

ECC壳-RC组合墩柱抗震性能及塑性铰形成机制

王瑾 许维炳 杜修力 丁梦佳 陈彦江 方荣 闫晓宇

Seismic performance of ECC shell-RC composite pier column and its plastic hinge developing mechanism

WANG Jin, XU Weibing, DU Xiuli, DING Mengjia, CHEN Yanjiang, FANG Rong, YAN Xiaoyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240009.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CFRP筋-高强钢筋/高强混凝土柱的抗震性能

Seismic behavior of high-strength concrete columns reinforced with CFRP tendons and high-strength steels

复合材料学报. 2021, 38(10): 3463–3473 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201222.001>

低轴压比聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料中长柱抗震性能试验

Experimental study on seismic performance of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composite medium-length columns with low axial pressure ratio

复合材料学报. 2021, 38(12): 4337–4348 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210310.001>

碳纤维增强树脂复合材料加固钢筋混凝土柱抗震性能的尺寸效应试验

Experiment on the size effect of seismic behavior for reinforced concrete columns strengthened by carbon fiber reinforced plastics

复合材料学报. 2020, 37(10): 2645–2655 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200212.001>

聚乙烯醇纤维增强水泥复合材料板的冲切性能

Punching performance of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composite slab

复合材料学报. 2021, 38(3): 902–910 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200616.001>

碳纤维增强环氧树脂复合材料-铝合金短柱力学性能

Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy composite-aluminium alloy stub column

复合材料学报. 2021, 38(4): 1115–1127 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200806.001>

纤维增强树脂复合材料约束超高性能混凝土轴压性能的细观数值模拟

Meso-scale numerical simulation of axial compression performance of fiber reinforced polymer composite-confined ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1629–1638 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190827.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

ECC 壳-RC 组合墩柱抗震性能及塑性铰形成机制



分享本文

王瑾¹, 许维炳^{*2}, 杜修力², 丁梦佳², 陈彦江², 方荣², 闫晓宇³

(1. 华北电力大学 水利与水电工程学院, 北京 102206; 2. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124;

3. 国家开放大学 理工教学部, 北京 100039)

摘要: 为提升钢筋混凝土 (RC) 墩柱的抗震性能并充分利用工程水泥基复合材料 (ECC) 的力学性能, 提出了 ECC 壳-RC 组合墩柱的构造; 基于 ABAQUS 有限元软件建立了现浇 ECC 壳-RC 组合墩柱数值分析模型, 并基于既有试验结果验证; 进而探究了 ECC 节段高度、ECC 壳厚度、纵筋配筋率、体积配箍率、轴压比等参数对组合墩柱抗震性能的影响规律。在此基础上, 探讨了该型组合墩柱塑性铰形成机制。结果表明: 相较于 RC 墩柱, ECC 壳-RC 组合墩柱的承载能力、延性和耗能能力均有所提高。增加 ECC 节段高度, 组合墩柱的峰值荷载有所增加, ECC 节段高度达到 $1.4h$ (h 为截面高度) 后组合墩柱的抗震性能接近全高度 ECC 墩柱的抗震性能; 增加 ECC 壳厚度及纵筋配筋率可同时提高组合墩柱的峰值荷载及延性, ECC 壳厚度达到 $1/5h$ 后继续增加 ECC 壳厚度对提升组合墩柱抗震性能效果不明显; 增加轴压比可使试件初始刚度和峰值荷载增加, 但对延性产生不利影响; 减小塑性铰区域的体积配箍率试件延性明显降低, 而承载力变化不明显; 组合墩柱的塑性铰形成机制受 ECC 壳-RC 组合节段高度影响显著, 存在一个组合节段临界高度使该组合柱的塑性铰区不发生转移。

关键词: 抗震性能; 数值模拟; ECC 壳; ECC 壳-RC 组合墩柱; 塑性铰

中图分类号: TU528.58; TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)07-3689-15

Seismic performance of ECC shell-RC composite pier column and its plastic hinge developing mechanism

WANG Jin¹, XU Weibing^{*2}, DU Xiuli², DING Mengjia², CHEN Yanjiang², FANG Rong², YAN Xiaoyu³

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206,

China; 2. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

100124, China; 3. School of Engineering, The Open University of China, Beijing 100039, China)

Abstract: To improve the seismic performance of reinforced concrete (RC) pier column and fully utilize the mechanical properties of engineered cementitious composites (ECC), an innovative ECC shell-RC composite pier column was proposed. The numerical analysis model of the composite pier column was established and verified based on ABAQUS platform and existing experimental results, respectively. On this basis, the influence of common design parameters on the seismic performance of the composite pier column was systematically investigated, including the ECC segment height, ECC shell thickness, longitudinal reinforcement ratio, volume stirrup ratio and axial compression ratio. Finally, the plastic hinge development mechanism of the composite pier column was

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2023-12-08; 录用日期: 2023-12-29; 网络首发时间: 2024-01-10 11:45:26

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240009.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (52108428; 52178446); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2023MS067); 北京工业大学重点实验室校外开放课题资助项目 (2022B02)

National Natural Science Foundation of China (52108428; 52178446); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2023MS067); Open Research Fund of Key Laboratory of Beijing University of Technology (2022B02)

通信作者: 许维炳, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为高性能混凝土在工程结构中的应用 E-mail: weibingx@bjut.edu.cn

引用格式: 王瑾, 许维炳, 杜修力, 等. ECC 壳-RC 组合墩柱抗震性能及塑性铰形成机制 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(7): 3689-3703.

WANG Jin, XU Weibing, DU Xiuli, et al. Seismic performance of ECC shell-RC composite pier column and its plastic hinge developing mechanism[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(7): 3689-3703(in Chinese).

clarified. The results show that compared with RC pier column, the bearing capacity, displacement ductility and energy dissipating capacity of ECC shell-RC composite pier columns are improved. The peak loads of the composite pier columns increase with the ECC segment height increasing. The seismic performance of the composite pier columns can approach to that of the ECC pure pier column when the height of the ECC shell-RC composite segment is larger than $1.4h$ (Transverse dimension of the pier column h). The peak load and ductility of the composite pier column increase with the ECC shell thickness and longitudinal reinforcement ratio increasing. However, the seismic performance of the composite pier column will not significantly change when the ECC shell thickness is larger than $1/5h$. The increase of the axial compression ratio can increase the initial stiffness and peak load of the specimen, while has a negative impact on its ductility. The decreasing of the volume stirrup ratio around the plastic hinge zone will significantly decrease the ductility of the specimen, but little affect its bearing capacity. The plastic hinge development mechanism of the composite pier column is significantly influenced by the height of the ECC shell-RC composite segment. There is a minimum critical height of the composite segment to make the plastic hinge zone not transfer.

Keywords: seismic performance; numerical simulation; ECC shell; ECC shell-RC composite pier column; plastic hinge

工程水泥基复合材料 (ECC)^[1] 具有韧性强、抗拉性能好、耗能能力强等优点^[2], 但弹性模量低、价格昂贵、施工难度大等问题限制了其在工程结构中的推广应用^[3]。在结构或构件中使用全 ECC 截面显然是不经济的^[4], 而在钢筋混凝土 (RC) 梁、柱、梁柱节点等局部位置使用 ECC 不仅有利于发挥其性能, 同时可以有效地降低其用量, 提高应用 ECC 的性价比。有鉴于此, 国内外学者对 ECC-RC 组合构件/节点力学性能开展了系列研究。

梁-板式构件方面, Yuan 等^[5] 通过数值仿真研究了 ECC/RC 组合梁的受弯性能, 探究了 ECC 位置和 ECC 厚度等对组合梁受弯性能的影响。结果表明: 受拉区 ECC 厚度增加, 组合梁极限弯矩增加、最大裂缝宽度降低。受压区采用 ECC 会显著增加组合梁的挠度, 但对其极限弯矩影响不大。Zhang 等^[6] 通过四点弯曲试验指出 ECC 可提高 RC 梁的抗剪承载力, 可替代部分箍筋的作用。陈全胜等^[7] 设计并完成了钢-混凝土-ECC 组合梁的单调加载试验, 指出 ECC 组合梁的屈服荷载和极限荷载高于传统钢-混凝土组合梁。白亮等^[8] 通过静力加载试验指出压型钢板-ECC 组合楼板具有良好的纵向剪切性能。廖桥等^[9] 通过四点弯曲试验探究了超高强钢筋 ECC 梁受弯性能, 指出 ECC 材料的引入可以减少钢筋用量并增强梁的控裂能力和延性性能。Xu 等^[10] 通过有限元分析研究了钢筋 ECC 梁的塑性铰区长度, 并探讨了 ECC 抗拉/压强度、钢筋屈服强度、梁截面尺寸等参数对其塑性铰长度的影响。

柱式构件方面, Billington 等^[11] 通过试验验证

了 ECC-RC 装配式组合柱能够提高装配式 RC 柱的耗能能力。Cho 等^[12] 指出在塑性铰区使用 ECC 不仅能够提高柱式构件的侧向承载力、变形和耗能能力, 同时能够大幅降低其受弯临界区的弯剪斜裂缝。Shan 等^[13] 通过数值仿真指出 ECC 柱和 RC/ECC 组合柱具有更高的承载力和延性; 且仅在柱底 1.2 倍截面高度区域使用 ECC 材料即可取得等同全 ECC 柱的效果。Mohebbi 等^[14] 将 ECC 应用于装配式双柱墩塑性铰区来提高其变形能力, 并通过振动台试验验证了该型构造的有效性。Xu 等^[3, 15] 也通过试验研究指出柱底塑性铰区采用 ECC 可有效改善构件的抗震性能。为进一步节约 ECC 材料用量, Zhang 等^[16] 提出将预制聚丙烯 (PP)-ECC 壳应用于 RC 柱塑性铰区, 并通过试验和数值仿真指出 ECC 壳能够提升墩柱的力学性能和抗震性能^[17]。Li 等^[18] 则通过拟静力试验指出塑性铰区采用 ECC 壳的桥墩能够达到塑性铰区全 ECC 桥墩的承载力和延性。此外, 王新玲等^[19-20]、Deng 等^[21]、Di 等^[22] 则通过试验分别验证了 ECC 壳对组合试件约束效果、剪切变形能力、极限位移和耗能能力的提升作用。

梁柱节点方面, 程彩霞^[23] 通过试验指出使用 ECC 材料可在保证结构抗剪强度和延性的前提下减少节点区配箍率。Said 等^[24] 通过低周往复试验研究了 T 型梁柱边节点的抗震性能。结果表明: 相比 RC 节点, ECC 节点在破坏前形成了大量的细密裂缝, 节点的受弯承载力、抗剪强度、延性和耗能能力均有所提高。董胜等^[25] 通过非线性数值分析指出节点后浇 ECC 能够明显提高节点的延

性和耗能能力。Suryanto 等^[26]通过拟静力试验指出 ECC-RC 组合梁柱节点滞回曲线较饱满,残余位移较小,承载能力和耗能能力均有所提高,且破坏时 ECC-RC 试件的节点核心区完好无损。此外,Zhang 等^[27]通过试验验证了 ECC 的引入可适当降低 T 型节点试件的配箍率而不影响试件的峰值荷载,且可获得更大的累积耗能。既有研究成果表明,在梁板下缘、柱塑性铰区、梁柱节点等关键位置应用 ECC 能够提高 RC 构件的承载能力、延性、耗能能力、裂缝控制能力以及抗震性能。而在上述关键位置采用 ECC 壳构造来代替全截面 ECC 则可能会降低 ECC 的用量,并进一步发挥 ECC 的材料力学性能。

有鉴于此,本文以钢筋混凝土墩柱为研究对象,提出了一种带 ECC 壳的 RC 组合墩柱构造,基于 ABAQUS 有限元软件建立了 ECC 壳-RC 组合墩柱数值分析模型,并通过既有试验结果验证;进而探究了 ECC 节段高度、ECC 壳厚度等参数对 ECC 壳-RC 组合墩柱抗震性能的影响规律;在此基础上,分析讨论了 ECC 壳-RC 组合节段高度对该型墩柱塑性铰形成机制的影响。

1 ECC 壳-RC 组合墩柱构造及数值模型建立

1.1 基本构造

ECC 壳-RC 组合墩柱的构造如图 1 所示,其以常见的 RC 墩柱为基础,在 RC 墩柱的柱端设置具有一定厚度和高度的 ECC 壳体,形成带 ECC 壳的 RC 组合墩柱。该型墩柱的现浇施工过程与 RC 墩柱类似,包括钢筋绑扎、ECC 壳体/混凝土支模和施工。为增加 ECC 壳体和混凝土内芯界面的粘结力,可采取模板内侧粘贴泡泡膜、界面凿毛和局部配筋等界面处置方式^[28]。

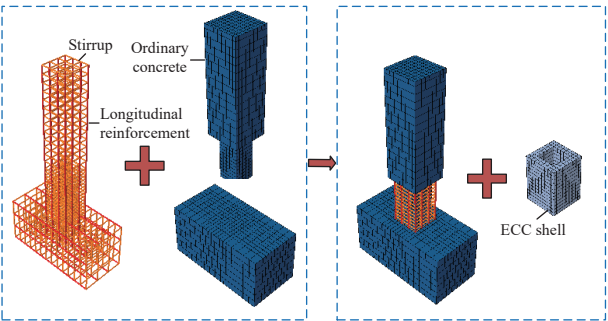


图 1 工程水泥基复合材料(ECC)壳(节段)-钢筋混凝土(RC)组合墩柱构造

Fig. 1 Engineered cementitious composites (ECC) shell (segment)-reinforced concrete (RC) composite pier structure diagram

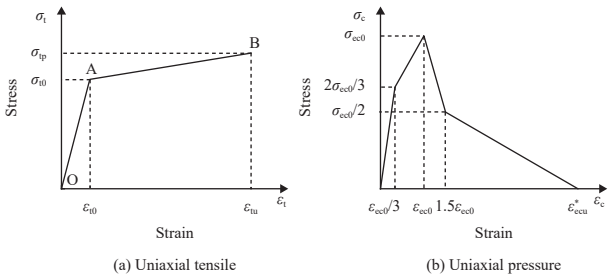
需要指出的是,ECC 壳的引入会造成墩柱制作过程中分层、分阶段施工,而为了减少分层、分阶段施工的方式对施工难度和施工周期的影响,一方面应优化 ECC 壳的设置范围,另一方面可考虑采用工厂预制的方式。

1.2 模型建立

基于 ABAQUS 平台建立 ECC 壳-RC 组合墩柱的数值仿真模型。其中,墩柱、承台 RC 和 ECC 壳均采用 C3D8R 实体单元模拟;钢筋采用 T3D2 桁架单元模拟;ECC 和 RC 的非线性行为采用 ABAQUS 提供的塑性损伤模型模拟。偏于安全,数值仿真过程中未考虑箍筋和 ECC 壳的约束作用^[22, 29],RC 本构模型采用《混凝土结构设计规范》(GB/T 50010—2010^[30])提供的普通混凝土本构模型;由于 ECC 具有优异的拉伸变形能力,实际应用时很难达到其拉伸极限状态,ECC 受拉本构模型采用具有应变-硬化特征的双线性本构模型^[31],见图 2(a)。该模型的本构关系可用下式表示^[32]:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E_t \varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_{t0} \\ \sigma_{t0} + E_{tu}(\varepsilon - \varepsilon_{t0}), & \varepsilon_{t0} < \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_t 为初始弹性模量(GPa), $E_t = \sigma_{t0}/\varepsilon_{t0}$; σ_{t0} 为名义初裂强度(MPa),即应变-硬化段拟合直线和弹性段拟合直线的交点($\varepsilon_{t0}, \sigma_{t0}$)所对应的应力值; ε_{t0} 为名义初裂应变,即应变-硬化段拟合直线和弹性段拟合直线的交点($\varepsilon_{t0}, \sigma_{t0}$)所对应的应变值; E_{tu} 为应变-硬化阶段弹性模量(GPa), $E_{tu} = (\sigma_{tp} - \sigma_{t0})/(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{t0})$, σ_{tp} 为极限抗拉强度(MPa), ε_{tu} 为极限拉应变。对于立方体抗压强度标准值为 40 MPa 的 ECC, σ_{t0} 取 4.0 MPa, ε_{t0} 取 0.00021, σ_{tp} 取 5.0 MPa, ε_{tu} 取 0.03。



$\sigma_v, \sigma_{tp}, \sigma_{t0}$ —Tensile stress, ultimate tensile strength, nominal cracking strength; $\varepsilon_v, \varepsilon_{tu}, \varepsilon_{t0}$ —Tensile strain, ultimate tensile strain, nominal cracking strain; σ_c, σ_{ec0} —Compressive stress, peak compressive stress; $\varepsilon_c, \varepsilon_{ec0}, \varepsilon_{ecu}^*$ —Compressive strain, peak compressive strain, ultimate compressive strain

图 2 ECC 本构关系模型

Fig. 2 ECC constitutive relation model

ECC 受压本构模型采用 Yuan 等^[5] 提出的单轴压缩荷载下 ECC 材料的本构模型, 本构关系可用式 (2) 表示, 其应力-应变曲线见 图 2(b)。

$\sigma_{ec}(\varepsilon_c) =$

$$\begin{cases} \varepsilon_c \frac{2\sigma_{ec0}}{\varepsilon_{ec0}}, & \varepsilon_c \leq \frac{\varepsilon_{ec0}}{3} \\ \frac{2\sigma_{ec0}}{3} + \left(\sigma_{ec0} - \frac{2\sigma_{ec0}}{3}\right) \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{ec0}/3}{\varepsilon_{ec0} - \varepsilon_{ec0}/3}\right), & \frac{\varepsilon_{ec0}}{3} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ec0} \\ \sigma_{ec0} + \left(\frac{\sigma_{ec0}}{2} - \sigma_{ec0}\right) \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{ec0}}{1.5\varepsilon_{ec0} - \varepsilon_{ec0}}\right), & \varepsilon_{ec0} < \varepsilon_c \leq 1.5\varepsilon_{ec0} \\ \frac{\sigma_{ec0}}{2} - \frac{\sigma_{ec0}}{2} \left(\frac{\varepsilon_c - 1.5\varepsilon_{ec0}}{\varepsilon_{ecu}^* - 1.5\varepsilon_{ec0}}\right), & 1.5\varepsilon_{ec0} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ecu}^* \end{cases}$$

(2)

式中: σ_{ec0} 为峰值压应力 (MPa); ε_c 为 ECC 压应变; ε_{ec0} 为峰值压应力对应的压应变; ε_{ecu}^* 为极限受压应变。对于立方体抗压强度标准值为 40 MPa 的 ECC, σ_{ec0} 取 26.8 MPa, ε_{ec0} 取 0.005, ε_{ecu}^* 取 0.012。

鉴于实际应用时需要确保 ECC 壳与混凝土内芯的界面粘结力, 而凿毛清洗+胶结剂、局部配筋等界面处置措施满足这一要求^[33]。为不失一般性, 本文数值仿真分析中假定界面粘结稳定、有效, 采用“Tie”绑定接触来模拟 ECC 壳与混凝土内芯之间的界面关系。钢筋与 ECC、混凝土之间的粘结滑移均采用方自虎等^[34] 提出的四节点粘结滑移单元模拟。承台底采用固定约束边界条件。为避免局部应力集中, 在试件侧面 (水平往复荷载施加面) 和顶面 (轴压力施加面, 调整轴压比) 均设置钢垫板, 钢垫板与墩柱侧面和顶面加载面采用“Tie”约束, 侧面和顶面钢垫板上分别设置参考点 RP-1 和 RP-2, 并与钢垫板加载面耦合。根据模型的受力特点并综合考虑模型计算精度、计算效率和收敛性, 确定有限元模型网格尺寸^[35]。其中潜在塑性铰区网格尺寸为 50 mm, 其他部分网格尺寸为 100 mm。

1.3 模型验证

基于前述的建模过程, 分别建立陈科旭^[36] 和 Zhang 等^[16] 开展的 ECC-RC 组合墩柱试验模型的数值分析模型。试件基本信息见 表 1, 其他信息参见文献^[36] 和^[16]。图 3 给出了 S1 试件的有限元模型。

表 1 试件具体信息

Table 1 Specific information of the specimens

Specimen	H/mm	b×h/mm ²	h _e /mm	t/mm
S1	1 400	300×300	400	150
S2				100

Notes: H—Pier height; b—Section width; h—Section height; h_e—ECC height; t—ECC shell thickness.

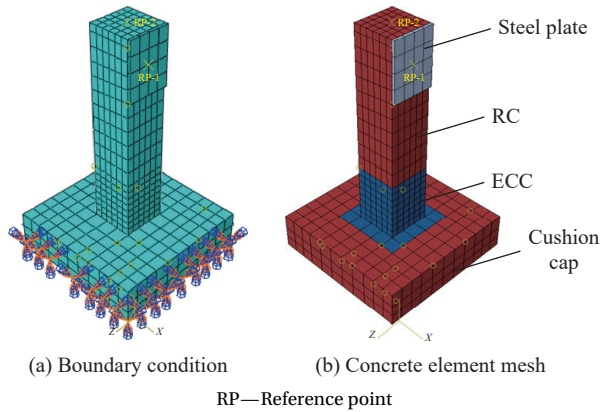


图 3 模型边界条件及网格划分示意图

Fig. 3 Model boundary conditions and meshing diagram

为验证模型的有效性, 图 4 给出了低周往复荷载作用下验证模型的 PEEQ 损伤云图。对比试验结果可知, 两个试件的混凝土损伤分布较为均匀, 表明 ECC 具有良好的裂缝控制能力。数值模

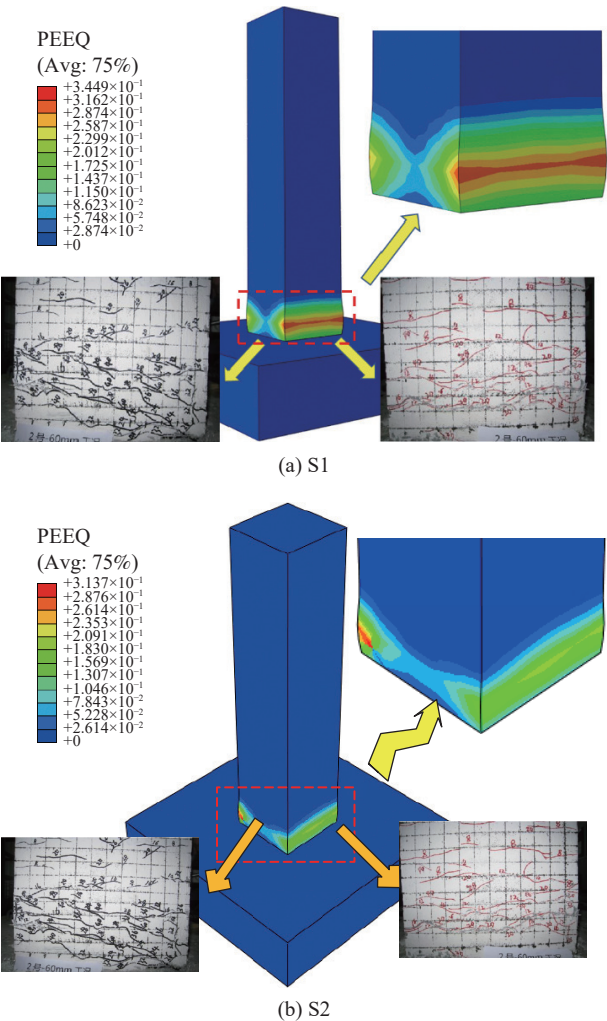


图 4 模拟等效塑性应变 (PEEQ) 云图

Fig. 4 Simulated equivalent plastic strain (PEEQ) cloud images

拟所得两个试件的损伤位置和范围均与试验结果基本吻合, 本文数值模拟方法可有效模拟试件的失效模式和损伤分布。图 5 给出了试验和数值模拟所得各试件滞回曲线的对比。表 2 给出了各试件抗震性能指标对比。

由图 5 和表 2 可知, 数值模拟和试验研究所得滞回曲线的形状和变化规律基本相似, 滞回曲线的“捏缩”效应明显。然而达到峰值位移后, 有限元分析结果的软化行为不如试验结果严重。主要原因为: (1) 在不影响极限状态前模拟结果准确性的前提下, 为节约分析时间数值模拟采用单次循环加

载^[22, 37], 而试验采用三循环加载, 相同加载位移条件下试验试件的损伤更为严重; (2) 数值模拟过程中的材料、边界、荷载参数均较为理想, 而试验条件下相关参数的不确定性更大。综上可知, 数值模型能较好地反映钢筋与混凝土之间的粘结滑移现象, 可清晰地反映试件的强度和刚度退化等特性, 相关有限元模型建模和参数选取方法有效。

2 ECC 壳-RC 组合墩柱抗震性能参数影响分析

ECC 壳-RC 组合墩柱的基准设计信息和整体布置图见表 3 和图 6。基于第 1 节的数值建模和参

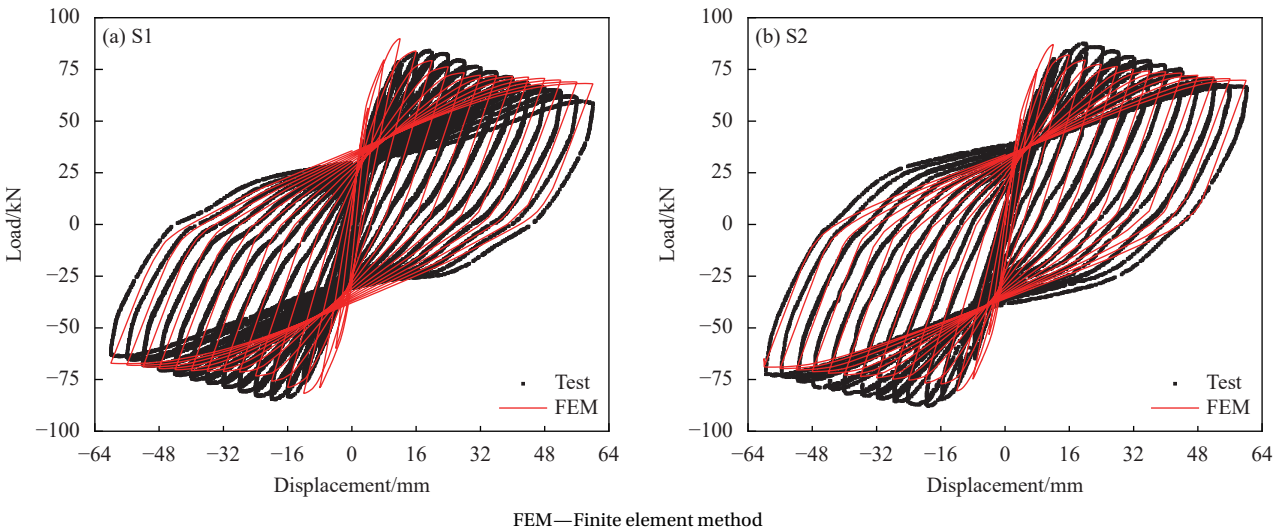


图 5 试验和模拟滞回曲线对比

表 2 试件抗震性能指标							
Table 2 Seismic performance index of the specimen							
Specimen		Yield displacement/mm	Yield load/kN	Peak load/kN	Ultimate displacement/mm	Ultimate load/kN	
S1	Positive	Test ^[36]	8.20	65.46	86.89	60	65.77
		FEM	7.04	78.65	89.31	60	67.23
		Error	14.10%	-20.15%	-2.79%	0%	-2.22%
	Negative	Test ^[36]	-9.20	-68.47	-86.85	-60	-71.90
		FEM	-7.26	-70.67	-81.26	-60	-66.42
		Error	21.09%	-3.22%	6.44%	0%	7.62%
S2	Positive	Test ^[16]	7.39	64.24	87.20	60	60.37
		FEM	8.42	76.14	86.85	60	69.64
		Error	-13.94%	-18.52%	0.40%	0%	-15.36%
	Negative	Test ^[16]	-8.31	-63.16	-87.35	-60	-66.48
		FEM	-7.27	-70.76	-80.34	-60	-68.84
		Error	12.52%	-12.03%	8.03%	0%	-3.55%

表 3 ECC 壳-RC 组合墩柱基准设计参数					
Table 3 Benchmark parameters of ECC shell-RC composite pier column					
Parts	$z \times b \times h / \text{mm}^3$	Material	Longitudinal reinforcement	Stirrups (Encrypted zone)	Axial compression ratio n
Pier	2 000×450×450	C40/E40	12C18	A10@100 (A10@50)	0.2
Cushion cap	700×1 400×700	C40		A10@100	—

Note: z—Height of the part.

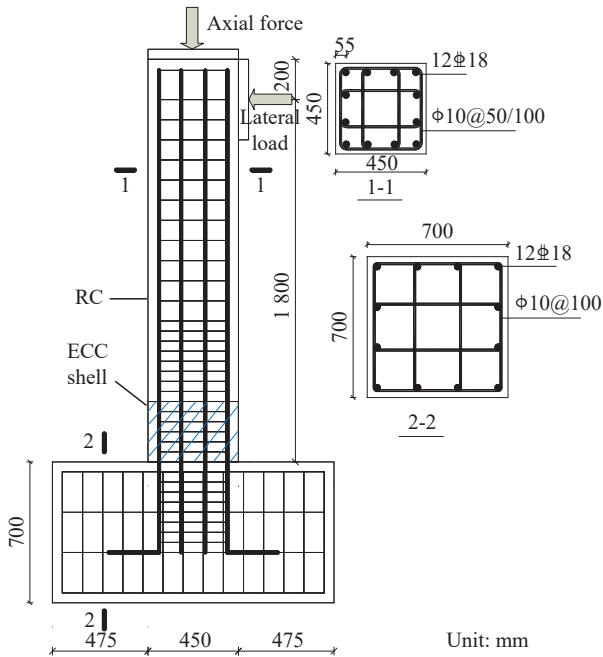


图 6 ECC 壳-RC 组合墩柱整体布置图

Fig. 6 Overall layout of ECC shell-RC composite pier column

数选取方法，本节重点探讨了ECC 节段高度、ECC 壳厚度、纵筋配筋率、体积配箍率、轴压比等参

数对该型组合墩柱抗震性能的参数影响规律。

2.1 ECC 节段高度 h_e

将现浇 ECC 壳-RC 组合墩柱的 ECC 壳厚度 t 定义为 225 mm (ECC 节段)，其他参数见表 3。不同 ECC 节段高度 h_e 条件下组合墩柱的滞回曲线、骨架曲线、平均割线刚度 (K_s)/初始刚度 (K_0)-位移曲线、累积耗能曲线、延性系数曲线如图 7 所示。

由图 7(a) 可知，与 RC 柱 ($h_e=0$ mm) 相比，组合墩柱滞回曲线“捏缩”效应有所改善，残余位移减小，且随 ECC 节段高度 h_e 增加，组合墩柱试件的滞回曲线越来越饱满。由图 7(b) 可知，随 h_e 增加组合墩柱初始刚度降低，这是由于 ECC 的弹性模量比混凝土低。随 h_e 的增加，组合墩柱的屈服位移呈先增大后减小的趋势。这是由于当 $h_e \leq 450$ mm 时，组合墩柱的塑性铰转移到了 ECC 节段上部 RC 区域 (图 8)；当 $h_e > 450$ mm 时，塑性铰开始在墩底出现，且随着 h_e 增加 ECC 节段上部塑性铰长度减少，底部塑性铰长度增加，试件屈服位移减小、极限位移增加、延性系数增加 (图 7(e))。组合墩柱峰值荷载随 h_e 的增加而提高，但增幅呈

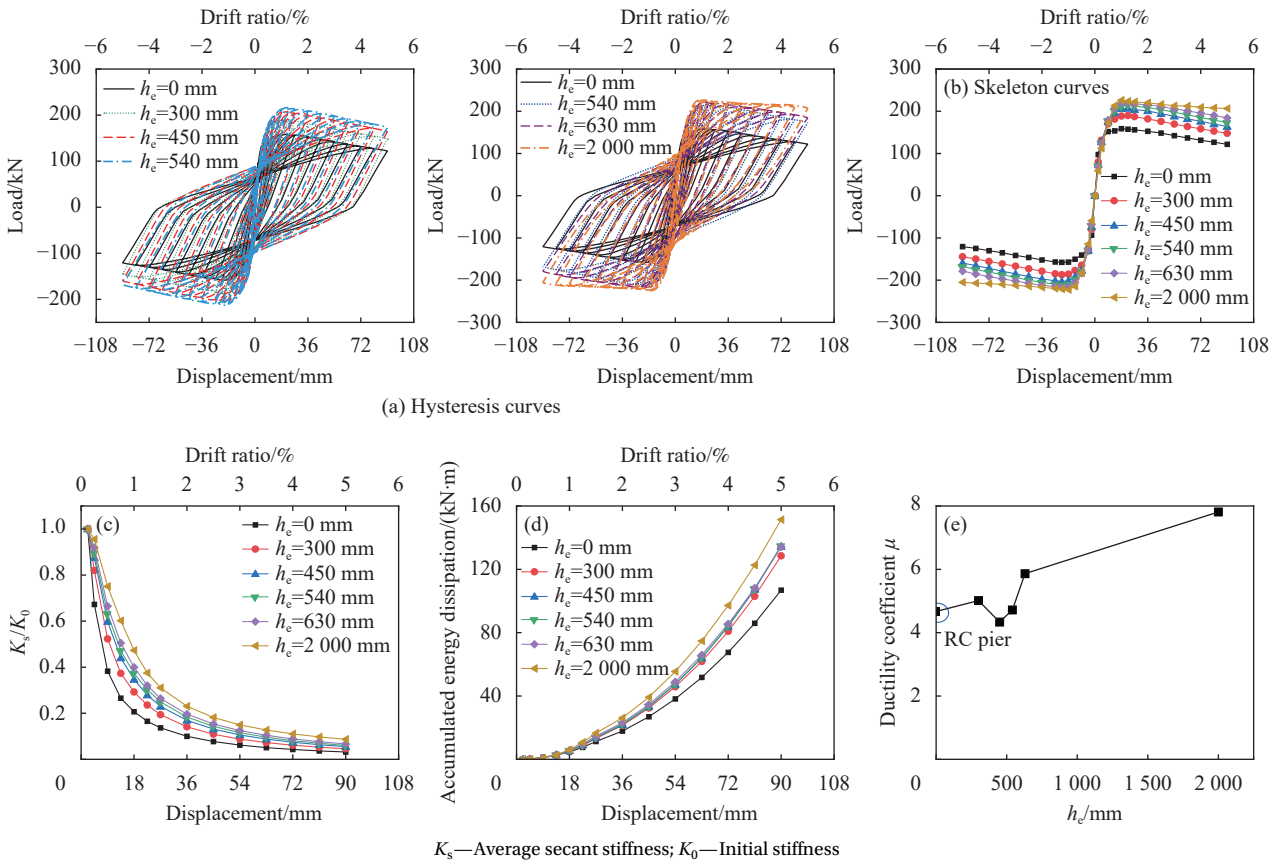


图 7 ECC 节段高度 h_e 的影响

Fig. 7 Effect of ECC segment height h_e

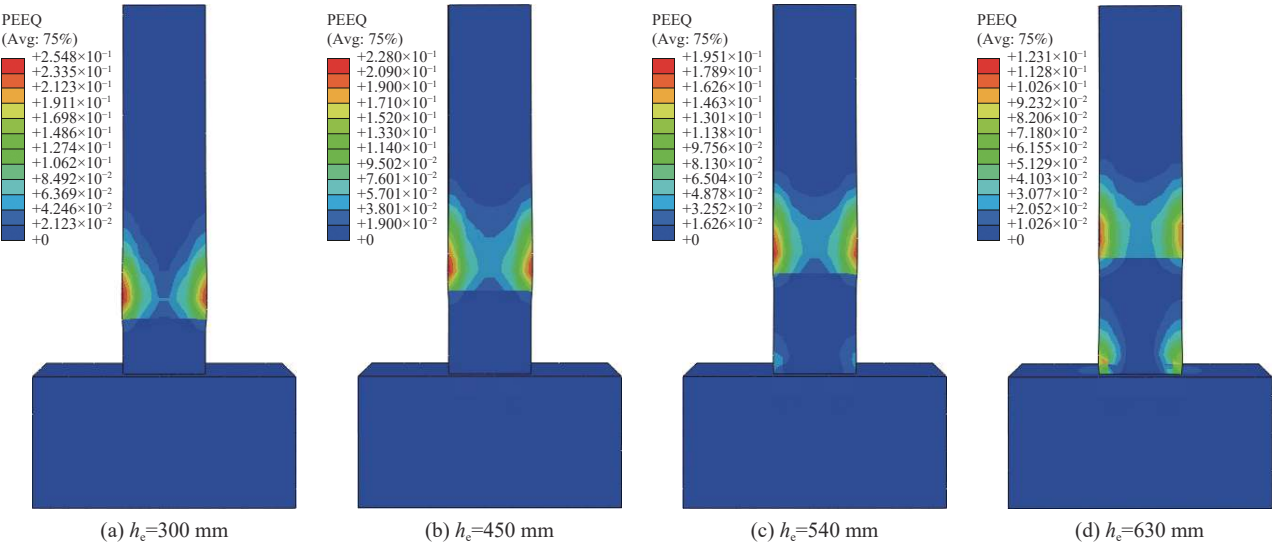


图 8 不同 h_e 试件 PEEQ 云图

Fig. 8 PEEQ cloud diagram of specimens with different h_e

减小趋势。当 $h_e=630\text{ mm}$ 时, 组合墩柱的峰值荷载、极限位移分别为全高度 ECC 墩柱的 0.97 倍和 0.94 倍, 说明 ECC 节段高度达到 $1.4h$ (h 为试件截面高度) 时组合墩柱的抗震性能接近全高度 ECC 墩柱的抗震性能。由图 7(c) 可知, 随 ECC 节段高度 h_e 增加, 组合墩柱的刚度退化变缓, 这是由于 ECC 具有优异的裂缝控制能力。由图 7(d) 可知, 组合墩柱的累积耗能随 h_e 增加而增大, 增幅达 25.15%~173.17%。综上, ECC 壳-RC 组合墩柱的组合截面高度推荐值为 $1.2h\sim1.4h$, 此时可充分发挥 ECC 的力学性能并降低成本。

2.2 ECC 壳厚度 t

基于 2.1 节内容, ECC 高度 h_e 取为 630 mm, 其他参数见表 3。分别设定 ECC 壳厚度 t 为 0 mm (RC)、30 mm、60 mm、90 mm、120 mm、150 mm 和 225 mm ($0.5h$, 全 ECC 墩柱)。不同 t 时组合墩柱的滞回曲线、骨架曲线、 K_s/K_0 -位移曲线、累积耗能曲线、延性系数曲线见图 9。

由图 9(a) 可知, 与 RC 墩柱相比, 随 t 增加, ECC 壳-RC 组合墩柱滞回曲线趋于饱满, “捏缩”效应更小, 达到峰值荷载后承载力下降缓慢, ECC 壳-RC 组合墩柱具有良好的耗能能力。当 $t\geq 90\text{ mm}$ ($0.2h$) 时, 试件的滞回环几乎重合, 增加 t 对提升组合墩柱抗震性能效果不明显, 这也从侧面说明了 2.1 节获得的较优全截面 ECC 节段高度可作为较优的 ECC 壳-RC 组合节段高度。由图 9(b) 可知, 随 t 增加组合墩柱初始刚度逐步降低。相比 RC 墩柱, 当 t 从 30 mm 增加到 225 mm 时, 组

合墩柱屈服位移增加了 30.97%~61.16%, 峰值荷载提高了 21.52%~37.93%, 极限位移提高了 25.07%~38.51%, 延性系数提高了 19.9%~30.2%。由图 9(c) 可知, 随 t 增加, 组合墩柱的刚度退化速度变缓。由图 9(d) 可知, 加载位移 Δ 较小时组合墩柱的累积耗能同 RC 墩柱差别不大; Δ 较大时组合墩柱的累积耗能高于 RC 墩柱。由图 9(e) 可知, 组合墩柱的延性系数均高于 RC 墩柱, 但 t 不同延性系数差距不大。综上, ECC 壳厚度 t 的推荐值在 $2/15h\sim4/15h$ 之间。

2.3 ECC 壳-RC 组合墩柱的纵筋配筋率 ρ_s

h_e 取为 630 mm, t 取为 60 mm ($2/15h$), 其他参数见表 3。通过修改纵向钢筋的直径来改变纵筋配筋率 ρ_s , ρ_s 分别取 0.5%、1.5%、2.5% 和 3.5%。不同 ρ_s 时组合墩柱的滞回曲线、骨架曲线、 K_s/K_0 -位移曲线、累积耗能曲线、位移延性系数曲线见图 10。

由图 10(a)、图 10(b) 可知, ρ_s 为 0.5% 时, 组合墩柱达到峰值荷载后承载力下降较快, 极限位移、极限承载力均很小; 随 ρ_s 增加, 组合墩柱的滞回曲线趋于饱满, 峰值荷载、极限位移、延性均有所增加。由图 10(c) 可知, 加载前期 ($\Delta\leq 9\text{ mm}$), 不同 ρ_s 组合墩柱的 K_s/K_0 -位移曲线几乎重合; 加载中期 ($9\text{ mm}<\Delta<54\text{ mm}$), ρ_s 越大组合墩柱的刚度退化速度越慢, 这主要是由于提高配筋率限制了裂缝的产生和发展; 加载后期 ($\Delta\geq 54\text{ mm}$), 组合墩柱的刚度退化速度随 Δ 增加趋于平缓, 此时组合墩柱的裂缝已经充分开展。由

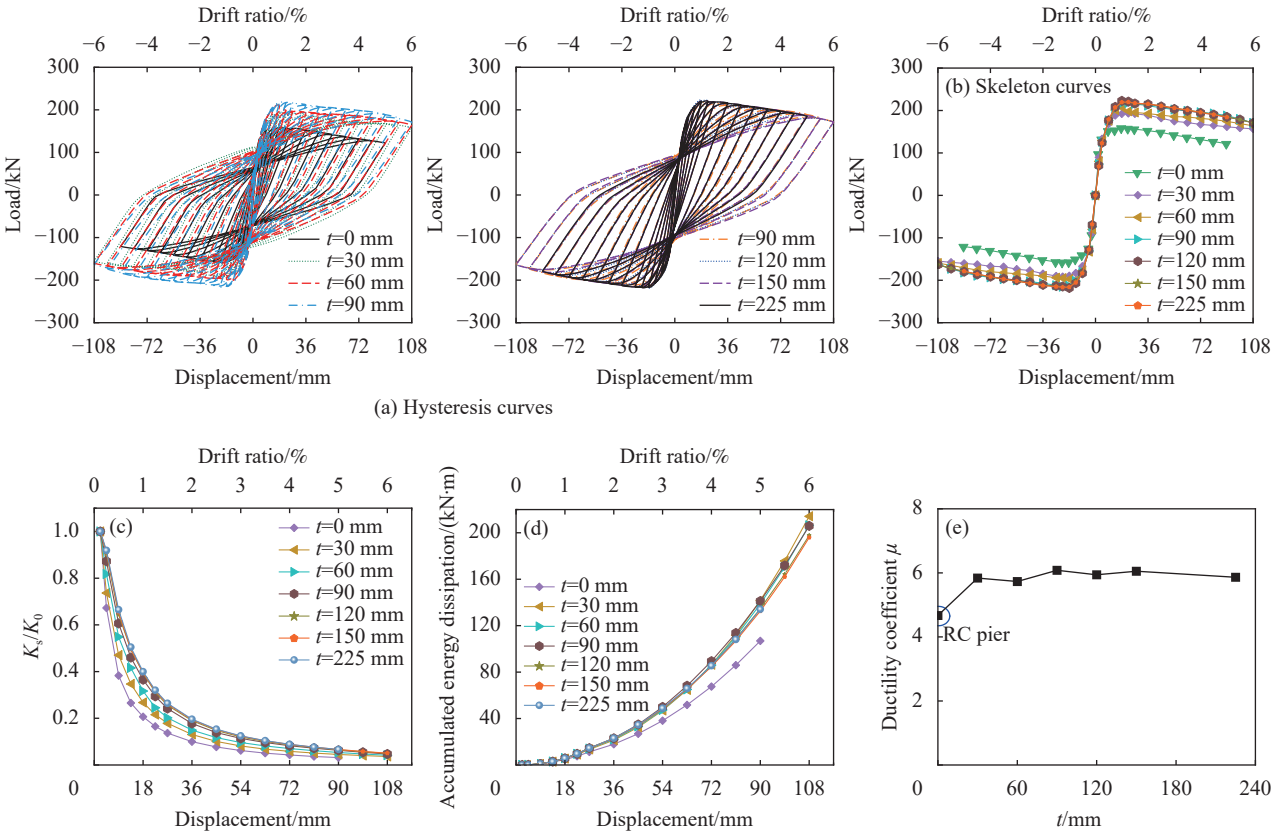


图9 ECC壳厚度 t 的影响

Fig. 9 Effect of ECC shell thickness t

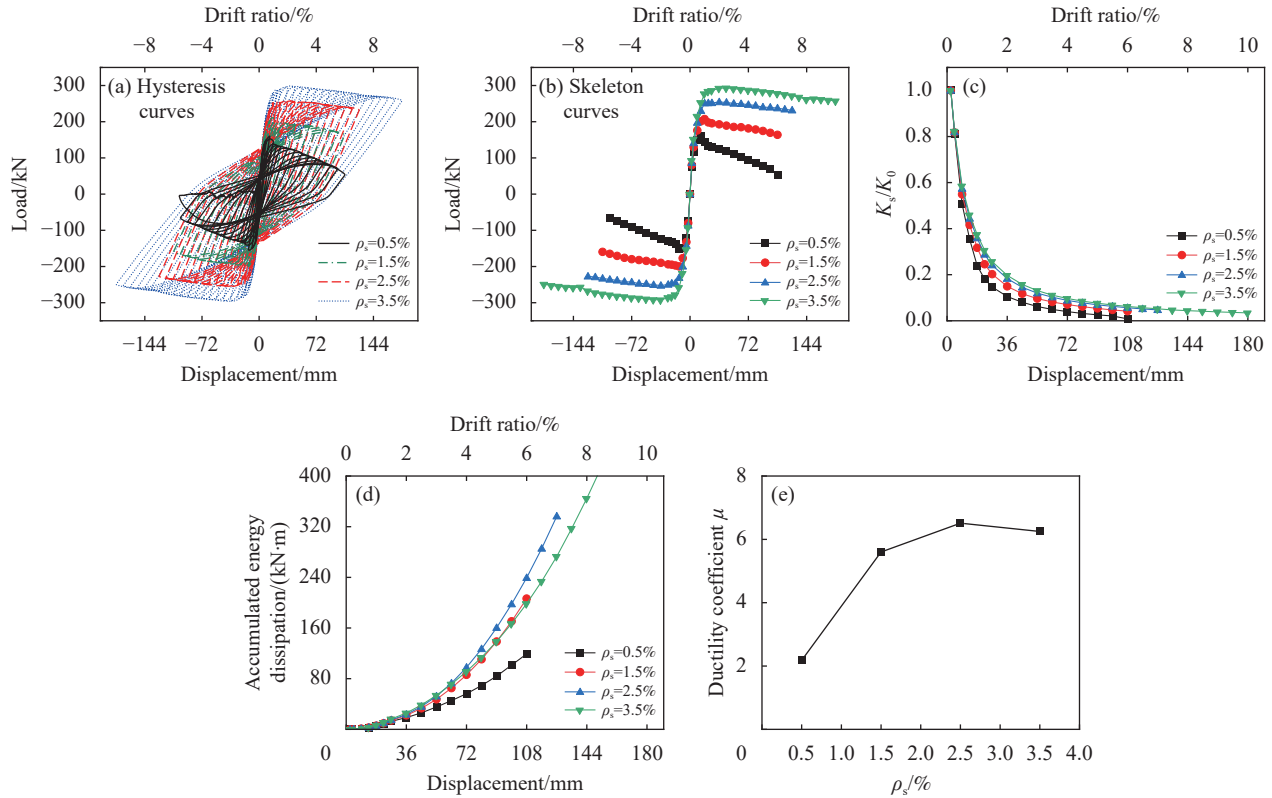


图10 ECC壳-RC组合墩柱纵筋配筋率 ρ_s 的影响

Fig. 10 Effect of longitudinal reinforcement ratio ρ_s of ECC shell-RC composite pier column

图 10(d) 可知, $\Delta \leq 27\text{ mm}$ 时, 改变 ρ_s 对组合墩柱累积耗能影响不大; $\Delta > 27\text{ mm}$ 时, 当 ρ_s 为 0.5%~2.5% 时, 组合墩柱累积耗能随 ρ_s 增加而增加, 这是由于随 ρ_s 增加组合墩柱承载力提高, 同时钢筋-ECC 之间的粘结滑移引起的捏缩效应减少; 而 ρ_s 为 3.5% 时, 由于钢筋配置过多, 钢筋发生屈服耗能的程度降低。由图 10(e) 可知, 随 ρ_s 增加组合墩柱的延性系数先上升后略有减小。与 ρ_s 为 0.5% 相比, ρ_s 为 1.5%~3.5% 时组合墩柱的延性系数增加了 156.88%~198.62%。

综上所述, 随 ρ_s 增加组合墩柱承载力、延性均有所提高。然而配筋率过高会影响混凝土与钢筋的协同作用效果并限制钢筋性能的发挥, 因此建议 ECC 壳-RC 组合墩柱的配筋率在 1.5%~2.5% 之间。

2.4 ECC 壳-RC 组合墩柱的体积配箍率 ρ_{sv}

h_e 取为 630 mm, t 取为 60 mm (2/15 h), 其他参数见表 3, 通过修改箍筋间距来改变体积配箍率 ρ_{sv} , ρ_{sv} 分别取 1.81%(3.61%) (括号内为加密区配箍率)、1.81%(1.81%) 和 0.91%(1.81%)。不同 ρ_{sv} 时组合墩柱的滞回曲线、骨架曲线、 K_s/K_0 -位移

曲线、累积耗能曲线、位移延性系数曲线见图 11。

由图 11(a)、图 11(b) 可知, 不同 ρ_{sv} 组合墩柱的滞回环形状相似, ρ_{sv} 对组合墩柱的初始刚度、屈服位移、承载能力影响不大, 但降低加密区 ρ_{sv} 组合墩柱承载力下降变快, 极限位移减小, 残余位移增大。由图 11(c)、图 11(d) 可知, ρ_{sv} 对组合墩柱刚度退化曲线、累积耗能曲线影响不大。由图 11(e) 可知, 降低加密区 ρ_{sv} , 组合墩柱延性系数降低, 加密区 ρ_{sv} 由 3.61% 降低为 1.81%, 组合墩柱延性系数降低了 41.96%; 而降低非加密区 ρ_{sv} 组合墩柱延性系数变化不大 (< 8%)。综上, ECC 可起到一定的箍筋作用。

2.5 ECC 壳-RC 组合墩柱的轴压比 n

h_e 取为 630 mm, t 取为 60 mm (2/15 h), 其他参数见表 3, 组合墩柱的轴压比 n 分别设定为 0.05、0.2、0.3、0.4、0.5。不同 n 时组合墩柱的滞回曲线、骨架曲线、 K_s/K_0 -位移曲线、累积耗能曲线、位移延性系数曲线见图 12。

由图 12(a) 可知, n 为 0.05、0.2 和 0.3 时, 组合墩柱滞回曲线形状相似, 均呈饱满的弓形, 组合墩柱的破坏模式以弯曲破坏为主, 具有良好的

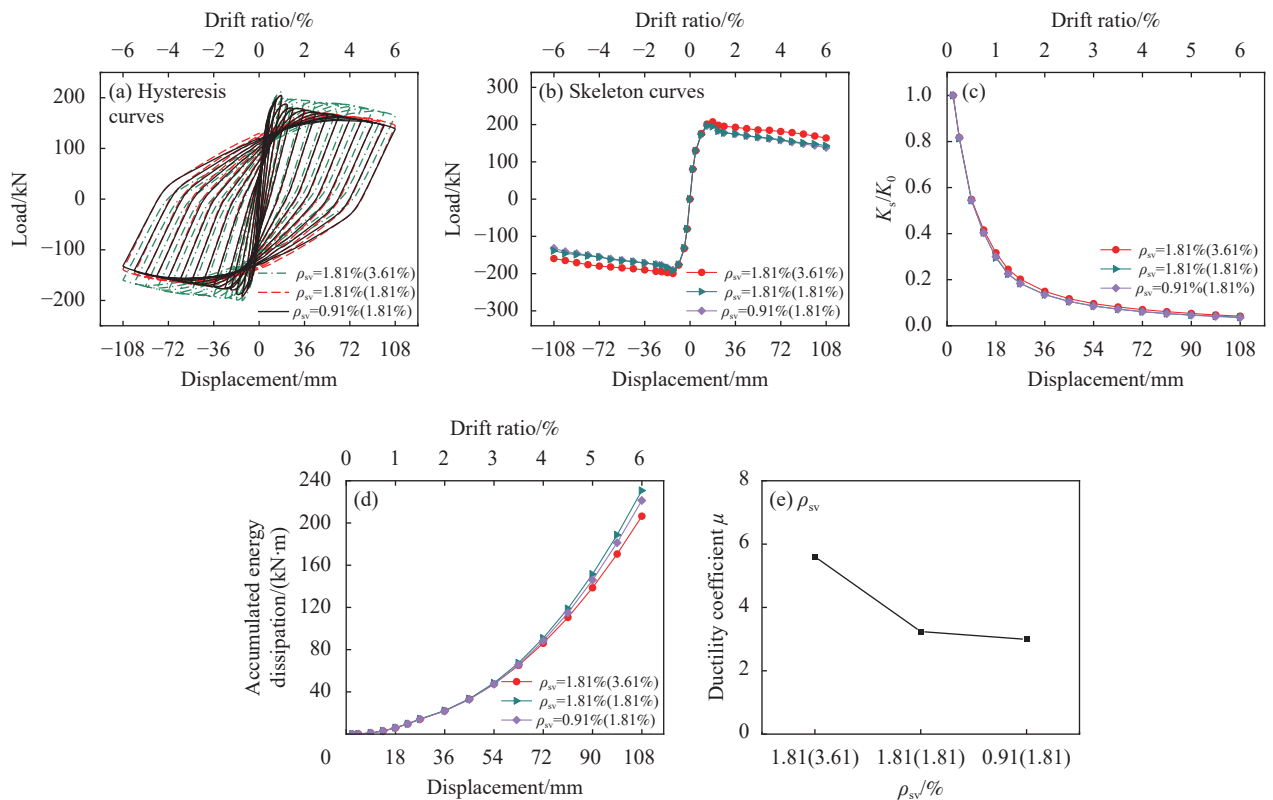


图 11 ECC 壳-RC 组合墩柱的体积配箍率 ρ_{sv} 的影响

Fig. 11 Effect of volume stirrup ratio ρ_{sv} of ECC shell-RC composite pier column

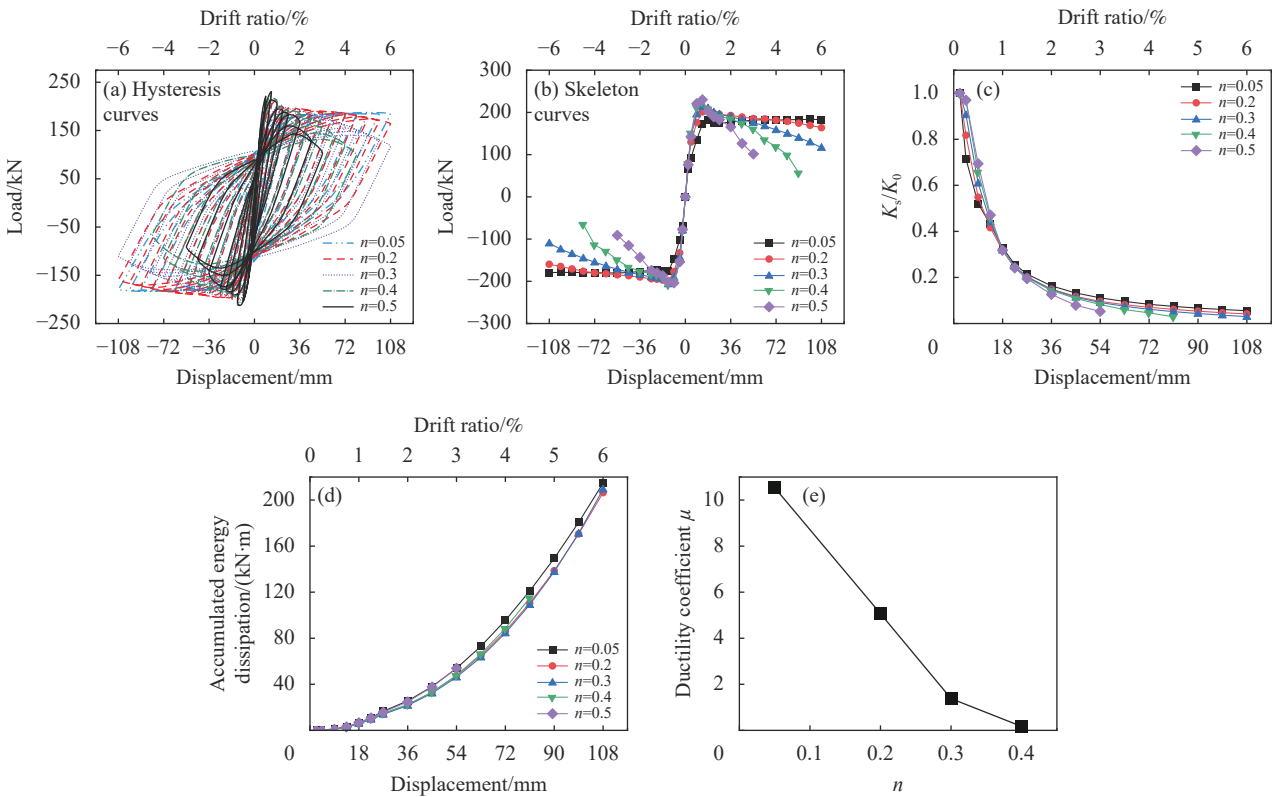


图 12 ECC 壳-RC 组合墩柱的轴压比 n 的影响

Fig. 12 Effect of axial compression ratio n of ECC shell-RC composite pier column

耗能能力。而随 n 进一步增加, 试件“捏缩”效应明显增加, 钢筋与混凝土之间粘结滑移较为显著, 表现出典型的弯剪破坏形态。由图 12(b)可知, 轴压比 n 从 0.05 提高到 0.2, 组合墩柱的初始刚度和峰值荷载分别提高了 18.40% 和 12.02%, 这是由于此时增加 n 混凝土初始拉裂缝受到限制。而轴压比 n 从 0.2 增加到 0.5, 提高轴压比对组合墩柱的初始刚度和峰值荷载影响不大, 但试件峰值荷载后骨架曲线下落速度加快, 试件极限位移减小、延性降低 (图 12(e))。由图 12(c)可知, 轴压比对试件刚度退化速度影响不大。由图 12(d)可知, 轴压比越小组合墩柱破坏时累积耗能越大。综上可知, 同普通 RC 墩柱类似, 增加轴压比 n 会提高 ECC 壳-RC 组合墩柱的刚度与承载力, 但是会大幅降低其延性与耗能能力。

3 地震作用下 ECC 壳-RC 组合墩柱动力响应分析

为进一步验证该型组合墩柱在真实地震动作用下的抗震性能和损伤模式, 基于第 2 节的分析结果, 本节采用非线性时程分析方法对地震动作用下具有较优参数的 ECC 壳-RC 组合墩柱 ($t =$

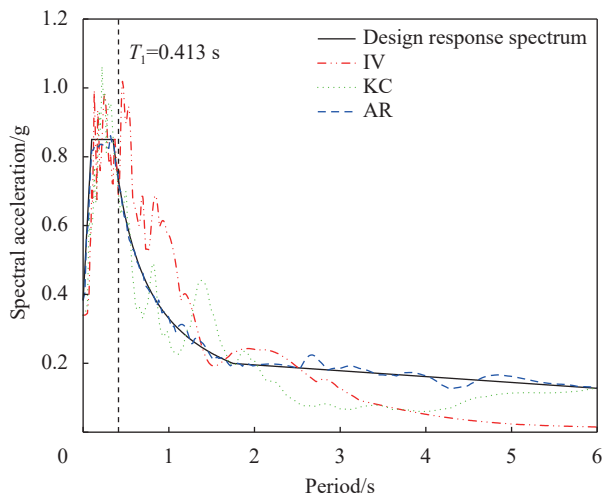
60 mm、 $h_e = 630$ mm、 $\rho_s = 1.5\%$) 的抗震性能进行了初步研究。为便于对比, 本文同时开展了相同设计参数的现浇 RC 墩柱的抗震性能分析。

3.1 地震波选取

鉴于本文研究对象的抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度为 0.2 g, 抗震设防类别为 A 类, 场地类别为 II 类, 依据现行《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020^[38]) 分别选择两条天然波 (Imperial Valley-02 (1940) 和 Kern County (1952), 分别简称 IV 和 KC), 并依据规范反应谱理论设计了一条人工波 (简称 AR) 作为地震动输入。图 13 给出了选取的地震波反应谱与规范设计反应谱对比。可知, 3 条地震波的加速度反应谱平均值和规范设计反应谱在组合墩柱的主要周期点 (0.413 s) 相差 0.21%, 满足规范要求。

3.2 时程分析结果

图 14 给出了地震波作用下 ECC 壳-RC 组合墩柱和现浇 RC 墩柱的位移时程曲线。可知, 相同地震波作用下, ECC 壳-RC 组合墩柱位移时程曲线的变化规律和形状与现浇 RC 墩柱基本一致, 而 ECC 壳-RC 组合墩柱的位移峰值与现浇 RC 墩柱有较大差异。表 4 给出了各墩柱墩顶位移峰值



IV—Imperial Valley-02 (1940) wave; KC—Kern County (1952) wave; AR—Artificial wave; T_1 —Fundamental natural vibration period of the ECC shell-RC composite pier column

图 13 规范设计反应谱与地震波反应谱对比

Fig. 13 Comparison between seismic response spectrum and code design response spectra

统计。相比现浇 RC 墩柱，在 IV、KC、AR 作用下，ECC 壳-RC 组合墩柱的位移峰值分别降低了 26.89%、21.41% 和 10.11%。ECC 壳的加入显著降

低了现浇 RC 墩柱的墩顶位移峰值。表 5 给出了各墩柱的墩底剪力峰值统计。相比现浇 RC 墩柱，在 IV、KC、AR 作用下，ECC 壳-RC 组合墩柱的墩底剪力峰值分别增加了 13.87%、17.49% 和 19.26%。地震作用下 ECC 壳-RC 组合墩柱的墩底剪力的增大和墩顶位移的减小，从侧面反映出该型组合墩柱具有更为优异的抗震性能(更小的损伤)。为进一步明确二者的震损状态，图 15 给出了典型地震作用下 ECC 壳-RC 组合墩柱与现浇 RC 墩柱的混凝土 PEEQ 损伤云图。

由图 15 可知，ECC 壳-RC 组合墩柱与现浇 RC 墩柱的混凝土损伤云图差异显著，ECC 壳-RC 组合墩柱混凝土损伤集中于 ECC 壳-RC 组合节段顶部和底部，而现浇 RC 墩柱的塑性损伤集中于墩底，相关现象与拟静力分析结果一致。表 6 给出了不同地震波作用下两种墩柱最大混凝土塑性损伤 PEEQ 值。由表 6 可以看出，ECC 壳-RC 组合墩柱的塑性损伤水平明显更低，约为现浇 RC 墩柱的 70%~80%。图 16 给出了不同地震波作用下二者的力-位移曲线。

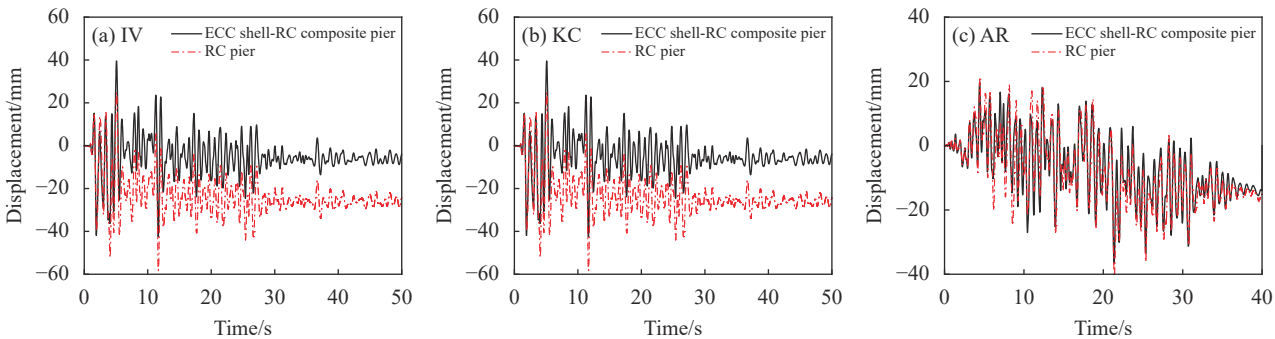


图 14 地震波作用下墩顶位移时程曲线

Fig. 14 Pier top displacement time history curves under different ground motions

表 4 各墩柱墩顶位移峰值

Table 4 Peak value of displacement at the top of the pier			
Pier type	Peak value of displacement/mm		
	IV	KC	AR
RC pier	58.28	29.24	40.77
ECC shell-RC composite pier	42.61	22.98	36.65

表 5 墩底剪力峰值

Table 5 Peak value of shear force at the pier bottom			
Pier type	Peak value of shear force/kN		
	IV	KC	AR
RC pier	237.64	191.99	181.90
ECC shell-RC composite pier	270.59	225.56	216.94

由图 16 可知，ECC 壳-RC 组合墩柱的承载力比 RC 组合墩柱的承载力高，ECC 壳-RC 组合墩柱的平均残余位移比现浇 RC 墩柱的平均残余位移小约 24%。ECC 壳的引入可有效降低墩柱的残余位移，有利于构件的震后修复。综上，实际地震动作用下较优设计参数 ECC 壳-RC 组合墩柱也表现出良好的抗震性能。

需要指出的是，ECC 壳-RC 组合墩柱在实际地震动作用下的抗震性能受地震动特性、组合墩柱设计参数等因素的影响，有关 ECC 壳-RC 组合墩柱的动力反应规律、地震损伤机制和相关抗震

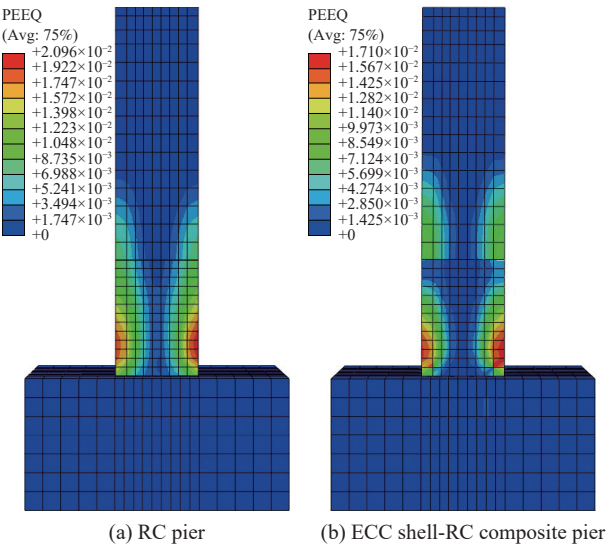


图 15 IV 作用下混凝土 PEEQ 损伤云图

Fig. 15 PEEQ of concrete for piers subjected to IV

设计方法仍有待进一步研究。

4 塑性铰形成机制判定准则

拟静力和动力时程分析结果表明，ECC 壳-RC 组合墩柱的承载能力、耗能能力、位移延性等抗震性能指标均与其柱端塑性铰区形成机制和塑性铰区发展状态(长度、变形、承载和耗能能力)有关^[39-40]。而 ECC 壳的引入会改变该型墩柱的塑性铰形成机制和发展状态。因此，有必要明确 ECC 壳-RC 组合墩柱塑性铰形成机制判定准则。图 17 为一定轴压比条件下水平荷载作用时 ECC 壳-RC 组合墩柱的弯矩分布简图。

图 17(a) 中 M_A 为 ECC 壳-RC 组合节段(高度为 L_{ECC})顶部(临界截面 A)处 RC 截面弯矩， M_B 为 ECC 壳-RC 组合节段底部(临界截面 B)的墩底截面弯矩。设 RC 墩柱的屈服弯矩和极限弯矩分别为 $M_{y,RC}$ 和 $M_{u,RC}$ ，ECC 壳-RC 组合截面的屈服

表 6 不同地震波各墩柱最大混凝土塑性损伤 PEEQ 值

Table 6 Maximum PEEQ value of the concrete of each specimen subjected to ground motions

Pier type	Maximum PEEQ value/ 10^{-2}		
	IV	KC	AR
RC pier	2.10	1.70	1.50
ECC shell-RC composite pier	1.71	1.21	1.17

弯矩和极限弯矩分别为 $M_{y,ECC-RC}$ 和 $M_{u,ECC-RC}$ 。因此，在相同加载位移下，若 $M_A/M_{y,RC} > M_B/M_{y,ECC-RC}$ ，ECC 壳-RC 组合节段顶部 RC 截面先屈服，屈服面从截面 A 向两侧发展，即发生了塑性铰转移；若 $M_A/M_{y,RC} < M_B/M_{y,ECC-RC}$ ，则 ECC 壳-RC 组合节段底部先屈服，ECC 壳-RC 组合墩柱不发生塑性铰转移。因此，ECC 壳-RC 组合节段存在一个临界高度 L^* ，使截面 A 和 B 处的纵筋同时屈服，即

$$\frac{M_A}{M_{y,RC}} = \frac{M_B}{M_{y,ECC-RC}} \tag{3}$$

$$\frac{M_A}{M_B} = \frac{M_{y,RC}}{M_{y,ECC-RC}} \tag{4}$$

根据图 17(b) 列出比例式

$$\frac{L-L^*}{L} = \frac{M_A}{M_B} \tag{5}$$

推出

$$L^* = L \left(1 - \frac{M_A}{M_B} \right) \tag{6}$$

因此，可得到 ECC 壳-RC 组合墩柱塑性铰形成机制判定准则：(1) 当 $L_{ECC} < L^*$ 时， $M_A > M_{y,RC}$ ， $M_B < M_{y,ECC-RC}$ ，即截面 A 处纵筋先于截面 B 纵筋屈服，进而塑性铰转移至 ECC 壳-RC 组合节段顶部 RC 截面 A；即组合墩柱仅在 RC 截面形成塑性铰，可按 RC 构件进行抗震设计。(2) 当 $L_{ECC} > L^*$ 时， $M_B > M_{y,ECC-RC}$ ， $M_A < M_{y,RC}$ ，即柱底截面 B 处纵筋先于截面 A 屈服，塑性铰不发生转移；即组合墩柱仅

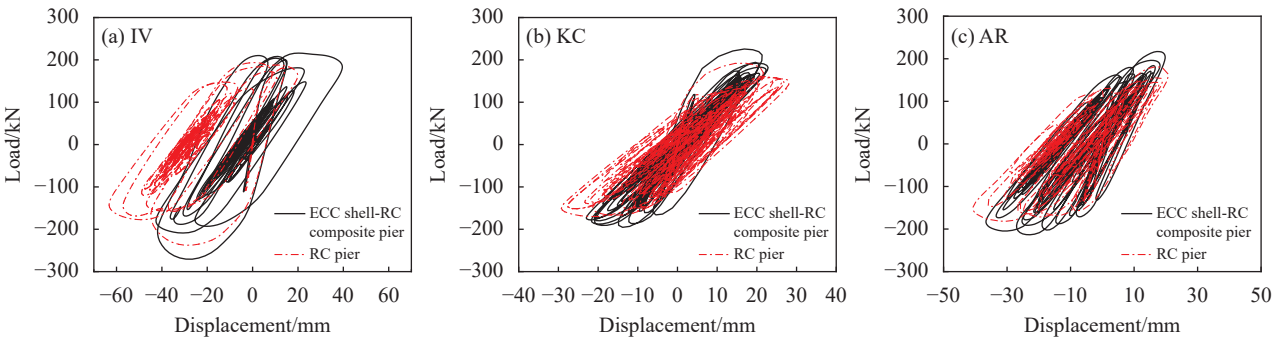


图 16 不同地震波作用下各墩柱滞回曲线

Fig. 16 Hysteresis curves of the specimens under different waves

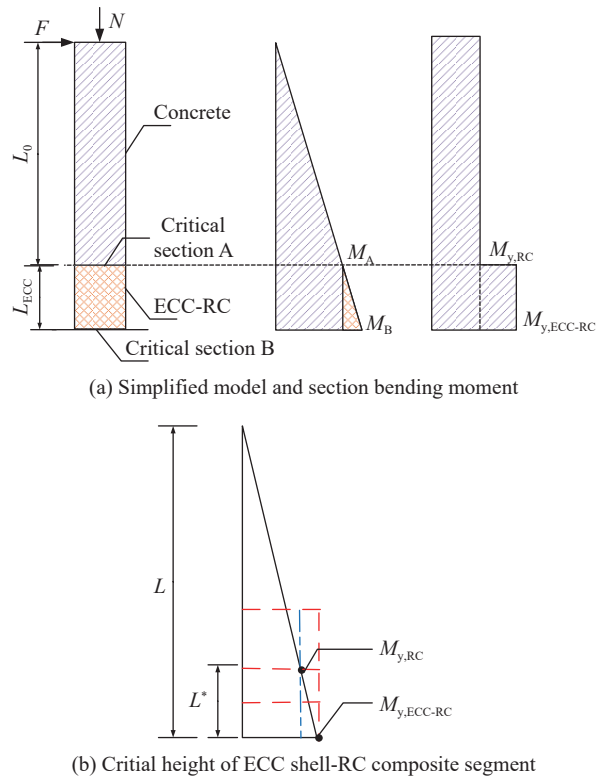


图 17 ECC 壳(节段)-RC 组合墩柱的弯矩分布

Fig. 17 Moment distribution of ECC shell (segment)-RC composite pier

在 ECC 壳-RC 组合节段形成塑性铰, 应按组合构件进行抗震设计。(3) 当 $L_{ECC} = L^*$ 时, 即截面 A 处纵筋与截面 B 纵筋同时屈服, 组合墩柱在 ECC 壳-RC 组合节段顶部 RC 截面和组合节段底部同时形成塑性铰; 即组合墩柱的抗震承载力和变形能力需要同时考虑两个区域塑性铰的影响。

为了验证上述判断准则的适用性, 通过截面设计分析可知本文数值模型的 $M_A/M_B = 0.704$, 则由上理论分析可得 L^* 为 533 mm。图 18 给出了钢筋应变随 ECC 壳-RC 组合节段高度变化图。结合图 8 和图 18 可知, ECC 壳-RC 组合节段高度为 450 mm 的试件纵筋屈服位置都在 ECC 区域上部, 即发生了塑性铰转移; ECC 壳-RC 组合节段高度为 540 mm 的试件出现双塑性铰, 即墩底和 ECC 区域上部纵筋同时屈服; ECC 壳-RC 组合节段高度为 630 mm 的试件塑性铰主要集中在墩底。以上分析表明本文提出的塑性铰形成机制判定准则基本有效, 可用于后续 ECC 壳-RC 组合墩柱的抗

震设计中。需要特别说明的是, ECC 壳-RC 组合墩柱的抗震性能研究仍处于起步阶段, 为建立其抗震设计与评估方法, ECC 壳与混凝土内芯间约束关系及协同工作机制、组合墩柱塑性铰形成机制及变形能力计算方法等研究工作亟待开展。

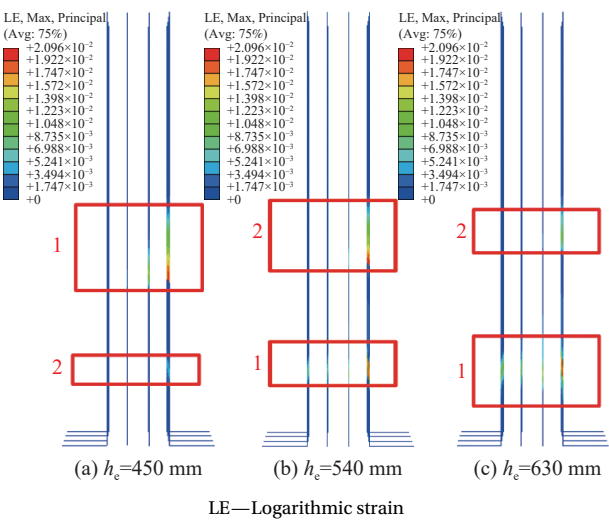


图 18 不同 ECC 壳-RC 组合节段高度时钢筋应变

5 结论

(1) 工程水泥基复合材料 (ECC) 壳-钢筋混凝土 (RC) 组合墩柱建模、参数设置方法可为同类研究借鉴, 建立的 ECC 壳-RC 组合墩柱有限元模型可用于后续的参数影响分析, 并可为类似墩柱的抗震性能分析所参考。

(2) 相较于 RC 墩柱, 较优设计参数的 ECC 壳-RC 组合墩柱的承载能力、延性和耗能能力均有所提高。增加 ECC 节段高度、ECC 壳厚度及纵筋配筋率可提高组合墩柱的承载能力, 体积配箍率降低、轴压比增加会显著降低试件的延性。

(3) 综合经济和抗震性能因素, 较优的 ECC 节段高度范围为 $1.2h \sim 1.4h$ (h 为试件截面高度) 之间, ECC 壳厚度在 $2/15h \sim 4/15h$ 之间, 纵筋配筋率在 1.5%~2.5% 之间;

(4) ECC 壳-RC 组合节段的引入会改变 ECC 壳-RC 组合墩柱的塑性铰形成机制, 存在 ECC 壳-RC 组合节段的最小临界高度使该型组合墩柱的塑性变形仍主要分布于底部, 不发生塑性铰转移。

参考文献:

[1] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of

- short random fiber composites[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [2] 江佳斐, 隋凯. 纤维网格增强超高韧性水泥复合材料加固混凝土圆柱受压性能试验 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36(8): 1957-1967.
JIANG Jiafei, SUI Kai. Experimental study of compression performance of concrete cylinder strengthened by textile reinforced engineering cement composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1957-1967(in Chinese).
- [3] XU L, PAN J L, CAI J. Seismic performance of precast RC and RC/ECC composite columns with grouted sleeve connections[J]. *Engineering Structures*, 2019, 188: 104-110.
- [4] 潘金龙. 基于高延性水泥基复合材料的结构性能提升技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 1-25.
PAN Jinlong. Structural performance improvement technology based on high ductility cementitious composites[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2020: 1-25(in Chinese).
- [5] YUAN F, PAN J, WU Y. Numerical study on flexural behaviors of steel reinforced engineered cementitious composite (ECC) and ECC/concrete composite beams[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57(3): 637-645.
- [6] ZHANG R, MATSUMOTO K, HIRATA T, et al. Shear behavior of polypropylene fiber reinforced ECC beams with varying shear reinforcement ratios[J]. *Journal of JSCE*, 2014, 2(1): 39-53.
- [7] 陈全胜, 侯圣均, 蒋晨晨, 等. 钢-混凝土-ECC组合梁受弯性能试验研究与有限元分析 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(S1): 136-146.
CHEN Quansheng, HOU Shengjun, JIANG Chenchen, et al. Experimental research and FEA on bearing capacity under negativemoment of steel-concrete-ECC composite beams[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(S1): 136-146(in Chinese).
- [8] 白亮, 张雨航, 梁兴文, 等. 压型钢板-高延性水泥基材料组合楼板纵向剪切性能及承载力研究 [J]. *工程力学*, 2023, 40(6): 172-181.
BAI Liang, ZHANG Yuhang, LIANG Xingwen, et al. Investigation on longitudinal shear behavior and bearing capacity of profiled steel sheeting and ECC composite slabs[J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(6): 172-181(in Chinese).
- [9] 廖桥, 李碧雄, 章一萍. 超高强钢筋 ECC 梁受弯性能试验研究及参数分析 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2022, 30(1): 121-133.
LIAO Qiao, LI Bixiong, ZHANG Yiping. Experimental study and parametric analysis of flexural behaviors of ultra high strength rebar reinforced ECC beams[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022, 30(1): 121-133(in Chinese).
- [10] XU L, PAN J L, LU C, et al. Development mechanism of plastic hinge in reinforced engineered cementitious composite beams under monotonic loading[J]. *Structural Concrete*, 2019, 20(1): 252-266.
- [11] BILLINGTON S L, YOON J K. Cyclic response of unbonded posttensioned precast columns with ductile fiber-reinforced concrete[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2004, 9(4): 353-363.
- [12] CHO C, KIM Y, FEO L, et al. Cyclic responses of reinforced concrete composite columns strengthened in the plastic hinge region by HPFRC mortar[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(7): 2246-2253.
- [13] SHAN Q, PAN J, CHEN J. Mechanical behaviors of steel reinforced ECC/concrete composite columns under combined vertical and horizontal loading[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2015, 31(2): 259-265.
- [14] MOHEBBI A, SAIIDI M, ITANI A. Shake table studies and analysis of a precast two-column bent with advanced materials and pocket connections[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(7): 04018046.
- [15] XU L, PAN J L, CHEN J H. Mechanical behavior of ECC and ECC/RC composite columns under reversed cyclic loading[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(9): 1-24.
- [16] ZHANG R, MENG Q L, SHUI Q J, et al. Cyclic response of RC composite bridge columns with precast PP-ECC jackets in the region of plastic hinges[J]. *Composite Structures*, 2019, 221: 110844.
- [17] ZHANG R, ZHAO R, LIU Z L, et al. Cyclic behavior of existing flexure-dominated RC bridge columns retrofitted by ECC jackets in the region of plastic hinge[J]. *Engineering Structures*, 2022, 269: 114820.
- [18] LI X, CHEN K D, HU P, et al. Effect of ECC jackets for enhancing the lateral cyclic behavior of RC bridge columns[J]. *Engineering Structures*, 2020, 219: 110714.
- [19] 王新玲, 李世伟, 罗鹏程, 等. 水泥基复合材料加固小偏心受压钢筋混凝土柱承载力 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3): 1773-1784.
WANG Xinling, LI Shiwei, LUO Pengcheng, et al. Bearing capacity of reinforced concrete columns strengthened by engineered cementitious composite under small eccentric compression load[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2023, 40(3): 1773-1784(in Chinese).
- [20] 王新玲, 李赞璞, 李苗浩夫, 等. 高强不锈钢绞线网增强 ECC 加固 RC 短柱轴心受压试验 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(5): 2308-2317.
WANG Xinling, LI Yunpu, LIMIAO Haofu, et al. Compressive behavior of RC short columns strengthened with high-strength stainless steel wire strand mesh and ECC[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2022, 39(5): 2308-2317(in Chinese).
- [21] DENG M K, ZHANG Y X, LI Q Q. Shear strengthening of RC short columns with ECC jacket: Cyclic behavior tests[J]. *Engineering Structures*, 2018, 160: 535-545.

- [22] DI J, FAN J H, ZHOU X H, et al. Hysteretic behavior of composite bridge columns with plastic hinge enhanced by engineered cementitious composite jacket for seismic resistance[J]. *Engineering Structures*, 2022, 251: 113532.
- [23] 程彩霞. PVA 纤维水泥基复合材料增强框架节点抗震性能研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2009.
- CHENG Caixia. A study on the earthquake-resistant behavior of the PVA fiber cementitious composite reinforced frame joints[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2009(in Chinese).
- [24] SAID S H, RAZAK H A. Structural behavior of RC engineered cementitious composite (ECC) exterior beam-column joints under reversed cyclic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 107: 226-234.
- [25] 董胜, 陈盈. 后浇高韧性水泥基复合材料预制混凝土节点有限元分析 [J]. 施工技术, 2017, 46(3): 55-60.
- DONG Sheng, CHEN Ying. Finite element analysis for precast concrete joints with engineered cementitious composite material[J]. *Construction Technology*, 2017, 46(3): 55-60(in Chinese).
- [26] SURYANTO B, TAMBUSAY A, SUPROBO P, et al. Seismic performance of exterior beam-column joints constructed with engineered cementitious composite: Comparison with ordinary and steel fibre reinforced concrete[J]. *Engineering Structures*, 2022, 250: 113377.
- [27] ZHANG R, MATSUMOTO K, HIRATA T, et al. Application of PP-ECC in beam-column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements[J]. *Engineering Structures*, 2015, 86: 146-156.
- [28] 丁梦佳, 许维炳, 王瑾, 等. 一种灌浆套筒连接的装配式 ECC-RC 混合柱: 中国, 202110242254.4 [P]. 2022-07-19.
- DING Mengjia, XU Weibing, WANG Jin, et al. The utility model relates to an assembled ECC-RC mixed column with grouting sleeve connection: CN, 202110242254.4 [P]. 2022-07-19(in Chinese).
- [29] ZHANG Y, DENG M, LI T, et al. Strengthening of flexure-dominate RC columns with ECC jackets: Experiment and analysis[J]. *Engineering Structures*, 2021, 231: 111809.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB/T 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010(in Chinese).
- [31] KANDA T, LIN Z, LI V C. Modeling of tensile stress-strain relation of pseudo strain-hardening cementitious composites[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 12(2): 147-156.
- [32] 温丛格. 工程纤维增强水泥基复合材料 PVA-ECC 力学性能研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
- WEN Congge. Study on mechanical performance of engineering fiber reinforced cementitious composites PVA-ECC [D]. Jiaozuo: Master Dissertation of Henan Polytechnic University, 2015(in Chinese).
- [33] 田俊. 超高韧性水泥基复合材料加固混凝土结构的界面力学性能与耐久性性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- TIAN Jun. Experimental study on mechanical properties and durability of ultra high toughness cementitious composite-to-concrete interface [D]. Nanjing: Doctoral Dissertation of Southeast University, 2017(in Chinese).
- [34] 方自虎, 周海俊, 赖少颖, 等. 循环荷载下钢筋混凝土 ABAQUS 粘结滑移单元 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2014, 47(4): 527-531.
- FANG Zihu, ZHOU Haijun, LAI Shaoying, et al. ABAQUS bond-slip element of reinforced concrete under cyclic loads[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2014, 47(4): 527-531(in Chinese).
- [35] LI C, HAO H, BI K M. Seismic performance of precast concrete-filled circular tube segmental column under biaxial lateral cyclic loadings[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, 17: 271-296.
- [36] 陈科旭. PP-ECC 墩柱抗震性能研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.
- CHEN Kexu. Research on seismic behavior of PP-ECC piers [D]. Mianyang: Master Dissertation of Southwest University of Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [37] DING M, XU W, WANG J, et al. Seismic performance of prefabricated concrete columns with grouted sleeve connections, and a deformation-capacity estimation method[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 55: 104722.
- [38] 中华人民共和国交通运输部. 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.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01—2020 [S]. Beijing: China Communication Press, 2020(in Chinese).
- [39] 邓江东, 彭展翼. 功能梯度混凝土受弯构件形成机制和力学性能研究 [J]. 工程力学, 2023, 40(9): 74-80.
- DENG Jiangdong, PENG Zhanyi. Formulation mechanism and mechanical performance of functionally graded flexural concrete members[J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(9): 74-80(in Chinese).
- [40] 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.
- DENG Jiangdong, YANG Siyuan, GUO Chunquan. Formation mechanism of multi-plastic regions in concrete flexural members with graded GFRP bars[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*. 2023, 40(11): 6324-6335(in Chinese).