

文章编号: 1000-4750(2017)09-0043-11

核电工程双钢板混凝土组合剪力墙 面内受弯性能研究

李小军^{1,3}, 李晓虎^{2,3}

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 郑州航空工业管理学院土木建筑工程学院, 郑州 450046;

3. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 开展了核电厂屏蔽厂房双钢板混凝土组合剪力墙的结构形式的 10 个缩尺试件低周往复拟静力试验, 研究了钢板厚度、栓钉间距、竖向荷载以及加劲肋设置等因素对双钢板混凝土组合剪力墙受弯承载力的影响。分析结果表明: 钢板厚度、竖向荷载和加劲肋的设置都对剪力墙的受弯承载力有很大的影响, 而栓钉间距对其影响不大。采用 ABAQUS 有限元软件对双钢板混凝土组合剪力墙试件进行了数值模拟, 通过比较有限元计算结果和试验结果发现两者在受弯承载力上能够较好吻合, 但有限元计算得出的曲线没有明显的下降段。结合试验和有限元数值模拟, 提出了双钢板混凝土组合剪力墙受弯承载力的计算公式。研究为以后双钢板混凝土组合剪力墙的设计应用提供理论依据。

关键词: 双钢板混凝土组合剪力墙; 核电厂; 面内受弯性能; 受弯承载力; 数值模拟

中图分类号: TU398+.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.08.0665

STUDY ON IN-PLANE FLEXURAL BEHAVIOR OF DOUBLE STEEL PLATES AND CONCRETE INFILL COMPOSITE SHEAR WALLS FOR NUCLEAR ENGINEERING

LI Xiao-jun^{1,3}, LI Xiao-hu^{2,3}

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

2. School of Civil and Architecture Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China;

3. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A test of 10 scaled models was performed on double steel plates and concrete infill composite shear walls for nuclear engineering, and the influence of several parameters including the thickness of the steel plate, stud spacing, vertical load, stiffener on in-plane flexural behavior of double steel plate and concrete infill composite shear walls (SCSW) were studied based on the test results. The results indicate that the thickness of the steel plate, vertical load and stiffener all have a great effect on the in-plane flexural behavior of SCSW while the stud spacing has little impact. The SCSW specimens were simulated by using the finite element software ABAQUS. It is found that both the finite element calculation values and the test values of the flexural behavior of SCSW had a good agreement, but the curves of the finite element calculation did not have apparent declination. Combined with the experimental results and finite element numerical simulation, a calculation formula of flexural behavior of SCSW was proposed. This study provides a theoretical basis for the design and application of composite shear walls with double steel plates and filled concrete.

Key words: double steel plates and concrete infill composite shear walls; nuclear engineering; in-plane flexural behavior; flexural capacity; numerical simulation

收稿日期: 2016-08-31; 修改日期: 2016-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408255); 国家科技重大专项项目(2013ZX06002001); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51421005)

通讯作者: 李晓虎(1986—), 男, 河南人, 博士, 主要从事结构抗震研究(E-mail: xiaohu12066@126.com).

作者简介: 李小军(1965—), 男, 湖南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事强震观测、防灾减灾工程等研究(E-mail: beerli@vip.sina.com).

钢板混凝土剪力墙是核电工程采用的一种新型的组合结构形式。与民用建筑中钢板混凝土结构不同,核电工程剪力墙的钢板内部混凝土中没有配置钢筋,钢板和混凝土之间由钢板内侧的焊接栓钉连接。这种结构不仅具有良好的抗震性能和抗冲击性能,而且双钢板混凝土剪力墙模块化在实际工程中的应用能极大的提高施工效率。数据显示^[1]将外侧钢板作为施工模板浇筑混凝土,能够将施工周期降低 25%。我国自主设计的 CAP1400 核电工程中,采用这类双钢板混凝土组合剪力墙用于核电厂屏蔽厂房的建设。

20 世纪 80 年代以来,日本学者对钢板混凝土组合剪力墙进行了大量的试验研究和理论分析。1998 年,Takeuchi 等^[2]对核电工程钢板混凝土结构进行了试验研究。通过对缩尺比为 1/5 的 SC 剪力墙试件进行的轴压试验研究了如何阻止钢板局部屈曲。对钢板混凝土结构在施工中可行性进行了研究,探讨了施工周期、材料数量以及建设需要人工等因素对施工的影响。研究表明,施工人数可以缩减 30%,施工周期也可以缩短 2 个月~5 个月。2002 年,钢板混凝土结构被首次应用于日本柏崎刈羽核电厂的固体废物贮存厂房^[3]。2004 年,Ozaki 等^[4]通过对 9 个钢板混凝土板进行的面内往复荷载试验研究了竖向荷载和钢筋网的分布对抗剪强度的影响,并且推导出剪力墙的抗剪强度公式,与试验结果相比比较吻合。2005 年,在大量的试验研究和理论分析的基础上,日本制定了关于核电安全的钢板混凝土组合剪力墙的规范^[5]。根据日本对钢板混凝土组合结构的研究成果,韩国对钢板混凝土组合结构进行了试验研究,在此基础上编制了适合自己国家的核电工程钢板混凝土组合结构设计规范^[6-9]。美国西屋 AP1000 项目在普渡大学进行了大量的试验,在此基础上制定了相关的设计规范^[10]。2015 年,Sener 等^[11-12]通过对缩尺比为 1/10 的压水式反应堆容器进行的水平荷载试验以及钢板混凝土组合剪力墙的面外荷载试验研究了核电工程钢板混凝土组合结构的抗震性能。通过有限元数值模拟建立了压水式反应堆内部结构的 3D 模型,在试验和有限元分析模型的基础上为评估核电厂结构的抗震性能和意外事故提供参考依据。

近年来,这种结构被越来越多地应用于民用建筑中,如盐城广播电视塔^[13]和广州电视东塔^[14]。国内有许多学者对民用建筑双钢板混凝土组合结构

进行了试验和理论研究^[15]。马恺泽等^[16]通过对 4 个剪跨比为 2.5 的双层钢板-高强混凝土组合剪力墙进行的拟静力试验,研究了高轴压比下组合剪力墙的破坏机理、滞回性能、变形能力等抗震性能。试验结果表明,加劲肋的设置比约束拉杆的设置更能提高剪力墙的抗震性能。吴丽丽等^[17]对 3 个钢板混凝土组合板和 1 个混凝土板进行了抗剪承载力试验研究和数值模拟,分析研究了钢板混凝土组合板在剪力作用下的受力状态以及钢板和混凝土分别承担的剪力。试验结果表明,钢板混凝土组合板主要为斜拉破坏,钢板承担的剪力占总和的 50%以上。对核电工程双钢板混凝土组合剪力墙的研究,我国起步比较晚。但 CAP1400 核电工程的建设极大地促进了我国核电工程双钢板混凝土组合剪力墙研究的发展,对核电工程双钢板混凝土组合剪力墙的研究已经取得了一些研究成果。熊峰等^[18]利用 3 个 1:4 缩尺模型的面内低周往复加载抗剪试验,研究了核电厂双钢板混凝土剪力墙的破坏特征、承载力及耗能能力等抗剪性能。并通过有限元分析了混凝土强度、钢板厚度、轴压力和加劲肋的设置对抗剪强度的影响,提出核电厂双钢板混凝土剪力墙的抗剪强度计算公式,与试验结果吻合较好。张有佳等^[19]通过对 2 组双钢板混凝土剪力墙试件进行的面内低周往复荷载试验研究了剪力墙的抗震性能。分析了栓钉间距和加劲肋的设置对墙体刚度、承载力和延性的影响。

双钢板混凝土组合剪力墙已经在国内的核电工程中得到应用,不仅在核电工程屏蔽厂房而且在安全壳中的应用都具有广泛的前景,但我国还没有出台相关设计标准。需要进一步对双钢板混凝土组合结构进行研究。本文基于作者所在项目组进行的双钢板混凝土剪力墙试件的面内低周往复试验结果^[20],开展试验模型的数值模拟分析,研究双钢板混凝土组合剪力墙的面内抗震性能,并对试件破坏截面的应力状态进行分析,提出剪力墙的受弯承载力公式。同时,比较有限元分析和试验结果,证实有限元分析的可行性。为核电厂安全相关双钢板混凝土规范的制定提供资料。

1 试验模型及结果介绍

1.1 试件概况

作者所在项目组在北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室进行了 9 个 CAP1400

核岛屏蔽厂房墙体结构的双钢板混凝土剪力墙试件和 1 个钢筋混凝土剪力墙试件(对比研究试件)的面内低周往复试验，作者在文献[20]中详细介绍了试验试件的设计、试验加载设备、加载制度等，本文在此对试验主要信息进行简单的介绍。

试验设计了 9 个带栓钉的双钢板混凝土组合剪力墙试件，分别记为 SCSW1~SCSW9，并且设计了 1 个相同尺寸的钢筋混凝土剪力墙的对比性试件，记为 RC10。试件钢板采用 Q345，混凝土强度等级为 C55。考虑到试验条件有限，此次试验采用 1：5 缩尺模型。设计的试件由加载梁、剪力墙和基础梁组成，具体尺寸分别为：1020 mm×300 mm×300 mm、820 mm×220 mm×2000 mm 、 1820 mm×430 mm×550 mm，所有试件设计成同样的尺寸规格，试件设计的示意图、试件设计的主要参数以及材料性能详见参考文献[20]。图 1(a)、图 1(b)、图 1(c)为双钢板混凝土剪力墙试件内部栓钉和加劲肋布置示意图，表 1 给出了钢板与钢筋的材料性能参数。

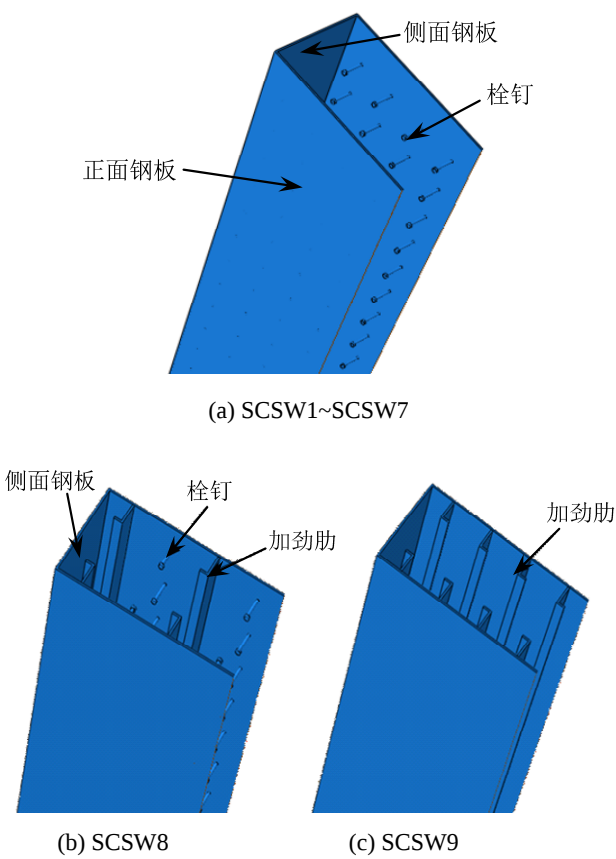


图 1 试件设计示意图

Fig.1 Design sketch of specimens

表 1 钢板与钢筋材料性能

Table 1 Properties of steel plates and rebars

钢材	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
4 mm 钢板	352.12	497.37	187
6 mm 钢板	348.33	494	197
8 mm 钢板	356.33	496.67	208
Φ14 mm 钢筋	431.33	613	204
Φ16 mm 钢筋	482	643.33	203
D6 栓钉	130.78	173.83	93

1.2 试验现象

RC10 试件试验现象：试件在加载初期没有明显的破坏现象，试件基本上处于弹性状态。当荷载加至 450 kN 时，加载试件发出“蹦蹦”的声音，在试件受拉侧的侧面出现 4 条横向细小裂缝，继续加载水平裂缝向试件的正面延伸，并且裂缝的宽度变大。在此阶段，荷载-位移曲线呈线性；弹塑性阶段，试件底部受压侧出现竖向裂缝，并且随着荷载的增加裂缝向上发展并慢慢增大。此阶段荷载-位移曲线的斜率变小；破坏阶段，试件底部受压侧混凝土被压碎，试件脆性破坏。在加载过程中出现的裂缝呈对称分布，试件的破坏现象如图 2 所示。

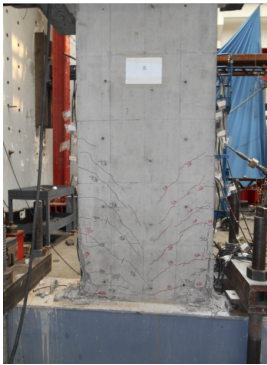


图 2 RC10 试件破坏模式

Fig.2 Failure mode of specimen RC10

文献[20]对双钢板混凝土组合剪力墙在低周往复荷载作用下的试验现象进行了具体描述，并对试验结果做了初步分析。试件 SCSW1~SCSW9 试验过程和试验现象基本相似。可以将试验过程大致分为弹性阶段、钢板鼓曲阶段、屈服阶段、开裂阶段和破坏阶段五个阶段。

通过对双钢板混凝土组合剪力墙和钢筋混凝土组合剪力墙的试验现象的对比可以看出，钢筋混凝土剪力墙发生的是脆性破坏，而双钢板混凝土组合剪力墙则是延性破坏。因此，双钢板混凝土组合

剪力墙明显比钢筋混凝土组合剪力墙有更好的延性和抗震性能。进一步对比 9 个双钢板混凝土组合剪力墙试件的试验现象可以发现, 试件 SCSW1~SCSW7 在钢板鼓曲连通后会整体破坏, 而试件 SCSW8、SCSW9 由于配有加劲肋延性明显要增加, 并且试件底部钢板鼓屈不会连成整体, 只会出现局部鼓屈。试件的破坏现象如图 3 所示。



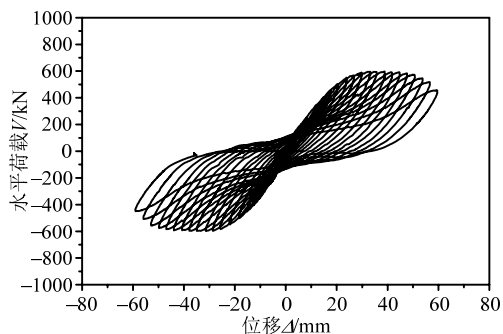
图 3 试件破坏模式

Fig.3 Failure modes of specimens

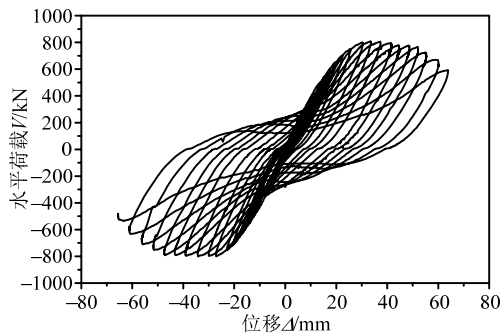
2 试验结果比较分析

2.1 荷载-位移滞回曲线

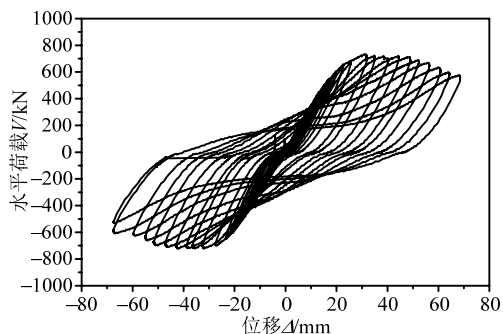
在荷载-位移滞回曲线中, 纵坐标取水平荷载 V 、横坐标取墙顶与基础的相对位移 Δ 。试件 SCSW1~SCSW9 和 RC10 的荷载-位移滞回曲线如图 4 所示。比较图中试件 SCSW1~SCSW9 的滞回曲线



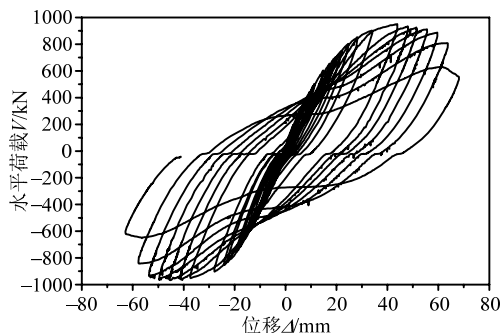
(c) SCSW3



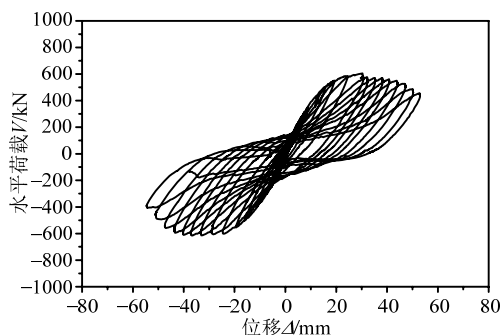
(d) SCSW4



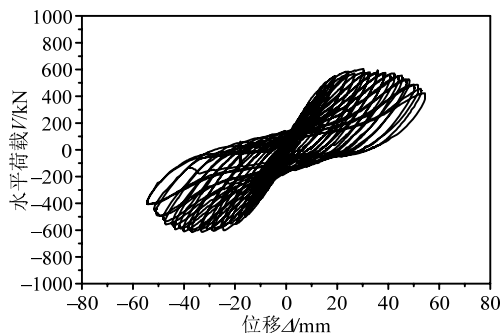
(e) SCSW5



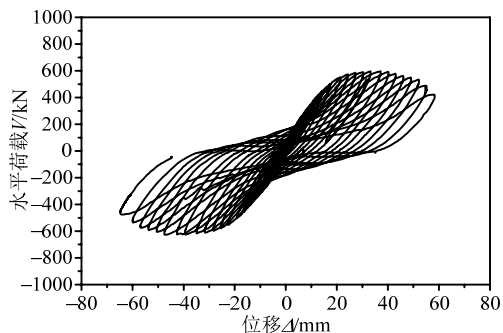
(f) SCSW6



(a) SCSW1



(b) SCSW2



(g) SCSW7

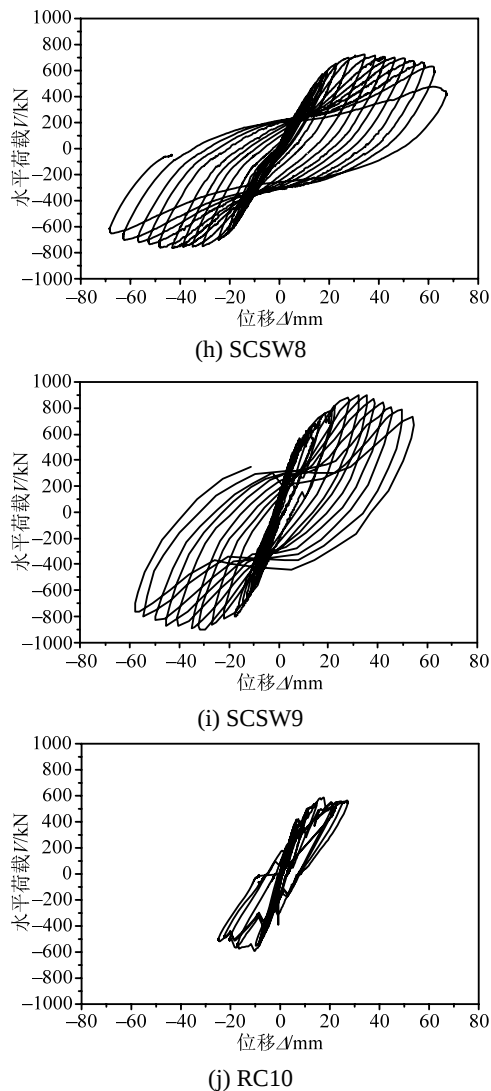


图4 试件水平荷载-位移滞回曲线

Fig.4 Top lateral load-displacement hysteretic curves of specimens

可以发现, 9 个钢板混凝土试件的破坏过程基本相似。在加载初期, 钢板和混凝土在粘结力和抗剪连接件的作用下协同工作, 试件处于弹性状态, 滞回曲线基本呈直线变化; 钢板发生鼓屈后, 钢板与混凝土之间的粘结作用基本丧失, 钢板屈服后对混凝土的约束作用变小, 滞回环面积逐渐增大, 斜率逐渐减小, 此时滞回曲线呈“S 形”。当混凝土在往复荷载作用下达到或接近极限抗压强度时, 试件达到水平方向极限承载力; 之后承载力缓慢下降, 滞回曲线出现一定的捏缩现象, 呈“反 S 形”发展。

比较试件 SCSW1 和 RC10 的滞回曲线可以看出, 在相同条件下, 试件 RC10 在达到极限承载力以后就突然破坏, 而试件 SCSW1 的滞回曲线则比较饱满, 在破坏阶段有比较好的延性。这表明双钢板混凝土组合剪力墙具有比较好的抗震耗能能力。

试件 SCSW1、SCSW4、SCSW6 相比较, 滞回曲线的饱满程度逐渐变大。试件 SCSW1、SCSW8、SCSW9 相比较, 滞回曲线的饱满程度逐渐变大。说明钢板厚度和加劲肋的设置能明显地提高剪力墙抗震耗能能力。

2.2 极限受弯承载力影响因素

9 个试件分别考虑了改变钢板厚度、栓钉间距、竖向荷载和加劲肋的设置等影响因素, 以对双钢板混凝土组合剪力墙的受弯承载力进行详细的分析研究。

2.2.1 钢板厚度

试验设计中按照 1:5 的缩尺比例, 取钢板基准参照厚度为 4 mm(SCSW1)。为了研究钢板厚度对双钢板混凝土组合剪力墙抗剪性能的影响, 另外取钢板厚度 6 mm(SCSW4)、8 mm(SCSW6)为研究对象。试件 SCSW1、SCSW4 和 SCSW6 的骨架曲线的结果如图 5 所示。从图中可以看到, 随着钢板厚度的增加, 组合剪力墙的极限承载力有很大提高。钢板厚度由 4 mm 增加到 6 mm 时试件的极限承载力提高 31.87%, 钢板厚度由 6 mm 增加到 8 mm 时试件的极限承载力提高 19.14%, 可以看出钢板厚度的变化对试件的极限承载力影响较大。

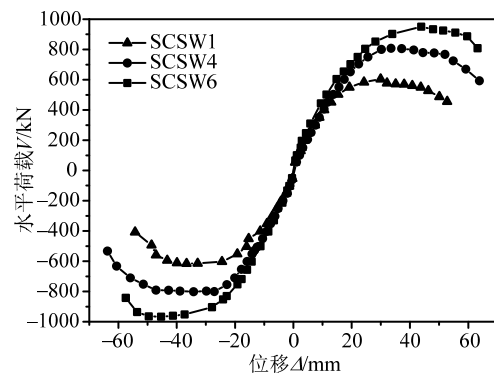


图5 不同钢板厚度下试件的骨架曲线

Fig.5 Skeleton curves of specimens with plates of different thickness

2.2.2 栓钉间距

试件设计栓钉间距以 100 mm(SCSW1)为基准, 取栓钉间距 60 mm(SCSW7)、150 mm(SCSW2)和 200 mm(SCSW3)来研究栓钉间距对双钢板混凝土组合剪力墙受弯承载力的影响。结果分析如图 6 所示。从图中可以看出, 不同的栓钉间距下组合剪力墙的骨架曲线基本重合, 极限承载力变化不大。因此, 栓钉间距(一定间距范围内)对双钢板混凝土组合剪力墙受弯承载力的影响比较小。

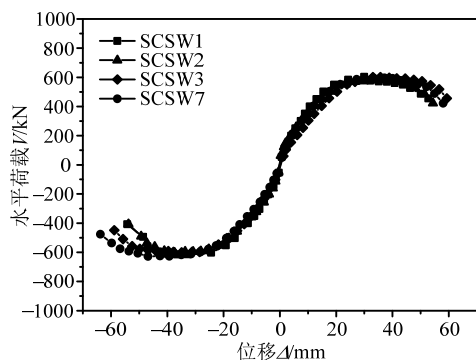


图6 不同栓钉间距下试件的骨架曲线

Fig.6 Skeleton curves of specimens with different stud spacings

2.2.3 竖向荷载

竖向荷载在一定程度上可以对双钢板混凝土组合剪力墙的位移变形起到约束的作用。为了研究竖向荷载对双钢板混凝土组合剪力墙受弯承载力的影响程度,将竖向荷载分别为 800kN 和 0kN 的试件 SCSW5 和 SCSW4 进行对比,结果分析如图 7 所示。从图中可以看出在竖向荷载作用下组合剪力墙的极限强度有所提高,通过数据分析可知提高了 10.39%。

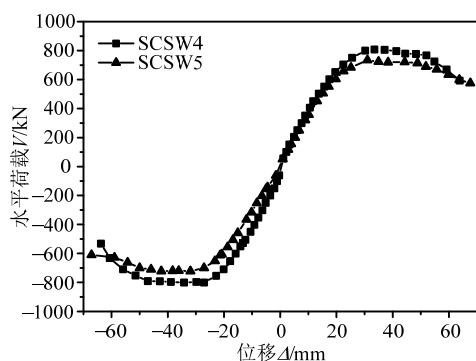


图7 不同竖向荷载下试件的骨架曲线

Fig.7 Skeleton curves of specimens with different vertical loads

2.2.4 加劲肋

为了研究加劲肋对双钢板混凝土组合剪力墙受弯承载力的影响,试验以试件 SCSW1 为参考,设计了栓钉+加劲肋(SCSW8)和加劲肋(SCSW9),其中试件 SCSW1 钢板内侧全部采用间距为 100 mm 的栓钉,试件 SCSW8 在试件 SCSW1 的基础上把原来的栓钉每间隔一列更换为加劲肋,试件 SCSW9 在试件 SCSW1 的基础上把所有的栓钉列都换成加劲肋。加劲肋规格为 L50×25×4。结果分析如图 8 所示。从图中可以看出 SCSW9 明显比 SCSW1 的抗侧刚度大,数据分析可知试件 SCSW9 的极限受弯

承载力比试件 SCSW8 提高了 21.83%。对比试件 SCSW8 和 SCSW1 的结果,可知试件 SCSW8 的极限受弯承载力比试件 SCSW1 提高了 22.02%。由此可知,加劲肋的设置对双钢板混凝土组合剪力墙的受弯承载力影响比较大。

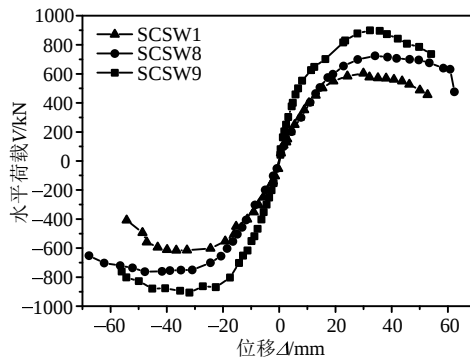


图8 不同抗剪连接件下试件的骨架曲线

Fig.8 Skeleton curves of specimens with different shear connectors

3 试验模型数值模拟分析

3.1 有限元模型建立

本文通过有限元计算软件 ABAQUS 建立了双钢板混凝土组合剪力墙试件的有限元模型,开展双钢板混凝土组合剪力墙的抗震性能模拟分析,解释试验现象及分析试验数据,并检验数值计算模型和方法的适用性。作者在文献[20]中对 3 个试件模型进行初步的数值模拟,本文进一步对 9 个试件模型进行数值模拟分析。

数值模型建立与模拟计算中,钢板、混凝土和加劲肋都采用 C3D8R 单元,钢筋采用两节点线性三维桁架单元(T3D2);水平荷载的施加采用位移控制,单调加载的方式,基础采用完全固定的方式,忽略试验时基础在往复荷载作用下的变形和位移对试验结果的影响;剪力墙试件的边界条件和加载方式如图 9 所示。同时,采用罚摩擦模拟钢板和混

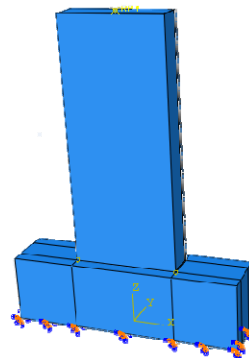


图9 边界条件和加载形式

Fig.9 Boundary conditions and loading

凝土之间的粘结关系,将栓钉嵌入混凝土和钢板中来模拟抗剪连接件的连接作用;在建立模型过程中忽略了加载梁的变形,将加载梁的自重算入竖向荷载中;加载点设置在墙顶表面中心以上 0.01 m 处,将加载点和墙顶表面耦合,竖向荷载和水平位移都施加在加载点上。

3.2 材料本构模型

混凝土的材料本构模型选取混凝土塑性损伤模型(concrete damaged plasticity model)。材料的抗压强度以及其他模型参数通过对原材料的试验结果取得,有限元模型中材料参数详见文献[20]。

3.3 有限元计算结果与试验结果比较

通过对双钢板混凝土组合剪力墙试件进行 ABAQUS 模拟计算,得出了试件在单调位移加载作用下的受力状态以及破坏模式,试件 SCSW2 模型的应力分布情况如图 10 所示。

比较试验中试件的破坏现象和 ABAQUS 模拟的试件模型的应力分布情况可以发现,两者都是在墙体和基础相接部位应力最大,破坏也是在这个部位。这进一步说明模拟过程和试验结果比较吻合。

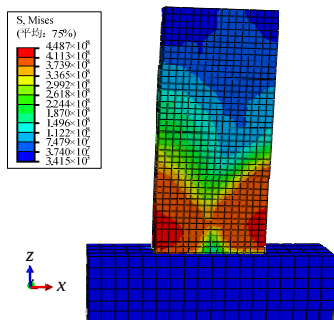
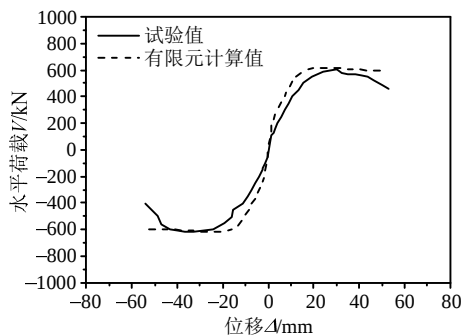


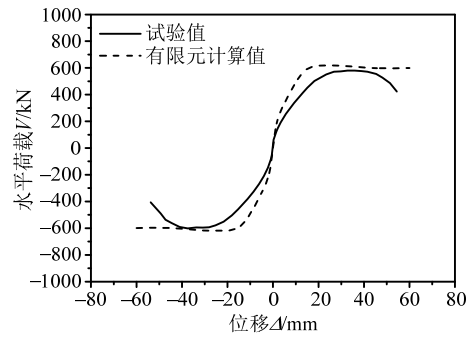
图 10 SCSW2 有限元计算结果显示图

Fig.10 Results from finite element calculation of SCSW2

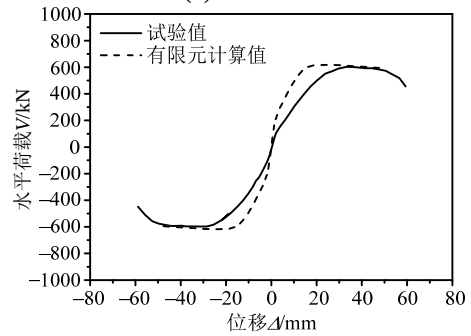
本文对试验中 9 个剪力墙试件都进行了有限元模拟。由于在模拟时采用的是单调位移加载的方式,有限元负方向曲线通过正方向反对称得出。图 11 给出了各试件试验和数值模拟中的荷载-位移骨架曲线,对比分析双钢板混凝土组合剪力墙的抗震性能。



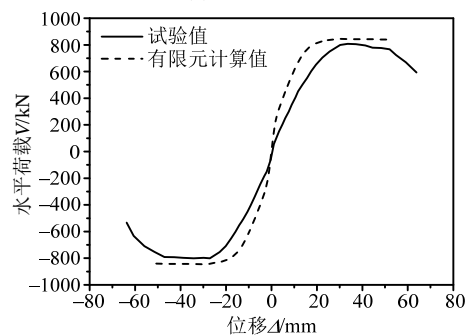
(a) SCSW1



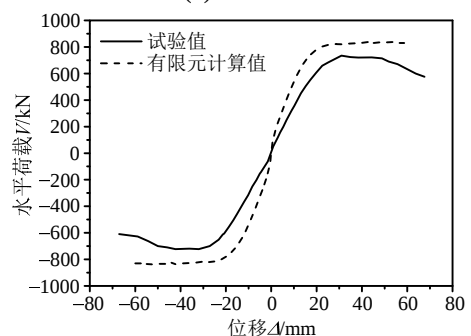
(b) SCSW2



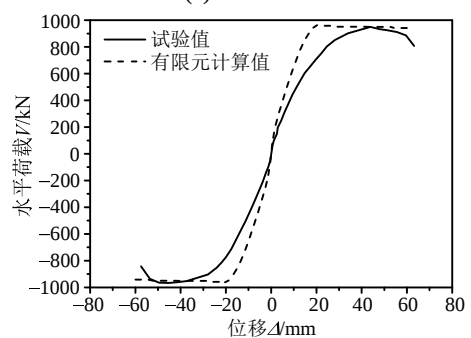
(c) SCSW3



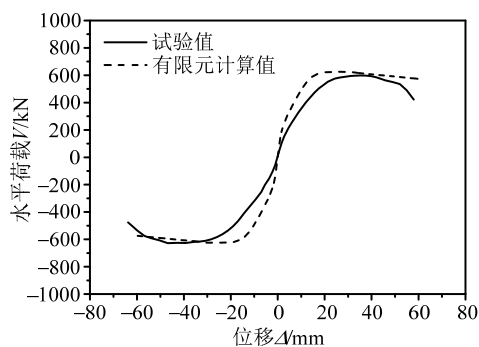
(d) SCSW4



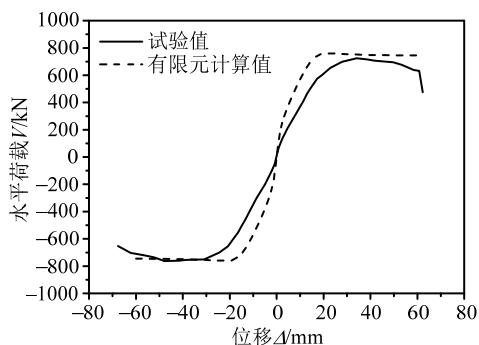
(e) SCSW5



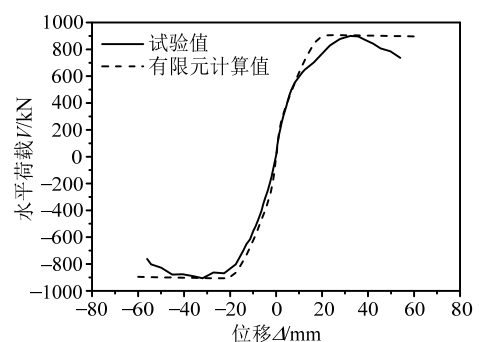
(f) SCSW6



(g) SCSW7



(h) SCSW8



(i) SCSW9

图 11 有限元与试验骨架曲线对比

Fig.11 Comparison of skeleton curves between finite element and experiment

从图 11 可以看出,双钢板混凝土组合剪力墙的水平极限承载力试验值和有限元计算值比较相近,具体的数据比较如表 2 所示,通过对比可以发现有限元计算和试验值比较吻合。比较试验和模型曲线,有限元计算的试件刚度比试验的试件刚度大。分析原因认为是在进行有限元模拟时未考虑加载过程中材料的损伤累计,并且在模型建立时未考虑初始几何缺陷。有限元模拟曲线下降段不明显甚至没有下降段,因此对于试验曲线的下降段有限元计算值的参考价值不大。这是由于在进行有限元计算时不能完全考虑混凝土的压碎等因素。对于有限元模拟中下降段曲线还需进一步研究。

表 2 极限承载力有限元计算值和试验值对比

Table 2 Comparison of ultimate capacities between the test results and computed results

试件编号	试验值/kN	有限元计算值/kN	误差/(%)
SCSW1	610	616.60	1.08
SCSW2	598.61	618.2	3.17
SCSW3	596.95	617.5	3.33
SCSW4	804.4	845.16	4.82
SCSW5	728.7	838.13	13.06
SCSW6	958.4	963.5	0.53
SCSW7	612.4	625.04	2.02
SCSW8	744.3	759.14	1.95
SCSW9	906.8	907.26	0.05

4 剪力墙受弯承载力理论分析和计算公式推导

4.1 双钢板混凝土组合剪力墙受弯承载力研究

根据剪力墙破坏的现象,把剪力墙破坏分为受剪力控制的剪切破坏、受弯矩控制的受弯破坏以及弯剪破坏。马晓伟等^[21]基于材料的单轴本构关系,研发了带有钢管混凝土端柱和钢筋网片的双钢板混凝土组合剪力墙的压弯弹塑性数值模型,研究了混凝土墙厚、钢板厚度以及轴压力对压弯承载力的影响,并基于关键参数提出了此类剪力墙极限状态下的压弯承载力简化计算公式。曹万林等^[22]采用引入平截面假定和条带法对钢管混凝土边框内藏钢板组合剪力墙进行了计算公式的推导,计算结果和实测符合较好。杨悦^[23]在试验和数值分析的基础上,给出了双钢板混凝土组合构件在面外荷载作用下的抗弯承载力计算方法。

4.2 双钢板混凝土组合剪力墙受弯承载力计算公式

根据试验结果试件的破坏现象可以看出,本文所研究的双钢板混凝土组合剪力墙试件发生的破坏为弯矩起控制作用的弯曲破坏,属于大偏压。分析试件在达到极限承载力的试验现象:受压侧钢板发生鼓屈现象,受拉侧钢板原先鼓屈的部位被拉平。根据试验现象和试验数据对剪力墙试件在往复荷载作用下的极限承载力状态进行分析可以基于以下假设:

- 1) 栓钉间距对剪力墙试件受弯承载力影响比较小,在计算时忽略栓钉对剪力墙试件受弯承载力的作用。
- 2) 截面变形符合平截面假定。
- 3) 在受力分析中不考虑受拉区混凝土的抗拉强度;混凝土和钢板在往复荷载作用下变形协调,

没有相对滑移。

4) 钢板的应力-应变关系为: 钢板屈服前为线性变化, 屈服后应力取屈服强度; 混凝土的应力-应变关系曲线按照 GB50010-2010《混凝土结构设计规范》中规定的混凝土本构关系确定。考虑钢板对混凝土的约束作用, 钢板内混凝土的抗压强度中引入一个提高系数 $\alpha_2=1.2^{[22]}$ 。双钢板混凝土组合剪力墙的受弯承载力计算模型如图 12。

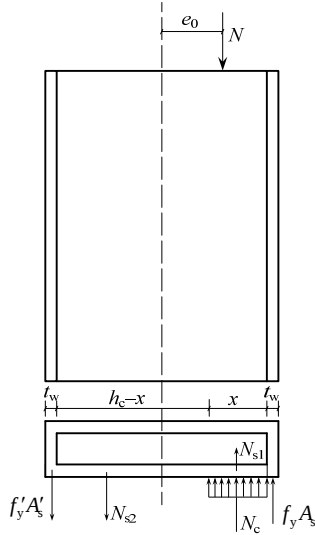


图 12 承载力计算模型

Fig.12 Mechanical model of capacity

根据图 12 试件的承载力计算模型和力的平衡得:

$$N = N_c + N_{s1} + f_y A_s - f'_y A'_s - N_{s2} \quad (4)$$

式中: $N_c = \alpha_1 f_c t_c x$; $N_{s1} = 2 f_y t_w x$; $N_{s2} = 2 f_y t_w (h_c - x)$ 。由于钢板所有的材料相同, 根据钢板的截面特征, 部分参数之间有如下关系:

$$f_y = f'_y, A_s = A'_s。$$

平衡方程可以简化为:

$$N = N_c + N_{s1} - N_{s2} \quad (5)$$

式中, N_c 为受压区混凝土的合力, 将受压区混凝土的应力图形简化为等效的矩形应力图。根据 GB50010-2010 混凝土结构设计规范中的相关规定, 在混凝土轴心抗压强度设计值 f_c 前乘以一个转换系数 α_1 , 经计算取 $\alpha_1=0.99$, 受压区混凝土的应力合力为 $N_c = \alpha_1 f_c t_c x$ 。

将 N_c 、 N_{s1} 、 N_{s2} 代入式(5)可以得出:

$$x = \frac{N + 2 f_y t_w h_c}{\alpha_1 \alpha_2 f_c t_c + 4 f_y t_w} \quad (6)$$

根据试件的设计参数以及破坏特征可以判断

双钢板混凝土剪力墙为弯曲破坏, 大偏心受压, 竖向荷载 N 的偏心距为 e_0 。根据弯矩平衡方程可得:

$$Ne_0 = (N_c + N_{s1}) \left(\frac{h_c}{2} - \frac{x}{2} \right) + 2 f_y A_s \left(\frac{h_c}{2} + \frac{t_w}{2} \right) + 2 f_y t_w \cdot \frac{h_c}{2} \cdot \frac{h_c}{4} - 2 f_y t_w \cdot \frac{\left(\frac{h_c}{2} - x \right)^2}{2} = \alpha_1 \alpha_2 f_c t_c x (h_c - x) + f_y t_w h_c (h_c - x) + f_y A_s (h_c + t_w) \quad (7)$$

式(4)~式(7)中: N_c 、 N_{s1} 、 N_{s2} 分别为受压区混凝土的应力合力、受压区钢板应力合力、受拉区钢板应力合力; α_1 为混凝土的等效矩形应力图系数; α_2 为钢板内混凝土的提高系数; f_y 、 f'_y 为钢板的抗拉和抗压强度; f_c 为混凝土的抗压强度; x 为混凝土的受压区高度; A_s 、 A'_s 分别为侧面钢板的受压和受拉面积, $A_s = A'_s = b t_w$; h_c 、 b 、 t_w 分别为钢板内混凝土的截面总高度、试件总厚度、单层钢板厚度。

在弯矩控制作用下试件的水平承载力为:

$$F = \frac{Ne_0}{H} \quad (8)$$

式中: e_0 为竖向力作用点至截面形心的距离; $e_0 = \frac{M}{N}$; H 为基础顶面至水平加载点的距离。

把混凝土和钢板的实测强度代入式(7)和式(8)可得出各个双钢板混凝土组合剪力墙试件在弯矩起控制作用下的受弯承载力值 F_{ca} , 和试验结果 F_{te} 进行比较, 如表 3 所示。

表 3 试验数据与计算值对比

Table 3 Comparison of maximum shear capacity between test and calculation

试件编号	试验数据 F_{te}/kN	计算值 F_{ca}/kN	F_{ca}/F_{te}
SCSW1	610.00	624	1.023
SCSW2	598.61	624	1.042
SCSW3	596.95	624	1.045
SCSW4	804.40	803.96	0.999
SCSW5	728.70	784.9	1.077
SCSW6	958.40	988.7	1.032
SCSW7	612.40	624	1.019
SCSW8	744.30	728.13	0.978
SCSW9	906.80	830.27	0.916

从表 3 可以看出, 针对 9 个双钢板混凝土组合剪力墙试件, 受弯承载力的计算值和试验值之间的误差在 10% 以内。这说明本文推导得到的双钢板混凝土组合剪力墙受弯承载力的计算公式能够较好地给出双钢板混凝土组合剪力墙的受弯承载力。

4 结论

(1) 对 9 个双钢板混凝土组合剪力墙试件和 1 个钢筋混凝土剪力墙试件的面内低周反复拟试验现象和观测值进行分析, 得到双钢板混凝土组合剪力墙有比较好的延性和耗能能力; 钢板厚度、竖向荷载和加劲肋的设置对剪力墙的抗震性能均有很大的影响, 而栓钉间距(一定间距范围内)对其影响不大。

(2) 采用 ABAQUS 有限元软件对双钢板混凝土组合剪力墙模型试验进行数值模拟分析, 有限元计算结果与试验值吻合较好。但进一步分析发现有限元计算曲线没有明显的下降段, 对此还需要开展进一步的研究。

(3) 本文基于简化力学模型和理论推导给出了双钢板混凝土组合剪力墙受弯承载力的计算公式; 试验结果和计算公式结果吻合较好, 表明本文给出的计算公式合理和实用。

参考文献:

- [1] Braverman J, Morante R, Hofmayer C. Assessment of modular construction for safety-related structures at advanced nuclear power plants [S]. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D C, USA, 1997.
- [2] Takeuchi M, Narikawa M, Matsuo I, et al. Study on a concrete filled structure for nuclear power plants [J]. Nuclear Engineering & Design, 1998, 179(2): 209—223.
- [3] Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Improved construction and project management [EB/OL]. www.Inspi.Ufl.Edu/ICAPP/plenary/5Construction-omoto.ppt, 2001.
- [4] Ozaki M, Akita S, Osuga H, et al. Study on steel plate reinforced concrete panels subjected to cyclic in-plane shear [J]. Nuclear Engineering & Design, 2004, 228(1/2/3): 225—244.
- [5] JEAG 4618-05. Technical guidelines for aseismic design of steel plate reinforced concrete structures—Buildings and structures [S]. Nuclear Standards Committee, Japan Electric Association, Transactions of JEAG 4618, Translated from Japanese by Obayashi Company and Westinghouse Electric Company, 2005.
- [6] KEPIC-SNG. Specification for safety-related steel plate concrete structures for nuclear facilities [S]. Board of KEPIC Policy, Structural Committee, Korea Electric Association, 2010.
- [7] Kim W, Lee S J, Jung R Y, Kim M. Damping values for seismic design of nuclear power plant SC structures [C]// Proceedings of the 20th IASMiRT Conference, SMiRT 20, August 9—14, Espoo, Finland, 2009.
- [8] Choi B J, Han H S. An experiment on compressive profile of the unstiffened steel plate-concrete structures under compression loading [J]. Steel & Composite Structures, 2009, 9(6): 519—534.
- [9] Hong S G, Lee K J, Park D S, Ham K W, Lee H W. Out-of-plane shear strength of steel-plate-reinforced concrete walls dependent on bond behavior [C]// Proceedings of the 20th IASMiRT Conference, SMiRT 20, Div-6, August 9—14, Espoo, Finland, 2009.
- [10] AISC Proposal APPENDIX N9. Specification for design of steel-plate composite (SC) walls in safety-related structures for nuclear facilities [S]. Chicago, IL, 2010.
- [11] Sener K C, Varma A H, Booth P N, et al. Seismic behavior of a containment internal structure consisting of composite SC walls [J]. Nuclear Engineering & Design, 2015, 295: 804—816.
- [12] Sener K C, Varma A H, Ayhan D. Steel-plate composite (SC) walls: Out-of-plane flexural behavior, database, and design [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 108: 46—59.
- [13] 丁朝辉, 江欢成, 曾菁, 等. 双钢板-混凝土组合墙的大胆尝试: 盐城电视塔结构设计[J]. 建筑结构, 2011, 41(12): 87—91.
Ding Zhaohui, Jiang Huancheng, Zeng Jing, et al. An innovative application of SCS composite wall: Structural design of Yancheng TV Tower [J]. Building Structure, 2011, 41(12): 87—91. (in Chinese)
- [14] 周定, 韩建强, 杨汉伦, 等. 广州塔设计[J]. 建筑结构, 2012, 42(6): 1—12.
Zhou Ding, Han Jianqiang, Yang Hanlun, et al. Structural design of Guangzhou Tower [J]. Building Structure, 2012, 42(6): 1—12. (in Chinese)
- [15] 聂建国, 卜凡民, 樊健生. 高轴压比、低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙拟静力试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 60—66.
Nie Jianguo, Bu Fanmin, Fan Jiansheng. Quasi-static test on low shear-span ratio composite shear wall with double steel plates and infill concrete under high axial compression ratio [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 60—66. (in Chinese)
- [16] 马恺泽, 刘伯权, 鄢红良, 等. 高轴压比双层钢板-高强混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 218—224.
Ma Kaize, Liu Boquan, Yan Hongliang, et al. Experimental investigation on aseismic behavior of double steel high strength concrete shear walls with high axial load ratio [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 218—224. (in Chinese)
- [17] 吴丽丽, 李佳蔚, 邢瑞娇, 等. 钢板-混凝土组合板抗剪承载性能的试验研究与数值分析[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 173—182.
Wu Lili, Li Jiawei, Xing Ruijiao, et al. Experimental study and numerical simulation of the shear capacity of

- steel plate-concrete composite slabs [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 173—182. (in Chinese)
- [18] 熊峰, 何涛, 周宁. 核电站双钢板混凝土剪力墙抗剪强度研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(9): 33—41.
- Xiong Feng, He Tao, Zhou Ning. Study on the shear strength of double steel plate composite shear wall in nuclear plant [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(9): 33—41. (in Chinese)
- [19] 张有佳, 李小军. 双钢板混凝土墙体构件抗震性能试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(5): 658—665.
- Zhang Youjia, Li Xiaojun. Experimental research on seismic behavior of wall component with double steel plate and infill concrete [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(5): 658—665. (in Chinese)
- [20] 李晓虎, 李小军, 申丽婷, 刘进. 核岛结构双钢板混凝土组合剪力墙低周往复试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(10): 1498—1508.
- Li Xiaohu, Li Xiaojun, Shen Liting, Liu Jin. Experimental study of composite shear walls with double steel plates and filled concrete for a nuclear island structure under low cyclic loading [J]. Journal of Beijing university of technology, 2016, 42(10): 1498—1508. (in Chinese)
- [21] 马晓伟, 聂建国, 陶慕轩, 等. 双钢板-混凝土组合剪力墙压弯承载力数值模型及简化计算公式[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 99—106.
- Ma Xiaowei, Nie Jianguo, Tao Muxuan, et al. Numerical model and simplified formula of axial force-moment capacity of composite shear wall with double steel plates and infill concrete [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 99—106. (in Chinese)
- [22] 曹万林, 王敏, 张建伟, 等. 钢管混凝土边框剪力墙抗震试验及承载力计算[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(12): 1291—1297.
- Cao Wanlin, Wang Min, Zhang Jianwei, et al. Seismic experiment and load-carrying capacity calculation of shear wall with concrete filled steel tube columns [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(12): 1291—1297. (in Chinese)
- [23] 杨悦. 核工程双钢板-混凝土结构抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2015: 61—69.
- Yang Yue. Seismic behavior of double steel-concrete composite structures in nuclear engineering [D]. Beijing: Tsinghua University: 61—69. (in Chinese)

(上接第 33 页)

- [12] 袁驷, 王枚, 和雪峰. 一维 C^1 有限元后处理超收敛解答计算的 EEP 法[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 1—9.
- Yuan Si, Wang Mei, He Xuefeng. Computation of super-convergent solutions in one-dimensional C^1 FEM by EEP method [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 1—9. (in Chinese)
- [13] 袁驷, 邢沁妍, 王旭, 叶康生. 具有最佳超收敛阶的 EEP 法的计算格式: I 算法公式[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 1—5.
- Yuan Si, Xing Qinyan, Wang Xu, Ye Kangsheng. A scheme with optimal order of super-convergence based on the element energy projection method: I formulation [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 1—5. (in Chinese)
- [14] 袁驷, 邢沁妍. 一维 Ritz 有限元超收敛计算的 EEP 法简约格式的误差估计[J]. 工程力学, 2014, 31(12): 1—3, 16.
- Yuan Si, Xing Qinyan. An error estimate of EEP super-convergent solutions of simplified form in one-dimensional Ritz FEM [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(12): 1—3, 16. (in Chinese)
- [15] 袁驷, 邢沁妍, 叶康生. 一维 C^1 有限元 EEP 超收敛位
- 移计算简约格式的误差估计[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 16—19.
- Yuan Si, Xing Qinyan, Ye Kangsheng. An error estimate of EEP super-convergent displacement of simplified form in one-dimensional C^1 FEM [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 16—19. (in Chinese)
- [16] Bush L, Deng Q, Ginting V. A locally conservative stress recovery technique for continuous Galerkin FEM in linear elasticity [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 286: 354—372.
- [17] Cao W. Superconvergence analysis of the linear finite element method and a gradient recovery postprocessing on anisotropic meshes [J]. Mathematics of computation, 2015, 84(291): 89—117.
- [18] 赵新中, 陈传森. 梁问题有限元逼近的新估计及超收敛[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2000, 23(4): 6—11.
- Zhao Xinzhong, Chen Chuanmiao. New estimates of finite element approximation to beam problem and superconvergence [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2000, 23(4): 6—11. (in Chinese)