

PBL键钢芯板混凝土组合剪力墙抗震性能 试验研究及承载力设计方法

涂庭婷¹, 吴函恒¹, 王辰¹, 党世杰¹, 隋璐²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

摘要:为拓展开孔板(perfobond leiste, PBL)剪力连接键的应用范围, 该文设计了1个型钢混凝土组合剪力墙试件和4个PBL键钢芯板混凝土组合剪力墙试件, 进行低周往复加载试验, 系统研究各试件的破坏机制和抗震性能。研究结果表明, 剪力墙在水平荷载作用下的破坏模式可分为弯曲破坏和弯剪破坏两类。墙体高宽比、钢芯板配置及PBL键的布置方式是影响破坏模式的重要因素。PBL键可确保钢芯板与混凝土协同工作性能完好, 此外增设钢芯板可提高墙体的承载能力。剪力墙的承载力随高宽比的增大而减小, PBL键竖向布置优于PBL键横向布置。基于欧洲规范EN 1994-1-1:2004中建议的型钢混凝土柱压弯承载力设计方法, 提出了PBL键钢芯板混凝土组合剪力墙的压弯承载力设计公式。经过对比验证, 设计公式可准确计算大高宽比试件的压弯承载力。

关键词:钢-混凝土组合结构; 组合剪力墙; PBL剪力键; 低周往复加载试验; 承载力设计方法

中图分类号: TU398.9; TU352.11

文献标志码: A

Seismic performance test and bearing capacity design method of steel plate concrete composite shear walls with PBL connectors

TU Tingting¹, WU Hanheng¹, WANG Chen¹, DANG Shijie¹, SUI Lu²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: In order to expand the application of perfobond leiste (PBL) shear connectors, the low-cycle reciprocating loading tests were conducted on one steel reinforced concrete composite shear wall and four steel plate concrete composite shear walls with PBL shear connectors. The failure mechanism and seismic performance of the specimens were studied. The results show that the failure modes of shear walls under horizontal loads can be divided into two types including bending failure and bending-shear failure. The aspect ratio of the walls, the configuration of steel core plates and the arrangement of the PBL shear connectors are important factors affecting failure modes. PBL shear connectors can facilitate steel core plates working well with the concrete. Besides, the configuration of steel core plates can improve the bearing capacity of the walls. The bearing capacity of shear walls decreases with the increase of aspect ratios, and the vertical arrangement of PBL shear connectors is better than the horizontal arrangement of PBL shear connectors. Based on the design of compression-bending capacity of steel reinforced concrete columns recommended in EN 1994-1-1:2004, a design formula of compression-bending capacity for steel plate concrete composite shear walls with PBL shear connectors is proposed. It is verified that the design formula can accurately calculate the compression-bending capacity of the shear walls with large aspect ratios by comparison.

Key words: steel-concrete composite structure; composite shear walls; PBL shear connector; low-cycle reciprocating loading test; bearing capacity design method

收稿日期:2024-03-14; 修回日期:2024-05-27

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2023-JC-YB-295); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102282204, 300102282718)

作者简介:涂庭婷(2000—), 女, 博士研究生, 主要从事钢结构方面的研究。E-mail: tutingting2024@163.com

通信作者:吴函恒(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事钢结构、钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail: wuhanheng@163.com

0 引言

近年来,由于城市人口集中,用地资源紧张,高层及超高层建筑成为城市发展的必然趋势。钢板混凝土组合剪力墙因其融合了钢与混凝土这2种材料的优势,具有承载力高、刚度大、延性好和抗震性能优等特点,被广泛应用于高层建筑中。

国内外学者针对钢板混凝土组合剪力墙的抗震性能^[1-4]、受力机理^[5-8]和设计方法^[9-11]开展了系统的研究,取得了丰硕的研究成果。董宏英等^[12]、伍云天等^[13]和 LOU 等^[1]对钢板混凝土组合剪力墙进行了拟静力加载试验研究,得到了高宽比、轴压比及钢板厚度等参数对组合剪力墙抗震性能的影响规律;王威等^[14]和陈宗平等^[15]分别通过低周往复加载试验探究了波纹钢板混凝土组合剪力墙的受力特征,结果表明:波纹钢板沿垂直波纹方向受力时具有良好的承载能力;李文韬等^[16]参考钢管混凝土统一强度理论的思想,提出了双层波纹钢板混凝土组合剪力墙受剪承载力简化计算公式。

针对钢板混凝土组合剪力墙,增强钢板与混凝土之间的黏结滑移性能,使二者能够协调变形并更好地协同工作是需要解决的关键问题之一。开孔板(perforated leiste, PBL)剪力连接键是通过钢板开孔处的混凝土抗剪销或在孔中贯穿钢筋来承担剪力,从而使钢板与混凝土紧密连接并协同工作的一种抗剪键,其在钢-混凝土组合梁^[17-19]和组合桥面板^[20-22]中被广泛地研究与应用。张婧等^[23]对6个PBL剪力连接件进行了极限承载力破坏试验,结果表明增加钢板开孔直径和孔洞个数可有效提高PBL连接件的抗剪刚度;YANG等^[24]在静荷载作用下对PBL剪力连接件进行了推出试验,并基于弹性地基梁理论提出了PBL剪力连接件的刚度评价方程;杨勇等^[25]采用同样的试验手段探究了端部混凝土、贯穿钢筋等对PBL剪力连接件承载力的贡献,并提出了抗剪承载力计算公式;白久林等^[26]为提高钢筋混凝土框架结构的抗震性能,提出了PBL整体式连接节点,并基于泛应力法推导出了节点板和PBL的设计方法。PBL剪力连接件在抗剪刚度和传力能力方面具有一定的优势,为钢板混凝土组合剪力墙中的连接件设计提供了新思路。

综上所述,国内外学者针对PBL剪力键和钢板混凝土组合剪力墙已经开展了较多研究,主要集中在组合剪力墙的抗震性能研究和PBL键的抗剪性能等方面。为了拓展PBL剪力键的应用范畴,本文将PBL剪力键引入到钢板混凝土组合剪力墙中,在钢芯板两侧设置PBL剪力键,并将剪力墙的墙身钢筋穿过PBL剪力键,以增强钢板与混凝土之间的抗黏结滑移能力。为此,本文对1个型钢混凝土组合剪力墙试件和4个PBL键钢芯板混凝土组合剪力墙试件进行拟静力加载试验,系统分析墙体的滞回特性、变形能力、延性、刚度退化及耗能能力,最后提出压弯承载力设计方法,为理论研究和工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验依据 JGJ 138—2016《组合结构设计规范》^[27]和 GB/T 50011—2010(2024版)《建筑抗震设计标准》^[28],共设计了5个1:5缩尺比例试件,试件编号分别为试件 W1~试件 W5。5个试件均由顶部加载梁、墙身和底部地梁组成,加载梁和地梁截面尺寸分别为300 mm×400 mm、600 mm×600 mm,墙身截面尺寸为1200 mm×160 mm。试件 W1~试件 W3的高宽比为2,试件 W4~试件 W5的高宽比为1.17。

为了更好地研究钢芯板和PBL键对组合剪力墙抗震性能的影响,在试件 W2~试件 W5的墙身内部布置钢芯板和PBL键见图1,墙端200 mm范围内设置型钢暗柱,其中,试件 W2和试件 W4的钢芯板厚度为6 mm,PBL键竖向放置且每隔250 mm布置一道,沿墙身宽度方向共设置3道;试件 W3和试件 W5的钢芯板厚度为4 mm,PBL键横向放置且每隔200 mm布置一道,沿墙身高度方向共设置15道和10道;试件 W1作为对比试件,墙身内部不布置钢板和PBL键,仅设置端柱型钢。试件设计主要参数见表1。试件 W1~试件 W5的端部设置暗柱,暗柱截面尺寸为200 mm×160 mm,内置型钢规格为I10工字钢,截面配置纵筋4 Φ 14,箍筋 Φ 8@100/200。墙身钢芯板两端与工字钢翼缘焊接,钢板两侧配有 Φ 8@200的水平分布筋和竖向分布筋。各试件具体尺寸及构造细节见图2和图3。

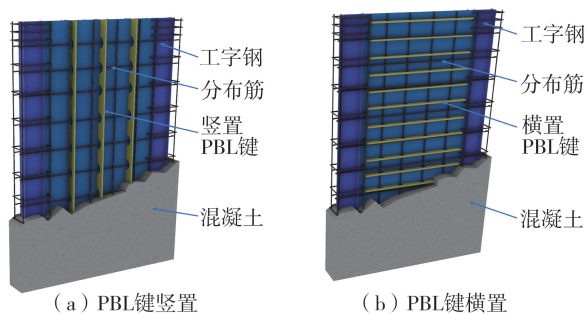


图1 PBL键钢板混凝土组合剪力墙

Fig.1 Steel plate concrete composite shear walls with PBL shear connectors

表1 试件设计参数

Table 1 Specimen design parameters

试件	截面尺寸/mm	高宽比	钢板厚度/mm	PBL键放置
W1	1200×160	2	—	—
W2	1200×160	2	6	竖置
W3	1200×160	2	4	横置
W4	1200×160	1.17	竖置	
W5	1200×160	1.17	4	横置

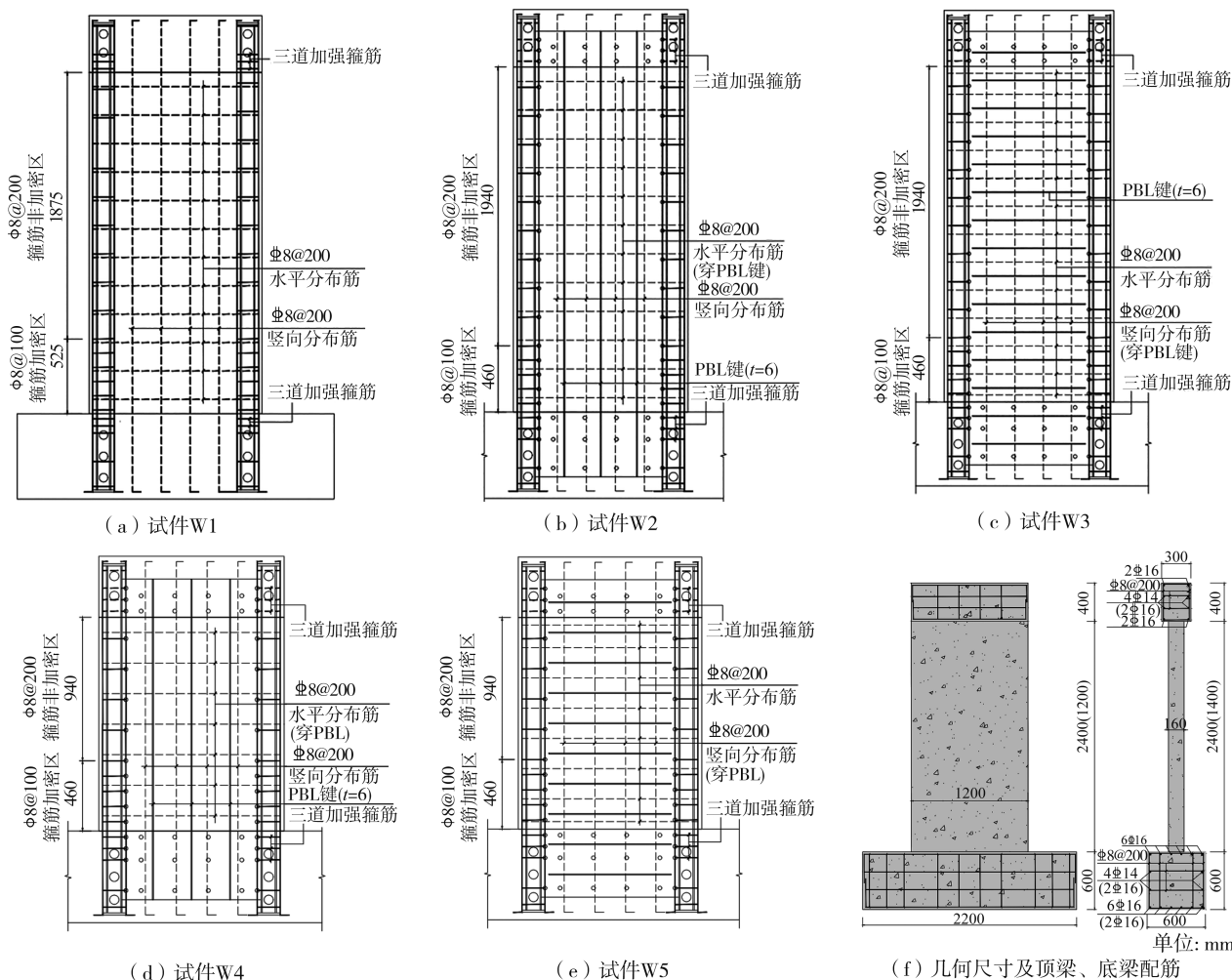


图2 试件几何尺寸及构造细节

Fig.2 Geometric dimensions and construction details of the specimen

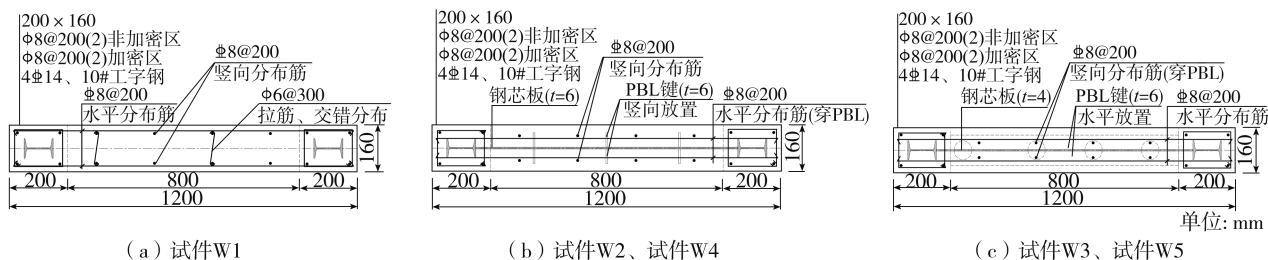


图3 试件截面信息

Fig.3 Specimen cross-section information

所有试件采用 C30 混凝土同批浇筑,并预留 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试块与试件在标准养护条件下养护 28 d,根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[29]测得混凝土立方体抗压强度实测平均值为 32.48 MPa。内嵌于混凝土的型钢与钢芯板为 Q235B 钢。边缘约束构件中的纵筋和墙身分布筋的牌号为 HRB400,箍筋和拉结筋的牌号为 HPB300。按照 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》^[30]测得钢筋和钢板力学性能指标见表 2。

表 2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel

部位	直径(厚度)/mm	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 δ/%
箍筋/拉结筋	8	209	329.4	431.6	12.9
分布筋	8	203	405.6	667.3	13.0
边缘约束构件纵筋	14	211	416.3	624.7	17.1
钢芯板	4	208	305.1	460.5	25.8
钢芯板	6	202	294.0	458.9	23.0

1.2 加载装置与加载制度

采用竖向作动器施加竖向加载,MTS 水平作动器进行水平加载,在竖向作动器顶部设置聚四氟乙烯板以消除摩擦力,加载装置见图 4。首先通过竖向作动器分 3 级施加轴压比为 0.3 的竖向恒定荷载,加载至规定荷载后,通过 MTS 水平作动器在加载梁处施加水平往复荷载。

根据 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》^[31]确定水平加载制度为位移加载。加载分两阶段进行见图 5,加载前对各试件进行有限元模拟,确定其预估屈服荷载 P_y 和屈服位移 Δ_y 。初始循环位移幅值为 2 mm 且每次循环加载 1 次,达到预估屈服点后,每级位移幅值增加到 5 mm 且每次循环加载 3 次,直到试件严重破坏失去承载能力或水平荷载下降至峰值荷载的 85%停止加载。

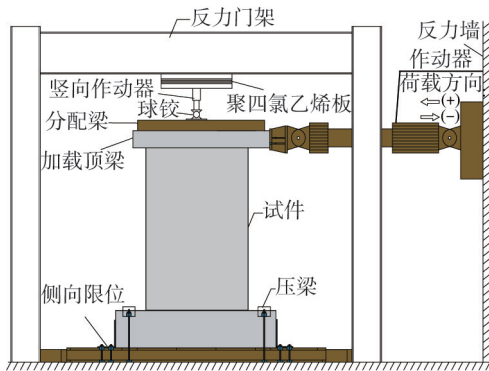


图 4 加载装置

Fig. 4 Loading device

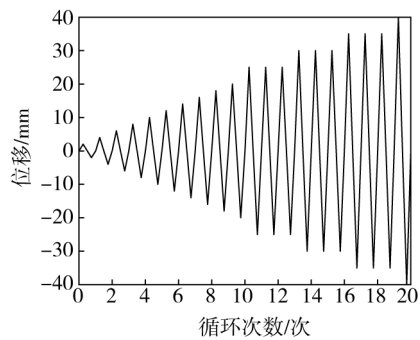


图 5 加载制度

Fig. 5 Loading scheme

1.3 测点布置

在加载平面内共布置 4 个位移计和 2 个百分表,具体位移计布置见图 6。位移计 D1、D2 主要用于测量和采集墙体顶部的水平位移;位移计 D3、D4 以及地梁 300 mm 高度处南北方向的百分表用于观测墙体的滑移和偏转。

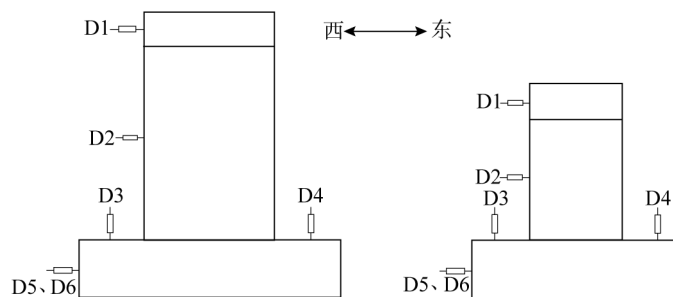


图 6 位移计布置

Fig. 6 Displacement gauge arrangement

2 试验现象及破坏特征

2.1 试验主要现象

1) 试件 W1, 高宽比为 2, 未布置钢芯板和 PBL 键。当位移加载至 10 mm 时, 墙体中上部斜裂缝快速发展形成少量交叉裂缝。加载至 20 mm, 沿型钢暗柱长度方向开始出现水平裂缝; 继续加载, 斜裂缝延伸、扩展, 在墙身形成菱形状网格, 见图 7(a), 同时墙体角部细小裂缝处混凝土出现轻微压酥脱落现象。当位移加载至 40 mm 时, 竖向裂缝发展加宽, 混凝土压碎区沿墙宽贯通。加载至 65 mm, 受压区型钢和钢筋屈服、箍筋被拉断, 钢筋外侧混凝土大面积脱落, 见图 7(b)。破坏形态见图 7(c)。

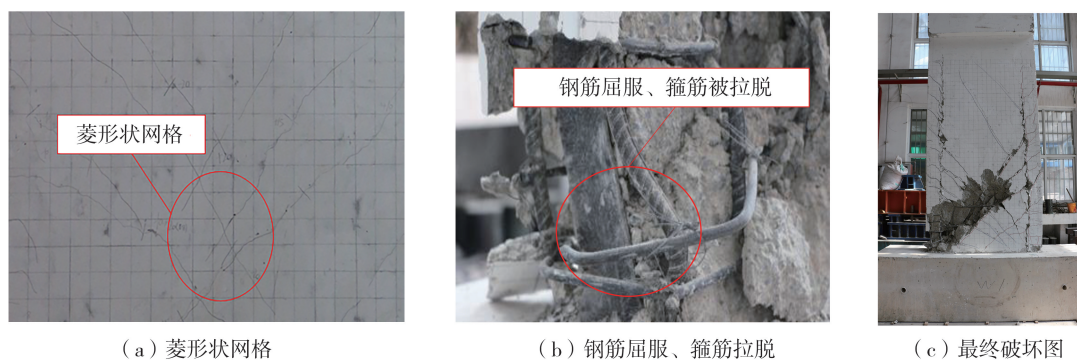


图 7 试件 W1 破坏形态

Fig. 7 Failure of specimen W1

2) 试件 W2, 高宽比为 2, 布置钢芯板和竖向 PBL 键。当位移加载至 15 mm 时, 沿 PBL 键长度方向缓慢发展出 2 条竖向长裂缝, 墙体中上部出现少量水平裂缝; 继续加载, 竖向长裂缝上延伸出几条主斜裂缝, 随后发展成大树躯干般的裂缝群, 见图 8(a)。加载至 35 mm, 墙体角部细小裂缝处混凝土出现轻微起皮、脱落现象, 墙体整体性仍然保持良好。当位移加载至 40 mm 时, 墙体角部混凝土被压溃, 见图 8(b), 试件达到最大承载力。随后在各级加载下, 受压区型钢产生较小变形, 纵向钢筋向外鼓出、箍筋被拉脱, 承载力下降到 85% 峰值荷载。破坏形态见图 8(c)。

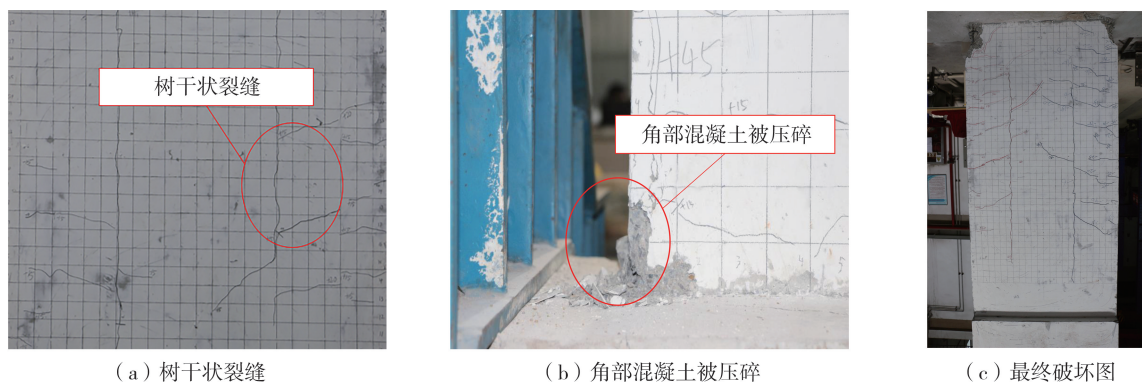


图 8 试件 W2 破坏形态

Fig. 8 Failure of specimen W2

3) 试件 W3, 高宽比为 2, 布置钢芯板和横向 PBL 键。当位移加载至 8 mm 时, 在墙体中下部出现许多沿 PBL 键长度方向的横向长裂缝, 相邻横向裂缝间产生斜裂缝, 且不断延伸; 继续加载, 在墙体中上部也出现少量横向裂缝, 而中下部裂缝此时快速发展形成网格状裂缝, 见图 9(a)。加载至 20 mm 时, 墙体中下部横向裂缝处频繁掉落混凝土碎块, 墙体角部混凝土出现轻微压碎、剥落现象。当位移加载至 40 mm 时, 墙体角部混凝土压碎区向上扩大, 直至与 PBL 键处的横向裂缝贯通, 见图 9(b), 在墙根出现破裂带, 底部混凝土突然大面积被压溃而退出工作, 加载结束。破坏形态见图 9(c)。

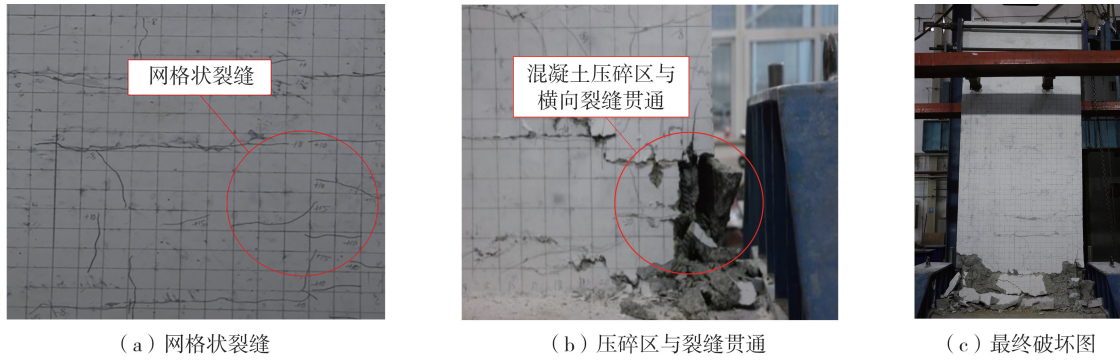


图 9 试件 W3 破坏形态

Fig.9 Failure of specimen W3

4) 试件 W4,高宽比为 1.17,布置钢芯板和竖向 PBL 键。当位移加载至 10 mm 时,沿 PBL 键长度方向出现 3 条竖向长裂缝,见图 10(a);继续加载,墙身缓慢发展出几条与试件 W2 类似的树干状裂缝。加载至 20 mm 时,墙体角部细小裂缝处混凝土出现酥裂、剥落等现象。继续加载,墙体角部混凝土压碎区不断扩大,见图 10(b),试件达到最大承载力。破坏形态见图 10(c)。

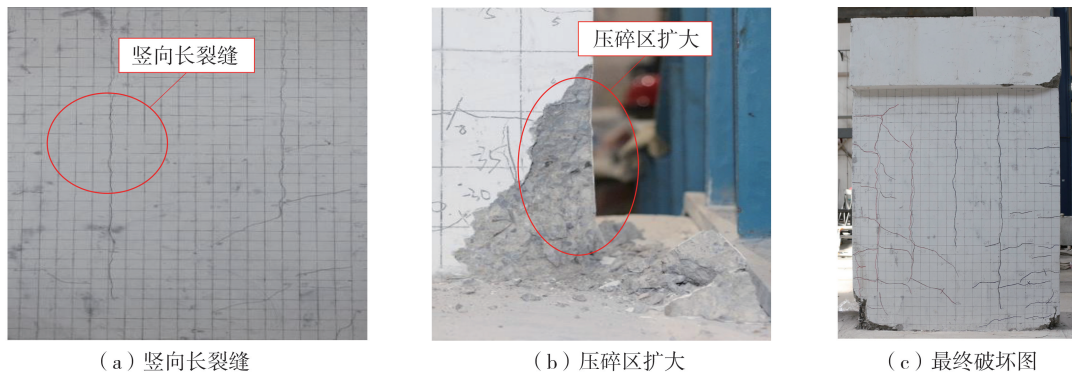


图 10 试件 W4 破坏形态

Fig.10 Failure of specimen W4

5) 试件 W5,高宽比为 1.17,布置钢芯板和横向 PBL 键。当位移加载至 8 mm 时,沿 PBL 键长度方向出现 4 条横向长裂缝,相邻横向裂缝间发展出几条斜裂缝使之连通;继续加载,横向裂缝和斜裂缝不断扩展、延伸,将墙体划分成一个一个裂缝网格,见图 11(a)。此时墙体底部 PBL 键处出现横向通缝,见图 11(b)。加载至 20 mm 时,墙体角部混凝土被压碎,试件达到最大承载力。随后在各级加载下,墙体角部混凝土被严重压溃,承载力下降到 85% 峰值荷载。破坏形态见图 11(c)。

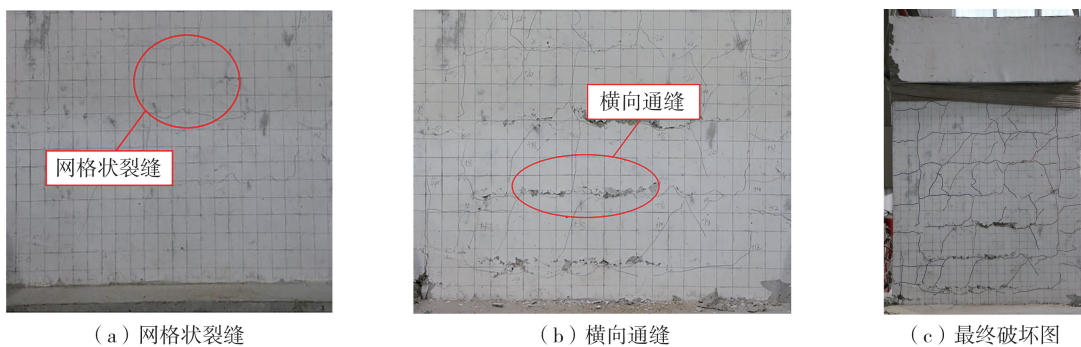


图 11 试件 W5 破坏形态

Fig.11 Failure of specimen W5

2.2 破坏特征

根据各试件的裂缝发展和最终破坏的损伤情况,5 个试件呈现出 2 种破坏类型,包括弯剪型破坏和弯曲型破坏,其破坏特点如下所述:

1) 试件 W1 属于弯剪型破坏, 出现此类破坏的原因是: 在水平荷载作用下, 试件沿型钢方向产生水平裂缝并延伸为斜裂缝, 随着荷载增大, 斜裂缝迅速发展并贯通, 墙身水平分布筋屈服; 同时, 墙身根部受压区的混凝土被压碎、型钢和钢筋压屈, 受拉区型钢和钢筋屈服, 试件呈现出弯剪型的破坏特征。

2) 试件 W2~试件 W5 属于弯曲型破坏, 出现此类破坏的原因是: 钢芯板的配置增强了墙体抗剪能力, 无论是 PBL 键竖置还是横置, 钢芯板始终未屈服, PBL 键与混凝土黏结性能良好; 高宽比为 2.0 和 1.17 的墙体试件, 能够达到承载能力极限状态的均是由于墙身根部正截面受弯破坏所致, 试件呈现出弯曲型的破坏特征。而对于试件 W3, 在加载后期, 由于墙身根部 PBL 键处的横向剪切裂缝贯通, 在往复弯矩作用下, 墙角混凝土压碎区与墙身横向裂缝贯通, 墙身根部混凝土整体碎裂, 承载力突降, 试件延性差; 而同为 PBL 键横置的试件 W5, 尽管墙身根部也存在贯通的水平裂缝, 但由于墙体的高宽比小, 弯矩作用也较小, 墙角破坏区与墙身水平裂缝不贯通, 正截面破坏仅限于墙体角部的受拉和受压区, 承载力未突降。

3 试验结果及其分析

3.1 滞回曲线

滞回曲线是构件在低周往复荷载作用下, 应力-应变关系形成的闭合环路。它是对构件进行抗震性能分析的依据, 能够有效反映出构件在弹塑性阶段的受力特征。图 12(a)~(e) 给出了 5 个组合剪力墙试件的滞回曲线, 可以发现:

1) 试件 W1 在加载初期滞回曲线形状饱满, 呈梭形。随着水平位移的增加, 滞回环的面积增大, 受剪切变形的影响出现“捏缩”效应, 滞回曲线开始由梭形向弓形发展。

2) 试件 W2 和试件 W3 在加载初期滞回环的形状相似, 呈现狭而长的梭形形状。在加载后期, 试件 W2 墙体裂缝发展、加宽, 试件刚度不断退化, 滞回曲线出现轻微的捏缩并逐渐向反 S 型发展; 试件 W3 的滞回曲线仍呈现为梭形, 但随着加载位移的增大, 墙根出现的水平贯通缝在往复弯矩的作用下破坏严重, 试件突然丧失承载力, 在滞回曲线上表现为未闭合的滞回环。

3) 试件 W4 和试件 W5 的滞回曲线形状不饱满, 受较大剪切变形的影响始终呈反 S 型, 达到峰值荷载后, 其承载力和刚度下降速度快。

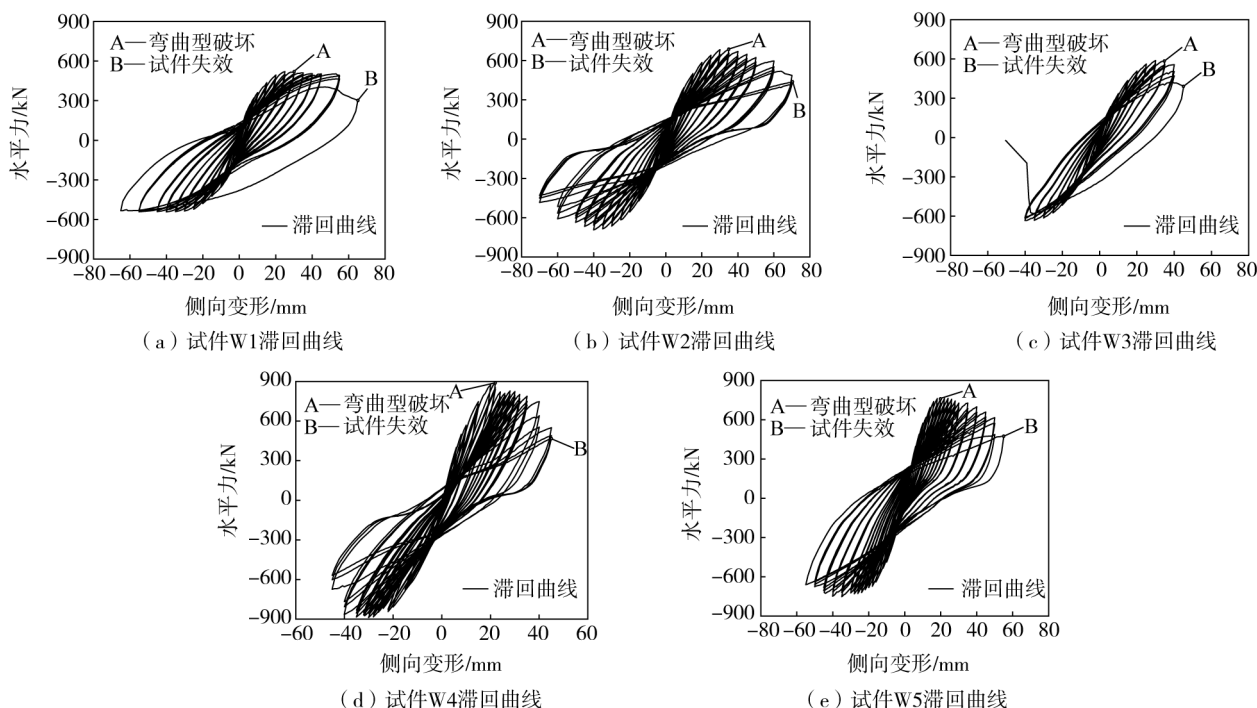


图 12 滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curves

3.2 骨架曲线

根据墙体剪切变形值 Δ 和水平荷载 P 之间的关系, 绘制出各试件的骨架曲线见图 13。由图可知, 试件 W1~

试件 W5 的骨架曲线形状相似,均呈反 S 型,没有明显的屈服点和屈服平台。在墙体开裂前,骨架曲线呈线性,此时试件处于弹性阶段,随着混凝土开裂,进入弹塑性阶段,试件承载力和刚度不断下降,此时骨架曲线的斜率不断减小,呈非线性。继续加载墙体角部混凝土大面积被压溃,试件进入破坏阶段不再具备承载能力。由于试件 W1~试件 W5 的荷载-位移曲线上无明显屈服点,本文根据 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》^[31] 的规定,采用等面积法确定试件的屈服荷载 P_y 和屈服位移 Δ_y ,取荷载下降至峰值荷载的 85% 时所对应的荷载和位移为极限荷载 P_u 和极限位移 Δ_u ,取值方法见图 14。

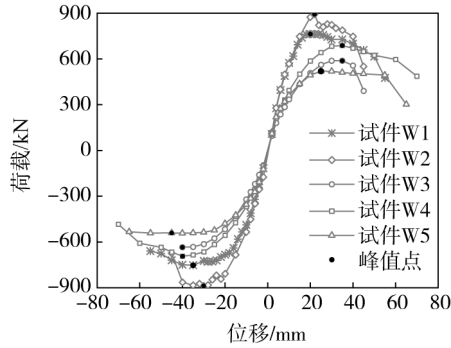


图 13 骨架曲线对比图

Fig. 13 Comparison of skeleton curves

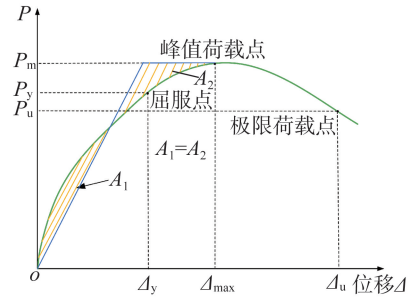


图 14 骨架曲线特征点定义

Fig. 14 Definition of feature points of skeleton curves

按上述方法,得到各试件的荷载和位移特征值,此时记 μ 为位移延性系数,取 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$; θ_u 为破坏点的侧向位移角,取 $\theta_u = \Delta_u / h$,其中 h 为试件高度。根据上述公式得到各试件的主要特征点试验数据见表 3。

由表 3 可知:

1) 试件 W1~试件 W5 的峰值荷载平均值依次是:531.35、690.55、611.15、890.25、757.85 kN。含钢芯板试件 W2~试件 W5 的峰值荷载明显高于无钢芯板试件 W1,说明设置钢芯板能显著提高组合剪力墙的承载力。

2) 试件 W4、试件 W5(高宽比为 1.17)的承载力高于试件 W2、试件 W3(高宽比为 2),这是由于大高宽比试件的倾覆弯矩效应强,承担的弯矩较大,故水平承载力较低。

3) 当高宽比相同时,试件 W2 的承载力高于试件 W3,试件 W4 的承载力高于试件 W5。其主要原因是:PBL 键横置时会产生水平通缝,水平通缝会影响墙体的抗弯承载力,尤其是当墙体高宽比较大时,由于倾覆弯矩效应明显,墙角受弯破坏区容易与墙身水平裂缝区贯通,导致试件破坏严重,影响墙体延性的发挥(如试件 W3)。

4) 除试件 W3 外,各试件的位移延性系数介于 2.48~3.11 之间,说明型钢混凝土剪力墙与钢芯板混凝土剪力墙均具备良好的延性;试件 W3 的位移延性系数小于 2,是因为加载后期,墙角受弯破坏区与墙身水平裂缝贯通,试件的变形能力没有得到完全发挥。

表 3 骨架曲线特征点实测结果

Table 3 Measured results of feature points of skeleton curves

试件编号	加载方向	屈服点		峰值荷载点		极限荷载点		θ_u	位移及延性系数 μ
		P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm		
W1	正	436.2	20.9	520.2	25.0	442.1	58.5	1/40	2.79
	负	-451.9	-23.3	-542.5	-40.0	-461.1	-61.9	1/37	2.65
W2	正	591.3	20.3	688.1	34.9	584.9	61.5	1/40	3.11
	负	-594.3	-20.7	-693.0	-39.9	-589.1	-61.7	1/40	2.98
W3	正	505.6	19.8	588.7	35.0	500.4	42.0	1/57	2.12
	负	-553.7	22.9	-633.6	-39.9	-538.6	-39.9	1/60	1.74
W4	正	780.8	15.9	892.6	22.0	758.7	39.5	1/35	2.48
	负	-788.6	-16.7	-887.9	-29.9	-754.7	-43.0	1/33	2.57
W5	正	673.0	16.4	763.2	20.0	648.7	46.9	1/30	2.85
	负	-673.5	-18.2	-752.5	-34.9	-639.6	-53.0	1/28	2.91

3.3 刚度退化

本文采用割线刚度 K_i 评价试件的刚度退化情况,各试件得刚度退化曲线见图 15。其中割线刚度 K_i 的计算式(1)所示:

$$K_i = \frac{|F_i| + |-F_i|}{|X_i| + |-X_i|} \quad (1)$$

式中: F_i 、 $-F_i$ 为第 i 级荷载第 1 循环的正、反向峰值点的荷载值; X_i 、 $-X_i$ 为与 F_i 、 $-F_i$ 对应的位移值。可以看出:

1) 5 个试件刚度退化的总趋势表现为:退化初期刚度下降速度快,随着组合剪力墙开裂、钢筋屈服,各试件的刚度退化逐渐趋于平缓;

2) 试件 W4、试件 W5 的初始刚度大于试件 W1、试件 W2 和试件 W3,说明高宽比越小,初始刚度越大;此外,竖置 PBL 键试件 W2、试件 W4 比横置 PBL 键试件 W3、试件 W5 的初始刚度分别高出 6%、13%,表明 PBL 键的放置形式会在一定程度上影响试件的初始刚度;

3) 试件 W3 在加载后期突然破坏,其刚度退化严重。

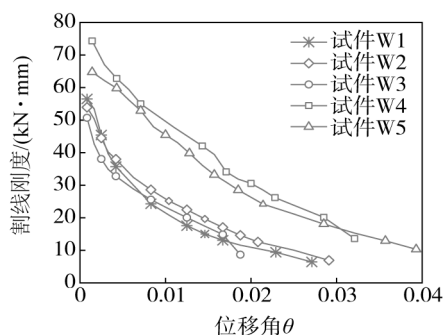


图 15 刚度退化曲线

Fig. 15 Stiffness degradation curves

4 压弯承载力设计公式

4.1 设计公式的建立

根据试验研究结果,当钢芯板及 PBL 键配置合理时,在轴力与弯矩联合作用下,PBL 键钢芯板混凝土组合剪力墙发生正截面破坏,其破坏机理与型钢混凝土偏压构件较为一致。基于欧洲规范 EN1994-1-1:2004^[32] 中型钢混凝土单向偏心受压构件的承载力设计思路,本文对钢芯板混凝土组合剪力墙在轴力和弯矩共同作用下的相关曲线通过引入 A、B、C、D 这 4 个特征点描述见图 16,并根据各特征点的受力特征,推导出墙体正截面的承载力计算公式。

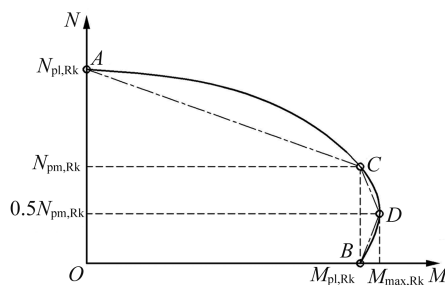


图 16 简化的 $M-N$ 相关曲线型

Fig. 16 Simplified interaction curves for combined compression and bending

为了简化计算,本文采用“以直代曲”的思路用直线依次连接 A、C、D、B 得到简化的复合偏压构件 $M-N$ 曲线(如图 16 虚线所示), $M-N$ 曲线包含 AC 段、CD 段和 BD 段,4 个特征点的坐标分别为 $(0, N_{pl,Rk})$ 、 $(M_{pl,Rk}, 0)$ 、 $(M_{pl,Rk}, N_{pm,Rk})$ 、 $(M_{max,Rk}, 0.5 N_{pm,Rk})$,则简化的压弯构件 $M-N$ 曲线可以表达为

$$\begin{cases} \frac{N_u - N_{pm,Rk}}{N_{pl,Rk} - N_{pm,Rk}} + \frac{M_u}{M_{pl,Rk}} = 1 & \text{(AC 段)} \\ \frac{N_u - 0.5N_{pm,Rk}}{0.5N_{pm,Rk}} + \frac{M_u - M_{pl,Rk}}{M_{max,Rk} - M_{pl,Rk}} = 1 & \text{(CD 段)} \\ \frac{N_u}{0.5M_{pl,Rk}} + \frac{M_u - M_{max,Rk}}{M_{pl,Rk} - M_{max,Rk}} = 1 & \text{(DB 段)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $N_{pm,Rk}$ 为截面中和轴通过形心时的受压承载力标准值; $N_{pl,Rk}$ 为轴压情况下截面塑性受压承载力标准值; N_u 为受压承载力设计值; $M_{pl,Rk}$ 为纯弯情况下截面塑性抗弯承载力标准值; $M_{max,Rk}$ 为截面最大抗弯承载力标准值; M_u 为受弯承载力设计值。

墙体截面在 A 点的应力分布见图 17(a),此时墙体截面仅受到轴心压力作用。根据此受力特征可知:

$$M_A = 0, N_A = N_{pl,Rk} \quad (3)$$

式中, $N_{pl,Rk}$ 可按式(4)计算,得

$$N_{pl,Rk} = 0.85A_c f_c + A_a f_a + A_s f_{y,s} + A_{sh} f_{y,sh} \quad (4)$$

式中: A_c 为受压区混凝土截面面积; A_a 为钢材截面面积; A_s 为边缘约束区受拉纵筋截面面积; A_{sh} 为墙身受拉分布钢筋的截面面积; f_c 为混凝土的轴心抗压强度标准值; f_a 为钢材的屈服强度标准值; $f_{y,s}$ 为纵向钢筋的屈服强度标准值; $f_{y,sh}$ 为墙身分布钢筋的屈服强度标准值。

墙体截面在 B 点的应力分布见图 17(b),此时墙体截面仅受弯矩作用。由此受力特征可知:

$$M_B = M_{pl,Rk}, N_B = 0 \quad (5)$$

按照组合截面的塑性应力分布,根据截面内力平衡可得:

$$M_{pl,Rk} = M_{max,Rk} - M_0 \quad (6)$$

式中: $M_{max,Rk}$ 和 M_0 的计算式如式(7)和式(8)所示:

$$M_{max,Rk} = 0.85W_{pc} f_c / 2 + W_{pa} f_a + W_{ps} f_{y,s} + W_{psh} f_{y,sh} \quad (7)$$

$$M_0 = 0.85(b - t_b) h_n^2 f_c + t_b h_n^2 f_a + W_{nsh} f_{y,sh} \quad (8a)$$

$$h_n = \frac{N_{pm,Rk} - A_{sh} f_{y,sh}}{0.85 f_c b + 2 f_a t_b} \quad (8b)$$

$$N_{pm,Rk} = 0.85 b h f_c / 2 \quad (8c)$$

式中: W_{pc} 为混凝土的塑性截面模量; W_{pa} 为型钢的塑性截面模量; W_{ps} 为边缘约束区纵筋的塑性截面模量; W_{psh} 为墙身分布钢筋的塑性截面模量; W_{nsh} 为 h_n 范围内分布钢筋的塑性截面模量; M_0 为 $M_{max,Rk}$ 与 $M_{pl,Rk}$ 之差; h_n 为中和轴至中心线的距离; b 为墙身截面宽度; h 为墙身截面高度; t_b 为钢板厚度。

墙体截面在 C 点的应力分布见图 17(c),此时墙体截面受到轴力与纯弯情况下相等的弯矩作用。由此受力特征可知:

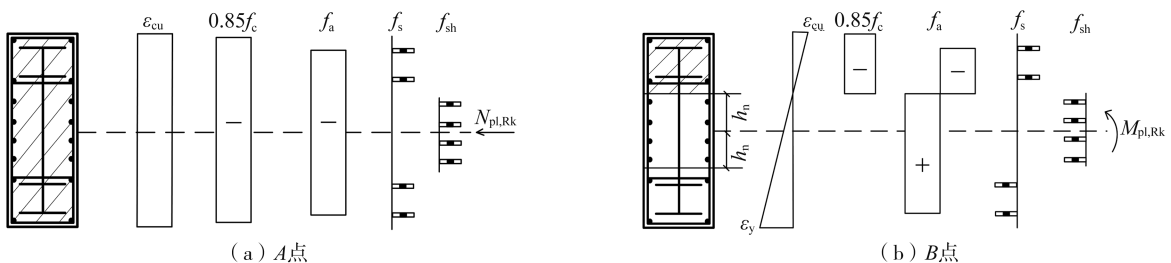
$$M_c = M_{pl,Rk}, N_c = N_{pm,Rk} \quad (9)$$

式中: $M_{pl,Rk}$ 和 $N_{pm,Rk}$ 可分别按式(6)和式(8c)计算。

墙体截面在 D 点的应力分布见图 17(d),此时墙体截面受到最大弯矩与轴向压力共同作用。由此受力特征可知:

$$M_D = M_{max,Rk}, N_D = N_{pm,Rk} / 2 \quad (10)$$

式中, $M_{max,Rk}$ 、 $N_{pm,Rk}$ 分别按式(7)和式(8c)计算。



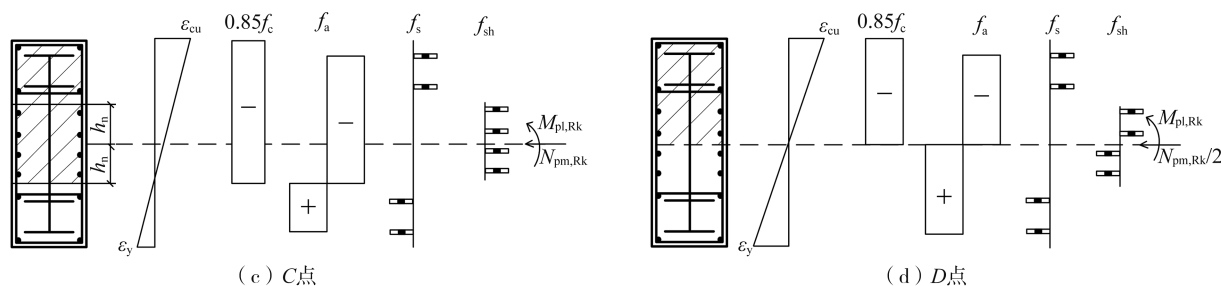


图 17 截面应力-应变分布

Fig. 17 Stress and strain distribution in cross-sections

4.2 公式验证

基于建议的承载力公式,并采用混凝土、钢筋和钢板实测强度计算试件 W1~试件 W5 的承载力,将承载力计算值与试验值进行对比,见图 18。

由图 18 可知,大高宽比试件 W1~试件 W3 的承载力计算值与试验值吻合较好,计算值与试验值的比值在 0.90~0.99 之间,计算值略低于试验值,说明上述建议公式对大高宽比试件精度较好。而小高宽比试件 W4、试件 W5 的承载力计算值高于试验值,这是由于小高宽比剪力墙的剪切效应显著,降低了剪力墙构件正截面压弯承载力。本文建议的方法可较为准确地计算大高宽比 PBL 键钢芯板组合剪力墙的压弯承载力,而对于小高宽比剪力墙,需要进一步考虑剪切效应的影响。

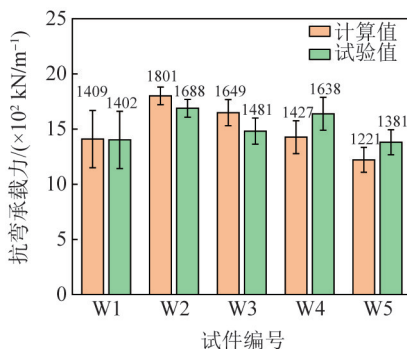


图 18 计算值与试验值对比

Fig. 18 Comparisons of tested values and calculated values

5 结论

本文通过拟静力加载试验,围绕 PBL 键钢芯板混凝土组合剪力墙的抗震性能展开研究。根据破坏机理,基于欧洲规范 EN 1994-1-1:2004 提出了剪力墙构件压弯承载力设计方法,得出如下主要结论:

1) 型钢混凝土组合剪力墙试件 W1 发生弯剪型破坏,PBL 键钢芯板混凝土组合剪力墙试件 W2~试件 W5 均呈弯曲型破坏。

2) 钢芯板与混凝土之间的抗黏结滑移性能良好,PBL 键可确保钢芯板与混凝土共同工作。但横置 PBL 的形式不适合于大高宽比剪力墙,因为墙体根部易沿 PBL 键的长度方向出现贯通裂缝,混凝土破坏严重,墙体延性差。

3) 提出了 PBL 键钢芯板混凝土组合剪力墙的压弯承载力计算公式,大高宽比墙体试件的计算结果与试验结果吻合较好,而计算小高宽比墙体时应考虑剪切效应的影响。

参考文献:

- [1] LOU G B, CHEN P X, ZHENG J H. Seismic performance of high-strength steel plate-concrete composite shear walls[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82: 108258.
- [2] 许新颖,陈宗平,张冯霖,等. T 形双波纹钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(3): 176-189. XU Xinying, CHEN Zongping, ZHANG Fenglin, et al. Experimental study on seismic behavior of T-shaped double skin profiled composite shear wall[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(3): 176-189. (in Chinese)

- [3] 杨啸,郭彦林,闻陈宝,等.波形钢板组合墙边缘构件-梁连接节点的滞回性能[J].工程力学,2023,40(12):160-174.
YANG Xiao, GUO Yanlin, WEN Chenbao, et al. Hysteretic performance of joint connecting boundary element of steel corrugated-plate composite wall and i-beam[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(12): 160-174. (in Chinese)
- [4] 汪士也,陈丽华,娄宇,等.双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验及数值模拟[J].地震工程与工程振动,2020,40(4):216-226.
WANG Shiye, CHEN Lihua, LOU Yu, et al. Experimental study and numerical simulation on double skin composite walls[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(4): 216-226. (in Chinese)
- [5] 王柯.多腔双钢板-混凝土组合剪力墙受力机理和设计方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
WANG ke. Research on stress mechanism and design method of multi-cavity double steel plate-concrete composite shear wall[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [6] 张壮南,李珊珊,王春刚,等.设置混合连接件的双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J].建筑结构学报,2023,44(增刊1):92-100.
ZHANG Zhuangnan, LI Shanshan, WANG Chungang, et al. Study on seismic performance of double-steel plate concrete composite shear wall with mixed connectors[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(Sup. 1): 92-100. (in Chinese)
- [7] WU L L, WANG H, LIN Z B. Ultimate strength behavior of steel plate-concrete composite slabs: An experimental and theoretical study[J]. Steel and Composite Structures, 2020, 37(6): 741-59.
- [8] 赵鹤,何杰峰,陶慕轩.双钢板-混凝土组合剪力墙结构压弯损伤评估方法[J].建筑结构学报,2025,46(7):257-264.
ZHAO He, HE Jiefeng, TAO Muxuan. Compressive-flexural damage assessment method for double steel plate-concrete composite shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2025, 45(5): 218-227. (in Chinese)
- [9] 柯晓军,李娜,李庆乐.部分包裹钢板混凝土剪力墙抗震性能及承载力计算[J].工程力学,2025,42(5):218-227.
KEXiaojun, LI Na, LI Qingle. Calculation of seismic performance and bearing capacity of partially wrapped steel plate concrete shear wall[J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(5): 218-227. (in Chinese)
- [10] 郭全全,黄泽宇,赵唯以,等.双钢板混凝土组合剪力墙斜截面承载力计算方法[J].建筑结构学报,2015,36(6):145-150.
GUO Quanquan, HUANG Zeyu, ZHAO Weiye, et al. Calculation method for shear bearing capacity of steel-concrete composite shear wall[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6): 145-150. (in Chinese)
- [11] 李一康.波纹双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能及设计方法研究[D].天津:天津大学,2020.
LI Yikang. Study on seismic performance and design method of corrugated double steel plate-concrete composite shear wall[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)
- [12] 董宏英,孙亮,曹万林,等.高轴压比下内置钢板高强混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2020,53(增刊2):28-33,67.
DONG Hongying, SUN Liang, CAO Wanlin, et al. Experimental study on seismic performance of high-strength concrete composite shear wall with built-in steel plate under high axial compression ratio[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup. 2): 28-33, 67. (in Chinese)
- [13] 伍云天,王泉,张婕,等.钢板混凝土联肢剪力墙抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2021,41(1):44-52.
WU Yuntian, WANG Xiao, ZHANG jie, et al. Experimental study on seismic behavior of coupled steel plate and concrete composite wall[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics 2021, 41(1): 44-52. (in Chinese)
- [14] 王威,刘格炜,苏三庆,等.波形钢板剪力墙及组合墙抗剪承载力研究[J].工程力学,2019,36(7):197-206,226.
WANG Wei, LIU Gewei, SU Sanqing, et al. Research on the shear bearing capacity of corrugated steel plate shear wall and composite wall[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(7): 197-206, 226. (in Chinese)
- [15] 陈宗平,周济,莫琳琳,等.双波纹钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(10):199-213.
CHEN Zongping, ZHOU Ji, MO Linlin, et al. Experimental study on seismic performance of double-corrugated steel-plate concrete composite shear wall[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(10): 199-213. (in Chinese)
- [16] 李文韬,郭明,赵群昌,等.双层波纹钢板混凝土组合剪力墙抗剪承载力研究[J].建筑结构,2022,52(增刊1):1299-1303.
LI Wentao, GUO Ming, ZHAO Qunchang, et al. Study on shear bearing capacity of double-layer corrugated steel-plate concrete composite shear wall[J]. Building Structure, 2022, 52(Sup. 1): 1299-1303. (in Chinese)
- [17] 秦凤江,周绪红,梁博文,等.大跨度自锚式悬索桥主梁钢-混结合段模型试验[J].中国公路学报,2018,31(9):52-64.
QIN Fengjiang, ZHOU Xuhong, LIANG Bowen, et al. Model test of steel-concrete section of main girder of long-span self-anchored suspension bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 52-64. (in Chinese)
- [18] CHENG X, NIE X, FAN J. Structural performance and strength prediction of steel-to-concrete box girder deck transition zone of hybrid steel-concrete cable-stayed bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(11): 4016083.
- [19] KIM S H, LEE C G, AHN J H, et al. Experimental study on joint of spliced steel-psc hybrid girder, Part I: proposed parallel-perforated-rib-type joint[J]. Engineering Structures, 2011, 33(8): 2382-2397.
- [20] HE S, FANG Z, FANG Y, et al. Experimental study on perforated strip connector in steel-concrete joints of hybrid bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 118: 169-179.
- [21] 彭忠礼,聂建国,方志,等.配置PBL剪力键钢-UHPC组合桥面板纵向受拉性能的试验及分析[J].公路工程,2022,47(6):16-23.
PENG Zhongli, NIE Jianguo, FANG Zhi, et al. Test and analysis of longitudinal tensile properties of PBL shear key steel-UHPC composite bridge deck[J]. Highway Engineering, 2022, 47(6): 16-23. (in Chinese)
- [22] 周敏,肖靖林,杨腾宇,等.带开孔板剪力键的钢-UHPC组合板受弯性能试验研究及数值模拟[J].工程力学,2022,39(7):19-29.

- ZHOU Min, XIAOJinglin, YANG Tengyu, et al. Experimental study and numerical simulation of flexural properties of steel-UHPC composite plate with shear key of perforated plate[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(7): 19-29. (in Chinese)
- [23] 张婧, 寇立亚, 胡夏闽, 等. PBL连接件在长期荷载作用下的试验研究[J]. *工业建筑*, 2018, 48(4): 144-52.
ZHANG Jing, KOU Liya, HU Xiamin, et al. Experimental study on PBL connectors under long-term load[J]. *Industrial Building*, 2018, 48(4): 144-52. (in Chinese)
- [24] YANG Y, CHEN Y. Experimental study on mechanical behavior of PBL shear connectors[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(9): 04018062.
- [25] 杨勇, 陈阳. PBL剪力连接件抗剪承载力试验研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(9): 89-96.
YANG Yong, CHEN Yang. Experimental study on shear capacity of PBL shear connectors[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(9): 89-96. (in Chinese)
- [26] 白久林, 冯明富, 李文学, 等. 防屈曲支撑-RC框架新型开孔钢板剪力键连接节点抗震性能研究[J]. *工程力学*, 2022, 39(6): 110-21.
BAI Jiulin, FENG Mingfu, LI Wenxue, et al. Study on the seismic performance of the new open-hole steel plate shear connectors connection joint of anti-buckling brace-RC frame[J]. *Engineering mechanics*, 2022, 39(6): 110-21. (in Chinese)
- [27] JGJ 318—2016 组合结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
JGJ 318—2016 Code for design of composite structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [28] GBT 50011—2010(2024 版) 建筑抗震设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
GBT 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. 2024 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024. (in Chinese)
- [29] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
GB/T 50081—2019 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [30] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
GB/T 228.1—2021 Metallic materials-tensile testing-part 1: Method of test at room temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [31] JGJ 101—2015 建筑抗震试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
JGJ 101—2015 Specification for seismic test of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [32] EN 1994-1-1: 2004: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings[S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization(CEN), 2004.