

钢边柱-双钢板混凝土剪力墙体系抗震设计及性能分析

雷云程¹, 段卫东¹, 伍云天^{1,2*}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 双钢板混凝土剪力墙是一种高效的抗侧力结构,但在受到地震荷载时容易发生破坏并且不易修复。为应对这一问题,将钢边柱耦合系统引入到双钢板剪力墙体系中,形成了钢边柱-双钢板剪力墙(SC-DSPCW)体系。该体系利用两侧的钢连梁进行能量耗散,以此来降低地震作用下双钢板剪力墙结构的损伤程度。采用基于能量平衡的性能化设计方法,以耦连比(C_R)和结构高度为变量设计了9个SC-DSPCW结构。通过模拟双钢板联肢剪力墙试验并进行对比,验证了基于ABAQUS建立有限元模型的可靠性。采用Pushover分析和地震时程分析方法,深入探讨了9个结构的屈服机制和抗震性能。结果表明,采用性能化设计方法设计的SC-DSPCW体系能够实现预期的性能目标,并表现出理想的屈服机制,即钢连梁大部分屈服后,剪力墙仍未发生倒塌;耦连比对结构响应有较强的影响,若耦连比过高,则不利于SC-DSPCW体系充分发挥其抗震性能。

关键词: 钢边柱-双钢板剪力墙; 性能化设计; 耦连比; Pushover分析; 非线性时程分析

中图分类号: TU398+.9; TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)10-0079-12

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240514001

Seismic Design and Performance Analysis of Steel Column-Double Steel Plate and Concrete Composite Wall System

LEI Yuncheng¹, DUAN Weidong¹, WU Yuntian^{1,2*}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

*Corresponding author: yuntianw@cqu.edu.cn

Abstract: Double steel plate and concrete composite walls are an efficient anti-lateral force structure, however, they are susceptible to damage under seismic loads and are difficult to repair. To address this issue, a steel edge column coupling system was introduced into the double steel plate shear wall system, resulting in the formation of the Steel Column-Double Steel Plate and Concrete Composite Wall (SC-DSPCW) system. This system utilizes steel link beams on both sides for energy dissipation, thereby reducing the extent of damage to the double steel plate shear wall structure under seismic action. Employing a performance-based design approach grounded in energy balance, nine SC-DSPCW structures were designed by varying the coupling ratio (C_R) and the structural height. By simulating

收稿日期: 2024-05-14

作者简介:

雷云程(1999—),男,硕士研究生,主要从事工程抗震方面的研究。E-mail: zgjzlyc@163.com。

段卫东(1998—),男,硕士研究生,主要从事工程抗震方面的研究。

通信作者:

伍云天(1979—),男,教授,博士,主要从事工程抗震方面的研究, E-mail: yuntianw@cqu.edu.cn。

experiments of double steel plate connected limb shear walls and comparing the results with experimental data, the credibility of the finite element model developed using ABAQUS was verified. Through Pushover analysis and seismic time-history analysis, an in-depth investigation of the yield mechanisms and seismic performance of nine structures was conducted. The results indicate that the SC-DSPCW system, engineered with a performance-based design approach, meets the expected performance targets and displays a favorable yielding behavior. Significantly, the shear walls do not collapse, even when a majority of the steel link beams have yielded. The coupling ratio has a strong impact on the structural response; a high coupling ratio is disadvantageous as it may prevent the SC-DSPCW system from fully exhibiting its seismic resistance capabilities.

Keywords: steel column-double steel plate and concrete composite wall; performance-based design; coupling ratio; Pushover analysis; nonlinear time-history analysis

双钢板剪力墙具有较高的抗侧向荷载性能和优异的耗能能力,许多学者对此开展了研究^[1-3]。GE等^[4]对网格管双钢板混凝土剪力墙进行了拟静力分析,研究结果表明其承载能力、变形能力、抗震性能和延性均优于钢筋混凝土剪力墙。XU等^[5]对具有钢桁架连梁的双钢板联肢剪力墙进行了研究,发现两片双钢板剪力墙通过连梁耦合在一起具有更大的抗震性能。赵宝成等^[6]对联肢双钢板剪力墙缩尺模型开展试验研究,结果表明钢连梁因失效而被更换后,结构的抗震性能并没有明显下降。

对于单片双钢板剪力墙来说,其破坏主要发生在墙肢底部,为避免这一影响,将钢边柱耦合体系引入到双钢板剪力墙中,形成钢边柱-双钢板剪力墙(Steel Column-Double Steel Plate and Concrete Composite Wall, SC-DSPCW)结构,已有研究表明该体系与联肢剪力墙具有类似的抗震性能^[7-8],但SC-DSPCW耦合体系的研究较为少见。在该体系中,双钢板混凝土剪力墙通过可更换的钢连梁与两旁钢柱连接,钢连梁与钢边柱铰接,与双钢板剪力墙刚接。钢连梁作为耗能构件,钢边柱只承担轴力和少量弯矩。可更换的钢连梁在强烈地震时首先屈服并耗散大部分地震能量,地震后可以很容易地更换,从而快速恢复结构的功能。并且,传统联肢剪力墙在进行拟静力分析或受到地震作用时,其墙肢会受到附加拉力和压力的反复作用,这将使结构更易发生破坏^[9]。与之相比,本文提出的SC-DSPCW体系就规避掉了这个缺点,反复作用的附加轴力作用在两旁的钢边柱上,双钢板墙则主要承受弯矩作用。

基于能量平衡的设计方法在框架结构^[10]、框架剪力墙结构^[11]和联肢剪力墙^[12-13]中已有多次运用。周巧玲等^[14]基于能量平衡设计方法对联肢PEC墙进行性能化设计,研究表明所设计的12个结构均满足预期耗能目标,具有良好的抗震性能,证明了该方法的可靠性。CHAN-ANAN等^[15]采用基于性能的塑性设计(PBPD)方法对具有不同高度和耦合比的联肢剪力墙进行设计,研究表明,PBPD是一种有效的联肢剪力墙体系设计方法,即便不涉及设计迭代,该方法也使结构实现了预期的

性能目标。

本文结合能量平衡设计方法介绍了SC-DSPCW结构的性能化设计方法,并依据该方法分别设计了三种高度和三种耦连比的结构算例。采用ABAQUS软件对设计的SC-DSPCW算例进行建模,并开展Pushover分析和非线性地震时程分析,验证了钢边柱-双钢板剪力墙性能化设计的有效性、SC-DSPCW结构的预期屈服机制和耦连比对SC-DSPCW结构抗震性能的影响,从而为钢边柱-双钢板剪力墙的抗震设计提供参考。

1 基于能量平衡的结构设计

1.1 SC-DSPCW 抗力机制

在开展设计之前,需理解钢边柱-双钢板剪力墙在侧向荷载作用下的抗力机制。在地震荷载作用下,SC-DSPCW体系所受到的总倾覆力矩由双钢板剪力墙抗倾覆力矩和两侧钢边柱拉压力形成的抗倾覆力矩共同承担,如图1所示。钢连梁与钢边柱之间采用铰接,仅传递剪力;钢连梁与双钢板剪力墙实行刚接形式,同时传递剪力和弯矩,如图2所示。与此同时,钢边柱主要承受轴力的作用。

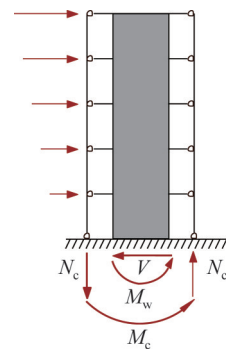


图1 SC-DSPCW 结构

Fig. 1 SC-DSPCW structure

SC-DSPCW体系的耦连比(Coupling Ratio, C_R)与联肢剪力墙类似,定义为两个钢边柱拉压力所形成的倾覆力矩(M_C)与体系所承担的总倾覆力矩($M_w + M_C$)之

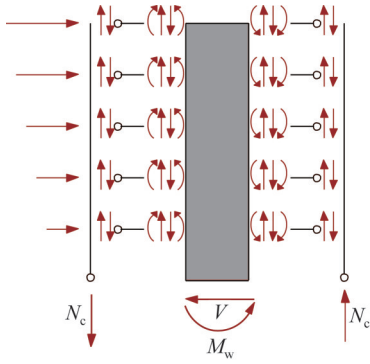


图2 SC-DSPCW 结构水平抗力机制

Fig. 2 Resistance mechanism of SC-DSPCW structure

比,如下式所示:

$$C_R = \frac{M_C}{M_W + M_C} \quad (1)$$

式中: M_W 为墙肢所承担的倾覆力矩; M_C 为钢边柱所承担的倾覆力矩,计算公式为

$$M_C = N_c L_{tot} = (l_w + 2l_b) \sum_{i=1}^n V_{link,i} \quad (2)$$

式中: N_c 为钢边柱轴力,其值等于各连梁剪力之和; L_{tot} 为两侧钢边柱距离,包括双钢板剪力墙截面宽度 l_w 和钢连梁长度 l_b ; $V_{link,i}$ 为第 i 层钢连梁剪力; n 为结构总层数。

1.2 性能目标与屈服模式

在进行设计之前,需要预先确定SC-DSPCW结构的性能目标和理想的屈服模式。本文在文献[7,16-17]的基础上,提出了该结构的屈服模式,即“先半数连梁耗能,后墙肢破坏”,如图3所示,同时参考相关文献[18-21]确定结构的性能目标。通过采用第1.5节所述的设计方法,确保钢连梁发生剪切破坏,而双钢板剪力墙则主要发生弯曲变形,墙肢底部发生弯曲破坏^[18,22-23]。性能目标和屈服模式具体如下:在设防地震作用下,SC-DSPCW体系首先通过半数连梁屈服耗散地震能量,结构最大层间位移角不超过1/200;在罕遇地震作用下,SC-DSPCW体系通过大部分连梁耗能,双钢板剪力墙肢底部进入塑性但结构未发生倒塌,结构最大层间位移角不超过1/80。

1.3 侧向力分布

CHAO等^[24]提出了结构塑性阶段的设计侧向力分布,即

$$F_i = \lambda_i V_y \quad (3)$$

$$\lambda_i = (\beta_i - \beta_{i+1}) \left(\frac{\sum_{j=1}^n (\omega_j h_j)}{\omega_n h_n} \right)^{0.75T^{-0.2}} \quad (4)$$

式中: F_i 为侧向荷载; λ_i 为侧向荷载分布系数; V_y 为设计基底剪力; β_i 和 β_{i+1} 分别是楼层 i 和 $(i+1)$ 的剪力分布系

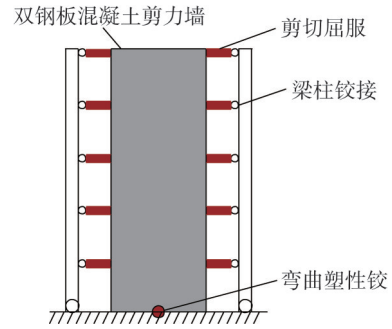


图3 理想屈服机制

Fig. 3 Ideal yield mechanism

数,其值可按式计算

$$\beta_i = V_i / V_n = \left(\sum_{j=i}^n (\omega_j h_j) / (\omega_n h_n) \right)^{0.75T^{-0.2}} \quad (5)$$

式中: V_i 为结构第 i 层层剪力; V_n 为顶层层剪力; ω_j 为结构第 j 层重量; h_j 为结构第 j 层离地面高度; T 为结构基本周期。

1.4 基底剪力计算

LEE^[25]和白久林等^[26]对能量平衡方程 $E_e + E_p = E_1$ 进行了改进,引入系数 γ 和 η 分别修正地震输入能和滞回耗能。

$$E_e + \eta E_p = \gamma E_1 \quad (6)$$

式中: E_e 和 E_p 分别为SC-DSPCW体系的弹性应变能和塑性耗能; E_1 为地震输入能; γ 为地震输入能修正系数,该系数取决于与结构周期相关的延性折减系数 R_μ 和延性系数 μ ,可按式计算

$$\gamma = \frac{2\mu - 1}{R_\mu^2} \quad (7)$$

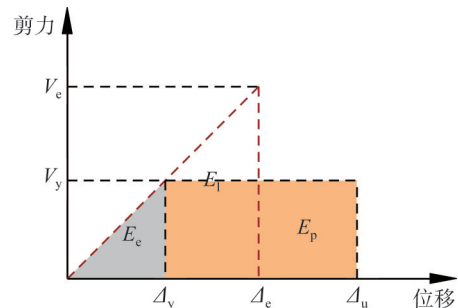


图4 能量平衡示意图

Fig. 4 Energy balance diagram

地震输入能计算如下,

$$E_1 = \frac{1}{2} \frac{W}{g} S_v^2 = \frac{1}{2} \frac{W}{g} \left(\frac{T}{2\pi} S_a g \right)^2 \quad (8)$$

式中: W 可取结构重力荷载代表值; T 为自振周期,可取结构前三阶的周期; g 为重力加速度; S_a 为谱加速度; S_v

是由加速度谱得到的速度谱。

钢边柱-双钢板剪力墙体系的弹性应变能 E_e 可基于 AKIYAMA 等^[27] 开展的研究计算, 计算公式如下

$$E_e = \frac{1}{2} \Delta_y V_y = \frac{1}{2} \frac{W}{g} \left(\frac{T}{2\pi} \cdot \frac{V_y}{W} g \right)^2 \quad (9)$$

式中: Δ_y 为结构的屈服位移。

塑性能量是由侧向荷载完成的外部功产生的, 钢边柱-双钢板剪力墙体系的塑性应变能 E_p 由如下公式计算:

$$E_p = \sum (F_i h_i \theta_p) = V_y \theta_p \sum (\lambda_i h_i) \quad (10)$$

式中: h_i 为第 i 层的高度; θ_p 为结构目标塑性位移角, 等于目标位移角减去屈服位移角, 即 $\theta_p = \theta_u - \theta_y$ 。

将公式(8)、(9)、(10)代入公式(6), 可得到体系的设计基底剪力:

$$\frac{V_y}{W} = \frac{-\delta + \sqrt{\delta^2 - 4\gamma S_a^2}}{2} \quad (11)$$

δ 计算如下:

$$\delta = \left(\frac{8\eta\theta_p\pi^2}{T^2g} \right) \sum_{i=1}^n \lambda_i h_i \quad (12)$$

确定基底剪力之后, 可以利用侧向力分布系数计算出结构各层的侧向力。鉴于结构在侧向变形分析中需考虑到由重力引起的二阶效应, 各层水平荷载需进行相应的修正, 修正后的侧向荷载表达式为:

$$F_i^D = \lambda_i V_y + w_i \theta_u \quad (13)$$

结构的总倾覆力矩为:

$$M_{otm} = \sum_{i=1}^n (F_i^D h_i) \quad (14)$$

1.5 结构构件设计

1.5.1 钢连梁设计

由 1.1 节可知, 连梁剪力实际上等于钢边柱的轴力。首先依据耦连比确定钢边柱所承担的倾覆力矩 M_c , 再将其除以两柱间的距离, 可以得到

$$\sum_{i=1}^n V_{link,i} = \frac{M_c}{L_{tot}} = \frac{C_R M_{otm}}{L_{tot}} \quad (15)$$

SC-DSPCW 结构与联肢剪力墙结构在结构高度方向上的连梁剪力分布并不均匀, 可引入剪力分配系数计算每层连梁的剪力, 连梁剪力按下式分配

$$V_{link,i}^D = \frac{\phi_i}{\sum_{i=1}^n \phi_i} \sum_{i=1}^n V_{link,i} \quad (16)$$

式中: ϕ_i 为剪力分配系数, 综合考虑安装便捷性和剪力分布不均匀性, 本文根据钢连梁在结构高度上的位置, 将其分为三个区域, 每一区域取连梁剪力的平均值。例如, 对于 12 层结构, 将其分为 1~4 层、5~8 层和 9~12 层三个区域, 每一区域的连梁剪力为四根连梁剪力的平

均值。

研究表明, 连梁剪切屈服耗能更好, 因此连梁长度的控制可以参考下式

$$l_b < 1.6 M_p / V_p \quad (17)$$

式中: l_b 为连梁净长度; M_p 为截面抗弯承载力; V_p 为截面抗剪承载力。

1.5.2 双钢板剪力墙肢设计

双钢板剪力墙在地震荷载下所承担的弯矩根据预设的耦连比进行分配, 其抗弯和抗剪承载力可按相关规范^[17] 进行设计, 在此不再赘述。设计双钢板剪力墙时, 应保证剪力墙发生弯曲破坏。

$$M_w = M_{otm} (1 - C_R) \quad (18)$$

1.5.3 钢边柱设计

钢连梁屈服剪力之和为钢边柱设计轴力, 考虑到钢边柱在受力过程中保持弹性状态, 需对其轴向荷载进行放大计算, 参考欧洲规范^[28], 采用 $1.1\gamma_{ov}$ 作为放大系数, γ_{ov} 可取 1.25。

$$N_c^D = 1.1\gamma_{ov} \sum_{i=1}^n V_{link,i} \quad (19)$$

1.6 性能化设计流程

图 5 展示了 SC-DSPCW 体系性能化设计流程。

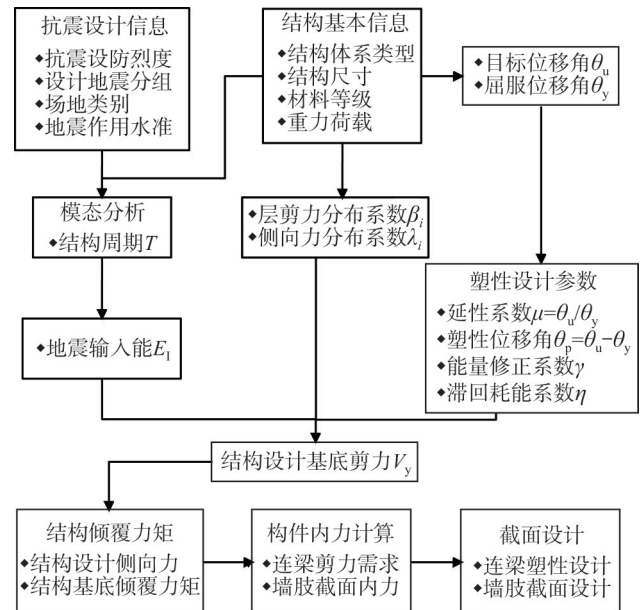


图 5 SC-DSPCW 体系性能化设计流程

Fig. 5 Performance-based design flow of SC-DSPCW system

1.7 设计算例

本文采用所提出的性能化设计方法设计了 9 个 SC-

DSPCW 结构,总层数分别为9层、12层和15层,相同层数的结构 C_R 分别取40%、50%和60%。SC-DSPCW 结构的层高均为3m。结构设计基本信息主要为:对于9层的结构,每层重力荷载代表值为1200kN,墙厚200mm;对于12层的结构,每层重力荷载代表值为1100kN,墙厚220mm;对于15层的结构,每层重力荷载代表值为1000kN,墙厚250mm。结构抗震设计信息见表1。钢板和钢连梁采用Q345钢,混凝土采用C40。9个SC-DSPCW 模型根据结构的高度和和耦连比来进行命名,如耦连比为40%的12层结构命名为SCS-12-40,其余模型以此类推。图6为SC-DSPCW 结构原型布置图,图7为SC-DSPCW 结构算例立面布置图,图8为SC-DSPCW 体系的平面图。钢边柱采用空心矩形截面,以更高效地利用钢材性能。双钢板剪力墙则采用带约束拉杆和方钢管的组合形式,从而增强其整体和局部的稳定性。钢连梁为主要耗能构件,限于篇幅,本文仅列出SCS-12-40、SCS-12-50和SCS-12-60模型的钢连梁参数,如表2所示。

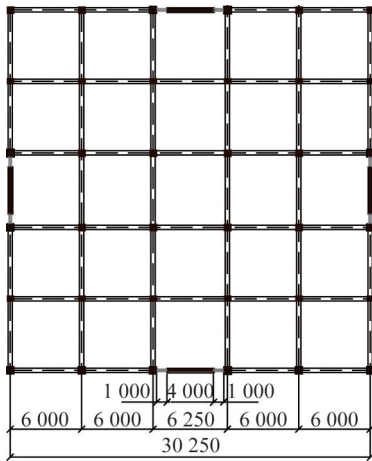


图6 结构原型布置图(单位:mm)

Fig. 6 Layout of structural prototype (unit:mm)

2 模型验证与对比

2.1 数值建模

采用ABAQUS软件对钢边柱-双钢板剪力墙结构进行有限元分析。混凝土材料强度为C40,采用C3D8R单元模拟,并使用塑性损伤模型(CDP)来考虑材料损伤。采用约束混凝土本构模型来模拟端柱中约束混凝土,其受压和受拉本构关系可以分别表示为式(20)和式(21),该式所涉及的参数可以参考韩林海^[29]的研究成果进行确定。双钢板内部则采用非约束混凝土,参照相关规范^[30]考虑其应力-应变关系。混凝土其余参数如弹性模量、泊松比和黏滞系数分别取32500MPa、0.2和0.001。混凝土本构模型如图9所示。

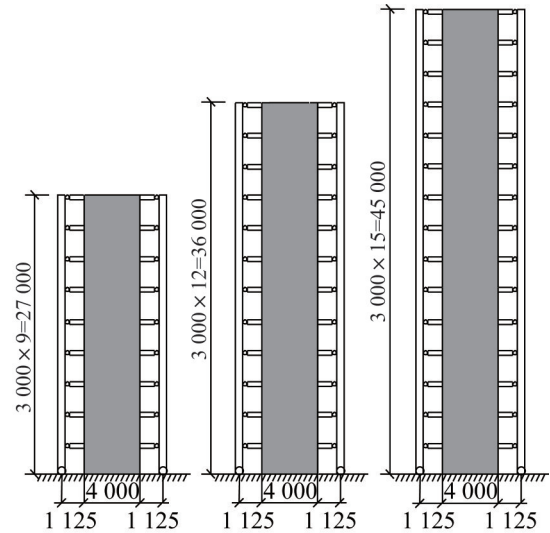


图7 算例立面图(单位:mm)

Fig. 7 Elevation diagram of models (unit:mm)

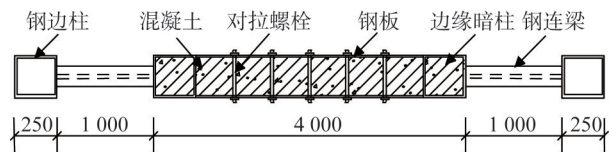


图8 SC-DSPCW 体系截面图(单位:mm)

Fig. 8 Cross-section of SC-DSPCW system (unit:mm)

表1 抗震设计信息

Table 1 Seismic design information

抗震设防类别	设防烈度	地震分组	场地类别	特征周期
丙类	8度(0.2g)	第三组	II类	0.45s

表2 算例SCS-12系列工字形连梁尺寸

Table 2 Dimensions of I-section link beams of

SCS-12 series models

mm

结构名称	层数	$H \times B \times t_w \times t_f$
SCS-12-40	一至四层	180×120×6×30
	五至八层	150×120×5.5×30
	九至十二层	120×120×5×30
SCS-12-50	一至四层	180×120×7×30
	五至八层	150×120×7×30
	九至十二层	130×120×6×30
SCS-12-60	一至四层	190×120×8×30
	五至八层	160×120×7.5×30
	九至十二层	140×120×6×30

$$\sigma_c = \begin{cases} \sigma_0 \left[2(\epsilon/\epsilon_0) - (\epsilon/\epsilon_0)^2 \right] & \epsilon \leq \epsilon_0 \\ \sigma_0 (\epsilon/\epsilon_0) \frac{1}{\beta (\epsilon/\epsilon_0 - 1)^\eta + \epsilon/\epsilon_0} & \epsilon \geq \epsilon_0 \end{cases} \quad (20)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_p \left[1.2(\epsilon/\epsilon_p) - 0.2(\epsilon/\epsilon_p)^6 \right] & \epsilon \leq \epsilon_p \\ \sigma_p \frac{(\epsilon/\epsilon_p)}{0.31\sigma_p^2 (\epsilon/\epsilon_p - 1)^{1.7} + \epsilon/\epsilon_p} & \epsilon \geq \epsilon_p \end{cases} \quad (21)$$

钢构件采用S4R壳单元模拟。钢材本构采用三折线模型,如图10所示,钢材屈服强度为345 MPa,弹性模量为 2.06×10^5 MPa, ϵ_y 为计算得到的屈服应变,硬化系数则取0.01。

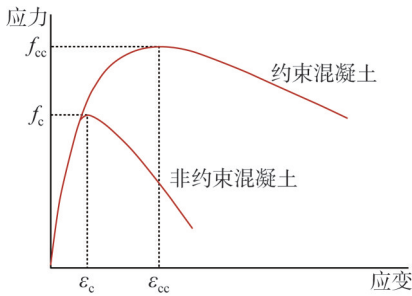


图9 混凝土本构模型

Fig. 9 Constitutive models of concrete

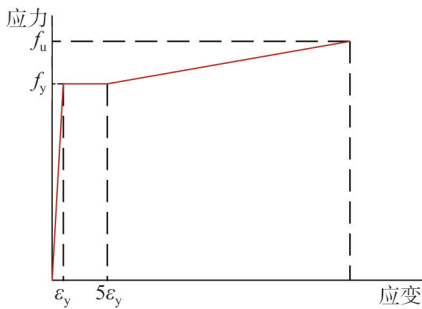


图10 钢材本构模型

Fig. 10 Constitutive model of steel

通过设置面面接触来模拟钢板内表面与内部混凝土表面切向和法向的相互作用,采用摩擦系数为0.6的罚函数来模拟切向相互作用,而在法向上采用硬接触,以限制钢板和混凝土在法向的穿透。连梁和钢板剪力墙通过Tie命令进行绑定以模拟焊接,使两者紧密连接在一起,钢连梁和钢边柱铰接,采用MPC约束进行模拟,如图11所示。对拉螺栓采用简化设置,采用Embedded region命令,直接将其嵌入到整个结构模型中。

SC-DSPCW模型的整体尺寸较大,为了平衡计算精度与效率,网格划分如下:双钢板剪力墙采用200 mm的网格尺寸,并在厚度方向上划分为两层;钢边柱的网格尺寸为100 mm;连梁和暗柱则采用更精细的50 mm网格尺寸。

钢边柱与地面铰接,需使其具有绕平面外轴的转动自由度。双钢板剪力墙则固定在地面上,采用完全固定约束。为防止结构发生平面外失稳,需要在各层楼面处对平面外的位移进行限制。在推覆分析中,采用Riks分析步在SC-DSPCW各层施加侧向力。在进行地震时程分析时,采用动力隐式分析,并在边界条件里选择加速度类型。

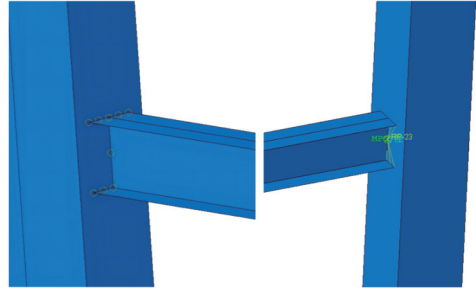


图11 构件间的相互作用

Fig. 11 Interaction of components

2.2 模型验证

本文并未开展SC-DSPCW体系的试验研究,因此本文根据文献[31]中的双钢板剪力墙试验研究结果,采用ABAQUS进行模拟分析和数据对比,以验证建模方法的准确性。该试验通过对带有T形翼缘的双钢板联肢剪力墙进行拟静力分析,以研究其抗震性能。钢材性能指标按照文中设置,其弹性模量、屈服强度和极限强度分别设置为 2.06×10^5 MPa、372 MPa和453 MPa。试验模型和加载制度如图12所示。

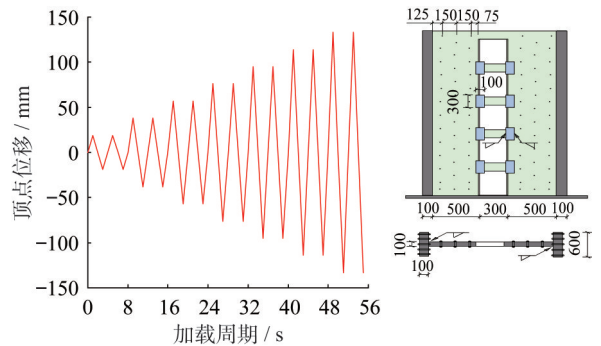


图12 加载制度

Fig. 12 Loading system

图13为结构模拟滞回曲线和试验滞回曲线的对比,由图可知,试验模型的结果与ABAQUS模型模拟的结果吻合较好,但模拟的峰值承载力比试验结果略低。图14展现了有限元模型与试验结构破坏情况的对比。在往复加载的过程中,有限元模型中的T形翼缘在试验试件屈曲的相应位置表现出了较高的应力水平,破坏位置一致。

总体上,通过有限元模型与试验模型结果的对比验证了建模方法的有效性。因此,所有后续仿真都将基于这种有限元建模方法。

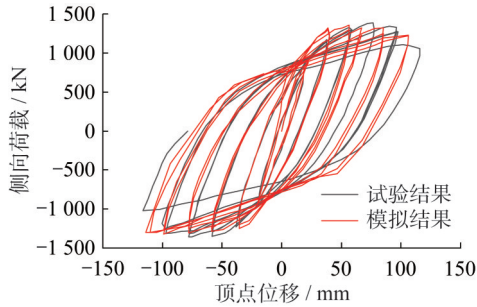


图13 滞回曲线的对比

Fig. 13 Comparison of hysteretic curves

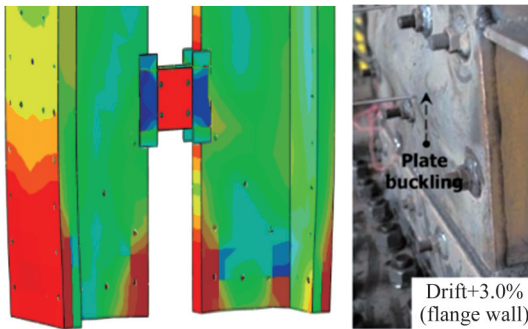


图14 破坏情况对比

Fig. 14 Comparison of failure mode

3 Pushover分析

在推覆分析中,侧向力采用1.3节提出的分布模式。由于采用Riks分析步,可以按照侧向力分布系数比例施加侧向力,本文给出12层结构算例的侧向力分布比例,如图15所示。

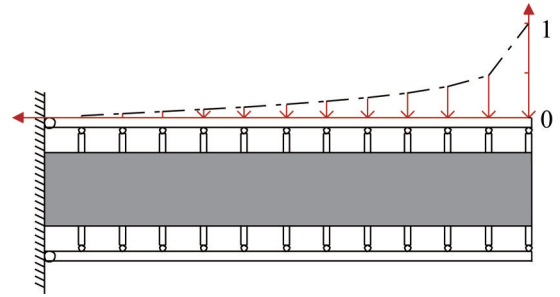


图15 侧向力分布图

Fig. 15 Lateral force distribution diagram

3.1 推覆曲线特征

采用考虑塑性的侧向力分布模式,对9个模型进行Pushover加载,得到的推覆曲线如图16所示。在图中,“□”表示钢连梁初次屈服,“○”表示所有钢连梁屈服,“△”表示双钢板剪力墙底部钢板达到屈服应力,即钢材应力达到345 MPa时,可以认为该构件已经发生屈服。“◇”则表示剪力墙底部混凝土破坏,当混凝土塑性应变达到0.003 3时,可认为混凝土达到破坏状态。整体来看,对于所分析的9个结构,所得到的推覆曲线表现出相同趋势。当钢连梁发生首次屈服时,结构逐步进入塑性状态,这时结构刚度开始减小。可以看出,增大耦连比在一定程度上改善了SC-DSPCW体系的抗震性能,尤其是在提高承载力和刚度方面,但可能对其他的抗震性能指标产生不利影响,例如可能导致延性降低和耗能减少。半数钢连梁屈服总是先于墙肢屈服发生,这一现象满足了双重抗震机制。综合分析发现,钢连梁屈服与墙肢底部钢板屈服时的最大层间位移角表现出相反的变化趋势,即耦连比过大时,墙肢的屈服提前而连梁的屈服延后。这表明,具有较高耦连比的结构在全部钢连梁通过剪切塑性变形耗能前,双钢板剪力墙可能会受到损坏,其延性也会降低。

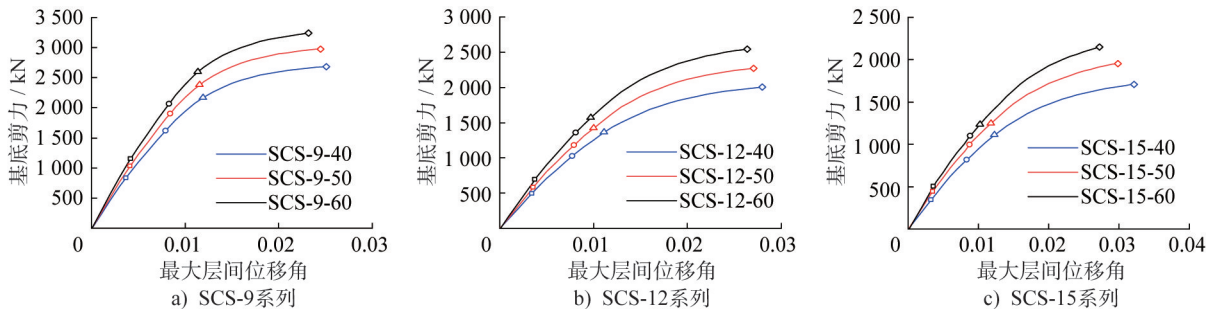


图16 SC-DSPCW算例推覆曲线

Fig. 16 Pushover curves of SC-DSPCW models

3.2 屈服机制

对钢连梁半数屈服和钢板屈服时的最大层间位移角进行统计分析,以此评估SC-DSPCW结构是否为理想破坏模式,如图17所示。由图可知,钢连梁半数屈服时,

结构最大层间位移角介于0.004 2~0.004 8之间,均未超过1/200。随着耦连比增加,观察到结构钢连梁在半数达到屈服状态时相应的最大层间位移角呈递增趋势,主要原因可能是耦连比增大时,钢边柱承担了更大的倾覆力矩,

导致设计钢连梁截面增大,屈服时需要更高的剪力。这种情况表明,双钢板剪力墙和钢边柱构件之间的耦合情况对SC-DSPCW结构的抗震性能有较大影响。随着推覆分析进一步进行,在墙肢底部钢板屈服时,最大层间位移角均超过1/200,但均小于1/80。在低耦连比下,SC-DSPCW结构的最大层间位移角几乎达到了1.2节所预设的性能目标。然而,在钢板开始屈服时, C_R 的增加导致结构的最大层间位移角与1/80的性能目标之间的偏差逐渐扩大,表明在高耦连比情况下结构未能达到性能预期。例如, $C_R=60\%$ 的结构最大层间位移角较 $C_R=40\%$ 的结构最大层间位移角更小。因此,在SC-DSPCW体系的设计中应注意采用适宜的耦连比。从以上分析可以看出,SC-DSPCW体系满足“先半数连梁耗能,后墙肢屈服”的屈服机制,且层间位移角指标满足性能目标。

3.3 连梁剪力分布

以选取的三个结构算例为例,在推覆分析时,将各层钢连梁剪力除以顶层钢连梁剪力进行归一化,得到钢连梁的归一化后相对剪力分布如图18所示。钢连梁首次屈服时,连梁剪力沿结构高度呈先增后减的趋势,且最大值通常出现在结构中上部区域,表明该类结构剪力分布存在不均匀性,这种现象与传统联肢剪力墙结构中所观察到的相对剪力分布特征具有一致性。同时,可以观察到,底部楼层的连梁剪力显著低于上部楼层的连梁剪力,据此可以推断中部钢连梁先屈服,其次是最上部钢连梁,最后是底部楼层的钢连梁屈服。全部钢连梁屈服之后,剪力沿结构的三个不同高度区域基本趋于均匀化分布,这主要归因于钢连梁首次屈服之后,结构对剪力进行了重新分配。在三种不同高度的结构中,底部楼层的钢连

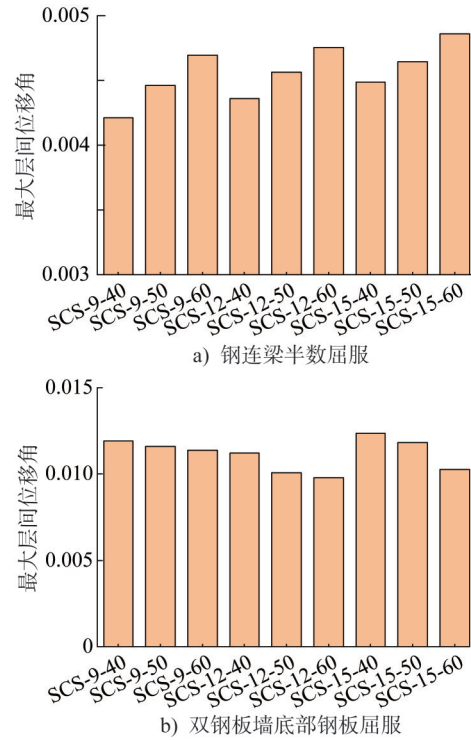


图17 不同算例的最大层间位移角

Fig. 17 Maximum inter-story drift of different models

梁剪力略微低于预期设计值,因此,在设计过程中底层连梁的剪力分配可以适当减小。对于SCS-9-60算例,结构下部6层的钢连梁剪力比设计值略小,最顶端3层的钢连梁剪力比设计值略大,整体呈现向中部集中的趋势。这表明,对于低层结构,钢连梁在高度方向上的剪力分配倾向于均匀分布。综上,所采用的剪力分配模式可以较为合理地对SC-DSPCW体系的钢连梁进行设计。

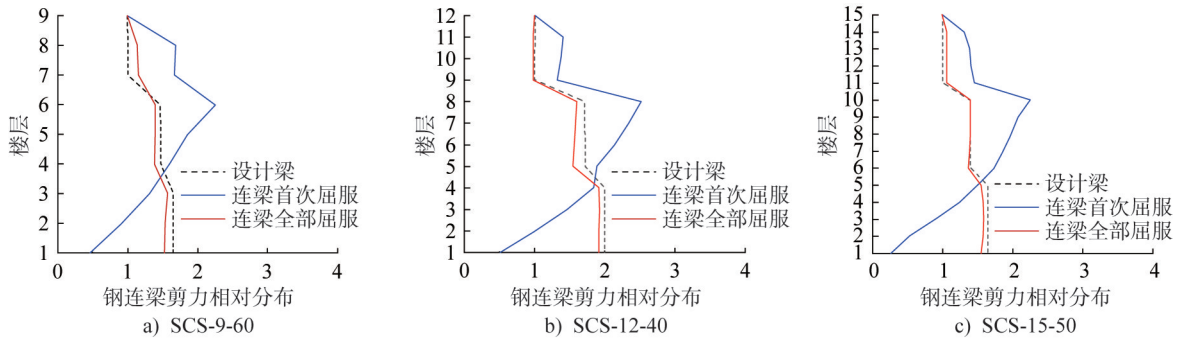


图18 钢连梁相对剪力

Fig. 18 Relative shear force of steel link beams

4 非线性动力时程分析

4.1 地震波选取

选取7条地震记录进行非线性地震时程分析,其中包含5条天然地震波和2条人工波,并根据《建筑抗震设

计规范》(GB 50011—2010)^[20]的建议对加速度峰值进行调幅。表3列出了地震波的基本信息。

4.2 层间剪力分布规律

在设防地震作用下,将9个算例各楼层最大层间剪

表3 地震波基本信息

Table 3 Information of seismic waves

地震波编号	震级	PGA/g	持时/s
NZD00224	6.7	-0.342	85.00
MEX00010	8.1	1.209	62.73
USA02087	4.9	-0.377	14.15
USA00855	6.5	0.322	74.13
JAP00076	7.8	-2.215	89.98
人工波1	-	0.400	40.00
人工波2	-	0.400	40.00

力除以顶层最大层间剪力进行归一化,得到各模型归一化后的层剪力分布如图19所示。由图可知,对于9层、12层和15层结构,结构上部1/3区域楼层所受的层剪力与设计结果基本一致,结构中下部楼层的层剪力明显低于设计值,而底部楼层的层剪力则又超过了设计值。并且,随着 C_R 的增大,设计曲线与实际曲线的交点也向更高层移动。以12层结构为例,当 $C_R=40\%$ 时,底部两层的层

剪力超过了设计值;而 C_R 增至60%时,层剪力超出设计值的楼层范围扩增至四层。整体而言,耦连比的提高导致实际层剪力分布趋近设计层剪力分布,但对于结构底部1层来说,实际层剪力与设计值之间的偏差不降反增。例如,SCS-15-40算例结构的1层层剪力与设计层剪力差值为0.15,SCS-15-50算例结构的1层层剪力与设计层剪力差值升至0.33,而SCS-15-60算例结构的1层层剪力与设计层剪力差值进一步上升至0.54。其主要原因在于,SC-DSPCW结构层剪力分布在耦连比较低时可能受高阶模态的影响,导致其偏向高阶分布;而耦连比增大时,层剪力分布则偏向一阶模态,更加符合设计分布的同时会导致下部层剪力的增大。SC-DSPCW结构在设计时已遵循“强剪弱弯”原则,因此即使下部层剪力增大,结构仍具备足够的抗剪承载力。以上分析结果证明了CHAO等^[24]提出的侧向力分布模式的有效性和准确性,但高估了SC-DSPCW结构的设计倾覆力矩,这种高估实际上能够进一步提高SC-DSPCW结构的安全富余度。

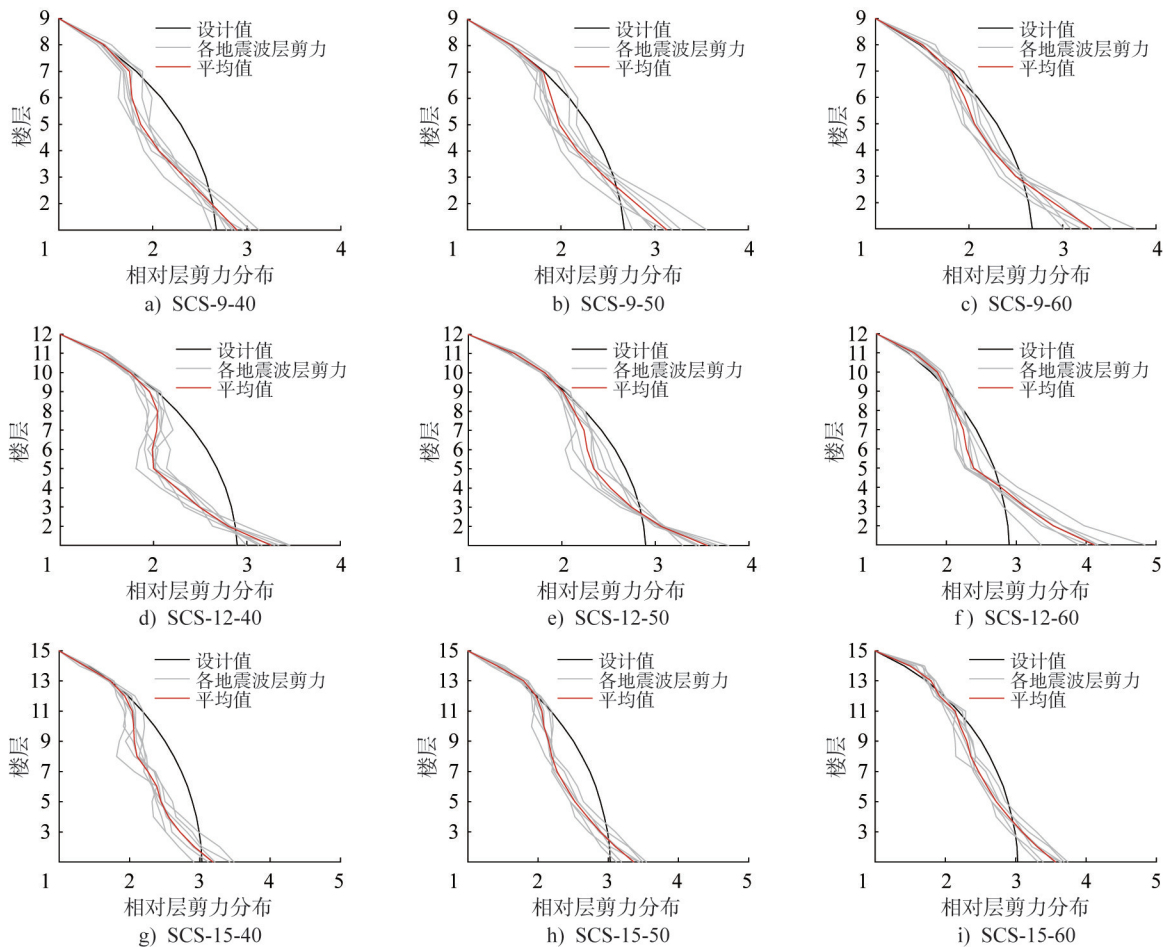


图19 各模型归一化层剪力分布模式

Fig. 19 Normalized shear force distribution patterns of all models

4.3 整体屈服机制

为进一步评估SC-DSPCW体系在地震作用下的性能,重点分析该体系在设防地震和罕遇地震作用下钢连梁的屈服情况,分析结果如图20所示。图20a)~图20c)和图20d)~图20f)分别为9层结构在设防地震和罕遇地震下的破坏情况,图20g)~图20l)为12层和

15层结构在设防地震作用下的破坏情况。设防地震下,钢连梁屈服现象主要发生在结构上部区域。在罕遇地震下,绝大多数钢连梁基本达到屈服状态,并且双钢板剪力墙墙肢底部也发生了破坏。然而,由于地震动的随机特性,极少数钢连梁在罕遇地震作用下仍保持未屈服状态。

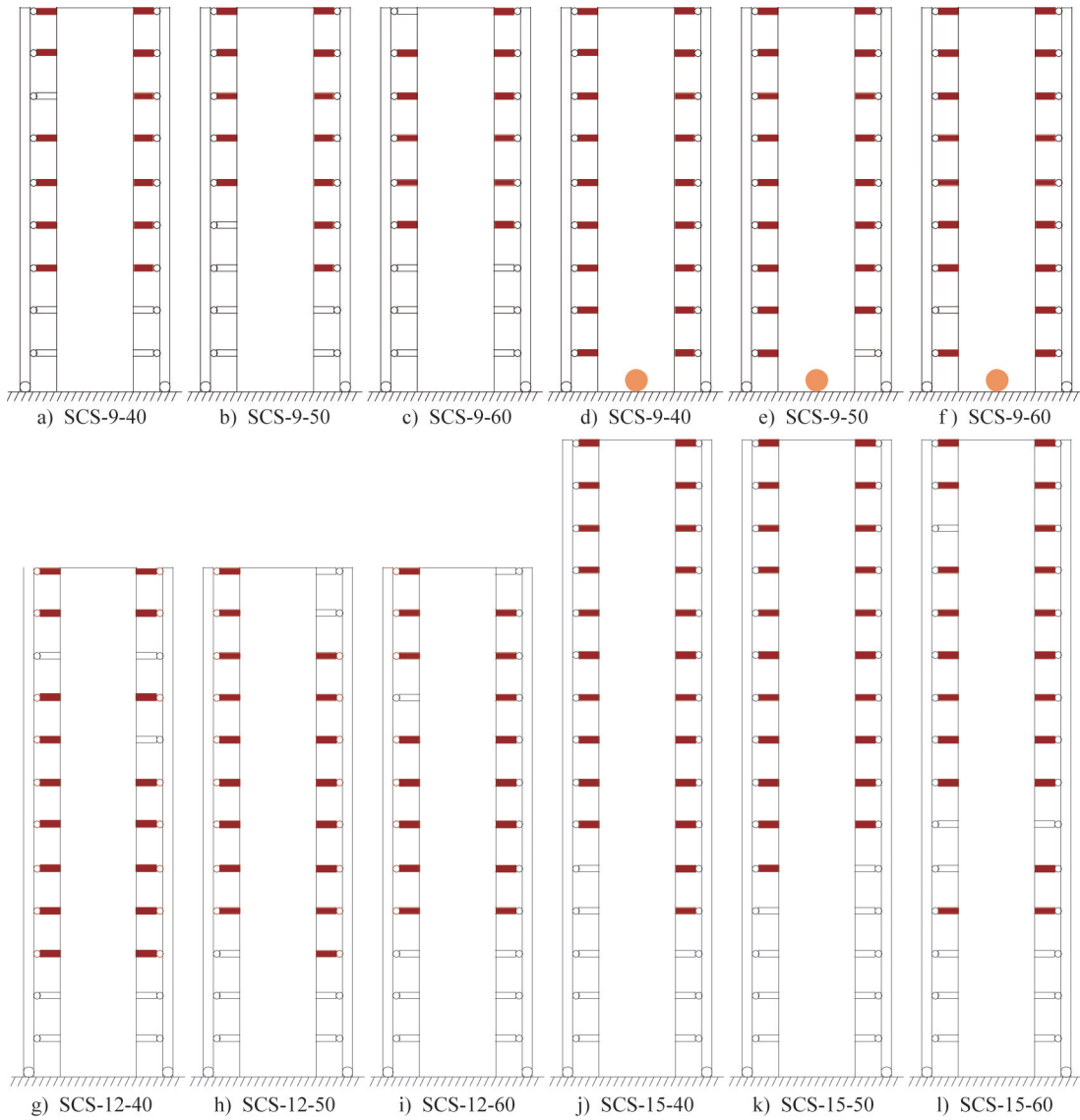


图20 结构连梁、墙肢屈服情况

Fig. 20 Yield status of structural link beams and wall limbs

4.4 钢连梁屈服率

钢连梁屈服率定义如下:已屈服钢连梁占全部钢连梁的比例。图21为设防地震和罕遇地震两种情况下钢连梁的屈服率。由图可知,在不同地震波的影响下,钢连梁的屈服率也随之发生变化,这表明地震的复杂动力效应使动力时程分析存在一定的不确定性。虽然地震波的随机性对分析结果有所影响,但钢连梁的屈服率始终保

持在50%以上,这一现象与“先连梁屈服,再墙肢破坏”的抗震机制相符合。在设防地震作用下,具有相同耦连比但高度不同的SC-DSPCW结构钢连梁屈服率表现出的差异较小。然而,对于高度相同的结构,随着耦连比的增加,钢连梁屈服率呈现降低的趋势。在罕遇地震作用下,大多数钢连梁都发生屈服。

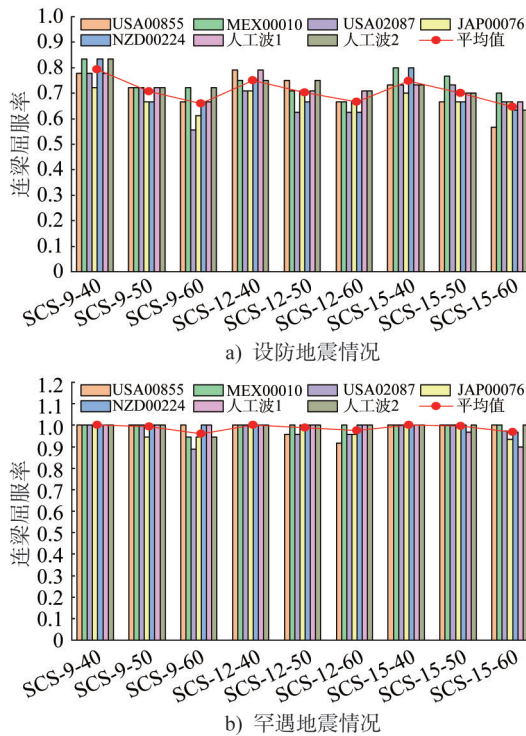


图 21 钢连梁屈服率

Fig. 21 Yield rates of steel link beams

5 结论

本文基于改进的能量平衡设计方法,提出了钢边柱-双钢板剪力墙体系的设计流程,并采用ABAQUS软件对该结构进行了Pushover分析和地震时程分析,得到的主要结论如下:

(1) 将钢边柱耦合体系引入双钢板剪力墙,提出了钢边柱-双钢板剪力墙体系,并基于能量平衡性能化设计方法,对该体系9层、12层和15层结构进行了设计,所设计的结构能够实现预期的性能目标,并且符合理想的屈服模式。

(2) 增大耦连比时,可以提升SC-DSPCW体系的抗震性能,但耦连比过大时,需要注意双钢板剪力墙先于钢连梁发生破坏的可能性。钢连梁发生屈服后,钢连梁剪力沿结构高度重新分布,并最终达到设计值,表明了所采用的钢连梁剪力分配方法的可靠性。

(3) 钢连梁在结构中上部先发生破坏,在罕遇地震下,大多数钢连梁均发生屈服。在设防地震作用下,耦连比的增加导致钢连梁屈服率下降。地震分析时的实际层剪力基本符合设计预期,但高估了设计倾覆力矩,提高了SC-DSPCW体系的安全富余度。

参考文献:

[1] 周志轩,刘健.巨型钢框架-双钢板组合剪力墙住宅体系力学性能探究[J].建筑钢结构进展,2024,26(2):90-103.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.02.010.

ZHOU Zhixuan, LIU Jian. Research on the mechanical properties of mega steel frame-double skin composite shear wall residential system [J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(2): 90-103. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.02.010. (in Chinese)

- [2] SENTHILKUMAR R, KARUNAKARAN P, CHANDRU U. Progress and challenges in double skin steel-concrete composite walls: A review [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2022, 8(1): 32. DOI: 10.1007/s41062-022-00973-y.
- [3] 姜宝龙,李英民,唐洋洋,等.带T形加劲肋双钢板组合剪力墙数值模拟研究[J].建筑钢结构进展,2021,23(3):34-41. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.03.004.
- JIANG Baolong, LI Yingmin, TANG Yangyang, et al. A numerical study on concrete filled double steel plate composite shear walls with T-shaped stiffeners [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(3): 34-41. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.03.004. (in Chinese)
- [4] GE W J, ZHANG Z W, XU W P, et al. Seismic response of grid tubular-double steel plate concrete composite shear walls and combined system subjected to low reversed cyclic loading [J]. Engineering Structures, 2022, 256: 114028. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114028.
- [5] XU D, CUI Y, YAN J B, et al. Cyclic test evaluation of double skin composite hybrid coupled wall with frictional steel truss coupling beams [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 79: 107832. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.107832.
- [6] 赵宝成,刘军,顾强,等.可替换连梁连接的双钢板混凝土联肢组合剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(7):10-18.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.07.002.
- ZHAO Baocheng, LIU Jun, GU Qiang, et al. Experimental research on seismic behavior of double steel plate-concrete coupled composite shear walls with replaceable steel link [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(7): 10-18. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.07.002. (in Chinese)
- [7] ZONA A, DEGÈE H, LEONI G, et al. Ductile design of innovative steel and concrete hybrid coupled walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 117: 204-213. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.10.017.
- [8] SALAMEH M, SHAYANFAR M, BARKHORDARI M A. Estimation and development of innovative hybrid coupled shear wall system using nonlinear dynamic and fragility analysis [J]. Structures, 2020, 26: 703-723. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.04.031.
- [9] 陈永盛,刘韬,张令心.塑性阶段联肢墙墙肢基底内力变化规律及其简化计算方法[J].地震工程与工程振动,2021,41(6):19-32.DOI:10.13197/j.eeev.2021.06.19.chenys.003.
- CHEN Yongsheng, LIU Tao, ZHANG Lingxin. Variation and simplified calculation of base forces in wall piers for coupled walls during plastic stage [J]. Earthquake Engineering

- and Engineering Dynamics, 2021, 41 (6) : 19-32. DOI: 10.13197/j.eeev.2021.06.19.chenys.003. (in Chinese)
- [10] 张海东, 顾强. 远场地震下人字形中心支撑钢框架基于能量的性态设计方法[J]. 建筑钢结构进展, 2017, 19(3) : 9-18. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2017.03.002.
ZHANG Haidong, GU Qiang. Energy-based seismic design method of chevron concentrically braced steel frame under far-field earthquake[J]. Progress in Steel Building Structures, 2017, 19(3) : 9-18. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2017.03.002. (in Chinese)
- [11] VALIZADEH H, GHOLHAKI M. Determination of response modification coefficient of SPSW in RC frame using plastic design method [J]. Australian Journal of Structural Engineering, 2025, 26 (2) : 161-174. DOI: 10.1080/13287982.2024.2323855.
- [12] 张军, 伍云天, 杨永斌, 等. 联肢钢板-混凝土组合剪力墙性能化设计方法及静力弹塑性分析[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(3) : 12-22, 53. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.03.002.
ZHANG Jun, WU Yuntian, YANG Yeongbin, et al. Performance-based design method and pushover analysis on steel plate and concrete composite coupled shear walls [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(3) : 12-22, 53. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.03.002. (in Chinese)
- [13] SAFARI GORJI M, ROGER CHENG J J. Plastic analysis and performance-based design of coupled steel plate shear walls [J]. Engineering Structures, 2018, 166: 472-484. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.048.
- [14] 周巧玲, 赵仕兴, 苏明周, 等. 混合联肢PEC墙结构基于合理失效模式的性能化设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(7) : 266-277, 289. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.07.028.
ZHOU Qiaoling, ZHAO Shixing, SU Mingzhou, et al. Performance-based design method for hybrid coupled PEC wall structure based on reasonable failure modes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(7) : 266-277, 289. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.07.028. (in Chinese)
- [15] CHAN-ANAN W, LEELATAVIWAT S, GOEL S C. Performance-based plastic design method for tall hybrid coupled walls [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2016, 25(14) : 681-699. DOI: 10.1002/tal.1278.
- [16] MA Z B, WU Y T, WANG X, et al. Seismic behavior of steel plate and reinforced concrete composite wall coupled to steel side columns [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 65: 105820. DOI: 10.1016/j.job.2022.105820.
- [17] DAS R, ZONA A, VANDOREN B, et al. Optimizing the coupling ratio of seismic resistant HCW systems with shear links [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 147: 393-407. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.04.026.
- [18] CHEN L, MAHMOUD H, TONG S M, et al. Seismic behavior of double steel plate-HSC composite walls [J]. Engineering Structures, 2015, 102: 1-12. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.017.
- [19] 赵宝成, 柳骏飞, 顾强, 等. 双钢板内填混凝土短肢组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1) : 28-36. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.01.004.
ZHAO Baocheng, LIU Junfei, GU Qiang, et al. Experimental investigation on seismic behavior of short-limb composite shear wall with double steel plates and infill concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1) : 28-36. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.01.004. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢板剪力墙技术规程: JGJ/T 380—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Steel Plate Shear Walls: JGJ/T 380—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [22] ZONA A, TASSOTTI L, LEONI G, et al. Nonlinear seismic response analysis of an innovative steel-and-concrete hybrid coupled wall system [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(7) : 04018082. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541x.0002080.
- [23] 冯榆晟. 双边柱混合剪力墙抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
FENG Yusheng. Test study on seismic behavior of double side-column hybrid coupled wall [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [24] CHAO S H, GOEL S C, LEE S S. A seismic design lateral force distribution based on inelastic state of structures [J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(3) : 547-569. DOI: 10.1193/1.2753549.
- [25] LEE S S. Performance-based design of steel moment frames using target drift and yield mechanism [D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2002.
- [26] 白久林, 欧进萍. 基于能量平衡的钢筋混凝土框架结构抗震塑性设计方法[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10) : 22-31. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.10.004.
BAI Jiulin, OU Jinping. Seismic plastic design of RC frame structure based on energy balance [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10) : 22-31. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.10.004. (in Chinese)
- [27] AKIYAMA H. Earthquake-resistant limit-state design for buildings[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1985.