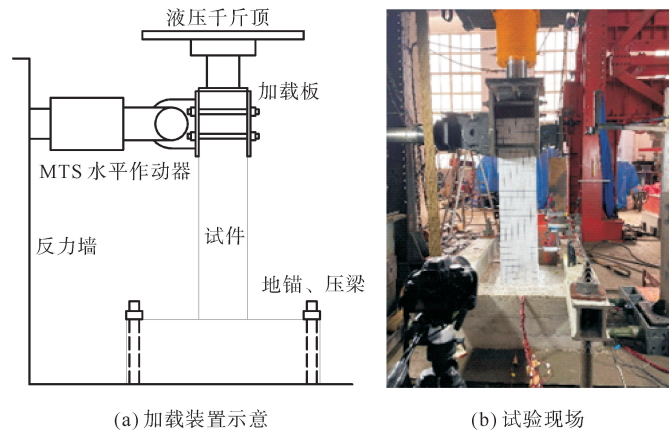


图 2 加载装置

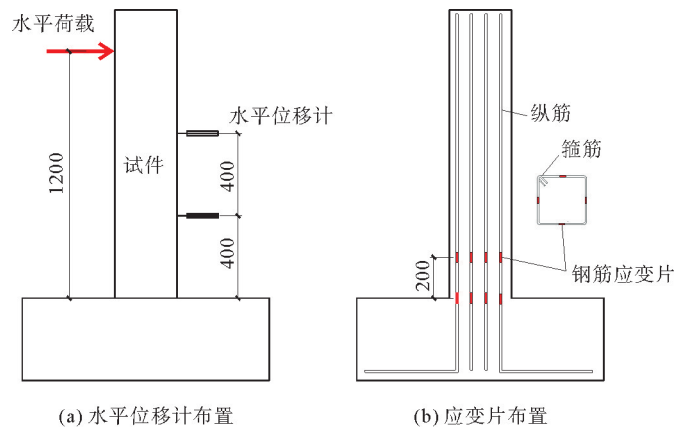


图 3 水平位移计、应变片布置示意(单位:mm)

表 7 主要试验现象

试验现象	RC	ECC-1	ECC-2
初始裂缝	荷载约 54 kN 位移比 $\pm 1.0\%$ (12 mm)	荷载约 45 kN 位移比 $\pm 0.5\%$ (6 mm)	荷载约 62 kN 位移比 $\pm 0.5\%$ (6 mm)
第 1 条水平贯穿裂缝	荷载约 80 kN 位移比 $\pm 2.0\%$ (24 mm)	荷载约 92 kN 位移比 $\pm 1.0\%$ (12 mm)	荷载约 105 kN 位移比 $\pm 1.0\%$ (12 mm)
混凝土保护层开始剥落	荷载约 75 kN 位移比 $\pm 3.0\%$ (36 mm)	荷载约 134 kN 位移比 $\pm 3.0\%$ (42 mm)	荷载约 138 kN 位移比 $\pm 3.0\%$ (36 mm)
试件破坏	荷载约 68 kN 位移比 $\pm 3.5\%$ (42 mm)	荷载约 98 kN 位移比 $\pm 4.0\%$ (48 mm)	荷载约 113 kN 位移比 $\pm 4.0\%$ (48 mm)

试件 ECC-2 的开裂荷载约为 62 kN,位移比为 $\pm 0.5\%$,裂缝距离柱底约为 470 mm,裂缝长度约为 180 mm;第 1 条水平贯穿裂缝出现时的荷载约为 105 kN,位移比为 $\pm 1.0\%$,裂缝距离柱底约为 470 mm,

裂缝长度约为 360 mm;位移比增加至 $\pm 1.5\%$ 时,裂缝集中出现在距离柱底 400~900 mm 区域内,并由两边向内侧斜向下约 45° 发展;当位移比增加至 $\pm 2.5\%$ 时,组合截面叠合处上下 50 mm 范围内集中出现细微斜裂缝且裂缝表面出现细碎混凝土颗粒,裂缝逐渐加宽;当位移比增加至 $\pm 3.0\%$ 时,组合截面叠合处下 50 mm 区域内混凝土开始剥落,纵筋开始外露;当位移比增加至 $\pm 3.5\%$ 时,组合截面叠合处形成压溃区,混凝土加速剥落,钢筋进一步外露;当位移比增加至 $+4.0\%$ 时,压溃区周围混凝土大面积脱落,钢筋大面积外露,纵筋屈曲,试件破坏,停止加载。

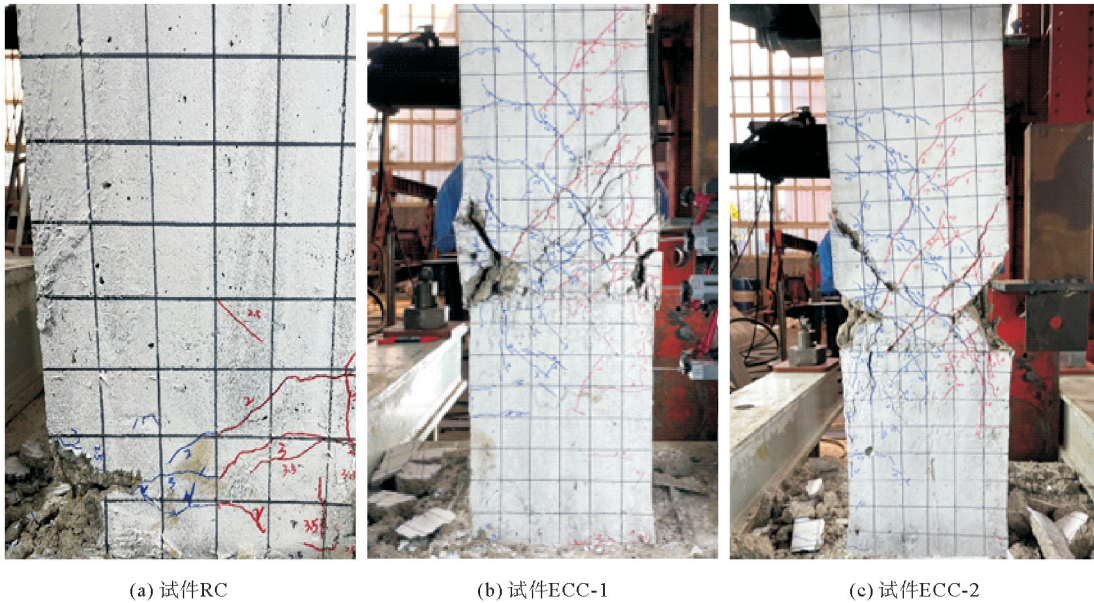


图4 试件破坏现象

3 试验结果与分析

3.1 滞回曲线

试验中得到的滞回曲线如图 5 所示。其中,试件 RC 曲线近似弓形,试件 ECC-1、ECC-2 曲线总体介于弓形和反 S 形之间,曲线中部均具有明显的捏缩效应,表明试件中出现了钢筋的黏结滑移。加载过程中,试件 RC 的加、卸载曲线基本重合,曲线单圈面积逐渐增大,承载力在达到峰值荷载后缓慢下降,直至下降到峰值荷载的 85%,停止加载;试件 ECC-1、ECC-2 的加、卸载曲线在前 5 级保持重合,曲线相对狭窄,在第 5 级之后单圈面积逐渐减小,加载至第 7 级时,塑性铰区组合截面处形成压溃区,混凝土大面积剥落,试件承载力快速下降,刚度快速退化,直至试件破坏,停止加载。

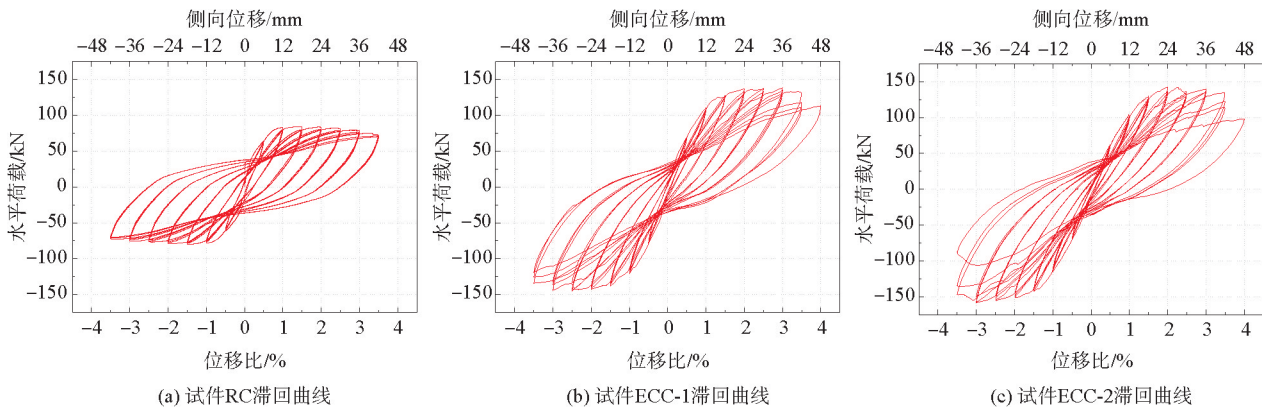


图5 试件滞回曲线

3.2 骨架曲线、延性性能

试验中得到的骨架曲线如图 6 所示,位移延性系数采用式(1)进行计算,计算结果及各试件特征点荷载、位移见表 8。

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{1}$$

式中: μ_{Δ} 为位移延性系数; Δ_u 极限位移; Δ_y 为屈服位移。

相比于试件 RC,试件 ECC-1、ECC-2 的峰值荷载和屈服荷载均有较大幅度提高,其中试件 ECC-1 的峰值荷载提高了 82.50%,屈服荷载提高了 91.80%;试件 ECC-2 的峰值荷载提高了 71.98%,屈服荷载提高了 79.96%,表明在塑性铰区采用 ECC-钢管混凝土组合截面形式可有效提高 RC 柱的承载力;加载初期,试件 ECC-1、ECC-2 具有更高的刚度,曲线斜率明显大于试件 RC;在位移比 $\pm 3.5\%$ 之后,试件 ECC-1、ECC-2 在组合截面叠合处形成了压溃区,压溃区周围混凝土快速剥落,承载力快速下降,ECC-2 下降速率略低于 ECC-1;相比于试件 RC,试件 ECC-1、ECC-2 的延性系数分别下降了 52.67%和 41.95%,表明试件 ECC-1、ECC-2 结构整体刚度较大,但塑性应变能力较弱,结构也由弯曲破坏转向弯剪破坏。

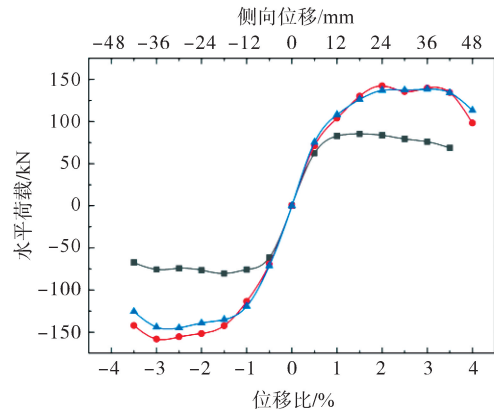


图 6 骨架曲线

—■— RC; —●— ECC-1; —▲— ECC-2

表 8 试件特征点位移、荷载及延性系数

试件	峰值点		屈服点		极限点		延性系数
	Δ_m /mm	P_m /kN	Δ_y /mm	P_y /kN	Δ_u /mm	P_u /kN	
RC	16.32	85.33	8.97	73.87	39.01	68.85	4.41
	-17.45	-80.41	-9.07	-70.41	-40.52	-67.32	
ECC-1	23.89	142.24	17.67	126.62	48.02	98.14	2.09
	-36.02	-158.49	-25.32	-150.03	-41.68	-142.33	
ECC-2	35.98	138.29	16.88	123.29	47.98	113.23	2.56
	-29.98	-145.03	-20.48	-136.35	-42.58	-125.63	

注: Δ_m 为试件峰值点位移; P_m 为试件峰值点荷载; Δ_y 为试件屈服点位移; P_y 为试件屈服点荷载; Δ_u 为试件极限点位移; P_u 为试件极限点荷载。

3.3 刚度退化

结构的刚度是指结构在荷载作用下抵抗变形的能力,本文采用割线刚度来表征试件的刚度变化^[17],计算如式(2)所示:

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \tag{2}$$

式中: K_i 为第 i 次循环时的割线刚度; $+F_i$ 、 $-F_i$ 为第 i 次循环时正、反向峰值点的荷载; $+\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$ 为第 i 次循环时正、反向峰值点的位移。

计算试件在各级加载作用下得到的刚度取正负向平均值如图 7 所示。试件 RC、ECC-2 曲线下降较为缓慢,试件 ECC-1 曲线下降相对陡峭;由于塑性铰区内置有外径 203 mm 的钢管,试件 ECC-1、ECC-2 初始刚度均大于试件 RC,其中试件 ECC-2 的初始刚度最大;在位移比 1.5%之前,试件 RC 刚度退化明显快于试件 ECC-1 和试件 ECC-2,表明塑性铰区采用 ECC-钢管混凝土组合截面形式可有效减缓加载初期

结构刚度退化;由于塑性铰区 ECC-钢管混凝土组合截面强度与普通钢筋混凝土截面强度相差较大,在位移比 2.0% 之后,试件 ECC-1、ECC-2 在组合截面叠合处逐渐形成压溃区,随荷载增加压溃区混凝土不断加速剥落,试件 ECC-1、ECC-2 在后期刚度退化速率加快,直至试件破坏。

3.4 残余位移

本次试验中,取每级加载最后 1 圈水平荷载为 0 时对应的位移为残余位移,得到试件残余位移与位移比的关系如图 8 所示。由图 8 可知,在位移比 $\pm 1.5\%$ 内,各试件曲线几乎重合;当位移比增加到 $\pm 2.5\%$ 时,试件 RC 残余位移及增长速率最大,试件 ECC-1、ECC-2 增长速率相对缓慢,

表明在塑性铰区采用 ECC-钢管混凝土组合截面可有效减小钢筋混凝土结构在水平反复荷载作用下的残余位移,进而保证构件正常使用和震后可快速修复的能力。

3.5 耗能能力

计算滞回曲线一次循环所包围的面积可得试件一次加载循环内所消耗的能量,计算每级加载下的累计耗能取正负向平均值如图 9 所示。加载初始阶段,各试件曲线相差不大,几乎重合;当位移比达到 1.5% 之后,相较于试件 RC,试件 ECC-1、ECC-2 曲线斜率逐渐增大;加载结束,相较于试件 RC,试件 ECC-1 累计耗能提高了 36.35%,试件 ECC-2 累计耗能提高了 49.48%,表明塑性铰区采用 ECC-钢管混凝土组合截面可在一定程度上有效提升试件 RC 的耗能能力。

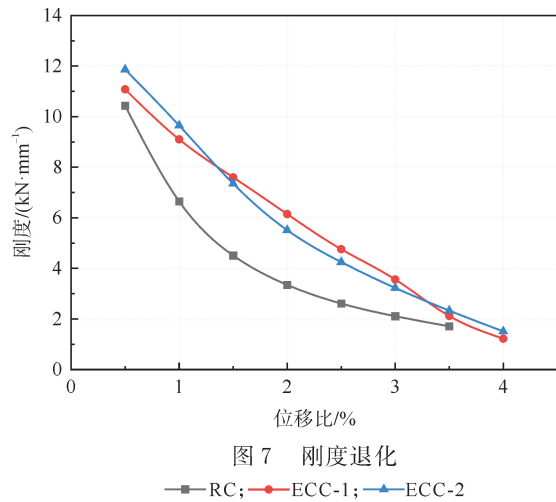


图7 刚度退化

—■— RC; —●— ECC-1; —▲— ECC-2

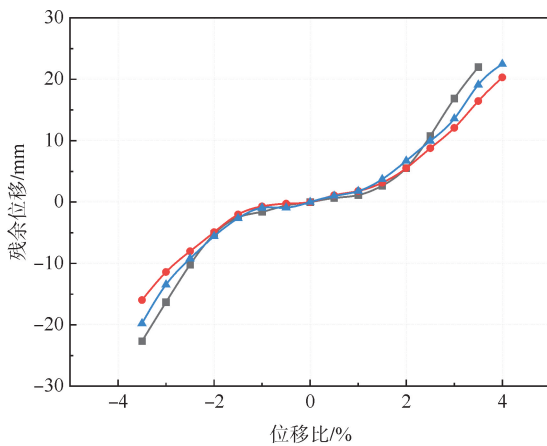


图8 残余位移

—■— RC; —●— ECC-1; —▲— ECC-2

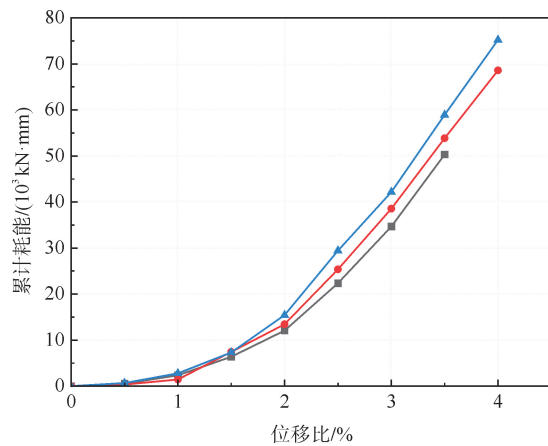


图9 累计耗能

—■— RC; —●— ECC-1; —▲— ECC-2

4 结论

本文通过低周反复水平荷载试验研究了塑性铰区 ECC-钢管混凝土组合截面柱的抗震性能,对比了试件 RC、ECC-1 和 ECC-2 在低周反复水平荷载作用下的破坏形态、承载力、延性、刚度退化和累积耗能能力,得出以下结论:

1) 在水平荷载作用下,试件 RC 的破坏现象主要为柱底东西侧混凝土大面积剥落,钢筋屈曲;试件 ECC-1、ECC-2 的破坏现象主要发生在组合截面叠合处,而采用 ECC-钢管混凝土组合截面的塑性铰区在结构破坏后仍具有较好的整体性。

2) 相较于试件 RC,试件 ECC-1、ECC-2 的承载力、刚度及耗能能力均有较大程度提高,残余位移均得

到有效控制,这得益于塑性铰区 ECC 材料变形撕裂时对荷载能量的消耗;但由于 ECC-钢管混凝土组合截面强度与普通钢筋混凝土截面强度相差过大,组合截面叠合处易发生普通混凝土压溃和剥落,试件 ECC-1、ECC-2 的延性性能均有所下降;此外,相比较于试件 ECC-1,试件 ECC-2 的刚度退化曲线下降更缓慢,表明组合截面钢管内部填充 UHPC 相较于填充 C60 可更有效减缓结构的刚度退化。

3) 通过低周反复水平荷载试验表明,在塑性铰区采用 ECC-钢管混凝土组合截面可满足钢筋混凝土柱的正常使用需求和达到震后快速修复的效果,且应用在实际工程中具有较高的性价比;钢管外部 ECC 材料与钢管及钢管内部填充材料具有良好的协同工作能力和协同变形能力,但结构的整体性及截面强度在组合截面叠合处的合理过渡还有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 袁万城,王思杰,李怀峰,等. 桥梁抗震智能与韧性的发展[J]. 中国公路学报,2021,34(2):98-117.
YUAN Wancheng, WANG Sijie, LI Huaifeng, et al. Development of intelligence and resilience for bridge seismic design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 98-117.
- [2] 韩强,贾振雷,周雨龙,等. 震后可恢复功能桥梁结构之摇摆桥梁研究综述[J]. 中国公路学报,2021,34(2):118-133.
HAN Qiang, JIA Zhenlei, ZHOU Yulong, et al. Review of seismic resilient bridge structures: rocking bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 118-133.
- [3] 倪永军,宋园,江辉. 基于韧性的摇摆桥墩桥梁抗震研究综述[J]. 北京交通大学学报,2023,47(3):1-10.
NI Yongjun, SONG Yuan, JIANG Hui. Review of resilience-based earthquake resistance for bridges with rocking columns[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(3): 1-10.
- [4] 康洪震,钱稼茹. 钢管混凝土叠合柱轴压强度试验研究[J]. 建筑结构,2006,36(S1):913-916.
KANG Hongzhen, QIAN Jiuru. An experiment study of axial compressive strength of concrete filled steel tube composite columns[J]. Building Structure, 2006, 36(S1): 913-916.
- [5] 赵国藩,张德娟,黄承连. 钢管砼增强高强砼柱的抗震性能研究[J]. 大连理工大学学报,1996(6):125-132.
ZHAO Guofan, ZHANG Dejuan, HUANG Chengkui. Research on seismic performance of high-strength concrete columns reinforced by concrete-filled steel tube[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1996(6): 125-132.
- [6] 李惠,王震宇,吴波. 钢管高强混凝土叠合柱抗震性能与受力机理的试验研究[J]. 地震工程与工程振动,1999(3):27-33.
LI Hui, WANG Zhenyu, WU Bo. Experimental research on mechanism and seismic performance of laminated column with steel tube filled with high strength concrete[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1999(3): 27-33.
- [7] HAN Linhai, YU Liaofei, ZHONG Tao, et al. Performance of concrete filled steel tube reinforced concrete columns subjected to cyclic bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8): 1607-1616.
- [8] DONG Hongying, JIA Qin, CAO Wanlin, et al. Seismic behavior of circular CFST columns with different internal constructions[J]. Engineering Structures, 2022, 260: 114262.
- [9] LIU Jin, LIANG Jian, CHEN Fengjuan, et al. Size effect on the seismic behavior of square CFST short columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 199: 107589.
- [10] 袁辉辉,程军,吴庆雄,等. 钢管混凝土混合柱抗震性能试验研究[J/OL]. 工程力学(2023-04-24)[2023-06-04]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=WYPw_9jmhsIlqM66SzcIqT-DsE0kEyuWmODb6fYZ5drggecyj8Yuh8GJ2mCQb3xgOtyMbjxPwK4Fa5RCvEfh8IKI68-7hgLJsVxKy13QOpsh2R-L0K4HXsf75_I0x6wmW2xDEeD9GZ8zM5Tl96_Iy77yMnlLXp&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
YUAN Huihui, CHENG Jun, WU Qingxiong, et al. Experimental study on seismic performance of CFST hybrid columns[J/OL]. Engineering Mechanics, (2023-04-24)[2023-06-04]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=WYPw_9jmhsIlqM66SzcIqT-DsE0kEyuWmODb6fYZ5drggecyj8Yuh8GJ2mCQb3xgOtyMbjxPwK4Fa5RCvEfh8IKI68-7hgLJsVxKy13QOpsh2R-L0K4HXsf75_I0x6wmW2xDEeD9GZ8zM5Tl96_Iy77yMnlLXp&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [11] JI Xiaodong, KANG Hongzhen, CHEN Xingchen, et al. Seismic behavior and strength capacity of steel tube-reinforced concrete composite columns[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(4): 487-505.
- [12] WANG Kun, LUO Huihui, GUO Kai, et al. Seismic collapse resistance performance on out-jacketing frames with concrete-encased CFST columns for adding storeys[J]. Structures, 2021, 33: 41-53.
- [13] TIAN Tian. Behaviour of steel tube reinforced-concrete short bridge columns under cyclic loading[J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 70(22): 1157-1174.

(下转第 26 页)