

引文格式:袁涛涛,蔡玉军,聂少锋,等.带 PBL 剪力键的钢芯板混凝土组合剪力墙低周往复加载试验研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(5):42-51.

YUAN Taotao, CAI Yujun, NIE Shaofeng, et al. Low cyclic loading tests on steel core plate and concrete composite shear walls with PBL shear connectors[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(5): 42-51.

DOI:10.19815/j.jace.2022.10117

带 PBL 剪力键的钢芯板混凝土组合剪力墙低周往复加载试验研究

袁涛涛¹, 蔡玉军¹, 聂少锋², 隋璐²

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:为研究带 PBL 剪力键的钢芯板混凝土组合剪力墙的抗震性能,对 1 个型钢混凝土组合剪力墙和 4 个钢芯板混凝土组合剪力墙进行了循环往复加载试验;观察带 PBL 剪力键的钢芯板混凝土组合剪力墙在水平循环荷载下的破坏全过程,并分析该类剪力墙的滞回特征、变形能力、承载能力、耗能性能、刚度和强度退化能力。结果表明:钢芯板混凝土组合剪力墙的破坏模式主要为弯曲型破坏,滞回曲线较为饱满;配置钢芯板的剪力墙承载力、延性性能和耗能能力较优;PBL 剪力键的构造方式可保证钢芯板与混凝土之间的黏结性能完好,PBL 剪力键平放会导致剪力墙出现沿 PBL 剪力键的水平通缝,影响剪力墙承载能力的发挥,建议采用 PBL 剪力键竖放的构造形式。

关键词:钢芯板混凝土组合剪力墙;PBL 剪力键;抗震性能;拟静力试验

中图分类号:TU392.5

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)05-0042-10

Low cyclic loading tests on steel core plate and concrete composite shear walls with PBL shear connectors

YUAN Taotao¹, CAI Yujun¹, NIE Shaofeng², SUI Lu²

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of steel core plate and concrete composite shear walls with PBL shear connectors, the cyclic loading tests of four steel core plate and concrete composite shear walls and one steel and reinforced concrete composite shear wall were carried out. The failure process of steel core plate and concrete composite shear walls with PBL shear connectors under horizontal cyclic loading was observed. The hysteresis performance, deformation capacity, bearing capacity, energy dissipation and degradation of stiffness and strength of the shear wall were analyzed. The results show that the failure mode of steel core plate and concrete composite shear walls is bending failure and the hysteresis curves are relatively full. The shear walls with steel core plate have good bearing capacity, ductility and energy dissipation. The adhesive property between steel core plate and concrete can be guaranteed by

收稿日期:2023-09-06

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2021SF-519);中铁第一勘察设计院集团有限公司科技创新项目(19-59)

作者简介:袁涛涛(1982-),男,高级工程师,E-mail:285522786@qq.com.

通信作者:聂少锋(1981-),男,工学博士,教授,E-mail:niesf@chd.edu.cn.

configurations of PBL shear connectors. The horizontal arrangement of PBL shear connectors can cause the horizontal seams of shear walls along PBL connectors, which have an impact on bearing capacity of shear walls. Therefore, the vertical arrangement of PBL shear connectors is suggested.

Key words: steel core plate and concrete composite shear wall; PBL shear connector; seismic performance; pseudo-static test

Author resumes: YUAN Taotao(1982-), male, senior engineer, E-mail: 285522786@qq. com; NIE Shaofeng(1981-), male, PhD, professor, E-mail: niesf@chd. edu. cn.

0 引 言

随着城市轨道交通的飞速发展,开发轨道交通的附属设施车辆段大平台已成为合理利用城市土地资源的一种有效途径^[1-4]。车辆段盖下、盖上功能完全不同,盖上部分通常用于高层住宅或商业开发,而盖下部分的主要功能为轨道交通的运行、停放和维修,此种功能差异往往会使盖上、盖下结构存在竖向不连续、刚度突变等问题,不利于整体结构的抗震性能。针对此问题,实际工程中往往在盖下结构中设置刚度和承载力较大的钢芯板混凝土组合剪力墙,以增强盖下大底盘的抗侧刚度,控制地震作用下的结构损伤并提升盖下结构的抗震性能,取得了良好的效果。

钢芯板混凝土组合剪力墙是将钢芯板内置于钢筋混凝土剪力墙中形成的新型组合构件,其具有较高的抗侧刚度、承载能力和耗能性能^[5-12];同时,混凝土可对钢芯板起到支撑和保护作用,提高钢芯板的耐腐蚀性,并能提高钢芯板的局部稳定性,充分发挥钢材的材料性能。为了保证钢芯板与混凝土能够协同工作,将抗剪连接键布置在钢芯板两侧。PBL 剪力键也称开孔钢板连接件,主要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共同受力。PBL 剪力键在钢-混凝土组合梁^[13-16]和方钢管混凝土^[17-22]中具有广泛的应用,优势显著。陈海等^[23]对斜板 PBL 剪力键的受剪性能进行试验研究;姜天华等^[24]通过疲劳推出试验,研究了 Twin-PBL 剪力键在循环荷载作用下的力学性能;司秀勇等^[25]提出了钢-混凝土组合梁中 PBL 剪力键在工作状态下的弹性静力解析解;赵建波等^[26]对 PBL 剪力键混凝土榫在特定破坏模式下的应力状态进行分析,并提出承载力提升措施;周阳等^[27]对混合梁斜拉桥钢-混结合段中的 PBL 剪力连接件群力学性能进行研究。上述研究成果表明:PBL 剪力键是一种承载力高、

剪切刚度强、抗疲劳性能优的抗剪连接件,其具有广泛的应用空间。

为了拓展 PBL 剪力键的应用范畴,本文摒弃传统抗剪栓钉的构造方式,将 PBL 剪力键引入到钢芯板混凝土组合剪力墙构件中。在钢芯板两侧设置 PBL 剪力键,并将剪力墙的水平或竖向分布钢筋穿过 PBL 剪力键上的预留孔,以增强钢芯板与混凝土之间的抗黏结滑移能力(图 1)。与传统的栓钉抗剪键相比,PBL 剪力键能对钢芯板起到加劲作用,尤其是提高钢芯板在施工阶段的局部稳定性。同时,PBL 剪力键的设置还能提高钢芯板在加工过程中的平整度。

本文以西安地铁某项目中的盖下剪力墙为原型,设计了 1 个型钢混凝土组合剪力墙和 4 个带 PBL 剪力键的钢芯板混凝土组合剪力墙,并对其进行循环往复加载试验研究,分析该类墙体在往复水平力作用下的失效机制和抗震机理,为理论研究和工程应用提供参考。

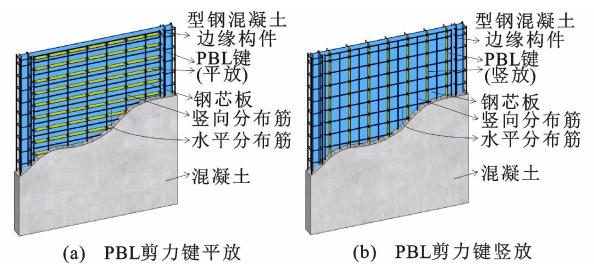


图 1 带 PBL 剪力键的钢芯板混凝土组合剪力墙
Fig. 1 Steel core plate and concrete composite shear walls with PBL shear connectors

1 试验概况

1.1 试件设计

为了研究带 PBL 剪力键的钢芯板混凝土组合剪力墙的抗震性能,以西安地铁某项目中的盖下剪力墙为原型,结合实验室条件,并依据《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[28]设计了 5 个墙体试件

(W1~W5), 缩尺比例为 1:5。其中试件 W1 基于原工程模型, 作为对比试件, 未配置钢芯板, 而试件 W2~W5 均配置有钢芯板。所有试件具有相同的截面尺寸, 截面形状均为一字形, 截面宽度为 1 200 mm, 截面厚度为 160 mm。试件 W1~W3 为高墙系列, 试件高度为 2 400 mm, 高宽比为 2.0, 而试件 W4 和 W5 为矮墙系列, 试件高度为 1 400 mm, 高宽比为 1.17。

选取型钢混凝土构件作为剪力墙两端的暗柱, 选取 10[#] 工字钢(Q355B)作为内置型钢, 用直径 14 mm 的 4 根钢筋制作纵筋, 用直径为 8 mm 的钢筋制成箍筋, 箍筋按照间距 100 mm 和 200 mm 在加密区与非加密区进行布置, 其中暗柱下端 500 mm 范围为加密区高度。采用直径 8 mm 的钢筋作为墙体水平和竖向分布筋, 分布筋按照间距 200 mm 进行布置。试件 W2~W5 的钢芯板两侧焊接 PBL 剪力键, PBL 剪力键采用厚度为 6 mm、宽度为 50 mm 的钢板制作, 上面设置直径为 60 mm 的半圆孔, 孔距 200 mm。试件 W2、W4 的 PBL 剪力键竖向设置, 墙身水平分布筋穿过半圆孔, 竖向分布筋与水平分布筋绑扎; 试件 W3、W5 的 PBL 剪力键水平设置, 墙身竖向分布筋穿过半圆孔, 水平分布筋与竖向分布筋绑扎。试件尺寸及细部构造形式见图 2, 主要试验参数见表 1。

1.2 材料力学性能

选用强度等级为 Q355B 级钢板制作暗柱的内置型钢与钢芯板; 采用强度等级为 HRB400 钢筋制作纵筋、水平分布筋和竖向分布筋; 选用强度等级为 HPB300 钢筋制作箍筋。依据《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[29], 对钢板和钢筋进行拉伸试验, 试验结果如表 2 所示。

混凝土材性可以按照相关规范^[30]来确定, 对尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体混凝土试块进行测试, 得到试块抗压强度平均值为 33.1 MPa。

1.3 加载装置与制度

试验加载装置见图 3, 采用 MTS 电液伺服程控结构试验机系统进行低周往复加载试验, 量程为 1 000 kN, 采用 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率进行加载; 按照 0.3 的轴压比在墙体加载顶梁上施加竖向力, 分成三级施加, 整个试验过程中不发生变化。在加载开始之前, 通过有限元建模的方式分析结构的屈服荷载 P_y 和屈服位移 Δ_y 。荷载均匀划分为 5 级, 试验加载至预先估计的屈服点后, 按照每级为 $0.5\Delta_y$ 的

位移极差进行位移控制加载, 每一级循环 3 周。当水平荷载为 85% 峰值荷载时, 再进行一次低周往复循环后结束试验。在试件底部对加载底梁进行锚固, 通过压梁和水平限位器约束试件的倾覆变形和底部的水平变形。

1.4 测点布置及量测内容

通过位移计测量加载过程中试件各部位的变形值, 位移计布置如图 4 所示, 每个墙体试件共布置 6 个位移计。试件顶端的水平位移通过位移计 DM1 来测量; 试件 1/2 高度处的水平位移通过位移计 DM2 来测量; DM3、DM4 竖向设置于加载底梁两端, 用于测量底梁的转动变形; DM5 水平设置于加载底梁端部, 用于测试底梁的水平变形; 位移计 DM6 测试试件的平面外变形。

2 试验现象及破坏特征

2.1 大高宽比剪力墙(试件 W1~W3)

试件 W1~W3 属于“高墙”系列, 即高宽比为 2.0。由于墙体内部构造措施不同, 试件呈现出不同的破坏特征[图 5(a)~(c)]。

试件 W1 为未配置钢芯板的型钢混凝土组合剪力墙。加载至 10 mm(位移角 $\theta=1/240$)时, 墙身中部斜裂缝迅速发展并不断交汇; 加载至 20 mm($\theta=1/120$)时, 沿暗柱内型钢与墙面的交接处开始出现竖向裂缝。随着水平位移不断增大, 交叉斜裂缝将墙体分割成若干菱形块, 且墙体角部细小裂缝处出现混凝土轻微压碎、剥落等现象; 加载至 40 mm($\theta=1/60$)时, 受压侧墙角压碎区贯通墙厚, 此时达到峰值荷载; 继续加载, 因受压区钢筋与型钢被压屈, 箍筋被拉断, 导致外围混凝土保护层大面积脱落。

试件 W2 为配置钢芯板且 PBL 剪力键竖放的组合剪力墙。加载至 15 mm($\theta=1/160$)时, 墙身沿 PBL 剪力键位置处出现竖向长裂缝; 继续加载, 墙身中部开始出现少量水平裂缝, 但墙身的水平裂缝和沿 PBL 剪力键方向的竖向裂缝发展较为缓慢; 加载至 35 mm($\theta=1/70$)时, 墙角处混凝土产生轻微压碎、剥落等现象; 当位移增加至 40 mm($\theta=1/60$)时, 墙角混凝土压碎区严重破坏, 试件承载力升至最大值; 加载至 70 mm($\theta=1/35$)时, 暗柱处纵筋压屈, 箍筋被拉脱后丧失约束作用, 承载力下降到 85% 的峰值荷载。

试件 W3 为配置钢芯板且 PBL 剪力键平放的组合剪力墙。加载至 10 mm($\theta=1/240$)时, 墙体中下部出现较多沿 PBL 剪力键方向的水平向裂缝; 随

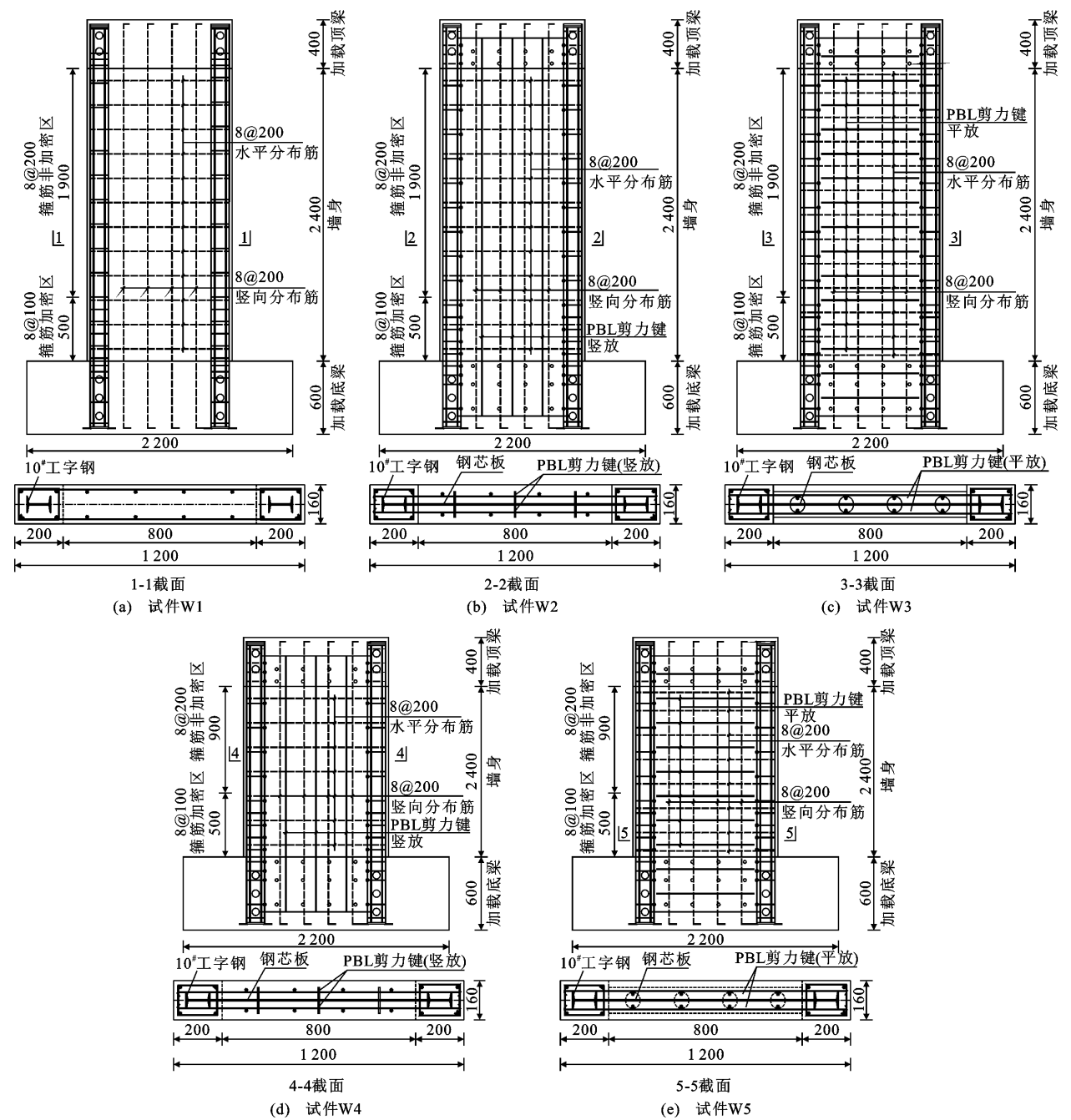


图 2 试件几何尺寸及构造形式(单位:mm)

Fig. 2 Geometric dimensions and configurations of specimens (unit:mm)

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	试件尺寸	高宽比	钢芯板厚度/mm	黏结构造
W1	2 400 mm×1 200 mm×200 mm	2.00		
W2	2 400 mm×1 200 mm×200 mm	2.00	6	PBL 剪力键(竖放)
W3	2 400 mm×1 200 mm×200 mm	2.00	6	PBL 剪力键(平放)
W4	1 400 mm×1 200 mm×200 mm	1.17	6	PBL 剪力键(竖放)
W5	1 400 mm×1 200 mm×200 mm	1.17	6	PBL 剪力键(平放)

着位移增大,相邻水平向裂缝间开始出现斜裂缝;加载至 20 mm($\theta=1/120$)时,水平向裂缝处已经出现

轻微的混凝土剥落现象;加载至 40 mm 时,墙角混凝土压溃失效,试件承载力达到最大值,加载至 60

表 2 钢板和钢筋力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel plates and bars

取样位置	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa	伸长率 $\delta/\%$	弹性模量 $E/10^5 \text{ MPa}$
型钢翼缘	360.6	441.9	30.5	2.07
型钢腹板	363.7	492.6	36.6	2.10
钢芯板	394.0	488.9	32.5	2.02
水平和竖向分布筋	424.0	507.3	23.0	2.03
暗柱纵筋	416.3	524.0	21.0	2.11
暗柱箍筋	356.0	458.3	24.9	2.07

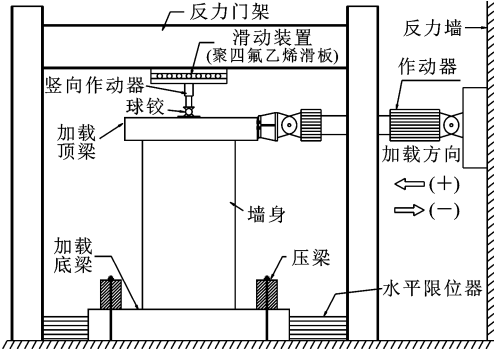


图 3 试验装置
Fig. 3 Test setup

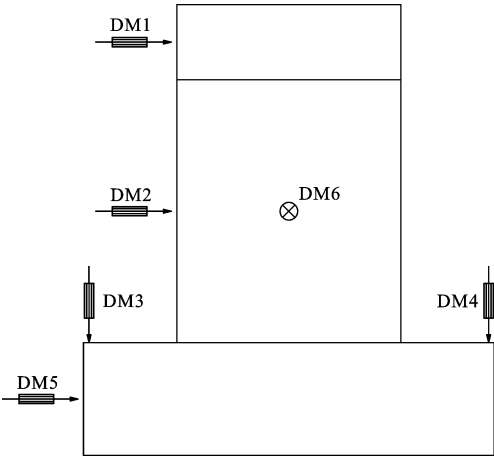


图 4 位移计布置
Fig. 4 Layout of displacement transducers

mm($\theta=1/40$)时,墙角压溃区向上发展,压溃区裂缝与距底部 300 mm 处沿 PBL 剪力键的水平向裂缝贯通,此时试件底部混凝土突然大面积压溃,发生通缝破坏。

2.2 小高宽比剪力墙 (试件 W4、W5)

试件 W4 和 W5 属于“矮墙”系列,即高宽比为 1.17。2 个试件采用 PBL 剪力键的构造形式不同,导致试件出现不同的破坏特征[图 5(d)、(e)]。

试件 W4 的 PBL 剪力键竖放,加载至 10 mm ($\theta=1/140$)时,沿 PBL 剪力键方向出现 3 条竖向长

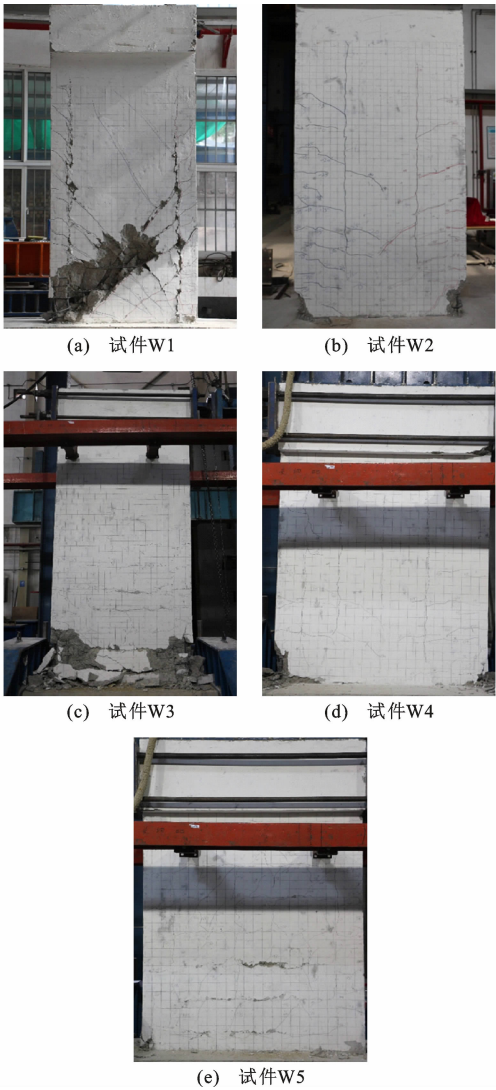


图 5 试件的破坏形态
Fig. 5 Failure modes of specimens

裂缝;随着位移增大,在几条竖向长裂缝上发展出若干斜裂缝;加载至 20 mm($\theta=1/70$)时,墙角细小裂缝处混凝土开始出现压碎和脱落等现象;继续加载,墙体墙角混凝土压溃面积不断扩大,试件达到最大承载力,而墙身处的竖向裂缝和斜裂缝发展较为缓慢。

试件 W5 的 PBL 剪力键平放,加载至 8 mm ($\theta=1/175$)时,沿着平放 PBL 剪力键处,试件出现 4 条水平向长裂缝,且水平向长裂缝之间发展出几条斜向裂缝将其连通;加载至 20 mm($\theta=1/70$)时,墙体墙角受压区混凝土出现碎裂和掉渣等现象;加载至 30 mm($\theta=1/45$)时,墙角受压区混凝土破坏严重,试件的承载力达到峰值,而整个加载过程中 PBL 剪力键处的水平裂缝和墙身斜裂缝发展缓慢,且均未贯通。

2.3 破坏特征分析

通过 5 个试件的低周往复加载试验研究,分析峰值荷载时引起承载力下降的原因,结合应变数据,将水平荷载作用下剪力墙破坏特征概括为:

(1)试件 W1:弯剪型破坏。墙角受压区混凝土压碎、型钢和纵筋压屈、箍筋断裂;受拉区型钢、纵筋屈服;墙身出现斜向裂缝贯通现象,水平分布筋达到屈服状态。试件呈现弯曲和剪切双重破坏特征。

(2)试件 W2、W3:弯曲型破坏。由于钢芯板的作用,剪力墙的抗剪能力得到加强,墙身的水平裂缝、竖向裂缝和斜向裂缝均未贯通;峰值荷载时,墙角受压区混凝土压碎,型钢和纵筋屈服,2 个试件均呈现出弯曲破坏的典型特征。对于试件 W3,在峰值荷载后,沿着墙根发生通缝破坏,其原因为:破坏处平放 PBL 剪力键会造成混凝土受剪面的削弱;该墙体根部的混凝土浇筑质量较差。

(3)试件 W4、W5:弯曲型破坏。2 个试件的高宽比为 1.17,属于小高宽比墙体。由于内置钢芯板增强了墙体的抗剪能力,墙体最终发生弯曲型破坏,峰值荷载时,墙角受压区混凝土压碎,型钢和纵筋屈服。

3 试验结果和分析

3.1 滞回曲线

根据位移计测试的变形值,可以得到墙体试件的顶点水平净位移 Δ 。各试件的滞回曲线如图 6 所示,其中 P 为荷载。从图 6 可以看出:试验初期,结构保持弹性状态,基本不耗能,滞回环较小,特征不明显;随着荷载不断增加,由于混凝土出现开裂,试件表现出一定耗能能力,滞回环面积逐渐增大,呈现为梭形;随着荷载继续增加,试件刚度逐渐降低,裂缝不断扩张,墙体角部的破坏不断加剧,滞回曲线出现捏缩滑移现象。对于试件 W3,由于达到峰值荷载后,墙体底部沿 PBL 剪力键出现水平向裂缝贯通,承载力急剧下降,试验停止,故缺少后期滞回环数据。

3.2 骨架曲线

试件的骨架曲线如图 7 所示,各试件均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和强度退化阶段。小高宽比剪力墙(W4、W5)的初始抗侧刚度高于大高宽比剪力墙(W1~W3)。除了试件 W3 外,其余试件的承载力下降较为缓慢,呈现出良好的变形能力,其中大高宽比剪力墙的变形能力优于小高宽比剪力墙。

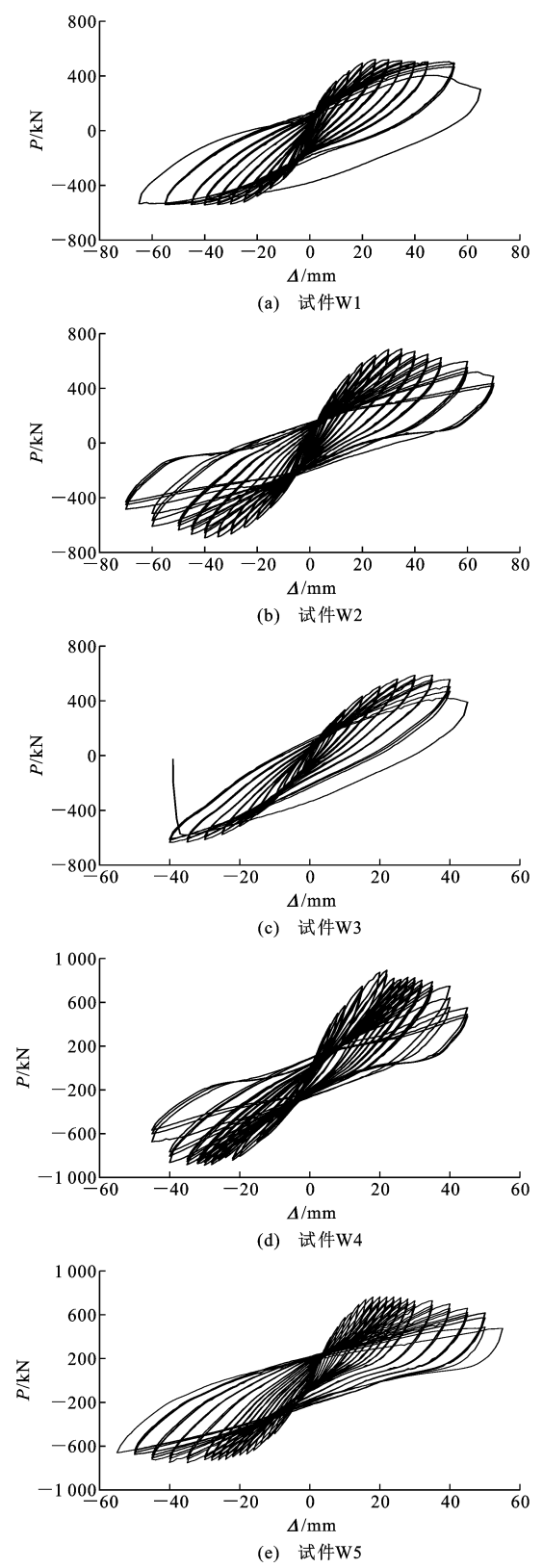


图 6 滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curves

3.3 承载力及延性分析

按照《建筑抗震试验规程》(JGJ 101—2015)^[31]确定各个试件特征点对应的荷载和位移,如表3所

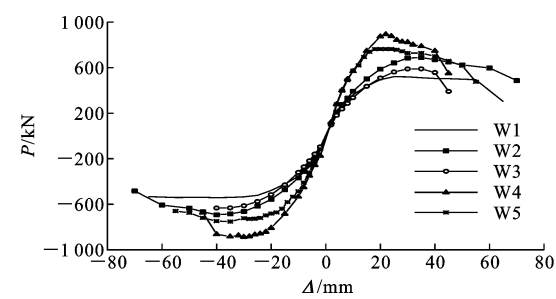


图 7 骨架曲线
Fig. 7 Skeleton curves

表 3 骨架曲线特征点实测结果

Table 3 Measured values of feature points on skeleton curves

试件编号	加载方向	开裂荷载 P_{cr}/kN	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值荷载 P_{max}/kN	峰值位移 Δ_{max}/mm	极限荷载 P_u/kN	极限位移 Δ_u/mm	延性系数 μ
W1	推(十)	273.02	436.2	20.93	520.22	35.01	442.18	58.57	2.79
	拉(一)		-451.9	-21.31	-542.50	-40.02	-461.10	-64.96	3.04
W2	推(十)	331.17	591.3	20.38	688.18	34.98	584.95	61.52	3.11
	拉(一)		-594.3	-20.74	-693.00	-39.97	-589.10	-64.77	3.12
W3	推(十)	336.63	505.6	19.82	588.72	35.02	500.41	42.04	2.12
	拉(一)		-553.7	22.93	-633.60	-39.99	-538.60	-39.99	1.74
W4	推(十)	398.96	780.8	15.90	892.67	22.01	758.76	49.56	3.11
	拉(一)		-788.6	-16.22	-887.90	-29.96	-754.70	-48.07	2.96
W5	推(十)	396.17	673.0	13.46	763.29	20.02	648.79	46.92	3.48
	拉(一)		-673.5	-18.28	-752.50	-34.97	-639.60	-55.01	3.01

(2)PBL 剪力键竖放试件的承载力高于 PBL 剪力键平放试件的承载力。同样以正向屈服荷载为例,大高宽比试件 W2 的承载力是试件 W3 的 1.17 倍;小高宽比试件 W4 的承载力是试件 W5 的 1.16 倍。主要原因为 PBL 剪力键平放时,容易出现沿 PBL 剪力键方向的水平通缝,对试件的承载力发挥较为不利,一旦水平通缝与角部压溃区贯通(如 W3 试件),会导致墙体迅速丧失承载力,试件的延性也较差。

(3)小高宽比试件的承载力比大高宽比试件的承载力高。以相同的 PBL 剪力键配置方式对比为例,W4 试件的承载力为 W2 试件的 1.29 倍;W5 试件的承载力为 W3 试件的 1.30 倍。

(4)除了试件 W3 外,试件 W1、W2、W4、W5 的位移延性系数均在 3.0 左右,说明试件 W1、W2、W4、W5 变形性能较优。值得一提的是,由于钢芯板的配置,小高宽比钢芯板混凝土组合剪力墙的位移延性系数也可达 3.0 左右,与大高宽比墙体基本持平,说明钢芯板混凝土组合剪力墙具有良好的延性,尤其是针对小高宽比剪力墙,其效果更优。

示。试件产生第 1 条裂缝时达到的荷载作为开裂荷载;采用等能量法得到屈服点;极限位移为 85%峰值荷载对应的位移。采用极限位移与屈服位移的比值来确定位移延性系数 μ 。

通过图 7 和表 3 可以看出:

(1)配置钢芯板可明显提高剪力墙的承载力能力。以正向屈服荷载为例,未配置钢芯板的试件 W1 承载力为 436.2 kN,而配置钢芯板的试件 W2、W3 的正向承载力分别为 591.3 kN 和 505.6 kN,是试件 W1 的 1.35 倍和 1.16 倍。

3.4 刚度分析

在低周往复加载作用下,用各级加载步的割线刚度来反映试件的抗侧刚度,通过正反两个方向最大值荷载与对应的位移绝对值之和的比值来确定割线刚度,如式(1)所示。

$$K_i = \frac{|P_i^+| + |P_i^-|}{|\Delta_i^+| + |\Delta_i^-|}$$

(1)

式中: K_i 为第 i 级荷载第 1 次循环的割线刚度; P_i^+ 、 P_i^- 分别为第 i 级荷载第 1 次循环正、负向峰值荷载; Δ_i^+ 、 Δ_i^- 分别为第 i 级荷载第 1 次循环正、负向峰值水平位移。

图 8 给出各试件割线刚度 K_i 随水平位移的变化规律。可以得出:①高宽比对试件的初始刚度有影响,小高宽比试件的初始刚度比大高宽比试件的初始刚度大;②相同高宽比下,各剪力墙试件的初始刚度不因钢芯板的设置而产生较大差异;③在加载初期,各试件割线刚度下降速度较快,随着加载位移的不断增加,混凝土开裂,钢筋达到屈服状态,刚度下降速度变缓。

3.5 强度退化分析

根据规范^[31]的相关规定,采用承载力退化系数

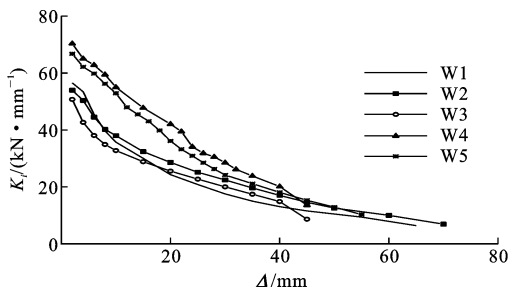


图 8 割线刚度

Fig. 8 Secant stiffness

λ_i 来评价承载力退化能力(图 9)。退化系数 λ_i 可用式(2)计算。

$$\lambda_i = \frac{P_{\max,i}^n}{P_{\max,i}^1} \tag{2}$$

式中: $P_{\max,i}^n$ 为第 3 次循环第 i 级荷载时达到的最大荷载; $P_{\max,i}^1$ 为第 1 次循环第 i 级荷载时达到的最大荷载。

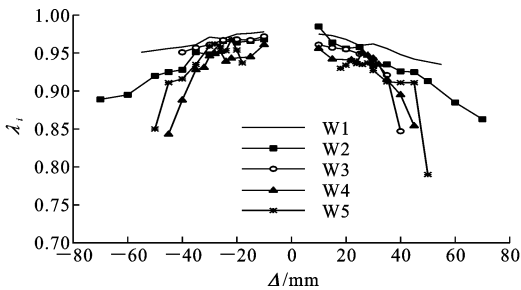


图 9 强度退化曲线

Fig. 9 Strength degradation curves

由图 9 可知:各个试件在屈服状态以前,其承载力退化系数在 0.95 左右,承载力退化降幅较小;在峰值荷载之后,强度退化系数下降较快,表明构件的累积损伤破坏加剧。

3.6 耗能能力分析

按照相关规范^[31]的规定,试件的耗能性能通过等效黏滞阻尼系数 h_e 来确定。 h_e 越大,试件的耗能性能越优。试件在各特征点荷载处的 h_e 见表 4。随着荷载的增加,剪力墙不断出现开裂及损伤破坏,其耗能能力不断增加;峰值荷载时,各试件的等效黏滞阻尼系数达到 0.1 左右;极限荷载时,等效黏滞阻尼系数均大于 0.15。可以看出,带 PBL 剪力键的钢芯板混凝土组合墙体试件的等效黏滞阻尼系数较型钢混凝土组合墙体试件和其他钢-混凝土组合试件偏低,其原因为带 PBL 剪力键的钢芯板组合剪力墙的混凝土开裂较少,同时试件 W2~W5 均发生弯曲型破坏,钢芯板参与塑性耗能较少,因此其耗能性能偏低。

表 4 等效黏滞阻尼系数

Table 4 Equivalent viscous damping ratio

试件编号	不同特征点的等效黏滞阻尼系数 h_e		
	屈服荷载处	峰值荷载处	极限荷载处
W1	0.087	0.149	0.202
W2	0.072	0.103	0.198
W3	0.077	0.141	
W4	0.065	0.092	0.151
W5	0.066	0.104	0.178

4 结 语

(1)水平荷载作用下钢芯板混凝土组合剪力墙的破坏模式主要为弯曲型破坏;由于钢芯板增强了墙体的抗剪性能,高宽比为 1.17 的小高宽比剪力墙仍然发生弯曲型破坏。

(2)钢芯板的设置可提升剪力墙的承载能力。钢芯板与混凝土之间采用 PBL 剪力键的构造方式,其黏结性能和整体性较好,加载过程中未发生破坏。

(3)PBL 剪力键竖放的构造形式优于 PBL 剪力键平放。PBL 剪力键平放会导致剪力墙出现沿 PBL 剪力键的水平通缝,一旦水平通缝出现在墙体底部并与角部破坏区贯通,将严重影响剪力墙承载能力的发挥。

(4)配置带 PBL 剪力键的钢芯板剪力墙抗震性能显著提高,可适用于剪力墙底部加强区、轨道交通盖下大底盘等关键部位,其应用前景广阔。

参考文献:

References:

[1] 袁 锋.城市轨道交通车辆段综合开发模式研究[J].铁道标准设计,2013,57(1):130-133.
YUAN Feng. Research on comprehensive development mode of rolling stock depot of urban rail transit [J]. Railway Standard Design, 2013, 57(1): 130-133.

[2] 郭 涛.大底盘多塔楼层间隔震结构的抗震性能分析[D].西安:长安大学,2021.
GUO Tao. Analysis of seismic behaviors of story isolated multi-tower structures with large base [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.

[3] 范 重,崔俊伟,王金金,等.地铁上盖层间隔震结构竖向地震响应[J].建筑科学与工程学报,2021,38(1):11-22.
FAN Zhong, CUI Junwei, WANG Jinjin, et al. Vertical seismic response of subway inter-story isolated superstructures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(1): 11-22.

- [4] 谢伟平,袁葵,孙亮明.地铁车辆段上盖建筑车致振动试验[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):99-107.
XIE Weiping, YUAN Kui, SUN Liangming. Train-induced vibration test of metro depot over-track buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 99-107.
- [5] 朱爱萍,肖从真,陈涛,等.剪跨比为1的内置钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2016,49(10):49-56,79.
ZHU Aiping, XIAO Congzhen, CHEN Tao, et al. Experimental study on seismic behavior of embedded steel plate reinforced concrete shear walls with 1.0 shear-span-ratio[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 49-56, 79.
- [6] 吕西林,干淳洁,王威.内置钢板钢筋混凝土剪力墙抗震性能研究[J].建筑结构学报,2009,30(5):89-96.
LU Xilin, GAN Chunjie, WANG Wei. Study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 89-96.
- [7] 王斌,蒋欢军,吕西林.内置钢板钢筋混凝土组合剪力墙数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2014,34(6):705-711.
WANG Bin, JIANG Huanjun, LV Xilin. Numerical simulation of steel plate-reinforced concrete composite shear wall[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(6): 705-711.
- [8] 蒋冬启,肖从真,陈涛,等.高强混凝土钢板组合剪力墙压弯性能试验研究[J].土木工程学报,2012,45(3):17-25,78.
JIANG Dongqi, XIAO Congzhen, CHEN Tao, et al. Experimental study of the compression-bending behavior of high-strength concrete steel composite shear walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 17-25, 78.
- [9] XU K Y, XU D, YAN J B, et al. Cyclic tests on steel truss-embedded steel plate-concrete composite walls[J]. Structures, 2022, 46: 1067-1083.
- [10] XU K Y, XU D, WANG X T, et al. Seismic behaviors of steel truss-embedded steel-concrete composite shear walls[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49: 104112.
- [11] ZHANG Z W, XU W P, GE W J, et al. Seismic performance of grid tubular-double steel plate concrete composite shear wall[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 189: 107077.
- [12] XIAO C Z, ZHU A P, LI J H, et al. Experimental study on seismic performance of embedded steel plate-HSC composite shear walls[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 34: 101909.
- [13] 罗如登,屈植锋,王正阳,等.大纵肋正交异性-PBL剪力键桥面板疲劳性能分析[J].铁道科学与工程学报,2020,17(11):2849-2856.
LUO Rudeng, QU Zhifeng, WANG Zhengyang, et al. Research on mechanical performance of a new type of large longitudinal rib orthotropic-PBL shear connectors composite bridge deck[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(11): 2849-2856.
- [14] 宋瑞年,王潇碧,占玉林,等.侧向压力作用下PBL剪力键的抗剪性能[J].铁道建筑,2019,59(12):34-37.
SONG Ruinian, WANG Xiaobi, ZHAN Yulin, et al. Shear performance of PBL shear connector under lateral pressure[J]. Railway Engineering, 2019, 59(12): 34-37.
- [15] XU H, ZHANG S, RONG B. Investigation on shear behavior of studs and PBL shear connectors in steel-concrete hybrid bridge girder[J]. Structures, 2022, 43: 1422-1435.
- [16] MO X D, ZENG W Q, LIAO J J, et al. Flexural behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular beams with PBL shear connectors[J]. Engineering Structures, 2022, 254: 113840.
- [17] GUO J H, DIAO Y. Experimental behaviors of square concrete filled steel tubular columns with PBL stiffeners[J]. Structures, 2022, 38: 1556-1569.
- [18] 朱伟庆,莫志鹏,刘永健. PBL加劲型方钢管混凝土外隔板式节点受拉性能试验研究[J].土木工程学报,2020,53(10):1-12,35.
ZHU Weiqing, MO Zhipeng, LIU Yongjian. Tensile performance of concrete filled square steel tube exterior-diaphragm connections stiffened with PBL[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(10): 1-12, 35.
- [19] 朱伟庆,邬昊怀,刘永健,等.受钢管被动约束PBL连接件受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(增1):402-410.
ZHU Weiqing, WU Haohuai, LIU Yongjian, et al. Experimental study on shear behavior of perfobond leiste connectors confined by steel tube passively[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(S1): 402-410.
- [20] 侯蓓蓓,刘永健,姜磊,等. PBL加劲型矩形钢管混凝土支管受拉节点有效分布宽度[J].建筑科学与工程学报,2017,34(6):116-126.
HOU Beibei, LIU Yongjian, JIANG Lei, et al. Effec-

- tive distribution width of tension joints in brace of rectangular concrete-filled steel tube stiffened with PBL[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(6): 116-126.
- [21] 高诣民,刘永健,姜磊,等. PBL加劲型矩形钢管混凝土桁架受弯性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 171-180.
- GAO Yimin, LIU Yongjian, JIANG Lei, et al. Experiment on flexural behaviour of rectangular concrete filled steel tubular truss stiffened with PBL[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 171-180.
- [22] 张宁,刘永健,李慧. PBL加劲型矩形钢管混凝土轴压柱局部屈曲性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(2): 95-102.
- ZHANG Ning, LIU Yongjian, LI Hui. Local buckling performance analysis of rectangular concrete-filled steel tubular axial compression column with PBL stiffeners[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(2): 95-102.
- [23] 陈海,郭子雄,刘阳,等. 斜板PBL剪力键受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 209-218.
- CHEN Hai, GUO Zixiong, LIU Yang, et al. Experimental study on shear capacity of inclined PBL shear connector[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 209-218.
- [24] 姜天华,王佳文,黄雯,等. Twin-PBL剪力键疲劳性能试验及有限元分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(11): 53-56.
- JIANG Tianhua, WANG Jiawen, HUANG Wen, et al. Fatigue performance test and finite element analysis for twin-PBL shear connectors[J]. Railway Engineering, 2018, 58(11): 53-56.
- [25] 司秀勇,刘丽芳,肖林. PBL剪力键的弹性静力解析解[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(6): 8-14.
- SI Xiuyong, LIU Lifang, XIAO Lin. Analytical solutions to elastic static force of PBL shear connectors[J]. China Railway Science, 2018, 39(6): 8-14.
- [26] 赵建波,王志浩,孙允达,等. PBL剪力键混凝土榫在特定破坏模式下的应力状态分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(10): 2612-2620.
- ZHAO Jianbo, WANG Zhihao, SUN Yunda, et al. Analysis of stress state of PBL shear connectors' concrete tenon in specific failure mode[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(10): 2612-2620.
- [27] 周阳,蒲黔辉,施洲,等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段剪力连接件群力学性能研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(10): 134-141.
- ZHOU Yang, PU Qianhui, SHI Zhou, et al. Study on mechanical behavior of group shear connectors for steel-concrete composite joint of hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(10): 134-141.
- [28] 组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Code for design of composite structures: JGJ 138—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [29] 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- Metallic materials — tensile testing — part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [30] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [31] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.