

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201010001

预制ECC耗能墙-框架结构抗震性能分析与评价*

汪君¹, 马高^{1,2}

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082;
2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082)

摘要: 工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)具有受拉应变硬化和多缝稳态开展的特性, 可以作为一种理想的耗能材料, 将ECC材料应用于预制墙板的塑性铰区形成一种新型预制ECC耗能墙板, 并将其用于预制剪力墙-框架结构中。基于OpenSees仿真平台, 采用多垂直杆单元构建预制ECC耗能墙板模型并进行参数分析, 对某12层预制ECC耗能墙-框架结构进行静力弹塑性分析和动力时程分析, 研究预制ECC耗能墙板对框剪结构抗震性能的影响。结果表明: 预制ECC耗能墙板的极限承载力和耗能能力相较于普通预制剪力墙分别提高了35%和31%; 静力弹塑性分析和易损性分析结果进一步验证了ECC材料对框剪结构抗震性能的改善作用; 在近场脉冲型地震波作用下预制ECC耗能墙-框架结构抗震性能的改善效果最为明显, ECC适用于近断层结构的抗震应用; 在造价上, 预制ECC耗能墙-框架的成本相较于RC剪力墙-框架结构仅提高2.1%, 因此配置ECC耗能墙是一种有效且经济的结构抗震性能提升方案。

关键词: 预制ECC耗能墙板; 框架-剪力墙结构; 静力弹塑性分析; 易损性分析; 近场地震动
中图分类号: TU973.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1348-11

Seismic Performance Analysis and Evaluation of Precast ECC Energy-Dissipating Wall Frame Structures

WANG Jun¹, MA Gao^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Hunan Provincial Key Lab on Damage Diagnosis for Engineering Structures (Hunan University),
Changsha 410082, China)

Abstract: Engineered cementitious composites (ECC) are cement-based composite materials that exhibit strain hardening under tension and the development of numerous fine cracks, making them ideal for energy dissipation. In this paper, ECC was utilized in the plastic hinge areas of precast wall panels, forming a new type of prefabricated ECC energy-dissipating wall panel, which was then used in prefabricated shear wall-frame structures. Using the OpenSees simulation platform, a precast ECC energy-dissipating wall panel model was built with the multiple vertical line element for parameter analysis. Static elastoplastic and dynamic time-history analysis was conducted on a 12-story precast ECC energy-dissipating wall-frame structure to investigate the influence of the ECC energy-dissipating wall

* 收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878268)、湖南省自然科学基金项目(2020JJ4195)资助

作者简介: 汪君(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事结构抗震研究。E-mail: wj9527@hnu.edu.cn

通信作者: 马高(1985—), 男, 副教授, 博士。主要从事结构抗震、装配式结构等研究。E-mail: magao@hnu.edu.cn

panels on the seismic performance of the frame-shear wall structures. The results showed that the ultimate bearing capacity and energy dissipation capacity of the precast ECC energy-dissipating wall panel were improved by 35% and 31%, respectively, compared to ordinary precast shear walls. Static elastoplastic analysis and fragility analysis results further verified the role of ECC materials in improving the seismic performance of frame-shear wall structures. The seismic performance improvement under near-field pulse-type seismic waves was most significant, indicating that ECC was suitable for seismic applications in near-fault structures. The cost of the precast ECC energy-dissipating wall-frame structure was only 2.1% higher than that of the RC shear wall-frame structure, making the use of ECC energy-dissipating walls an effective and economical solution for improving structural seismic performance.

Keywords: precast ECC energy-dissipating wall panels; frame-shear wall structure; static elastoplastic analysis; fragility analysis; near-fault seismic motion

0 引 言

产业化是我国住宅建设的重要发展方向,预制装配式剪力墙结构是实现住宅产业化和建筑节能排的有效途径之一,它具有生产效率高、劳动条件好、经济效益高等优点。由于我国大部分地区需进行抗震设防,装配式剪力墙结构能否得到推广应用取决于其抗震性能是否满足要求。目前已有相关文献针对墙体抗震性能进行改善的研究,如姜洪斌等^[1]为研究预制钢筋混凝土剪力墙结构抗震性能,对三层足尺模型进行了弹性阶段拟静力试验,结果表明结构整体抗震性能较好。钱稼茹等^[2]对多个采用不同连接方式的预制剪力墙试件进行低周反复加载试验,发现采用能有效传递钢筋应力的灌浆套筒连接方式的预制剪力墙,构件侧向刚度、极限承载力与现浇构件基本相当,但延性略有降低,且现浇剪力墙的滞回曲线更饱满,耗能更强。K. A. Soudki等^[3]分别采用预埋套筒连接、螺栓连接、钢板焊接等连接方式的预制剪力墙进行低周反复实验,结果表明这些连接方式能够满足一定的抗震需求。W. Guo等^[4]对使用螺栓连接的预制剪力墙结构及其构件进行试验研究,表明采用螺栓连接也是一种可行的连接方式。然而目前装配式剪力墙结构还主要应用于6度地区,在高抗震设防地区的应用偏少,且工程界对装配式剪力墙的抗震性能提出了更高的要求。

工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)是20世纪90年代初,由V. C. Li^[5]提出,是一种以水泥浆或水泥砂浆为基体、以

纤维为增强材料的高性能纤维增强水泥基复合材料。ECC具有高强度、高延性、高耐久性、拉伸应变硬化以及多缝开裂的特性^[6],因此具有优异的能量吸收能力。国内外学者已将ECC应用到土木结构抗震领域,先后开展了梁、柱、节点以及剪力墙全部或局部采用ECC的抗震性能试验和理论研究。高淑玲等^[7]在钢筋混凝土梁的底部受拉区浇筑不同厚度的ECC作为保护层,结果表明在底部1/4梁高位置处配置ECC对钢筋混凝土梁的增韧效果最好,且可以提高结构的耐久性。汪梦甫等^[8]将ECC应用于外廊式框架柱中,拟静力试验结果表明采用ECC柱的组合框架较普通混凝土框架具有更强的承载力、延性以及耗能能力。苏骏等^[9]将ECC应用于梁柱节点,进行了6榀缩尺比例为1/2的框架中节点的低周反复加载试验,结果表明ECC明显改善节点核心区的抗裂性能和剪切延性。梁兴文等^[10]对局部采用纤维增强混凝土(Fiber Reinforced Concrete, FRC)的剪力墙试件进行了拟静力试验,分析了此类剪力墙的破坏现象、受力机理和滞回特性。FRC材料的受拉极限应变一般可达1%^[11],而ECC的受拉应变硬化可稳定达到3%以上^[12],若将其用于预制剪力墙的塑性铰区,能有效提升剪力墙的承载力、延性和耗能性能。

综上,本文提出在预制剪力墙塑性铰区使用ECC的墙板构造方案,以满足高抗震设防区结构抗震的需求,采用数值模拟方法对其抗震性能进行分析验证以及参数分析,在深入了解其抗震性能的基础上,设计一栋12层预制ECC耗能剪力墙-框架结构,系统研究了ECC耗能剪力墙对该新型结构抗震性能的影响规律。

1 ECC耗能墙有限元建模与验证

1.1 材料本构

基于 OpenSees 分析平台建立剪力墙数值分析模型。普通混凝土材料和钢筋分别采用 Concrete01 和 Steel02 本构模型。ECC 材料采用 OpenSees 平台提供的 ECC01 本构模型,其应力-应变关系曲线见图 1。在受拉区域, $\sigma_{to}/\epsilon_{to}$ 、 $\sigma_{tp}/\epsilon_{tp}$ 和 ϵ_{tu} 分别表示开裂时应力/应变、峰值受拉应力/应变和极限拉应变。受压时骨架曲线在达到峰值应力/应变 ($\sigma_{cp}/\epsilon_{cp}$) 之前为线性段,之后是非线性的下降段,直到极限压应变 ϵ_{cu} , α_{cu} 是压缩软化曲线指数。ECC01 材料模型的卸载和再加载行为如图 1 所示,在受拉时,应变硬化和软化范围内的卸载路径皆为非线性,再加载路径为线性, α_{t1} 和 α_{t2} 为与卸载路径相关的参数。在压缩时,应变软化范围的卸载路径也为非线性,再加载路径为线性。模型本构关系的表达式详见文献[13]。

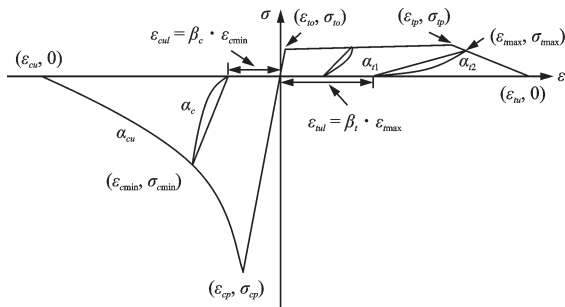


图 1 ECC01 材料模型应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of the ECC01 material model

1.2 单元选择

在 OpenSees 中剪力墙的建模方式可分为两类:第一类是通过细化剪力墙横截面并结合混凝土及钢筋的本构关系建立的有限元模型,例如纤维截面单元和 X. Lu 等^[14]开发的分层壳单元等,这类模型较直观但计算效率较低;第二类是将剪力墙简化为多根竖向弹簧来模拟,该模型力学概念明确,计算量小且能够较好地模拟剪力墙的非线性反应, A. Vulcano 等^[15]提出的多垂直杆单元 (Multiple Vertical Line Element Model, MVLEM) 便属于该类型中典型的剪力墙建模单元。本文使用 MVLEM 单元对剪力墙建模,建模时将剪力墙横截面划分为若干

份,每个部分用拉压弹簧模拟墙体的压弯变形,用水平弹簧模拟剪力墙的剪切变形。预制剪力墙的底部坐浆层采用零长度单元 (ZeroLength Element) 模拟,坐浆层材料采用 Concrete01 本构模型,只考虑受压,不考虑受拉。

1.3 模型验证

为验证本文所选单元模型和材料本构的准确性,选取文献[11]中底部塑性铰区采用纤维增强混凝土的剪力墙试件 FRCSW-01 和文献[2]中传统预制剪力墙 SW4 的试验结果进行比较验证。FRCSW-01 试件的尺寸及配筋如图 2 所示,墙高 2 000 mm,墙宽 1 000 mm,墙厚 100 mm,高宽比为 2.0,试验轴压比为 0.13。试件的纵筋为 HRB500 级热轧带肋钢筋,竖向和水平分布筋均采用直径 6.5 mm 的高强钢丝,对应的配筋率为 0.825%。墙体底部塑性铰区采用纤维增强混凝土,其余部分为普通混凝土,普通混凝土和纤维增强混凝土的强度等级均为 C60。预制剪力墙 SW4 的截面尺寸及配筋如图 3 所示,墙高为 2 800 mm,墙宽 1 300 mm,墙厚 160 mm,高宽比 2.25,试验轴压比为 0.3。试件的竖向与水平分布钢筋均为 A8@100,暗柱配置 B16 竖向钢筋和 A8@100 箍筋。边缘构件的竖向钢筋和竖向分布钢筋与地梁预埋钢筋采用灌浆套筒连接。实验所用混凝土立方体抗压强度为 40 MPa。

试件 FRCSW-01 和 SW4 模拟结果与实验结果的对比如图 4~5 所示,可见本文建模方法可以有效模拟 FRC 剪力墙和普通预制剪力墙的抗震性能。

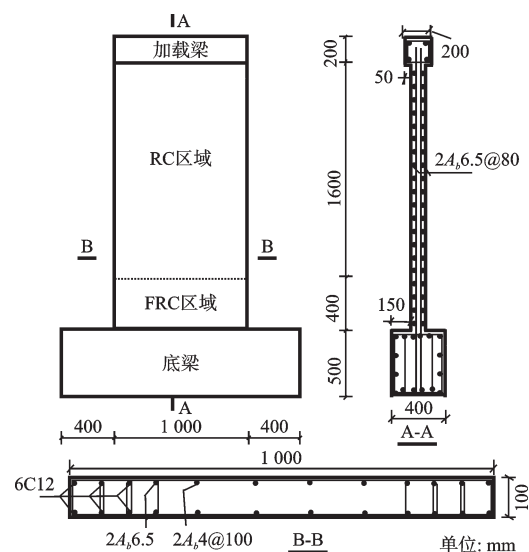


图 2 FRCSW-01 试件尺寸及配筋

Fig.2 Dimensions and reinforcement details of the FRCSW-01 specimen

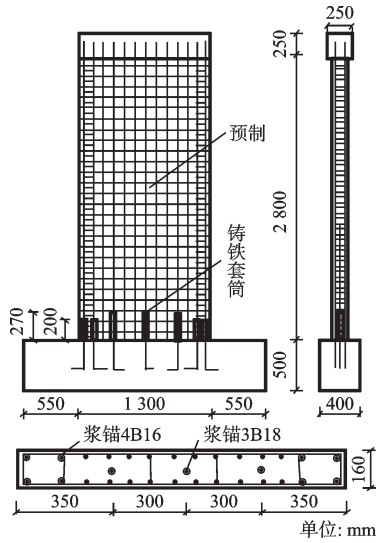


图3 SW4试件尺寸及配筋

Fig.3 Dimensions and reinforcement details of the SW4 specimen

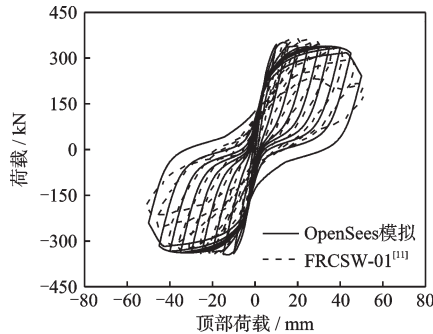


图4 FRCW-01模拟结果与实验结果对比

Fig.4 Comparison of simulation and experimental results for FRCW-01

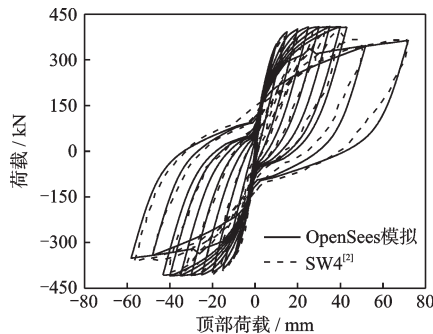


图5 SW4模拟结果与实验结果对比

Fig.5 Comparison of simulation results and experimental results for SW4

2 预制ECC耗能墙抗震性能参数分析

2.1 分析模型

为深入研究ECC对预制耗能墙抗震性能的影响

规律,设计预制ECC耗能墙ECCSW1,尺寸、配筋以及材料力学性能参考文献[2]中的试件SW4,其塑性铰区采用ECC,上部采用普通混凝土。为探究ECC高度对耗能墙抗震性能的影响,在2倍塑性铰区高度以及全截面高度设置ECC,分别对应ECCSW2和ECCSW3。为考虑轴压比对耗能墙板受力性能的影响,对塑性铰区设置ECC的剪力墙试件分别考虑轴压比0.1(ECCSWN1)、0.2(ECCSWN2)、0.3(ECCSWN3)和0.4(ECCSWN4)四种工况。ECC的受拉性能参考文献^[16],受拉开裂应力应变分别为4.2 MPa,0.04%,极限受拉应力应变分别为5.5 MPa,3.5%。塑性铰高度采用文献^[10]考虑纤维增强混凝土剪力墙实验结果修正后的公式计算:

$$l_p = 0.7 \left(0.2 + \frac{0.044H}{h_w} \right) h_w \quad (1)$$

式中, l_p 为塑性铰区长度; h_w 为剪力墙截面高度; H 为剪力墙高度。

2.2 滞回曲线与耗能能力

试件的模拟滞回曲线如图6~图12所示。图13~14为各试件的骨架曲线,由图13和表1可知,预制ECC耗能墙ECCSW1的极限承载力和滞回耗能比普通剪力墙分别提高了35%和31%,ECC显著提升了预制剪力墙的抗震性能。ECC高度为2倍塑性铰区的试件ECCSW2和全截面高度使用ECC的试件ECCSW3,相较于ECCSW1,极限承载力和滞回耗能仅提升了3%和6%、5%和8%。这表明即便墙板全高采用ECC,对墙板延性和耗能的提升有限,为降低成本,可仅在塑性铰区配置ECC。

图14表明轴压比对试件的初始抗侧刚度影响不大,试件的极限承载力随轴压比增大而增大,但

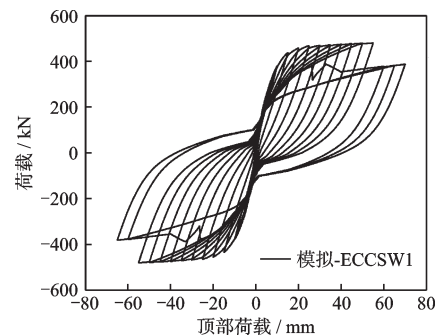


图6 ECCSW1滞回曲线

Fig.6 Top force vs displacement hysteretic curves of ECC-SW1

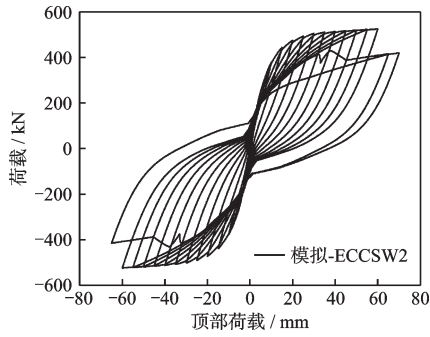


图7 ECCSW2滞回曲线

Fig.7 Top force vs displacement hysteretic curves of ECC-SW2

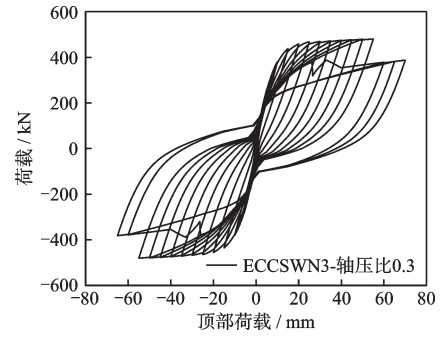


图11 ECCSWN3滞回曲线

Fig.11 Top force vs displacement hysteretic curves of ECC-SWN3

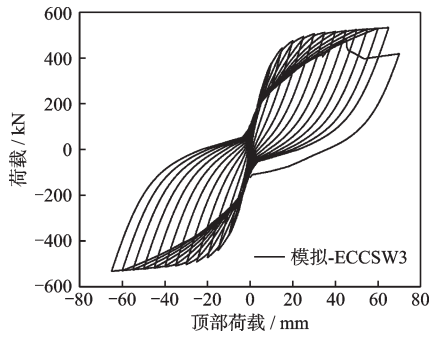


图8 ECCSW3滞回曲线

Fig.8 Top force vs displacement hysteretic curves of ECC-SW3

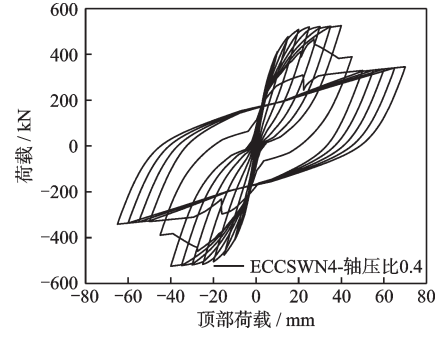


图12 ECCSWN4滞回曲线

Fig.12 Top force vs displacement hysteretic curves of ECC-SWN4

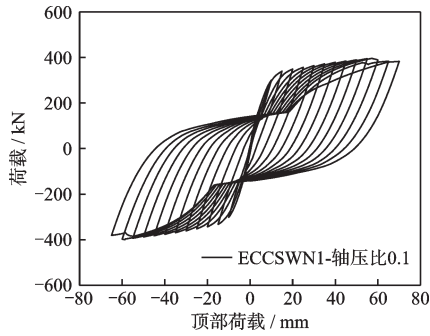


图9 ECCSWN1滞回曲线

Fig.9 Top force vs displacement hysteretic curves of ECC-SWN1

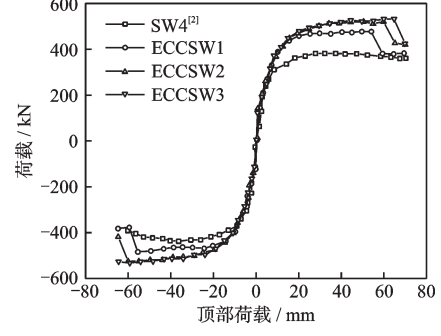


图13 ECC配置高度对骨架曲线的影响

Fig.13 The influence of ECC configuration height on the skeleton curve

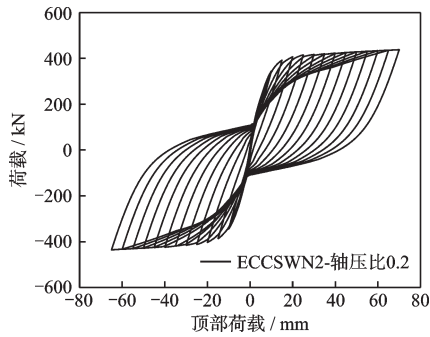


图10 ECCSWN2滞回曲线

Fig.10 Top force vs displacement hysteretic curves of ECC-SWN2

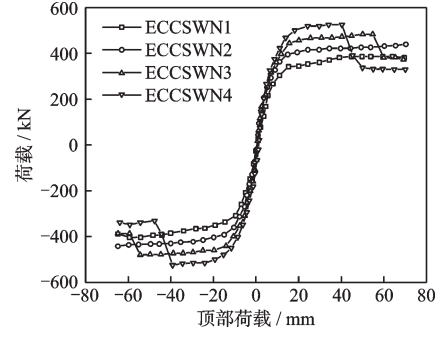


图14 轴压比对骨架曲线的影响

Fig.14 The influence of axial compression ratio on skeleton curves

表1 预制耗能墙板的极限承载力与耗能能力

Table 1 Ultimate bearing capacity and energy dissipation capacity of the precast ECC energy-dissipating wall panels

试件	ECC配置高度/mm	轴压比	极限承载力/kN	相对比值	滞回耗能/kN·m	相对比值
SW4 ^[2]	0	0.3	378.3	1	44.6	1
ECCSW1	268	0.3	510.2	1.35	58.5	1.31
ECCSW2	536	0.3	524.9	1.39	62.1	1.39
ECCSW3	2 800	0.3	525.1	1.39	63.1	1.41
ECCSWN1	268	0.1	395.4	1.05	50.5	1.13
ECCSWN2	268	0.2	437.8	1.16	54.8	1.23
ECCSWN3	268	0.3	510.2	1.35	58.5	1.31
ECCSWN4	268	0.4	525.1	1.39	57.3	1.28

变形能力减小。轴压比0.4的试件ECCSW6相较于轴压比0.1的ECCSW4,极限强度和滞回耗能分别提高了33%和18%,滞回耗能提高程度偏小的原因是轴压比增大会使骨架曲线下降段变陡,降低了试件变形能力。

3 算例设计与建模

3.1 框剪结构设计

按照我国抗震设计规范,设计了一栋12层框架-剪力墙结构,结构平面布置如图15所示。结构第一层层高4.5 m,其余各层层高3.5 m,结构总高43.0 m。抗震设防烈度为7度(0.15g),二类场地,地震分组为第一组。各层楼面恒载为5 kN/m²,活载2 kN/m²。剪力墙厚度均为250 mm,框架柱截面尺寸为600 mm×600 mm,框架梁、连梁截面尺寸为300 mm×600 mm,楼板厚度为120 mm。梁柱主筋采用HRB400,箍筋采用HPB300,混凝土等级为

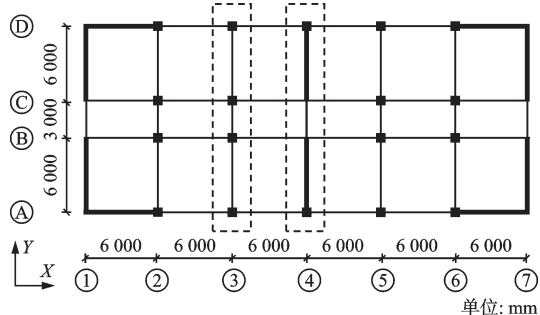


图15 结构平面布置

Fig.15 Floor plan of the structure

C30,构件尺寸与配筋信息相关数据见表2,利用公式(1)计算塑性铰区高度,并在该范围内配置ECC,形成预制ECC耗能墙-框架结构,其它参数均保持不变。参考中国建设工程造价信息网,2020年上半年建安成本为2 261元/m²,本文设计的RC剪力墙-框架结构总建造成本约为1 465万元,墙体底部塑性铰区材料体积约为31.5 m³,ECC参考广材网最新市场价约为1万元/m³,则预制ECC耗能墙-框架结构总建造成本约为1 496万元,成本仅提高2.1%。

表2 构件尺寸与配筋信息

Table 2 Dimensions and reinforcement details of structural components

构件类型	截面尺寸/mm	纵筋	纵向分布钢筋	竖向分布钢筋
框架柱	600×600	4B25+8B18	—	—
框架梁、连梁	300×600	6B22+4B25+4A12	—	—
剪力墙	250×6 000	8B16	B10@200	B12@200

注:剪力墙纵筋为墙肢一侧暗柱内配筋

3.2 有限元建模

为了提高分析效率,对模型进行简化,选取Y方向的一榀框架和一片联肢剪力墙,采用OpenSees建立Y向等价平面模型(图16)。建立等价平面模型通常是保持Y向框架和剪力墙的相对刚度即刚度特征值λ与原结构保持不变,即通过公式(2)^[17]将算例中剪力墙厚度进行折减。建模时,非约束区混凝土采用Concrete01本构模型,ECC采用ECC01本

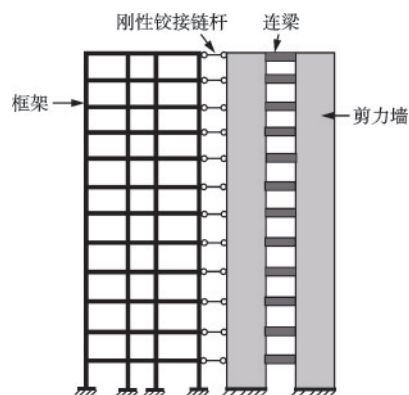


图16 框架剪力墙结构整体等效模型

Fig.16 Global equivalent model of the frame-shear wall structure

构模型,钢筋采用Steel02本构模型;采用修正后的Kent-Park模型^[18],计算核心区混凝土的本构模型;框架梁柱及连梁均采用基于力的纤维单元,墙体部分采用多垂直杆单元模拟,框架和剪力墙之间通过刚性铰接链杆连接。普通框剪结构基本周期为1.3 s,预制ECC耗能墙-框剪结构基本周期为1.2 s。

$$\lambda = H \sqrt{\frac{C_F}{E_c I_{eq}}} \quad (2)$$

式中, λ 为框剪结构特征值; H 为结构高度; C_F 为框架剪切刚度; $E_c I_{eq}$ 为剪力墙等效刚度。

4 静力弹塑性分析与剪力分配规律

为了解结构在侧向加载下的弹塑性行为和剪力分配规律,对结构进行静力弹塑性推覆分析,侧向荷载为水平倒三角分布。对获得的基底剪力-顶点位移关系曲线,采用等能量法^[19]确定结构屈服点,以剪力墙受压侧混凝土达到我国混凝土规范规定的压溃应变0.003 3为结构的极限位移点。静力推覆分析的结果见图17~图19和表3,图中分别采用FSW和ECCFSW代表RC剪力墙-框架结构和预制ECC耗能墙-框架结构。

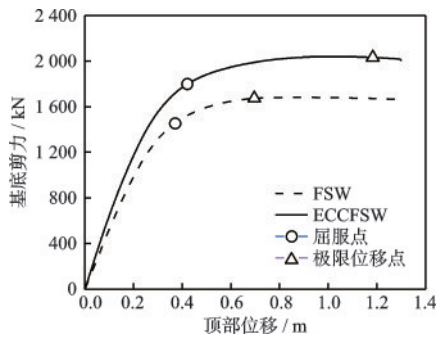


图17 基底剪力-结构顶点位移关系

Fig.17 Base shear-structural top displacement relationship

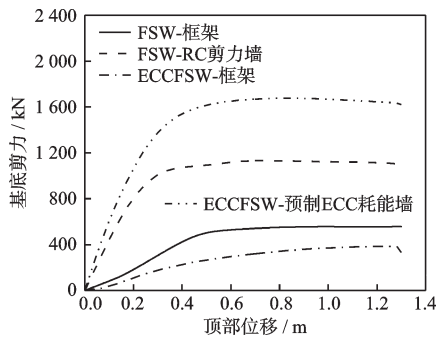


图18 各部分基底剪力

Fig.18 The shear force of each part of the substrate

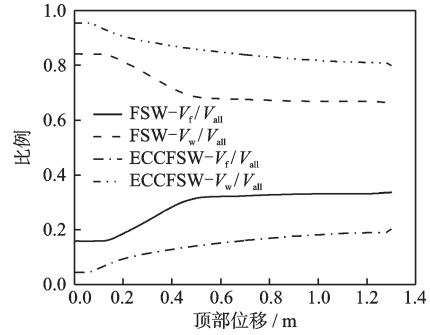


图19 剪力分配比值

Fig.19 Shear force distribution ratio

注: V_f 表示框架部分基底剪力, V_w 表示剪力墙部分基底剪力, V_{all} 表示结构整体基底剪力。

表3 静力推覆分析结构主要受力和变形特征

Table 3 Main mechanical and deformation characteristics of the structures under static pushover analysis

受力和变形特征	RC剪力墙-框架结构			预制ECC耗能墙板-框架结构		
	顶点位移/m	基底剪力/kN	延性系数 μ	顶点位移/m	基底剪力/kN	延性系数 μ
屈服点	0.370	1 455	1.9	0.420	1 750	2.8
极限点	0.696	1 673		1.183	2 031	

图17分别为两种结构的顶部位移与基底剪力关系曲线。相较于普通框剪结构,预制ECC耗能墙-框架结构的抗侧能力得到明显提升,其最大承载力提高了22%。RC剪力墙-框架结构顶点的极限位移为0.696 m,远小于预制ECC耗能墙-框架结构的1.183 m,表明预制ECC耗能墙能有效改善原结构的变形能力,延性系数 μ 从1.9提高到2.8(提升47%)。图18、19则反映了预制ECC耗能墙可以有效调节框架与墙体之间剪力的分配关系。由图19可知ECC墙体承担了更多的剪力,框架承担剪力比例的最大值从32%下降到18%,因此ECC耗能墙的设置降低了框架的地震剪力需求,能对框架结构发挥一定的保护作用。

5 预制ECC耗能剪力墙-框架结构抗震性能分析与评价

5.1 地震波的选取与动力时程分析

相关学者研究表明,对于中等高度的建筑,选取10条~20条地震记录进行增量动力分析可以较为准确的进行地震需求估计^[20]。根据场地条件等

因素从 PEER 数据库中选取 20 条地震动记录作为非线性动力时程分析的激励荷载。

将各条地震波的峰值调幅为 310 cm/s^2 , 调幅后的地震波反应谱平均值和与规范反应谱的比较如图 20 所示, 可以看出所选地震记录的平均反应谱在 $0\sim 2 \text{ s}$ 范围内与规范反应谱吻合良好, 在 $2\sim 4 \text{ s}$ 之间略低于规范反应谱。进行非线性时程分析时, 采用 Rayleigh 阻尼, 阻尼比取 0.05, 数值积分采用 Newmark-Beta 方法 (β 取值为 0.25), 考虑 $P-\Delta$ 效应。

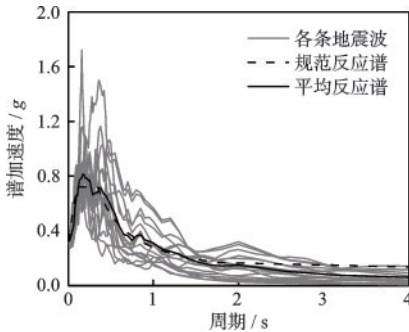


图 20 选择的地震动与我国规范反应谱对比

Fig.20 Comparison between the selected seismic motion and the code response spectrum

5.2 承载力安全程度评价

为了准确了解预制 ECC 耗能墙对框剪整体结构的作用效果, 选取 20 条地震波作用在两种模型上, 计算结构在不同谱加速度条件下侧向力的分配情况。由上文推覆分析可以得到结构在极限变形时的基底剪力 $V_{\text{all},u}$ 、框架部分基底剪力 $V_{\text{f},u}$ 和剪力墙基底剪力 $V_{\text{w},u}$ 。不同谱加速度下结构底部最大剪力平均值与极限状态时剪力的比值可以用来衡量结构的承载力相对安全程度。图 21~图 23 为结构底部总剪力、框架底部总剪力、剪力墙底部总剪力占比随谱加速度的变化图, 其结果为 20 条地震波作

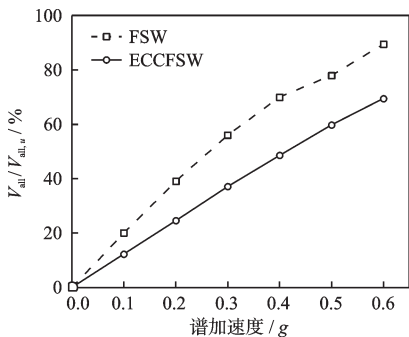


图 21 $V_{\text{all}}/V_{\text{all},u}$ 随谱加速度变化规律

Fig.21 $V_{\text{all}}/V_{\text{all},u}$ varies with spectral acceleration

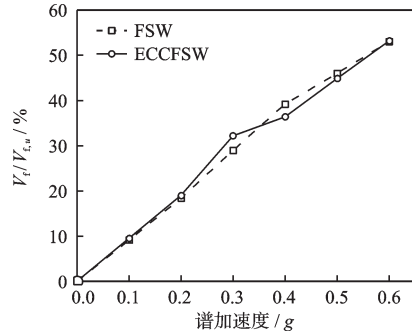


图 22 $V_{\text{f}}/V_{\text{f},u}$ 随谱加速度变化规律

Fig.22 $V_{\text{f}}/V_{\text{f},u}$ varies with spectral acceleration

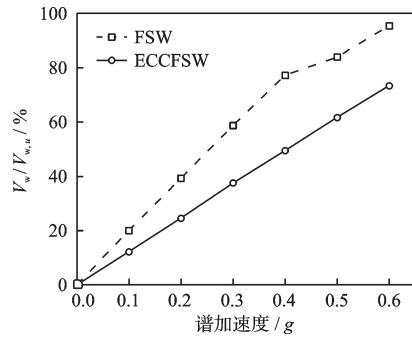


图 23 $V_{\text{w}}/V_{\text{w},u}$ 随谱加速度变化规律

Fig.23 $V_{\text{w}}/V_{\text{w},u}$ varies with spectral acceleration

用下的平均值。图 21 表明采用预制 ECC 耗能墙的框剪结构安全承载能力得到有效提高, 在谱加速度达到 $0.6g$ 时, RC 剪力墙-框架结构的底部剪力已达到总剪力的 89%, 而预制 ECC 耗能墙-框架结构还具有 31% 的安全储备; 框架部分安全储备相差不大 (图 22), 而预制 ECC 耗能墙的相对安全程度高于普通剪力墙 (图 23)。

5.3 地震易损性分析

地震易损性是指结构或构件在给定地震动强度作用下, 达到或超过指定损伤状态极限值的概率或可能性。在假设需求参数和谱加速度的对数线性关系基础上, 进行结构易损性分析, 得到结构在不同谱加速度下不同性能水准的超越概率, 采用公式 (3) 表示。

$$P_f(D \geq C | IM = S_a) = \Phi \left[\frac{\ln(\bar{D}/\bar{C})}{\sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (3)$$

式中, $P_f(D \geq C | IM = S_a)$ 表示在地震动强度 $IM = S_a$ 的地震动作用下结构的需求响应 D 超过其抗震能力 C 的概率; \bar{D} 为结构需求中值; \bar{C} 为结构能力中值; β_D 为结构需求标准差; β_C 为结构能力标准差; $\Phi(\cdot)$

为标准正态累积函数。

通常将建筑结构破坏程度分为若干等级,每一个破坏等级的界限状态被称为极限状态。本文将框架结构的极限状态(Damage State, DS)分为:轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌四个等级,参考文献^[21],各极限状态对应的层间位移角限值为1/800、1/400、1/200和1/100。

由图24可知,预制ECC耗能墙-框架结构的易损性曲线整体向右偏移,即同地震强度条件下,预制ECC耗能墙-框架结构失效概率更小,具有更好的抗震性能。这得益于ECC能够承担一定的拉力且具有优异的受拉应变硬化性能,提高了剪力墙构件的承载能力并能延缓构件的强度与刚度退化,同时在往复地震荷载作用下,ECC的耗能特性增加了结构的等效阻尼比,从而使结构产生更小的层间位移反应,减小了结构的地震损伤概率。

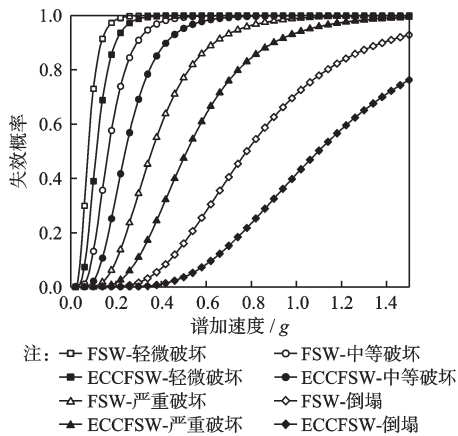


图24 FSW和ECCFSW的地震易损性曲线对比

Fig.24 Comparison of seismic fragility curves for FSW and ECCFSW

5.4 近远场地震动影响分析

已有震害表明,近场地震动会对结构造成更大的破坏作用。因此需要检验ECC耗能剪力墙-框架结构在近场地震动作用下的抗震性能。以断层距离为条件,可将地震划分为近场地震动和远场地震动,本文根据ATC-63^[22]的建议,定义断层距离小于10 km的地震波为近场地震动波,挑选了近场脉冲型、近场非脉冲型和远场各10条地震波。

图25为结构在三类地震作用下的50%分位IDA曲线结果。近场脉冲地震动的IDA曲线比近场非脉冲地震动和远场地震动的IDA曲线斜率更小,即在相同的谱加速度下,受近场脉冲型地震动

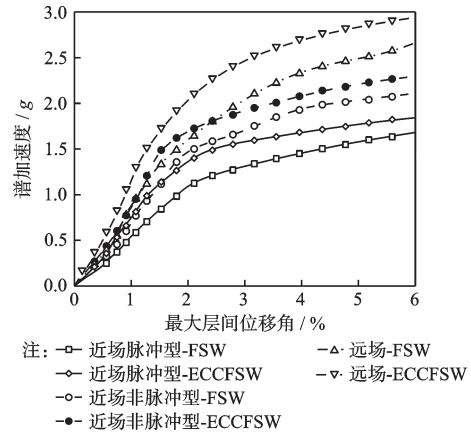


图25 50%分位IDA曲线对比

Fig.25 Comparison of 50% quantile IDA curves

作用的结构产生的层间位移角更大,即近场脉冲型地震动对结构的破坏要大于其他两类地震动。其主要原因近场脉冲型地震动包含有高能的速度脉冲,并以脉冲波的形式沿结构高度传播,致使结构在短时间内承受显著的能量冲击。因此面临近场脉冲型地震风险的建筑物对耗能提出了更高的要求,而具有高耗能特性的ECC可作为提升该类结构耗能性能的有效方案。

图26给出了7度罕遇地震(0.32g)作用下结构层间位移角均值随楼层高度的变化。在三类地震动作用下,预制ECC耗能墙均能够显著减小各楼层的层间位移角。比如在近场脉冲型地震动作用下,RC剪力墙-框架结构在第二层的层间位移角最大值为0.35%,而预制ECC耗能墙-框架结构仅为0.11%,降低了67.5%,其主要原因是ECC耗能墙耗散了更多的地震输入能量,增大了结构的等效阻尼比。两种结构在近场脉冲型地震动下(以Imperi-

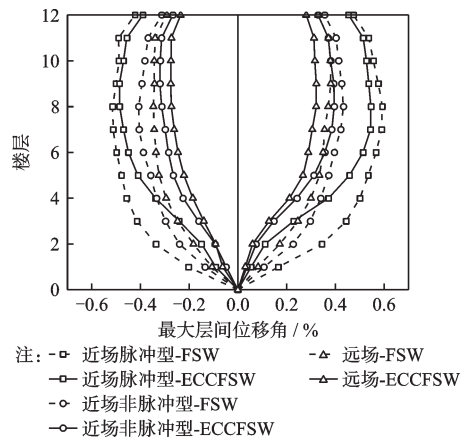


图26 层间位移角对比

Fig.26 Comparison of interstory drift angles

al Valley-06 为例)的耗能情况见图 27~28,可以发现,地震输入能量主要依靠结构的阻尼和滞回特性耗散,对于预制 ECC 耗能墙-框架结构,由于 ECC 的高应变耗能特性,其累积的滞回耗能占总输入能的 35.1%,显著高于 RC 剪力墙-框架结构的 25.6%。因此 ECC 的使用,可以有效降低框架柱、剪力墙中混凝土和钢筋材料的受拉、受压应变,减小构件的损伤破坏,提高结构的抗震性能。

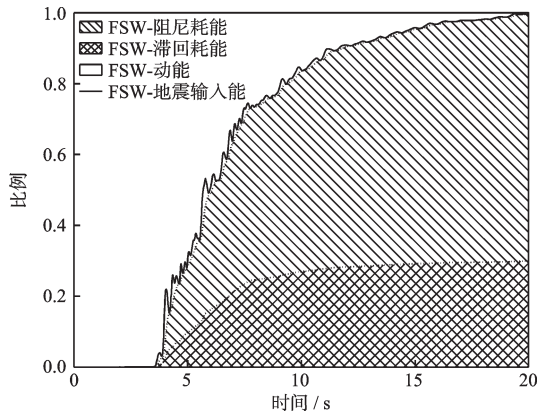


图 27 RC 剪力墙-框架结构

Fig.27 Time histories of seismic input energy and dissipated energy of RC shear wall - frame structure

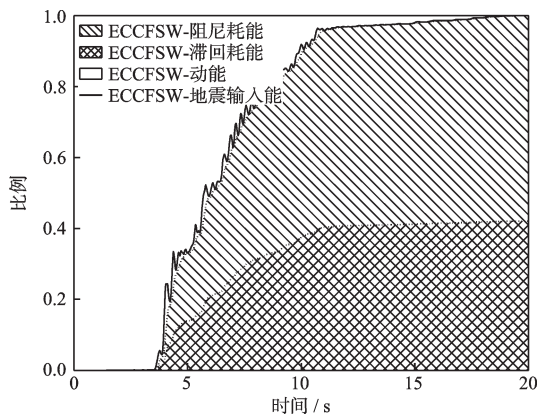


图 28 预制 ECC 耗能墙-框架结构

Fig.28 Time histories of seismic input energy and dissipated energy of Prefabricated ECC energy-dissipating wall-frame structure

6 结 论

(1)用多垂直杆单元模拟剪力墙构件,与已有的剪力墙实验结果吻合良好。利用该单元建立了塑性铰区采用 ECC 材料的预制墙板有限元模型,参数分析表明:预制 ECC 耗能墙的峰值荷载、耗耗能

力相较于普通剪力墙分别提高了 35% 和 31%,但继续增大底部 ECC 使用区高度,其抗震性能提升并不明显;试件的峰值荷载随着轴压比增大而增大,但变形能力降低。

(2)静力推覆分析和易损性分析结果均表明,预制 ECC 耗能墙显著提高了结构整体的承载能力和延性,且随着地震强度的增加,ECC 材料的性能发挥越充分,对结构抗震性能的提升也更明显,以“严重破坏”为极限状态时,在罕遇地震作用下,RC 剪力墙-框架结构的失效概率为 40%,而预制 ECC 耗能墙-框架结构仅为 13%。

(3)近场脉冲型地震动会明显增大结构的响应,预制 ECC 耗能墙能够显著减小各楼层的层间位移角,其主要原因是 ECC 耗能墙耗散了更多的地震输入能量,增大了结构的等效阻尼比。因此 ECC 可以有效降低结构构件混凝土和钢筋材料的应变响应,减小构件的损伤破坏,提升结构的抗震性能。由于预制 ECC 耗能墙-框架的成本相较于 RC 剪力墙-框架结构仅增加 2.1%,配置 ECC 耗能墙是一种有效的结构抗震性能提升方案。

参 考 文 献:

- [1] 姜洪斌,陈再现,张家齐,等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 34-40.
Jiang H B, Chen Z X, Zhang J Q, et al. Quasi-static test of precast reinforced concrete shear wall structure [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 34-40. (in Chinese)
- [2] 钱稼茹,杨新科,秦珩,等. 竖向钢筋采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 51-59.
Qian J R, Yang X K, Qin H, et al. Test on seismic behavior of pre-cast shear walls with various methods of vertical reinforcement splicing [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 51-59. (in Chinese)
- [3] Soudki K A, Rizkalla S H, LeBlanc B. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 1: mild steel connections[J]. PCI Journal, 1995, 40(4): 78-96.
- [4] Guo W, Zhai Z, Cui Y, et al. Seismic performance assessment of low-rise precast wall panel structure with bolt connections [J]. Engineering Structures, 2019, 181: 562-578.
- [5] Li V C. From micromechanics to structural engineering-

- the design of cementitious composites for civil engineering applications[J]. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 1994, 10(2): 1-34.
- [6] Li V C, Wang S, Wu C, et al. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)[J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(6): 483-492.
- [7] 高淑玲, 肖成志, 王晓伟. 依据材料与构件的受弯性能综合评价ECC的控制性[J]. *防灾减灾工程学报*, 2013, 33(2): 201-205.
Gao S L, Xiao C Z, Wang X W, et al. Evaluation and research on crack-controlling behavior of ecc according to bending performance of materials and components [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2013, 33(2): 201-205. (in Chinese)
- [8] 汪梦甫, 黄青山, 邬文奇. 新型外廊式钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究. *地震工程与工程振动*, 2018, 38(1): 135-143.
Wang M F, Huang Q S, Wu W Q. Experimental study on seismic behavior of innovative side corridor RC frame. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2018, 38(1): 135-143. (in Chinese)
- [9] 苏骏, 徐世焱, 毕辉. UHTCC新型梁柱节点抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2010, 30(2): 59-63.
Su J, Xu S L, Bi H. Experimental research on seismic behavior of new beam-column joints by using cementitious composites with ultrahigh toughness [J]. *Earthquake Engineering and Engineering*, 2010, 30(2): 59-63. (in Chinese)
- [10] 梁兴文, 郑雨, 邓明科, 等. 塑性铰区采用纤维增强混凝土剪力墙的变形性能研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(3): 256-262.
Liang X W, Zheng Y, Deng M K, et al. An investigation of deformation behavior of the shear wall with fiber-reinforced concrete in plastic hinge region[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(3): 256-262. (in Chinese)
- [11] 党争, 梁兴文, 邓明科, 等. 纤维增强混凝土剪力墙抗震性能试验研究与理论分析[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(6): 12-22.
Dang Z, Liang X W, Deng M K, et al. Experimental and theoretical studies on seismic behavior of fiber reinforced concrete shear walls [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(6): 12-22. (in Chinese)
- [12] 徐世焱, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(6): 45-60.
Xu S L, Li H D. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(6): 45-60. (in Chinese)
- [13] 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): 749-757.
- [14] Lu X, Xie L, Guan H, et al. A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2015, 98: 14-25.
- [15] Vulcano A, Bertero V V. Analytical models for predicting the lateral response of RC shear walls: Evaluation of their reliability[R]. *Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California*, 1987.
- [16] 蔡景明, 潘金龙, 苏浩. 钢筋增强ECC-钢管混凝土组合柱抗震性能试验及其数值模拟[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(7): 55-62.
Cai J M, Pan J L, Su H. Experimental and analytical research on seismic behavior of ECC-encased concrete-filled steel tubular columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(7): 55-62. (in Chinese)
- [17] 叶列平. *混凝土结构*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [18] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates[J]. *ACI Journal*, 1982, 79(1): 13-27.
- [19] 殷晓三. 无明显屈服特征构件屈服点的确定与评价[J]. *地震工程与工程振动*, 2019, 39(3): 143-150.
Yin X S. Evaluation and determination methods on yield point of structural components without obvious yield feature [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2019, 39(3): 143-150. (in Chinese)
- [20] Shome N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures[D]. San Francisco: Stanford University, 1999.
- [21] 吕西林. *超限高层建筑工程抗震设计指南*[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- [22] Applied Technology Council. Quantification of building seismic performance factors[S]. US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.

(本文编辑:周小潭)