

钢板-纤维增强混凝土连梁抗震性能研究

萨仁高娃¹, 聂建春¹, 张 振¹, 王 旭¹, 李晨霞¹, 田建勃², 王游春², 刘高举²

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力经济技术研究院分公司, 内蒙古 呼和浩特 010010;

2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为提升小跨高比钢筋混凝土连梁的抗震性能, 提出一种新方案, 即钢板-纤维增强混凝土连梁, 通过对内置钢板-混凝土连梁和钢板-纤维增强混凝土连梁试件进行低周反复加载试验, 研究连梁的破坏过程及滞回性能。结果表明: 钢板-混凝土连梁在加载过程中, 主剪切裂缝发展明显, 最终发生弯曲剪切型破坏, 而钢板-纤维增强混凝土在加载过程中, 相比较于弯曲裂缝, 剪切裂缝发展缓慢, 加载到中后期, 剪切裂缝基本停止发展, 表现出较好的变形能力, 直至试件破坏钢板-纤维增强混凝土连梁试件整体保持形态完整, 最终发生以弯曲控制为主的破坏。纤维的加入能够有效地限制混凝土裂缝宽度, 保持试件的完整性, 并能在一定程度上改善连梁的破坏模式。在此基础上, 通过有限元软件 ABAQUS 对钢板-纤维增强混凝土连梁进行参数分析, 对钢板-纤维增强混凝土连梁的抗震性能进行研究, 探究跨高比、钢板配板率、纤维增强混凝土抗压强度、纵筋配筋率和箍筋配筋率等因素对其性能的影响, 为其实际应用提供理论支持。

关键词: 纤维增强混凝土; 滞回性能; 有限元; 钢板-纤维增强混凝土连梁; 参数分析

中图分类号: TU398⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0492-10

Study on seismic performance of steel plate-fiber reinforced concrete coupling beams

SAREN Gaowa¹, NIE Jianchun¹, ZHANG Zhen¹, WANG Xu¹, LI Chenxia¹,
TIAN Jianbo², WANG Youchun², LIU Gaoju²

(1. Inner Mongolia Power Economic and Technological Research Institute, Hohhot 010010, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to enhance the seismic performance of reinforced concrete (RC) coupling beam with small span-to-depth ratio, a new type of steel plate-fiber reinforced concrete coupling beam is proposed in this paper. The low-cycle repeated loading test was carried out on the specimens of steel plate-concrete coupling beam and steel plate-fiber reinforced concrete coupling beam, and the failure process and hysteretic performance of the coupling beam were studied. The results show that during the loading process of the steel plate-concrete coupling beam, the main shear crack develops obviously, and finally the bending shear failure occurs. However, during the loading process of the steel plate-fiber reinforced concrete, the shear crack develops slower than the bending crack, and in the middle and late stages of loading, the shear crack basically stops developing, showing good deformation ability. Until the specimen fails, the steel plate-fiber reinforced concrete coupling beam specimen remains intact as a whole, and finally the failure dominated by bending control occurs. The addition of fiber reinforced concrete can effectively limit the crack width of concrete, maintain the integrity of specimens, and improve the failure mode of coupling beams to a certain extent. On this basis, the parameter analysis of steel plate-fiber reinforced concrete coupling beam is carried out by finite element software ABAQUS. The influence of span-depth ratio, steel plate ratio, fiber reinforced concrete compressive strength, longitudinal reinforcement and stirrup reinforcement ratio on the seismic performance of steel plate-fiber reinforced concrete coupling beam is studied, which provides a theoretical basis for the practical application of steel plate-fiber reinforced concrete coupling beam.

Key words: fiber reinforced concrete; hysteretic performance; finite element; steel plate-fiber reinforced concrete coupling beam; parametric analysis

收稿日期: 2023-07-23

修回日期: 2024-06-03

基金项目: 陕西省自然科学基金(2017JQ5032)

第一作者: 萨仁高娃(1976—), 女, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为混凝土结构及抗震、电力工程咨询技术管理。E-mail: srgw2020@163.com

连梁是高层建筑剪力墙或核心筒结构体系中的关键构件,因其具有较小的跨高比,在强烈地震作用下连梁易发生脆性剪切破坏。为了改善钢筋混凝土连梁的抗震性能,对角斜筋^[1]和菱形配筋^[2]方案被提出,这些配筋方案均在一定程度上提高了连梁的受剪承载力及其延性,但由于所配钢筋仅能在一定范围内抵抗剪力传递,当跨高比较小时连梁破坏形态多以剪切破坏为主,存在施工困难等问题。

相关研究表明,钢板-混凝土组合(PRC)连梁是一种综合性能更优的连梁形式,具有较高的受剪承载力和耗能能力,且构造简单、施工方便。学者 Subedi 等^[3]首次提出将钢板内置到连梁中,通过单调荷载下的试验结果表明,钢板高度很高时,虽然连梁尺寸较小,却拥有很高的抗剪承载力。在此基础上,为了深入探究小跨高比混凝土连梁的抗震性能,学者 Lam^[4]、张刚^[5]、史庆轩^[6]、田建勃^[7-9]、侯炜^[10-11]、邓明科^[12]等进行了相关研究,探究了内置钢板对其性能的影响,以期得出更为精准的结论,研究发现随着钢板的加入,连梁的耗能能力与变形能力均有显著提高,有效改善了钢筋混凝土连梁的抗震性能。

另外,改善普通混凝土的性能也是提升混凝土结构性能的一种方法,其中纤维增强混凝土作为一种新型的绿色环保建筑材料,具有高韧性、高耗能等优点。相较于普通混凝土,由于纤维的加入,其强度和韧性均有所提升,受压强度提升了两至三倍之多^[13];同时,内部纤维的桥联作用在微观结构中形成网状结构,使得拉伸时呈现出高度应变硬化的特性,其极限拉伸强度提升2%~6%^[14]。由于变电站砖砌结构长期遭受冻融和盐蚀作用,导致构件承载能力下降,结构的安全性能降低,严重影响结构的使用功能,进而可采用纤维增强混凝土显著提升其安全可靠。为探究纤维增强混凝土的性能,学者 Canbolat 等^[15]、Shin 等^[16]以及杨忠^[17]、梁兴文^[18]、邓明科^[19]对其进行研究,结果表明,掺入纤维材料的连梁在耗能能力、延性、承载能力等方面均呈现出显著的提升。这是由于纤维的加入可以有效地抑制混凝土的裂缝展开,降低混凝土的损伤,保持试件的完整性,这有利于混凝土和钢板协同工作,提高连梁的抗震性能。

因此,本文提出了采用纤维增强混凝土代替普通混凝土作为组合连梁的基体材料,提出新型钢板-纤维增强混凝土组合连梁,利用纤维增强混

凝土优异的弯拉性能、拉伸断裂能、高韧性及高耐损伤能力,进一步优化钢板-混凝土组合连梁的抗震性能。完成一组拟静力试验,分析结构的破坏过程及滞回性能。在此基础上,通过有限元软件 ABAQUS 对钢板-纤维增强混凝土连梁进行参数分析,研究跨高比、钢板配板率、纤维增强混凝土抗压强度、纵筋配筋率和箍筋配筋率对钢板-纤维增强混凝土连梁的性能影响,为实现该新型方案的设计和应用提供理论支持。

1 试验概况

1.1 试件设计

制作两个不同连梁试件,试件编号分别为 CS-1、CS-2。主要变化参数为连梁部分混凝土类型,试件 CS-1 的连梁部分采用纤维增强混凝土,试件 CS-2 的连梁部分采用普通商品混凝土。为了使试件端部的受力情况和变形特点与实际情况相符,试件由连梁、部分剪力墙和端块三个部分组成,形状为“哑铃”形,2个试件除了连梁部分浇筑的混凝土不同,其余参数均相同。试件各部分设计参数如表1、表2和表3所示。

试件的上下端块尺寸相同,截面尺寸均为300 mm×500 mm,端块中的配筋量较大,以保证试件在加载时有足够的约束和刚度,防止端块变形影响测试精度。端块部分设计混凝土强度为C40,保护层厚度为15 mm,端块的具体尺寸及配筋如图1所示。

为了让连梁的受力和边界条件更加接近实际情况,在连梁两端设置高800 mm的剪力墙,截面尺寸为160 mm×525 mm。CS-1、CS-2的连梁部分截面尺寸相同,均为160 mm×320 mm,跨度为480 mm,跨高比为1.5。其中,将纤维增强混凝土用于CS-1试件的连梁,将C40强度混凝土用于CS-2试件的连梁,两试件连梁设10 mm厚的混凝土保护层,且剪力墙部分也采用同CS-2的材料。对其进行拟静力加载试验后,对各构件分析其受力性能,并与普通钢筋混凝土结构作比较。如图1所示,连梁和剪力墙和具体尺寸以及配筋方案已被详细阐述。

根据《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[20],构件制作过程中,采用将钢板内置在混凝土中的连梁形式和钢板混凝土剪力墙相结合的方式,钢板混凝土剪力墙内除了设置有钢板外,还在墙肢边缘处设置有型钢暗柱。将连梁中的内置钢板、墙肢中的内置钢板分别与型钢暗柱焊接,

形成一个整体钢构件。为了使钢板与混凝土能够协同工作，在钢板表面均焊有抗剪栓钉。钢构件

具体尺寸及栓钉布置如图 2 所示。

表 1 连梁设计参数

Tab. 1 Design parameters of coupling beam

净跨/mm	截面尺寸/mm ²	单侧纵筋	箍筋	钢板截面高度/mm	钢板截面厚度/mm	钢板总长度/mm	钢板强度等级
480	320×160	2 ￠16	￠ 8@100	260	8	600	Q355

表 2 剪力墙设计参数

Tab. 2 Design parameters of shear wall

墙肢尺寸/mm	水平、竖向分布筋	边缘暗柱范围/mm	暗柱配筋	钢板截面尺寸/mm ²	钢板高度/mm	钢板强度等级
525×160	￠ 8@100 ￠ 14@100	240	纵筋 6 ￠ 14 箍筋 ￠ 8@100	810×6	800	Q355

表 3 型钢梁柱尺寸

Tab. 3 Steel column dimension

构件类型	截面高度/mm	腹板厚度/mm	翼缘宽度/mm	翼缘厚度/mm	高度/mm	强度等级
型钢柱	120	6	80	10	800	Q355

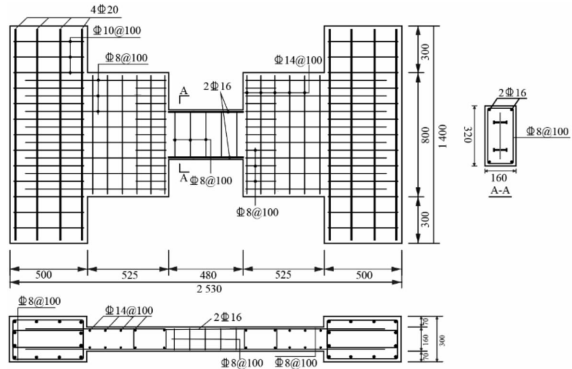


图 1 试件尺寸及配筋详图

Fig. 1 Specimen size and reinforcement details

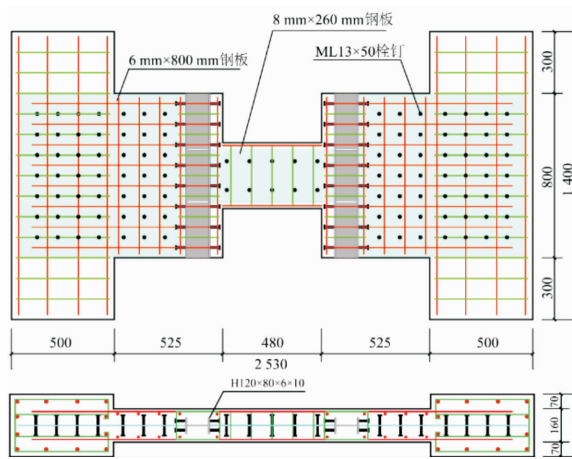


图 2 钢构件尺寸及栓钉布置图

Fig. 2 Steel member size and stud layout diagram

1.2 材料的性能

本次试验使用混凝土中掺入纤维的高性能材料，即纤维增强混凝土，该材料主要包括水泥基

材料和体积掺量为 2% 的聚乙烯醇(PVA)纤维，PVA 的性能指标如表 4 所示。另外，将粉煤灰、精细砂、普通硅酸盐水泥以及外加剂以特定比率进行混合搅拌而制成水泥基体，配合比见表 5。纤维增强混凝土由卧轴式强制搅拌机现场搅拌完成。

为了测量纤维增强混凝土的抗压强度，在试件浇筑当天，预留 3 组共 9 个边长 100 mm 的标准立方体试块，同条件养护。试验前测得纤维增强混凝土立方体抗压强度平均值为 69.30 MPa，由此可得纤维增强混凝土轴心抗压强度平均值为 55.44 MPa。作为对比，预留一定数量 C40 混凝土的标准立方体试块，其边长 150 mm，与试件同条件养护。在试验前进行测量，混凝土立方体抗压强度平均值为 41.18 MPa，由此可得混凝土轴心抗压强度平均值为 31.30 MPa。实测钢筋和钢板的力学性能指标如表 6 所示。

表 4 PVA 指标

Tab. 4 Indicators of PVA fibers

长度/mm	直径/ μm	抗拉强度/MPa	伸长率/%	弹性模量/GPa
12	39	1 620	7	42.8

表 5 水泥基体配合比

Tab. 5 Cement matrix mix proportion

水/g	水泥/g	粉煤灰/g	砂/g	PVA/g	减水剂/mL
346.95	598.18	598.18	430.69	26	3

表 6 钢材材性
Tab. 6 Mechanical properties of steel

钢材种类	钢材型号	$t(d)/\text{mm}$	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/MPa
连梁箍筋	HPB300	8	343	435	2.10×10^5
连梁纵筋	HRB400	16	435	643	1.95×10^5
墙肢箍筋	HRB400	8	423	705	1.94×10^5
墙肢水平分布筋	HRB400	8	425	653	1.98×10^5
墙肢竖向分布筋	HRB400	14	425	622	1.97×10^5
端块纵筋	HRB400	20	440	658	1.92×10^5
端块箍筋	HRB400	10	457	657	1.96×10^5
钢板	Q355	6	358	505	2.06×10^5
	Q355	8	370	523	2.06×10^5
	Q355	10	382	522	2.03×10^5

注: t 代表钢板厚度; d 代表钢筋直径.

1.3 加载方案

此次试验使用模拟地震作用下结构在反复荷载下的加载试验设备——建研式装置, 在加载过程中对试件抗震性能的变化进行仿真. 为更好地模拟结构在地震中的受力情况, 通过 1 000 kN 作动器对倒置的 L 型钢臂上施加水平荷载, 以此作为试件的横向作用力, 以保证作用点与连梁反弯点处于同一水平线上. 在试验过程中, 为了使试件上部端块发生定向位移, 将试件的上端块与带有四连杆装置的 L 型钢臂相连, 为加载提供水平向与竖向位移; 为保证试验数据的准确性与真实性, 将试件下端块通过压梁固定, 并利用螺栓将压梁与地梁固定连接, 以防止试验过程中试件发生滑动从而影响试验结果. 试验加载示意图和实际加载装置如图 3 所示.

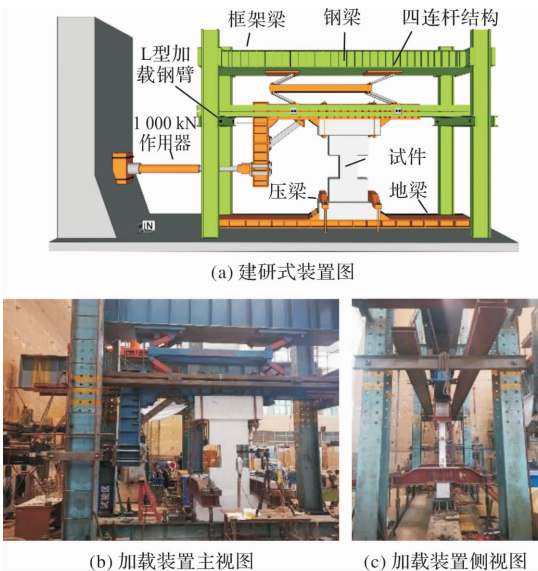


图 3 加载装置图
Fig. 3 Test setup

试验的测试内容包括: 连梁两端线位移、施加在连梁中心的水平往复荷载值、试件内嵌钢板及钢筋的应变、连梁及墙肢的破坏形态, 试验位移计的布置如图 4 所示.

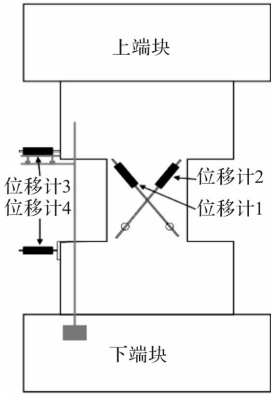


图 4 试验位移计布置图
Fig. 4 Test displacement meter layout

1.4 试验现象

试件 CS-1 荷载加至 +120 kN 时, 连梁中心偏右位置出现一条沿对角线方向的斜裂缝, 长约 10 cm; 荷载加至 -300 kN 时, 连梁下端部水平裂缝贯通, 此后构件进入位移控制阶段, 位移增量为 2 mm, 每级循环 3 次; 位移加至 +4.8 mm 时, 连梁右上角水平裂缝向墙肢内延伸, 长约 25 cm, 对角斜裂缝基本贯通, 此时最大裂缝宽度为 0.4 mm; 位移加至 +6.3 mm 时, 试件达到峰值荷载, 大小为 470.1 kN; 位移加载至 +18.8 mm 时, 停止加载, 试验结束, 最终破坏形态如图 5 (a)所示.

试件 CS-2 荷载加至 +120 kN 时, 连梁中心偏右位置出现一条沿对角线方向的斜裂缝, 长约 10 cm; 荷载加至 -300 kN 时, 连梁下端部水平裂缝贯通, 此后构件进入位移控制阶段, 位移增量为 2 mm, 每级循环 3 次; 位移加至 +4.8 mm 时, 连梁右上角水平裂缝总长约 25 cm; 位移加至 +6.3 mm 时, 试件达到峰值荷载, 大小为 470 kN; 位移加载至 +18.8 mm 时, 停止加载, 试验结束, 最终破坏形态如图 5 (b)所示.

浇筑普通混凝土的连梁在加载过程中, 混凝土严重损坏, 裂缝处大面积混凝土被压碎、脱落, 带有明显的脆性破坏特征; 而浇筑纤维增强混凝土的连梁, 在破坏以前均保持完整性, 未出现剥落现象, 且由于纤维的存在有效限制了混凝土裂缝宽度. 试件 CS-1 在加载过程中, 剪切裂缝缓于弯曲裂缝发展, 且到加载中后期, 剪切裂缝基本停止发展, 最终发生以弯曲控制为主的破坏. 试

件 CS-2 在加载过程中,主剪切裂缝发展明显,最终发生弯曲剪切型破坏。

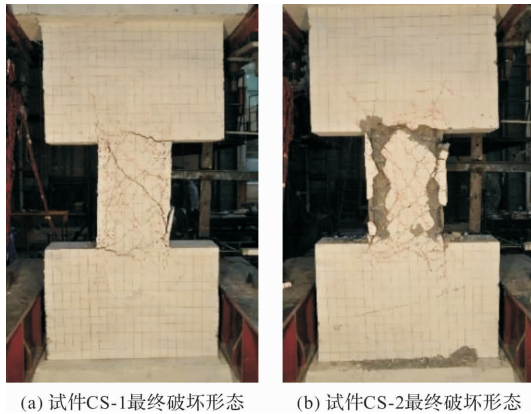


图5 各试件破坏形态

Fig. 5 Failure mode of each specimen

1.5 滞回曲线

图6为试验所得试件CS-1、CS-2的滞回曲线,曲线中试件的荷载值用 V 表示,水平位移值用 Δ 表示。通过对数据及现象分析得出了如下的结论:

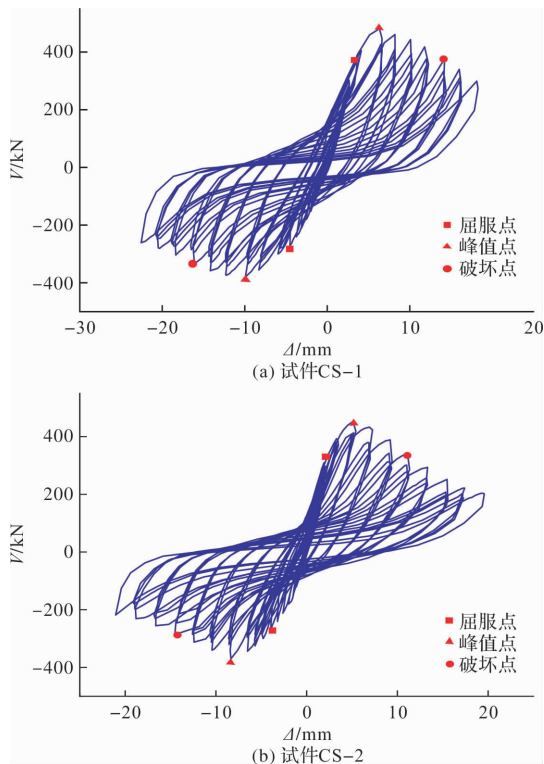


图6 各试件滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curve of each specimen

(1)在试件初始加载阶段,结构受荷较小,此时试件残余变形不大且基本处于弹性阶段,荷载与位移几乎成线性关系且滞回环比较小,加载卸载基本保持直线,此时耗能较低。随着加载的进行,试件开裂,随后钢筋和钢板达到屈服,试件的累积损伤逐渐增加,逐步进入弹塑性阶段。由

于卸载时受拉区的裂缝并不能完全闭合,滞回曲线不再保持近似直线形状,残余变形逐渐增大。反向加载时受压区仅依靠试件内置钢板承担压力,刚度较小,加载到混凝土裂缝完全闭合后受压混凝土才开始参与工作,所以滞回曲线出现一定的捏缩现象。

(2)当试件达到峰值荷载后,结构的累积耗能呈不断增加之势,而荷载-位移曲线的坡度则显著减小,呈现出强度与刚度的退化现象。此时,试件CS-2相比CS-1,其滞回环面积较小且在峰值荷载作用下承载力退化比较明显,而采用纤维增强混凝土的试件CS-1滞回环面积较大,在峰值荷载后承载力下降缓慢,该结果表明采用纤维增强混凝土可以提高连梁的延性和耗能。

(3)分析可知,钢板-纤维增强混凝土连梁的开裂荷载及位移明显大于钢板-混凝土连梁,位移延性系数高出18.8%,说明由于纤维增强混凝土内部纤维的桥联作用,使其能够比普通混凝土更晚开裂,从而使连梁承受更大的荷载。

2 有限元参数分析

2.1 有限元模型建立

采用ABAQUS有限元软件建立PRC连梁模型,本文普通混凝土受压本构采用软件提供的混凝土塑性损伤模型,混凝土受拉本构采用“应力-裂缝宽度”关系描述混凝土受拉力学行为,普通混凝土本构关系参照文献[7]。

纤维增强混凝土本构方程采用文献[21]提出的纤维混凝土应力-应变关系,按下式计算。

$$y = \begin{cases} \frac{Ax - x^2}{1 + (A-2)x}, & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{A_1 x}{1 + (A_1 - 2)x + x^2}, & x \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A = E_0/E_c$, E_0 为原点切线模量, E_c 为峰值应力点处割线模量; $x = \epsilon/\epsilon_c$, $y = \sigma/\sigma_c$, ϵ_c 、 σ_c 分别为峰值点对应的应变和应力; $A = 0.001 + 1.672\sigma_3/f'_c$, σ_3/f'_c 为侧向微压,其中 f'_c 为混凝土棱柱体抗压强度。高延性混凝土的极限压应变 ϵ_{1u} 可取为 0.65%。

纤维增强混凝土受拉应力-应变关系通常采用双线性模型作为其简化模型^[22],此模型的应力-应变关系按下式计算。

$$\sigma = \begin{cases} E_c \epsilon, & \epsilon \leq \frac{\sigma_{ss}}{E_c} \\ \sigma_i + E_s \epsilon, & \epsilon > \frac{\sigma_{ss}}{E_c} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $E_{ie} = (\sigma_{tu} - \sigma_{ss}) / (\sigma_{tu} - \sigma_{ss} / E_c)$; $\sigma_i = \sigma_{ss} (1 - E_{ie} / E_c)$, E_c 为弹性模量, σ_{ss} 为稳定开裂应力, σ_{tu} 为极限拉应力。

钢材本构采用双折线模型, E_0 为其初始的弹性模量, $0.01 E_0$ 为其屈服后的弹性模量, 此外, 钢材初始弹性模量由材性试验所得。

混凝土、钢筋和钢板分别采用实体单元 (C3D8R)、三维线性桁架单元 (T3D2) 和壳单元 (S4R) 分离式建模。文献[23]表明当在试验中钢板设置了足够数量的抗剪栓钉, 可以忽略钢板与混凝土之间的滑移, 因此, 模拟中钢板和钢筋均采用内嵌 (Embedded) 定义约束。上端块与 L 形钢臂绑定 (Tie) 连接, 加载点位于过连梁中心的水平直线上, 加载点与钢臂之间设置刚性垫片, 钢垫片与钢臂采用绑定 (Tie) 连接, 加载点与钢垫片耦合 (Rigid body), 使其沿水平方向做刚体运动, 下端块底面与参考点耦合 (Coupling), 约束参考点 6 个方向的自由度。为保证模拟分析有较好的收敛性和计算效率, 混凝土和钢筋均网格划分为 50 mm, 并且位移控制的加载方案, 有限元模型如图 7 所示, 网格划分如图 8 所示。

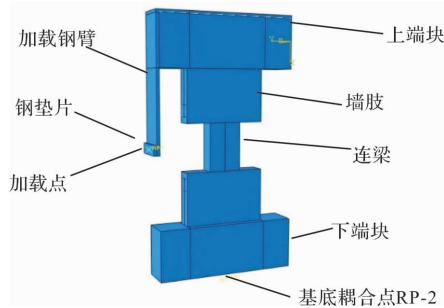


图7 连梁 CS-1 三维模型

Fig. 7 CS-1 three-dimensional model of coupling beam

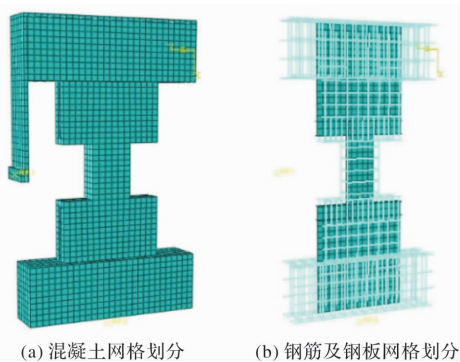


图8 连梁网格划分

Fig. 8 Coupling beam mesh division

2.2 模拟与试验的结果对比分析

图 9 和图 10 分别为试件 CS-1 骨架曲线对比图和试件最终损伤对比图。从图 9 骨架曲线对比看

出, 经 ABAQUS 模拟得到 CS-1 的峰值荷载为 484 kN, 与其对应的位移是 7.8 mm, 试验得到的峰值荷载及其对应的位移分别为 481 kN 和 6.3 mm, 表明有限元模拟所得曲线与试验所得骨架曲线吻合较好, 峰值荷载相差不到 1%, 但峰值位移相差 24%, 这可能是由于试验中装置松动造成的, 而在模拟中试件是理想的边界条件, 因此峰值荷载略高于试验值。

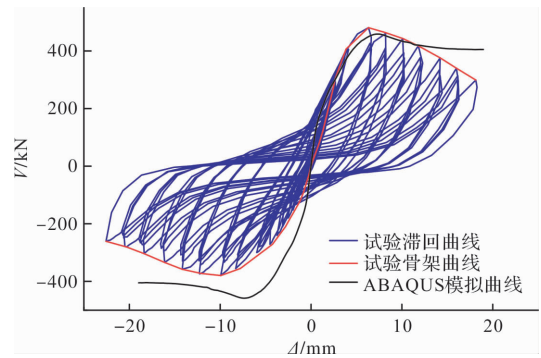


图9 试件骨架曲线对比

Fig. 9 Skeleton curve comparison diagram

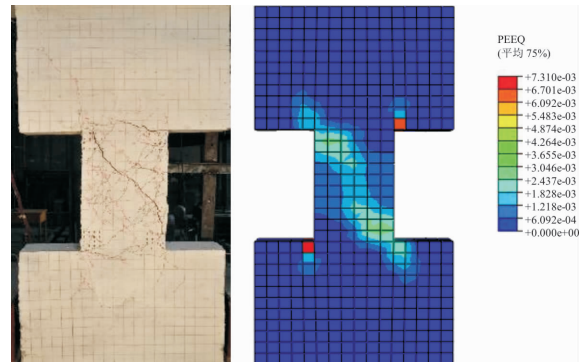


图10 试件损伤对比图

Fig. 10 Comparison diagram of specimen damage

2.3 连梁内力分布

图 11~图 16 给出了试件 CS-1 和试件 CS-2 的混凝土、内嵌钢板的 Mises 应力分布云图, 应力分布云图分别对应 50% 峰值荷载、75% 峰值荷载和 100% 峰值荷载 3 个阶段。由图可得出以下结论:

(1) 两试件连梁部分混凝土在加载到峰值荷载 50% 时, 可以观察到明显的对角压杆形成, 此过程伴随着混凝土开裂, 抵消了一部分剪力, 类似的现象在普通钢筋混凝土连梁中也可以观察到, 随着加载的继续进行, 梁墙交界处的应力迅速增长, 成为试件中应力最大的区域;

(2) 试件 CS-1 和试件 CS-2 的连梁纵筋均在梁墙交界处应力最大, 而纵向钢筋随着荷载的增加, 其参与受力的范围也逐渐扩大, 直至达到峰值荷载之前均已发生屈服;

(3)在加载过程中两试件连梁钢板与墙肢型钢暗柱翼缘焊接处应力最大,当达到峰值荷载 75% 时,钢板角部边缘已经屈服,此处也印证了第二章中连梁钢板角部撕裂的现象.在达到峰值荷载时,连梁钢板两端均已全截面屈服,此现象说明连梁内嵌钢板能够抵抗弯矩,改善连梁的屈服机制.

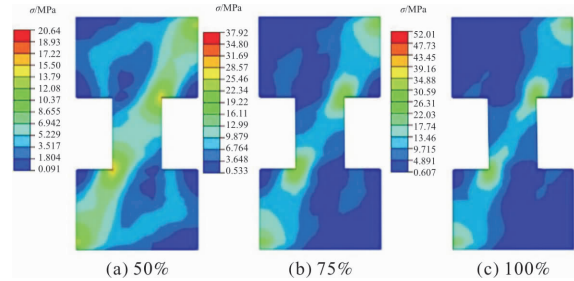


图 11 CS-1 混凝土应力发展情况

Fig. 11 Stress development of CS-1 concrete

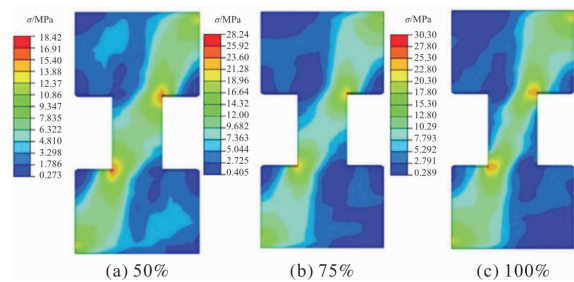


图 12 CS-2 混凝土应力发展情况

Fig. 12 Stress development of CS-2 concrete

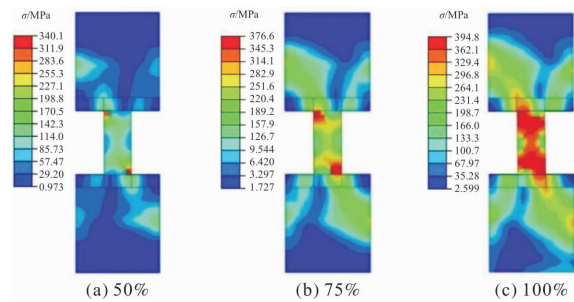


图 13 CS-1 内置钢板应力发展情况

Fig. 13 Stress development of CS-1 plate

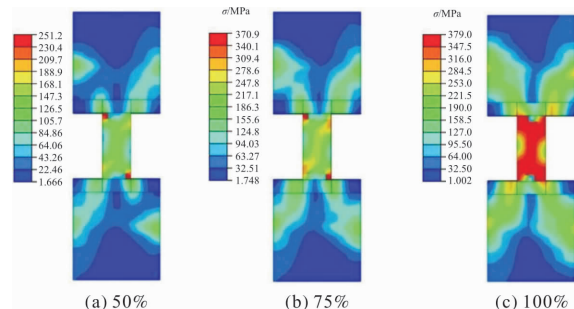


图 14 CS-2 内置钢板应力发展情况

Fig. 14 Stress development of CS-2 plate

2.4 钢板-纤维增强混凝土连梁参数分析

在试验基础上为进一步探究钢板-纤维增强混凝土连梁抗震性能的影响因素,通过有限元软件进行参数分析,包括跨高比、混凝土抗压强度、纵筋配筋率、箍筋配筋率参数.

2.4.1 跨高比

图 15 给出了连梁跨高比对钢板-纤维增强混凝土连梁的影响.本组分析选取跨高比为变化参数,以试件 CS-1(跨高比为 1.5)为基本试件,连梁截面保持不变,分别设置连梁跨度为 256、320、640、800 mm 的有限元模型,对应的跨高比分别为 0.8、1.0、2.0、2.5.由计算结果可知,连梁跨高比越大,峰值承载力越大,但由于连梁跨高比较小时,易出现脆性剪切破坏,导致位移延性降低.随着跨高比的增大,连梁两端逐渐出现弯曲塑性铰,通过弯曲塑性铰的转动能力耗能,从而提高连梁的延性.

2.4.2 内置钢板配板率

图 16 给出了连梁钢板配板率对钢板-纤维增强混凝土连梁的影响.本组分析选取钢板厚度为变化参数,以试件 CS-1(钢板厚度 8 mm)为基本试件,钢板高度保持不变,分别设置钢板厚度为 4、6、10、12 mm 的有限元模型,对应的配板率分别为 2.24%、3.36%、5.56%、6.72%.由计算结果可知,配板率的增大对钢板-纤维增强混凝土连梁的抗震性能有显著影响,随着配板率的提高,钢板-纤维增强混凝土连梁的初始刚度逐渐增大,峰值承载力随之上升.模型的延性系数处于 1.8~2.2 之间,说明配板率的提高对延性系数影响不大.

2.4.3 纵筋配筋率

图 17 给出了连梁纵筋配筋率对钢板-纤维增强混凝土连梁的影响,本组分析选取连梁纵筋直径为变化参数,以试件 CS-1(纵筋直径 16 mm)为基本试件,其他参数保持不变,分别设置纵筋直径为 12、18、20、25 mm 的有限元模型,对应的配筋率分别为 0.49%、1.10%、1.35%、2.11%.由计算结果可知,纵筋配筋率对钢板-纤维增强混凝土连梁的抗震性能影响有限,5 个模型的骨架曲线几乎重合,位移延性随着纵筋配筋率的增大而降低.

2.4.4 箍筋配筋率

图 18 给出了连梁箍筋配筋率对钢板-纤维增强混凝土连梁的影响,本组分析选取连梁箍筋间距为变化参数,以试件 CS-1(箍筋间距 100 mm)为基

本试件, 其他参数保持不变, 分别设置箍筋间距为 35、55、70 mm 的有限元模型, 对应的箍筋配筋率分别为 1.80%、1.15%、0.90%。由图可知, 箍筋配筋率的提高对钢板-纤维增强混凝土连梁抗震性能的影响不大, 与配箍率为 0.63% 的连梁相

比, 配箍率为 0.90%、1.15%、1.80% 的连梁峰值承载力分别提高了 1.19%、2.81% 和 4.16%, 说明提高配箍率能够小幅提高连梁的峰值承载力。模型的延性系数处于 1.8~2.0 之间, 配箍率的提高对延性系数影响不大。

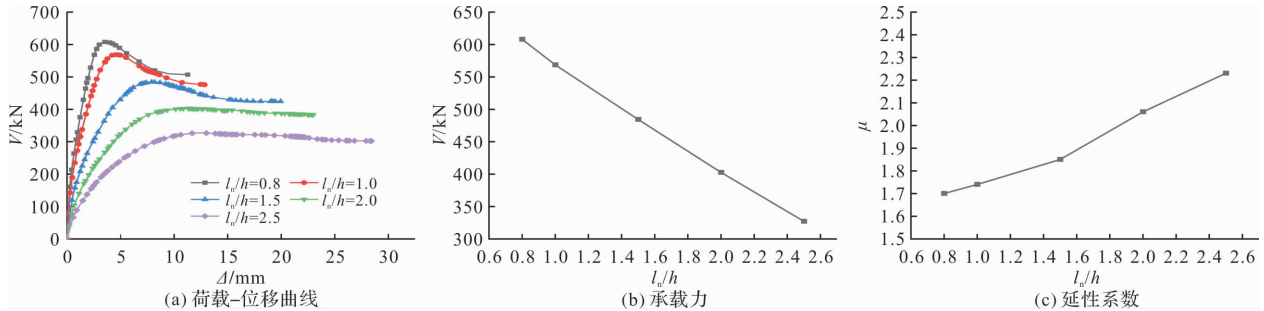


图 15 连梁不同跨高比荷载-位移曲线对比

Fig. 15 Comparison of load-displacement curves of coupling beams with different span height ratio

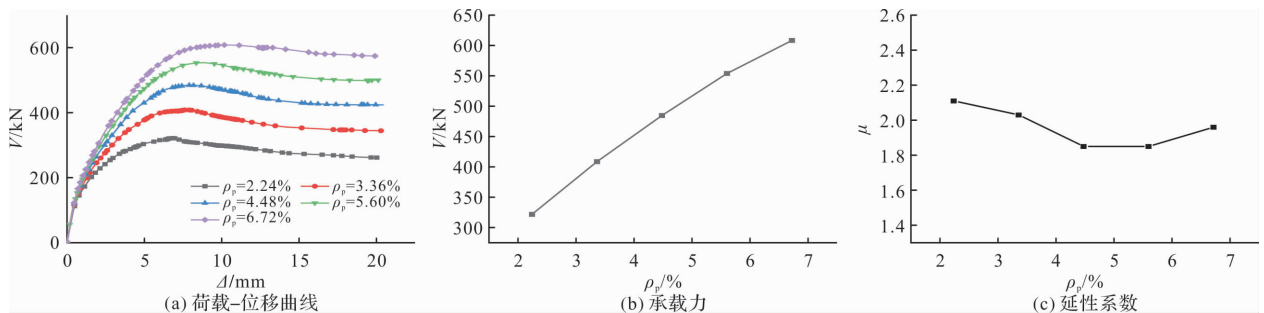


图 16 连梁不同钢板配板率荷载-位移曲线对比

Fig. 16 Comparison of load-displacement curves of different steel plate ratios of coupling beams

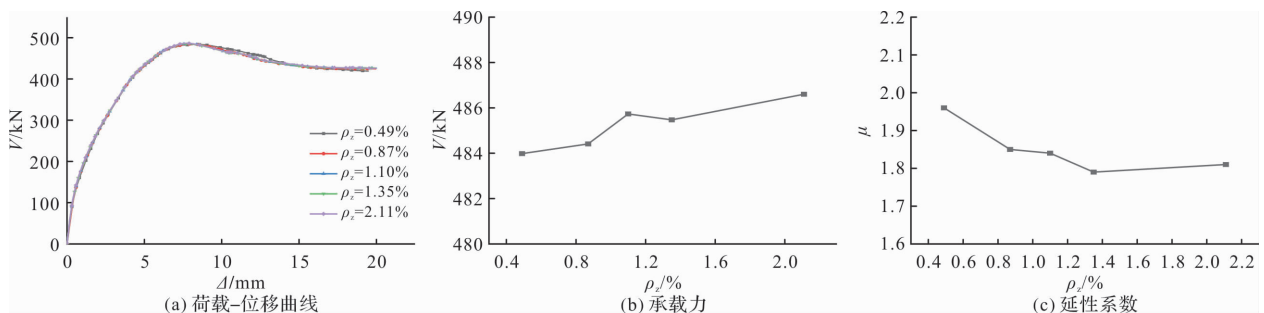


图 17 连梁不同纵筋配筋率荷载-位移曲线对比

Fig. 17 Comparison of load-displacement curves of different longitudinal reinforcement ratios of coupling beams

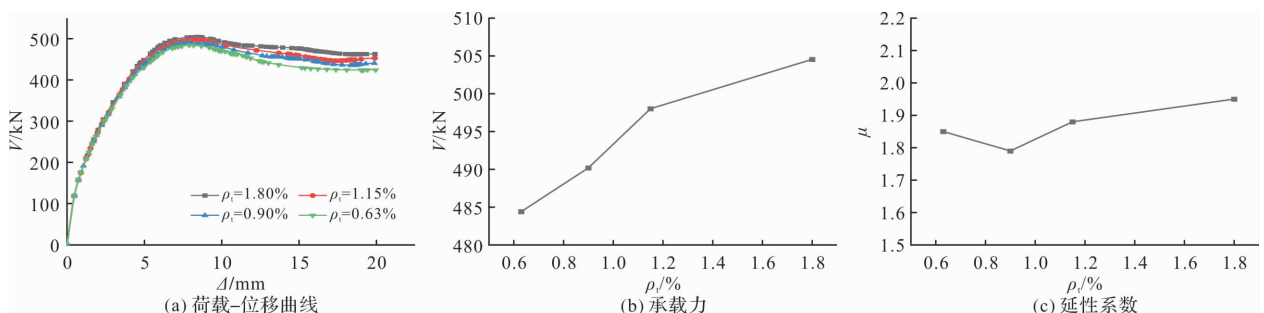


图 18 连梁不同箍筋配筋率荷载-位移曲线对比

Fig. 18 Comparison of load-displacement curves of different truss web diameter of coupling beam

2.4.5 混凝土抗压强度

图19给出了纤维增强混凝土抗压强度对钢板-纤维增强混凝土连梁的影响,本组分析选取纤维增强混凝土抗压强度为变化参数,其他参数保持不变,分别建立纤维增强混凝土抗压强度为40、

50、60 MPa的有限元模型,分析可得,该结构的峰值承载力提升显著,主要原因是掺入纤维使得普通混凝土的抗压强度得到提升,延性整体变化幅度不大。可见,纤维增强混凝土抗压强度对连梁承载力有显著影响。

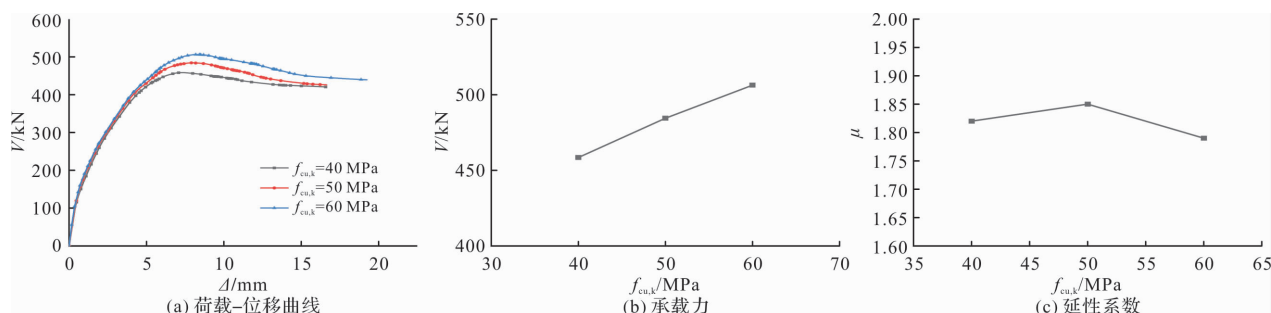


图19 连梁不同混凝土抗压强度荷载-位移曲线对比

Fig. 19 Comparison of load-displacement curves of different concrete compressive strength of coupling beams

3 结论

(1)钢板-纤维增强混凝土连梁发生了以弯曲破坏为主的破坏,钢板-混凝土连梁最终发生了弯剪破坏。纤维增强混凝土的加入能够有效地限制混凝土裂缝宽度,保持试件的完整性,并能在一定程度上改善连梁的破坏模式;

(2)两试件连梁部分混凝土在加载到峰值荷载50%时,可以观察到明显的对角压杆形成,此过程伴随着混凝土开裂,抵消了一部分剪力。连梁钢板与墙肢型钢暗柱翼缘焊接处应力最大,当达到峰值荷载75%时,钢板角部边缘已经屈服。在达到峰值荷载时,连梁钢板两端均已全截面屈服。连梁纵筋均在梁墙交界处应力最大,纵向钢筋随着荷载的增加,在结构中的受力范围逐渐扩大,在达到峰值荷载前,均已发生屈服现象;

(3)钢板-纤维增强混凝土连梁的受剪承载力会随着钢板配板率、纤维增强混凝土抗压强度和箍筋配板率的增大而提高,随着跨高比的增大而减小。跨高比和配箍率越大,连梁的延性越好,其余参数对连梁延性影响不大。总体上看,纤维增强混凝土抗压强度、跨高比和钢板配板率是影响钢板-纤维增强混凝土连梁抗震性能的主要因素。

参考文献 References

[1] PAULAY T, BINNEY J R. Diagonally reinforced coupling beams of shear walls[J]. ACI Special Publication, 1974, 42(2):579-598.
[2] TEGOS I A, PENELIS G G. Seismic resistance of short columns and coupling beams reinforced with inclined bars[J]. ACI Structural Journal, 1988, 85(1):

82-88.

[3] SUBEDI N K. Reinforced concrete beams with plate reinforcement for shear[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1989, 87(3):377-399.
[4] LAM W Y, LI L Z, SU R K L, et al. Behavior of plate anchorage in plate-reinforced composite coupling beams[J]. The Scientific World Journal, 2013:11-12.
[5] 张刚. 钢板混凝土连梁抗震性能的试验研究[D]. 北京:清华大学,2005.
ZHANG Gang. Experimental study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete coupling beams [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
[6] 史庆轩,田建勃,王秋维,等. 小跨高比钢板-混凝土组合连梁抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015, 36(2):104-114.
SHI Qingxuan, TIAN Jianbo, WANG Qiuwei, et al. Experimental research on seismic behavior of plate reinforced composite coupling beam with small span to depth ratio[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2):104-114.
[7] 田建勃,史庆轩,陶毅,等. 小跨高比钢板-混凝土组合连梁受力与变形性能研究[J]. 建筑结构学报,2016, 37(12):83-96.
TIAN Jianbo, SHI Qingxuan, TAO Yi, et al. Research on mechanics and deformation performance of plate-reinforced composite coupling beams with small span to depth ratio[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(12):83-96.
[8] TIAN Jianbo, SHI Qingxuan, LI Shen, et al. Experimental and numerical study of PRC coupling beams with low span-to-depth ratio[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 159:34-52.
[9] 田建勃,王梦梦,张俊发,等. 钢板-纤维增强混凝土

- 组合双连梁抗震性能试验研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 132-141.
- TIAN Jianbo, WANG Mengmeng, ZHANG Junfa, et al. Seismic behavior of plate-fiber reinforced concrete composite double coupling beams[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 132-141.
- [10] 侯炜, 陈彬, 郭子雄, 等. 内嵌钢板混凝土组合连梁抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2): 9-18.
- HOU Wei, CHEN Bin, GUO Zixiong, et al. Experimental study on seismic behavior of embedded steel plate reinforced concrete coupling beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(2): 9-18.
- [11] HOU Wei, XU Shilang, JI Dashuai, et al. Cyclic performance of steel plate-reinforced high toughness-concrete coupling beams with different span-to-depth ratios[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(10): 1-11.
- [12] 邓明科, 张敏, 张阳玺, 等. 内置钢板-高延性混凝土组合连梁抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 47-56.
- DENG Mingke, ZHANG Min, ZHANG Yangxi, et al. Experimental study on seismic behavior of steel plate-high ductile concrete composite coupling beam[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(7): 47-56.
- [13] ZHANG J, LI V C. Monotonic and fatigue performance in bending of fiber-reinforced engineered cementitious composite in overlay system[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(3): 415-423.
- [14] 邓明科, 秦萌, 梁兴文. 高延性纤维混凝土抗压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 120-126.
- DENG Mingke, QIN Meng, LIANG Xingwen. Experimental study of compressive behavior of fiber reinforced concrete[J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 120-126.
- [15] CANBOLAT B A, PARRA-MONTESINOS G J, WIGHT J K. Experimental study on seismic behavior of high-performance fiber reinforced cement composite coupling beams[J]. ACI Structures Journal, 2005, 102(1): 159-166.
- [16] SHIN M, GWON S W, LEE K, et al. Effectiveness of high-performance fiber-reinforced cement composites in slender coupling beams[J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 476-490.
- [17] ZHONG Yang. Experimental study on bearing capacity of oblique section of ultrahigh toughness cementitious composite coupling beams[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1): 257-263.
- [18] 梁兴文, 邢朋涛, 刘贞珍, 等. 小跨高比纤维增强混凝土连梁抗震性能试验及受剪承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2016(8): 48-10.
- LIANG Xingwen, XING Pengtao, LIU Zhenzhen, et al. Experimental study on seismic behavior and shear capacity of FRC coupling beams with small span-to-depth ratio[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(8): 48-10.
- [19] 邓明科, 吕浩, 宋恒钊. 外包钢板-纤维增强混凝土组合连梁抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 192-202.
- DENG Mingke, LV Hao, SONG Hengzhao. Experimental research on seismic behavior of high ductile concrete filled steel plate composite coupling beams[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 192-202.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of composite structures: JGJ 138—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [21] DENG M, PAN J, LIANG X. Uniaxial compressive test of high ductile fiber-reinforced concrete and damage constitutive model[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 1: 1-12.
- [22] TETSUSHI K, ZHONG L, VICTOR C L. Modeling of tensile stress-strain relation of pseudo strain-hardening cementitious composites[J]. ASCE J of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(2): 147-156.
- [23] LAM W Y. Experimental study on embedded steel plate composite coupling beams[D]. Hong Kong: The University of Hong Kong, 2003.

(编辑 李睿奇)