

文章编号:1673-2049(2014)01-0130-08

带竖缝钢板剪力墙-框架体系抗侧构件 要素特性配置

耿 帅¹, 陈以一^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:探讨了带竖缝钢板剪力墙(SPSWS)-框架体系中要素特性配置原则,建立了二重抗侧结构体系的概念模型,得到了体系的力-变形特征曲线,研究了构件要素特性配置的基本关系;建立了包含用杆件简化的 SPSWS 构件和钢框架的有限元模型,并对概念模型进行了检验。结果表明:概念模型所做的假定成立,SPSWS-钢框架体系中构件要素特性配置关系可以由体系的延性和承载力要求得出。

关键词:带竖缝钢板剪力墙;钢框架;概念模型;抗侧构件;要素特性配置;抗震设计

中图分类号:TU392.4 **文献标志码:**A

Configuration of Lateral Force-resistance Component Properties in Steel Plate Shear Wall with Slits-frame Structures

GENG Shuai¹, CHEN Yi-yi^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The principles of the configuration of component properties in steel plate shear wall with slits (SPSWS)-frame structures were discussed, conceptual model of structures with two earthquake-resistance systems was established, force-deformation characteristic curves of the system were obtained, and the basic relations of configuration of component properties were studied. The finite element models composed of wire-simplified (SPSWS) components and steel frames were designed to verify the conceptual models using nonlinear monotonic calculation. The results show that the conceptual model is reasonable, and the configuration of component properties in SPSWS-steel frame systems can be derived considering the requirement of ductility and bearing capacity.

Key words: steel plate shear wall with slits; steel frame; conceptual model; lateral force-resistance component; configuration of component property; seismic design

0 引言

钢板剪力墙结构是 20 世纪 70 年代发展起来的新型抗侧结构体系。现有的研究表明,该体系具有

较大的弹性刚度、较好的变形能力和滞回性能,是一种高效的抗侧结构体系。

带竖缝钢板剪力墙(Steel Plate Shear Wall with Slits, SPSWS)是最近几年逐渐开始应用于结

收稿日期:2013-10-09

基金项目:国际钢铁协会 Living Steel 项目(D07EBEJ200)

作者简介:耿 帅(1988-),男,山东招远人,工学硕士研究生,E-mail:shuai21a@hotmail.com。

构抗震体系的钢板剪力墙的一种,具有良好的耗能性能,且具有刚度、强度参数相对独立,可以分别设计的优点。各国学者已经对 SPSWS 构件进行了大量的理论分析和试验研究^[1-16],他们集中于对 SPSWS 构件关键参数(抗侧刚度和承载力等)的推导和验证以及对其稳定性、滞回性能和简化模型的研究,但是对于如何合理配置结构体系中 SPSWS 和框架结构的抗侧刚度和屈服承载力等参数还缺少深入研究和指导原则。

本文中笔者首先探讨结构要素特性配置的一般原则,从概念模型入手,考虑以上原则的应用方法,主要从延性角度研究了 SPSWS-钢框架结构在抗震设计中性能参数的合理配置,并利用 ABAQUS 对概念模型进行了验证。

1 结构要素特性的配置原则

带竖缝钢板剪力墙-框架体系作为一种二重抗侧结构体系,SPSWS 和钢框架是其中的基本要素。典型的 SPSWS 构成如图 1 所示。

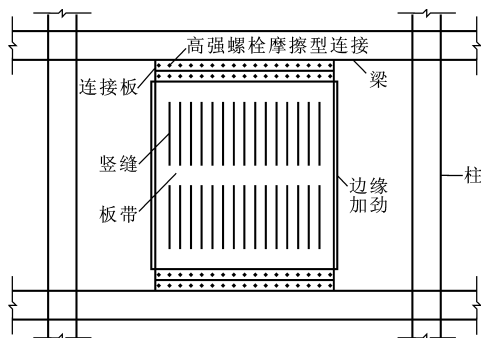


图 1 典型的 SPSWS 构成

Fig. 1 Constitution of Typical SPSWS

将 SPSWS 和钢框架等构件的弹性刚度、强化刚度和退化刚度、屈服承载力和极限承载力称为要素特性。在结构抗震设计中,要素特性的配置应满足以下原则:

(1) 钢框架作为主体结构,承受绝大部分竖向荷载,一旦破坏,会造成严重的后果,因此在受侧向力作用时,SPSWS 应先于钢框架屈服,从而发挥耗能作用,最大限度保护主体结构。在框架中,梁端应先于柱端屈服,满足“强柱弱梁”的要求。

(2) 结构应具有一定的承载力储备,即结构的极限承载力与屈服承载力比值满足一定要求。

(3) 结构应具有必要的延性,避免脆性破坏。

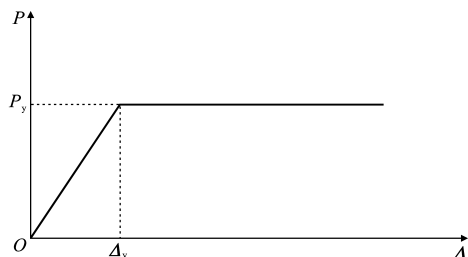
2 概念模型及要素特性的配置关系

在钢板剪力墙-框架体系中,为简化分析,建立

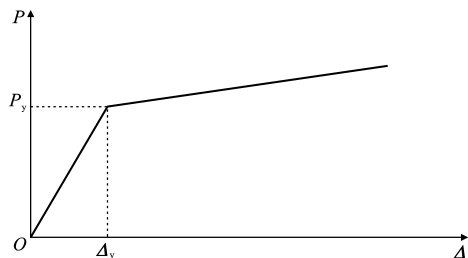
概念模型,并在此基础上分析抗侧构件的要素特性配置。

2.1 概念模型

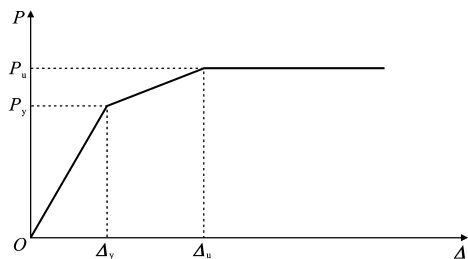
结构要素的基本力-变形特征可抽象为“理想弹性”、“弹性-强化型”、“弹性-强化-塑性”和“弹性-强化-劣化”4种,如图 2 所示,其中, P 为荷载, Δ 为位移, P_y, P_u 分别为构件屈服承载力和极限承载力, Δ_y, Δ_u 分别为构件屈服位移和极限位移。



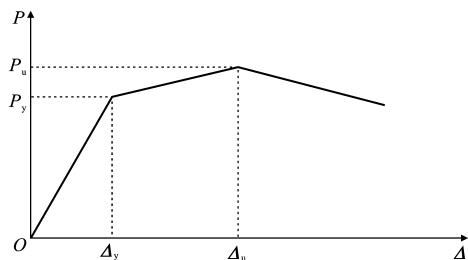
(a) 理想弹性



(b) 弹性-强化型



(c) 弹性-强化-塑性



(d) 弹性-强化-劣化

图 2 构件的基本力-变形特征曲线

Fig. 2 Basic Force-deformation Characteristic Curves of Components

考虑二重抗侧结构体系中剪力墙构件和钢框架结构要素特性的要求,二者的力-变形特征的组合包括以下 5 种类型:①“理想弹性”对“理想弹性”;②“理想弹性”对“弹性-强化型”;③“理想弹性”

对“弹性-强化-塑性”;④“弹性-强化-劣化”对“理想弹塑性”;⑤“弹性-强化-劣化”对“弹性-强化-塑性”。

结构体系概念模型如图 3 所示,其中, K_{if} , K_{iw} 分别为钢框架和剪力墙的分段刚度, P_{yf} , P_{yw} 分别为钢框架与剪力墙的屈服承载力, P_{uf} , P_{uw} 分别为钢框架与剪力墙的极限承载力, EI 为抗弯刚度, EA 为拉压刚度。将剪力墙构件和钢框架分别等效为 1 根杆件,这 2 根杆件分别具有剪力墙构件和钢框架的力学性能,用 1 根无限刚性杆将二者连接起来。这样一来,受侧向力作用时,剪力墙构件和钢框架具有相同的侧向位移,它们之间为简单的并联关系,于是二者的力-位移曲线与整个结构体系的力-位移曲线也应该遵从简单的叠加关系。

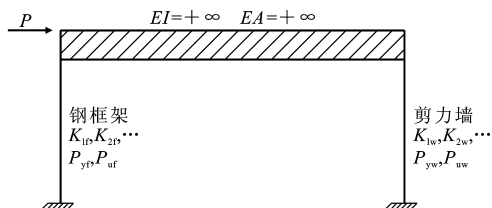


图 3 结构体系概念模型

Fig. 3 Conceptual Model of Structural System

有观点认为,在 SPSWS-钢框架体系的设计中,只需要保证 SPSWS 构件的屈服承载力小于钢框架的屈服承载力,然而,该条件并不能保证 SPSWS 构件先于钢框架屈服。在实际工程中,常使 SPSWS 构件的弹性刚度大于钢框架的弹性刚度,使 SPSWS 构件的屈服承载力小于钢框架的屈服承载力,这在文献[8],[16]中得到了有限元和试验验证,于是 SPSWS 构件先于钢框架屈服这一原则得到满足,并可以得到二重抗侧结构中剪力墙和钢框架不同力-变形特征组合对应的曲线,其中有代表性的组合如图 4 所示,其中, Δ_{yf} , Δ_{yw} 分别为钢框架与剪力墙的屈服位移, Δ_{uf} , Δ_{uw} 分别为钢框架与剪力墙的极限位移。图 4(a)对应力-变形特征组合类型①,图 4(b)对应力-变形特征组合类型②,图 4(c)对应力-变形特征组合类型③,图 4(d),(e)对应力-变形特征组合类型④,图 4(f)对应力-变形特征组合类型⑤。

2.2 延性、屈服位移和极限位移

结构体系的延性是指在外力作用下,结构超过弹性阶段后,其承载能力无显著下降情况时结构的后期非弹性变形能力。结构体系的延性对建筑物的

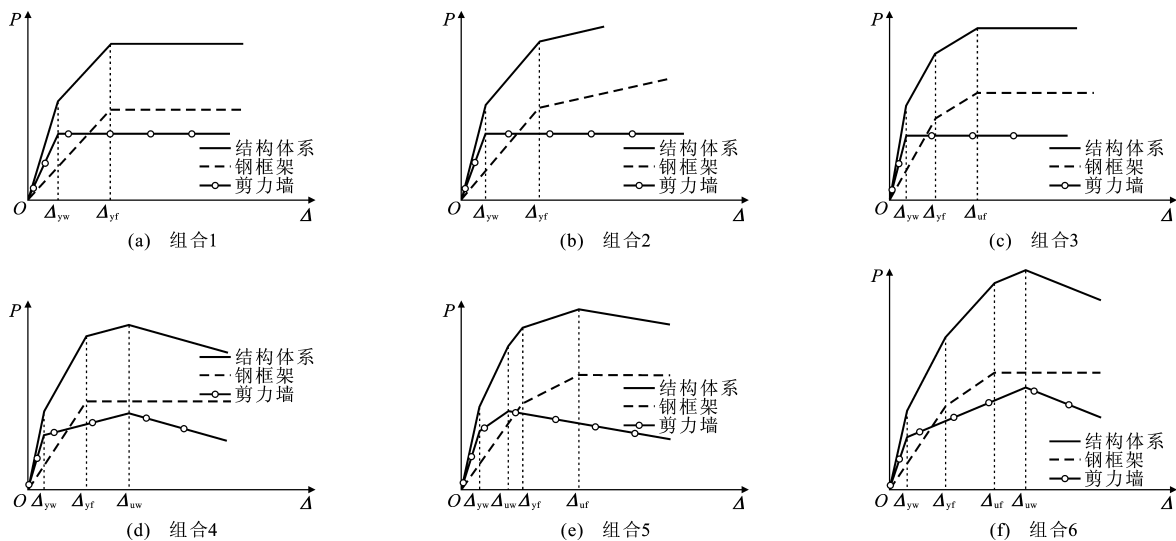


图 4 概念模型分析得到的力-位移曲线

Fig. 4 Force-displacement Curves Obtained by Conceptual Model

抗震性能具有重要的意义,通常用延性系数 μ 来表示结构体系延性的优劣,而延性系数 μ 通常定义为结构的极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 的比值,即

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

剪力墙构件和钢框架的屈服位移、极限位移及其对应的承载力由图 2 中力-变形特征曲线的拐点确定。

在概念模型中,钢板剪力墙-钢框架结构体系的力-位移曲线由钢板剪力墙和钢框架的力-位移曲线共同决定。如果单纯根据曲线拐点来确定体系的屈服位移、极限位移和对应的承载力,可能导致结构的屈服承载力与极限承载力比值过小,构件的性能得不到充分的发挥,这将造成不必要的浪费。因此本文中采用通用屈服弯矩法^[17]确定屈服位移 Δ_y ,以力-位移曲线的峰值点确定极限承载力 P_m ,当结构

体系力-位移特征曲线有下降段时,以承载力下降到 85% 极限承载力来确定极限位移 Δ_u ,当结构体系力-位移曲线没有下降段时,则认为结构满足延性要求而不必确定极限位移。

2.3 要素特性配置关系

钢板剪力墙-钢框架结构体系在侧向力作用下,忽略钢梁的轴向变形,钢板剪力墙和钢框架的侧向位移相等,要满足剪力墙率先屈服耗能,应保证剪力墙的屈服位移小于钢框架的屈服位移。

为保证结构的抗震性能,宜采用延性较好的结构,一般规定延性系数 μ 不小于某个值。依据概念模型,可以用钢板剪力墙和钢框架的要素特性表示钢板剪力墙-钢框架结构体系的要素特性,于是对结构体系延性系数 μ 的要求就转化为对钢板剪力墙和钢框架的要素特性的要求,即得到二者的要素特性配置关系。

以图 4(d) 为例,探究钢板剪力墙-钢框架结构体系中抗侧构件的要素特性配置关系。

图 5 为要素特性配置关系,其中, K_1, K_2, K_3, K_4 均为结构体系的刚度。过原点 O 以刚度 K_1 为斜率做直线 OH 与过极限承载力点 G 水平线相交于点 H ,过点 H 作垂线与曲线交于点 I ,对应位移 Δ_0 落在 Δ_{yw} 与 Δ_{yf} 之间,则 Δ_0 和对应荷载 P_0 可以用钢板剪力墙和钢框架的要素特性分别表示为

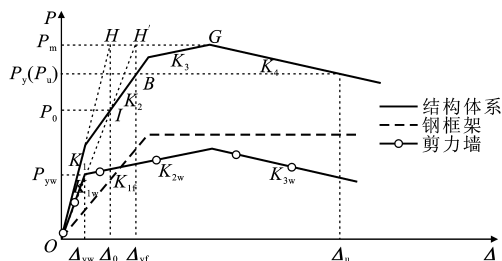


图 5 要素特性配置关系

Fig. 5 Configuration of Component Properties

$$\Delta_0 = P_m / K_1 = (P_{yf} + P_{uw}) / (K_{1f} + K_{1w}) \quad (2)$$

$$P_0 = \Delta_0 K_{1f} + P_{yw} + (\Delta_0 - \Delta_{yw}) K_{2w} \quad (3)$$

若 Δ_0 落在其他区间,则 P_0 的表达式会发生相应的变化。

连接 OI 并延长后与 HG 交于 H' ,过 H' 作垂线与曲线交于点 B ,即为近似屈服点,屈服位移 Δ_y 落在 Δ_{yw} 与 Δ_{yf} 之间,则 Δ_y 和屈服承载力 P_y 可以用钢板剪力墙和钢框架的要素特性分别表示为

$$\Delta_y = P_m / (P_0 / \Delta_0) = (P_{yf} + P_{uw}) \Delta_0 / P_0 \quad (4)$$

$$P_y = \Delta_y K_{1f} + P_{yw} + (\Delta_y - \Delta_{yw}) K_{2w} \quad (5)$$

同样的,若 Δ_y 落在其他区间, P_y 的表达式会发

生相应的变化。

最后,求得极限位移 Δ_u 和对应的屈服承载力 P_y 分别为

$$P_u = 0.85 P_m = 0.85 (P_{yf} + P_{uw}) \quad (6)$$

$$\Delta_u = (P_{uw} + P_{yf} - P_u) / K_{3w} + \Delta_{uw} \quad (7)$$

将式(4),(7)代入延性系数表达式(1),得到如下关系式

$$\mu = \frac{(P_{uw} + P_{yf} - P_u) / K_{3w} + \Delta_{uw}}{(P_{yf} + P_{uw}) \Delta_0 / P_0} > \mu_0 \quad (8)$$

式中: μ_0 为延性系数的某一给定值。

假设极限承载力 P_m 与屈服承载力 P_y 的比值为 λ ,即

$$\lambda = \frac{P_m}{P_y} \quad (9)$$

根据要素特性配置的原则,对于图 4(d) 中的结构,同样应满足式(10),即

$$\lambda = \frac{P_{yf} + P_{uw}}{\Delta_y K_{1f} + P_{yw} + (\Delta_y - \Delta_{yw}) K_{2w}} > \lambda_0 \quad (10)$$

式中: λ_0 为荷载比值的某一给定值。

式(9),(10)共同决定钢板剪力墙-钢框架结构体系中要素特性配置关系。采用同样的方法可以得到图 4 中几个典型组合的要素特性配置关系,结果如表 1 所示。

对于已知结构,将构件要素特性分别代入式(9),(10),判定其是否满足延性要求和承载力比值要求,从而对结构进行评估。

在工程设计中,按照以下步骤进行:

步骤 1,预估钢框架构件截面,得到钢框架相关要素特性。

步骤 2,将钢框架要素特性代入式(9),(10),得到 SPSWS 构件要素特性应满足的关系,并以此确定各要素特性。

步骤 3,构件验算,若不满足,则调整构件截面,重复步骤 2,直至满足。

3 概念模型的有限元验证

在有限元模型中,概念模型中的框架要素特性由 1 根等效立柱还原为柱和梁构件的。对于剪力墙要素特性,由于 SPSWS 构件与限制平面内转动的竖向杆件的工作原理类似,且该研究为定性研究,因此在模型中仍以等效立柱代替。对概念模型进行有限元验证可以为后续研究工作提供重要的依据,而杆系化模型可以考察破坏模式的形成和结构-机构的演化,从而深入认识结构机理。

表 1 典型概念模型组合的要素特性配置关系

Tab. 1 Configuration of Component Properties of Typical Conceptual Models

参数	要素特性配置关系		
	组合 1	组合 3	组合 6
P_m	$P_{yf}+P_{yw}$	$P_{yw}+P_{uf}$	$P_{uf}+P_{uw}$
Δ_0	$\frac{P_{yf}+P_{yw}}{K_{1f}+K_{1w}}$	$\frac{P_{yw}+P_{uf}}{K_{1f}+K_{1w}} \in (\Delta_{yw}, \Delta_{yf})$	$\frac{P_{uf}+P_{uw}}{K_{1f}+K_{1w}} \in (\Delta_{yw}, \Delta_{yf})$
P_0	$\Delta_0 K_{1f}+P_{yw}$	$\Delta_0 K_{1f}+P_{yw}$	$\Delta_0 K_{1f}+P_{yw}+(\Delta_0-\Delta_{yw})K_{2w}$
Δ_y	$\frac{(P_{yf}+P_{yw})\Delta_0}{P_0}$	$\frac{(P_{yf}+P_{yw})\Delta_0}{P_0} \in (\Delta_{yw}, \Delta_{yf})$	$\frac{(P_{uf}+P_{uw})\Delta_0}{P_0} \in (\Delta_{yf}, \Delta_{uf})$
P_y	$\Delta_y K_{1f}+P_{yw}$	$\Delta_y K_{1f}+P_{yw}$	$P_{yf}+(\Delta_y-\Delta_{yf})K_{2f}+P_{yw}+(\Delta_y-\Delta_{yw})K_{2w}$
P_u	$P_{yf}+P_{uw}$	$P_{yw}+P_{uf}$	$0.85(P_{uf}+P_{uw})$
Δ_u	Δ_{yf}	Δ_{uf}	$\frac{P_{uw}+P_{uf}-P_u}{K_{3w}}+\Delta_{uw}$
μ	$\frac{P_0\Delta_{yf}}{(P_{yf}+P_{yw})\Delta_0}$	$\frac{P_0\Delta_{uf}}{(P_{yw}+P_{uf})\Delta_0}$	$\frac{(P_{uw}+P_{uf}-P_u)/K_{3w}+\Delta_{uw}}{(P_{uf}+P_{uw})\Delta_0/P_0}$
λ	$\frac{P_{yf}+P_{yw}}{\Delta_y K_{1f}+P_{yw}}$	$\frac{P_{yw}+P_{uf}}{\Delta_y K_{1f}+P_{yw}}$	$\frac{P_{uf}+P_{uw}}{P_{yf}+(\Delta_y-\Delta_{yf})K_{2f}+P_{yw}+(\Delta_y-\Delta_{yw})K_{2w}}$

3.1 模型的建立

对每一个概念模型分别建立用杆件简化的 SPSWS 构件、钢框架和钢板剪力墙-钢框架结构体系 3 个有限元模型,模型编号如表 2 所示。

表 2 有限元模型编号

Tab. 2 Numerations of Finite Element Models			
模型编号	钢框架编号	SPSWS 构件编号	概念模型编号
System1	Frame1	Shear1	组合 1
System2	Frame2	Shear1	组合 2
System3	Frame3	Shear1	组合 3
System4	Frame1	Shear2	组合 4
System5	Frame3	Shear3	组合 5
System6	Frame3	Shear4	组合 6

为方便有限元模型的建立,统一假定原框架跨度为 6 m,高度为 3 m,而 SPSWS 构件宽度为 2 m。根据结构体系的变形特征,用杆件对 SPSWS 构件进行简化后,钢板剪力墙-钢框架结构体系的有限元模型如图 6 所示。

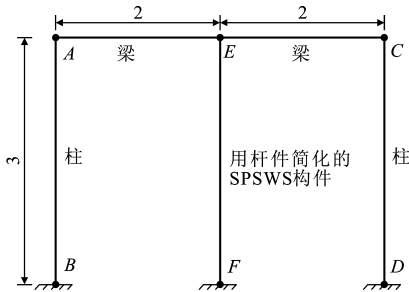


图 6 有限元模型(单位:m)

Fig. 6 Finite Element Model (Unit:m)

该有限元模型中,各节点处均设置为刚接。构件均采用 H 型钢的梁类型截面,其中钢框架采用碳

素结构钢 Q345,而用杆件简化的 SPSWS 构件采用碳素结构钢 Q235,材料塑性特性根据不同的模型需求进行设定。钢框架参数和 SPSWS 构件等效立柱参数如表 3,4 所示。

将柱脚和用杆件简化的 SPSWS 构件底端(B,D,F 点)设定为固定支座,约束梁柱节点(A,C 点),使之只能发生 Oxy 平面内的平移和转动,并约束用杆件简化的 SPSWS 构件的顶部(E 点)在 Oxy 平面内的转动。

对 E 点边界条件的设置主要出于以下考虑:

(1)如果不对该处 Oxy 平面内的转动加以约束,受钢梁的影响,用杆件简化的 SPSWS 构件在结构体系中和单独分析时约束条件会发生变化,影响分析结果。

(2)根据文献[18]中钢梁对 SPSWS 构件的约束这一问题的研究,定义转动约束刚度比 η_b 为梁局部转动刚度 K_b 与墙体自身端部转动刚度 K_p 的比值,只要 η_b 达到刚性转动约束刚度比 η_{br} ,如式(11),即可满足梁对 SPSWS 构件的面内刚性转动约束的要求,而经过有限元分析,最终得到刚性转动约束刚度比 $\eta_{br}=0.16$ 。经计算,在一般工程中,该条件均可以得到满足,所以采用上述约束方式是合理的。

转动约束刚度比 η_b 为

$$\eta_b = \frac{K_b}{K_p} \geq \eta_{br}$$

(11)

采用位移加载,即在设定 B 点边界条件的同时给定一个 x 轴正向位移。

表 3 钢框架参数
Tab. 3 Parameters of Steel Frames

钢框架编号	截面型号		材料本构模型		
	柱截面	梁截面	模型类型	刚度退化系数	极限塑性应变
Frame1	H500×350×20×20	H400×300×15×15	理想弹塑性		
Frame2	H500×350×20×20	H400×300×15×15	弹性-强化型	0.015	
Frame3	H600×400×20×20	H500×200×15×15	弹性-强化-塑性	0.100	0.005 69

表 4 SPSWS 构件等效立柱参数
Tab. 4 Parameters of Equivalent Column of SPSWS Component

SPSWS 构件编号	截面型号	材料本构模型			
		模型类型	刚度退化系数	极限塑性应变	负刚度系数
Shear1	H600×500×18×20	理想弹塑性			
Shear3	H600×400×18×20	弹性-强化-劣化	0.015	0.013 70	0.015
Shear5	H600×500×20×25	弹性-强化-劣化	0.015	0.003 82	0.010
Shear10	H600×500×20×25	弹性-强化-劣化	0.015	0.023 50	0.015

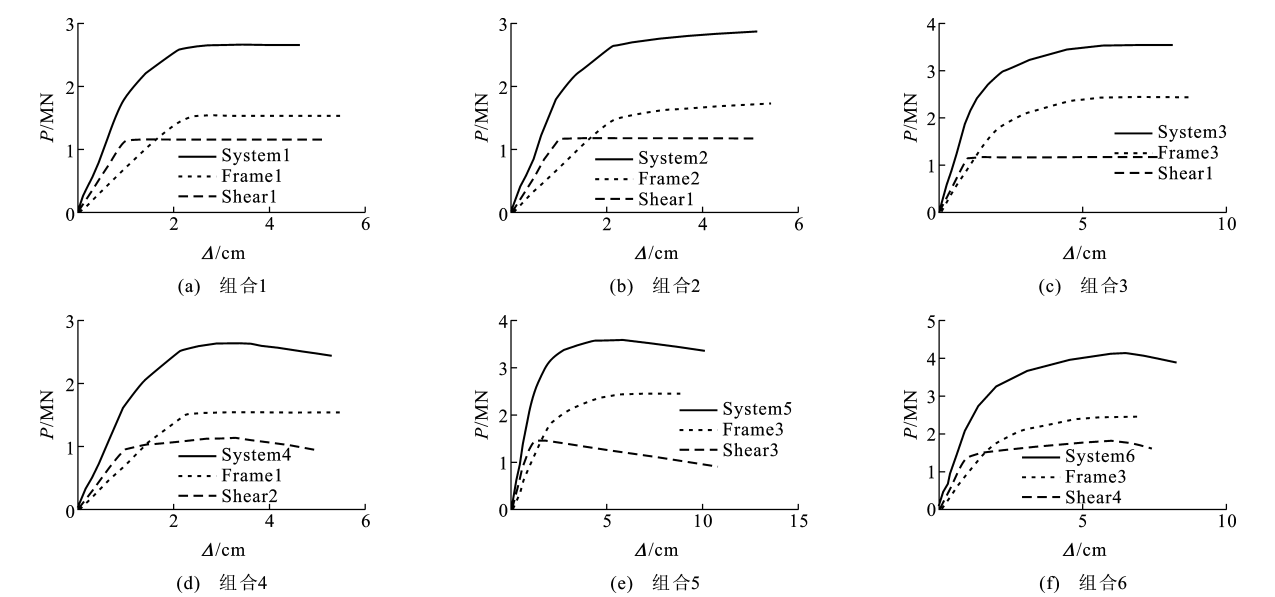


图 7 有限元分析得到的力-位移曲线

Fig. 7 Force-displacement Curves Obtained by Finite Element Analysis

3.2 力-位移曲线

对所创建的有限元模型进行分析计算,得到力-位移曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出,大部分模型都符合概念模型的假定,这与文献[16]中采用板单元模拟 SPSWS 构件的有限元分析结果相符。

将钢板剪力墙-钢框架结构体系的弹性刚度和极限承载力与用杆件简化的 SPSWS 构件和钢框架的相应值之和做比较,如表 5 所示。从表 5 中的数值对比可以看出,概念模型所做的假定成立。

3.3 破坏模式

本文中的破坏模式主要是指塑性铰产生的位置和顺序。有限元分析得到的典型破坏模式见图 8,

其中,数字表示塑性铰出现的一般顺序。在这 3 种破坏模式中,首先在用杆件简化的 SPSWS 构件的两端产生塑性铰,即用杆件简化的 SPSWS 构件率先屈服耗能,从而达到保护主体结构钢框架的目的;随后,在远离加载点的梁端形成塑性铰,钢框架开始进入屈服;最后,在柱脚、靠近加载点的梁端以及靠近用杆件简化的 SPSWS 构件两侧的梁上形成塑性铰,结构形成几何可变体系,进而发生破坏。其中,破坏模式 1,2 为有限元模型的主要破坏模式。

4 结 语

(1)概念模型所做的假定成立,即 SPSWS 构件和钢框架二者的力-位移曲线与整个结构体系的力-

表 5 力-位移曲线的关键数值比较

Tab. 5 Comparison of Key Points of Force-displacement Curves

模型编号	弹性刚度			极限承载力		
	计算值/(MN·m ⁻¹)	对比值/(MN·m ⁻¹)	相对误差/%	计算值/MN	对比值/MN	相对误差/%
System1	190.3	192.8	1.3	2.666	2.711	1.7
System2	190.3	192.8	1.3			
System3	210.1	215.9	2.7	3.547	3.611	1.8
System4	172.3	173.4	0.6	2.642	2.689	1.7
System5	230.0	240.4	4.3	3.600	3.656	1.5
System6	231.3	240.4	3.8	4.135	4.230	2.2

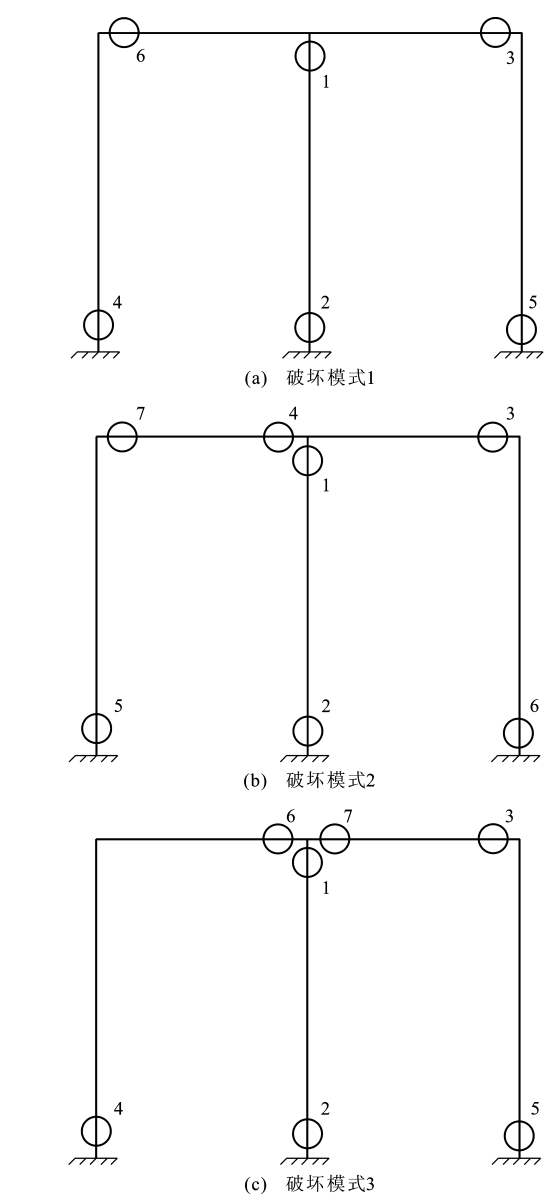


图 8 典型破坏模式

Fig. 8 Typical Failure Modes

位移曲线遵从简单的叠加关系。

(2)在 SPSWS-钢框架体系的设计中,应保证剪

力墙的屈服位移小于钢框架的屈服位移。

(3)由结构体系延性和承载力要求得出了 SPSWS-钢框架体系中构件要素特性的配置关系。

参考文献:

References:

[1] HITAKA T, MATSUI C. Experimental Study on Steel Shear Wall with Slits[J]. Journal of Structural Engineering,2003,129(5):586-594.

[2] 苏 磊.带缝钢板剪力墙结构分析与试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2004.

SU Lei. Structural Analysis and Experimental Study of Steel Plate Shear Wall with Slits[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2004.

[3] 曹志亮.带缝钢板剪力墙稳定性分析[D].武汉:武汉理工大学,2004.

CAO Zhi-liang. Stability Study of Steel Plate Shear Wall with Slits[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2004.

[4] 王 恒.带缝钢板剪力墙性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.

WANG Heng. Studies of Properties of Steel Plate Shear Wall with Slits[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2006.

[5] 魏德敏,温沛纲,卞宗舒.新型带缝钢板剪力墙的试验研究及其数值模拟[J].地震工程与工程振动,2006,26(1):129-133.

WEI De-min, WEN Pei-gang, BIAN Zong-shu. Experimental Investigation and Simulation Analysis of New Steel Plate Shear Walls with Slits[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2006,26(1):129-133.

[6] 袁朝庆,贺有丰,徐松芝.钢框架-带缝钢板剪力墙结构受力性能分析[J].地震工程与工程振动,2008,28(2):96-101.

YUAN Zhao-qing, HE You-feng, XU Song-zhi.

- Analysis of Mechanical Performance of a Structure Containing Steel Frame and Steel Plate Shear Wall with Slits[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(2): 96-101.
- [7] 曹春华, 郝际平, 王迎春, 等. 开缝薄钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(1): 46-52.
- CAO Chun-hua, HAO Ji-ping, WANG Ying-chun, et al. Cyclic Test of Thin Steel Plate Shear Wall with Slits[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(1): 46-52.
- [8] 蒋 路. 带缝钢板剪力墙研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- JIANG Lu. Studies of Steel Plate Shear Wall with Slits[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [9] 蒋 路, 陈以一, 汪文辉, 等. 足尺带缝钢板剪力墙低周往复加载试验研究 I [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 57-64.
- JIANG Lu, CHEN Yi-yi, WANG Wen-hui, et al. Experimental Study on Full Scale Steel Plate Shear Wall with Slits Under Low-frequency Cyclic Loads: Part I [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 57-64.
- [10] 蒋 路, 陈以一, 卞宗舒. 足尺带缝钢板剪力墙低周往复加载试验研究 II [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 65-71.
- JIANG Lu, CHEN Yi-yi, BIAN Zong-shu. Experimental Study on Full Scale Steel Plate Shear Wall with Slits Under Low-frequency Cyclic Loads: Part II [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 65-71.
- [11] 汪文辉. 带缝钢板剪力墙试验研究与理论分析[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- WANG Wen-hui. Experimental Study and Theoretical Analysis of Steel Plate Shear Wall with Slits[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [12] 徐松芝, 袁朝庆. 钢框架-带缝钢板剪力墙抗震性能的有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(12): 3558-3560.
- XU Song-zhi, YUAN Zhao-qing. Analysis on Seismic Property of Steel Frame-steel Plate Shear Wall with Slit[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(12): 3558-3560.
- [13] 陈以一, 蒋 路. 带缝钢板剪力墙的承载力和开缝参数研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(3): 109-114.
- CHEN Yi-yi, JIANG Lu. Research on Bearing Capacity and Slit Parameters of Steel Plate Shear Wall with Slits[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 109-114.
- [14] 贺旻斐, 蒲康国, 金华建, 等. 开缝钢板墙简化模型研究[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(4): 38-45, 50.
- HE Min-fei, PU Kang-guo, JIN Hua-jian, et al. Research on Simplified Model for Steel Plate Wall with Slits[J]. Progress in Steel Building Structures, 2010, 12(4): 38-45, 50.
- [15] 蒋 路, 陈以一, 王伟栋. 带缝钢板剪力墙弹性抗侧刚度及简化模型研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(3): 115-120.
- JIANG Lu, CHEN Yi-yi, WANG Wei-dong. Research on Elastic Lateral Stiffness and Simplified Model of Steel Plate Shear Wall with Slits[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 115-120.
- [16] 宁燕琪. 考虑竖向荷载作用的带缝钢板剪力墙试验研究与理论分析[D]. 上海: 同济大学, 2011.
- NING Yan-qi. Experimental Study and Theoretical Analysis of Steel Plate Shear Wall with Slits Under Vertical Loads [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [17] 范立础, 卓卫东. 桥梁延性抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- FAN Li-chu, ZHUO Wei-dong. Bridge Ductile Aseismic Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [18] 魏德敏, 温沛纲. 新型钢板剪力墙钢框架结构的地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(1): 63-67.
- WEI De-min, WEN Pei-gang. Seismic Response Analyses of Frame Structure with Slit Steel Shear Walls [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(1): 63-67.

