

文章编号:1673-2049(2019)03-0074-09

带耗能角钢无黏结预应力预制剪力墙抗震性能

黄 远^{1,2}, 易展辉^{1,2}

(1. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:改进了传统无黏结预应力(UPT)装配式墙体的连接构造方式,在墙趾处设置耗能角钢以提升构件的抗侧承载能力和耗能能力等抗震性能。利用有限元软件 MSC. Marc 对带耗能角钢 UPT 预制剪力墙进行单元建模,通过已有耗能角钢的试验数据和无黏结预应力墙体验证有限元模型中无黏结预应力筋、耗能角钢本构模型和接触等参数设置的准确性和合理性。通过参数分析研究了耗能角钢张拉控制应力、预应力筋位置、轴压比、参数设置及墙体高度对带耗能角钢 UPT 墙体延性及水平抗侧承载力的影响。结果表明:与不带耗能角钢 UPT 墙体相比,带耗能角钢 UPT 墙体的抗侧承载能力有明显提高,设置耗能角钢能有效降低预应力筋最大应力;随着耗能角钢厚度的增加或者耗能角钢竖向水平群螺栓至角钢外边缘距离的减小,墙体的抗侧承载力将增大;预应力筋偏心率较小时墙体延性较好,较大的偏心率虽然能够提高墙体的抗侧承载能力,但将大幅降低墙体的延性,不利于改善墙体抗震性能。

关键词:无黏结预应力;预制剪力墙;耗能角钢;抗震性能

中图分类号:TU378.1

文献标志码:A

Seismic Behavior of Unbonded Prestressed Tendon Precast Shear Walls with Energy Dissipation Angle Steel

HUANG Yuan^{1,2}, YI Zhan-hui^{1,2}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory on Damage Diagnosis for Engineering Structures, Hunan University,

Changsha 410082, Hunan, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University,

Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: The connection details of traditional unbonded prestressing tendon (UPT) prefabricated walls were improved. The energy dissipation angle steel was installed at the toe of the wall to improve the lateral bearing capacity and energy dissipation capacity of the members. The element model of UPT prefabricated shear wall with energy dissipation angle steel was built using finite element software MSC. Marc. The accuracy and rationality of parameters setting in finite element model, such as unbonded prestressed tendons, energy dissipation angle steel constitutive model and contact, were verified by experimental data of energy dissipation angle steel and unbonded prestressed wall. The effects of tension control stress, position of prestressing tendon, axial compression ratio, parameter setting and wall height on ductility and lateral bearing capacity of UPT wall with energy dissipation angle steel were studied by parameter analysis. The results show that compared with the UPT wall without the energy dissipation angle steel, the lateral

收稿日期:2018-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51478174)

作者简介:黄 远(1982-),男,湖南长沙人,副教授,工学博士,E-mail:huangy@hnu.edu.cn。

bearing capacity of UPT wall with angle steel is significantly improved. The steel angle can effectively reduce the maximum stress of prestressed tendons. With the increase of the thickness of the energy dissipation angle steel or the decrease of the distance between the vertical horizontal group bolts and the outer edge of angle steel, the lateral bearing capacity of the wall will increase. The eccentricity ratio of prestressing tendons is smaller and the ductility is better. The larger eccentricity ratio can improve the lateral bearing capacity of the wall, but it will greatly reduce the ductility of the wall, which is not conducive to improving the seismic performance of the wall.

Key words: unbonded prestress; precast shear; energy dissipation angle steel; seismic performance

0 引言

随着中国建筑工程的快速发展,大量有关预制混凝土结构的研究得以迅速展开。预制剪力墙是装配式结构中最重要水平抗力构件。工业化生产的预制构件质量大多优于现浇墙体,但是传统预制剪力墙结构在设防地震作用下存在结构残余变形大、震后损伤修复成本高等不足^[1]。某些构件难于修复只能拆除重建,对社会资源造成不必要的浪费。无黏结预应力(UPT)墙体具备良好的自复位性能,震后残余变形较小,但是 UPT 墙体耗能能力不足,预应力筋容易屈服,因此,本文提出将耗能角钢设置在 UPT 墙体的墙趾处,主要为了改善 UPT 墙体的耗能能力,增强结构的稳固性。相比在墙体内设置耗能钢筋,在墙趾处设置易于更换的耗能角钢能更好地保证墙体的耗能能力及自复位和可修复性能^[2]。

目前国内外已经对 UPT 预制剪力墙结构开展了相关研究。Kurama 等^[3]通过试验验证了 UPT 墙体具有自复位性能,能用于抗震区域;Henry^[4]对无黏结预应力预制剪力墙进行了测试。作为预制构件,预应力筋连接使得界面连接变得更为方便,安全度更高,并且能减少构件的配筋率,节省材料。Restrepo 等^[5]基于对带耗能软钢 UPT 墙体的试验和理论分析,得出了较详细的设计方法和公式。维多利亚大学一教学楼已经采用 UPT 墙体与框架结构形成新的结构体系,目前建筑已经落成^[4]。中国的研究也相继展开,党像梁等^[6]对于底部开水平缝预应力自复位墙体进行了试验,研究发现底部开水平缝预应力剪力墙有较好的自复位能力,且承载能力与普通剪力墙相等。吴浩等^[7]对无黏结预应力拼接的多块预制墙板进行试验研究,发现预应力筋能提供足够的恢复能力,墙体本身损伤较小。

本文在 UPT 墙体试验研究的基础上,进行带

耗能角钢 UPT 剪力墙的精细有限元分析,在验证模型准确性的基础上,进行参数分析,研究不同参数条件下 UPT 墙体承载力和延性的变化规律,进而为带耗能角钢的 UPT 墙体设计提供参考。

1 有限元模型

本文将利用有限元软件 MSC. Marc 对带耗能角钢 UPT 墙体进行非线性有限元分析,下面将对主要的有限元建模分析过程给以说明。

1.1 单元类型

带耗能角钢 UPT 墙体有限元模型包括混凝土、钢筋、角钢、预应力筋,混凝土主要采用八节点各向同性六面体单元(7号),而钢筋和预应力筋则采用 3D Truss 桁架单元(9号)进行模拟。忽略钢筋和混凝土的黏结滑移效应,桁架单元通过 MSC. Marc 提供的“Inserts”技术嵌入到混凝土单元。

1.2 接触设置

由于 UPT 墙体在水平接缝处无受力钢筋的贯通,而是使用高强砂浆进行缝的填充,因此,在水平荷载作用下,墙体会产生局部抬升,按照此受力模式,在软件中通过定义接触来实现试验中所发生的现象,采用罚函数施加无穿透接触约束来考虑接触面之间的剪切行为,并定义接触面摩擦因数^[8],在有限元软件 MSC. Marc 中采用“Segment to Segment”判别接触,这样便能更准确地表示接触体上应力连续均匀的分布。

1.3 材料本构模型

混凝土应力-应变($\sigma-\epsilon$)关系见图 1(a),其中, σ_0 , ϵ_0 分别为混凝土峰值压应力和压应变, ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变,混凝土受拉软化模量取弹性模量的 10%,剪力传递系数为 0.125。钢筋的应力-应变关系见图 1(b),其中, ϵ_{sy} 为钢筋屈服应变, f_{sy} 为钢筋屈服应力, f_{su} 为钢筋极限拉应力,钢筋的受拉和受压

弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^5$ MPa, E_t 为强化阶段弹性模量。预应力钢筋的单轴应力-应变关系参考文献[9], 见图 1(c), 其中, E_p 为预应力筋弹性模量, f_{py} 为预应力筋屈服应力, ϵ_{pu} 为预应力筋屈服应变, f_{pu} 为预应力筋极限拉应力。为了保证有限元模型计算的收敛性, 混凝土、钢筋、预应力筋单元均采用 Von Mises 屈服准则。

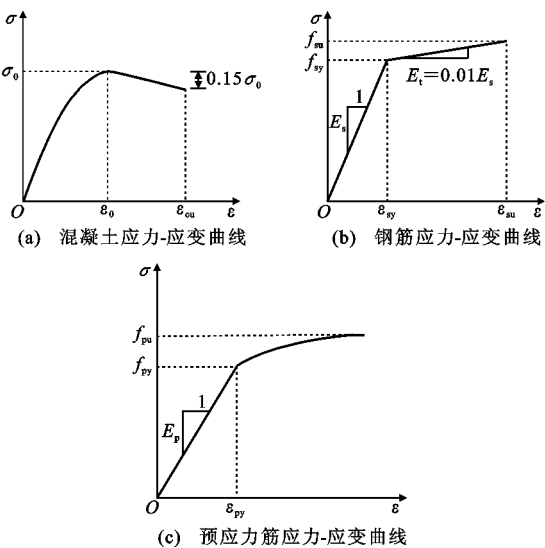


图 1 材料本构关系

Fig. 1 Material Constitutive Relations

1.4 预应力筋设置

采用降温法施加预应力, 降温幅度值 $\Delta T = F/(\alpha EA)$, 其中, F 为张力, α 为预应力筋线性膨胀系数, A 为预应力筋截面面积, 并考虑软件中由于混凝土的弹性微缩引起的预应力损失。墙体预应力筋采用后张无黏结形式, 即预应力筋被放置在 PVC 管道内, 与混凝土无黏结^[10]。在有限元模拟中, 对管道内预应力筋采用部分耦合方式, 锚固段采用完全耦合的方式(防止预应力筋承压)来模拟无黏结预应力筋在结构中的受力模式, 而在 MSC. Marc 中本

文将采用 Spring 进行耦合连接, 其简化示意如图 2 所示。

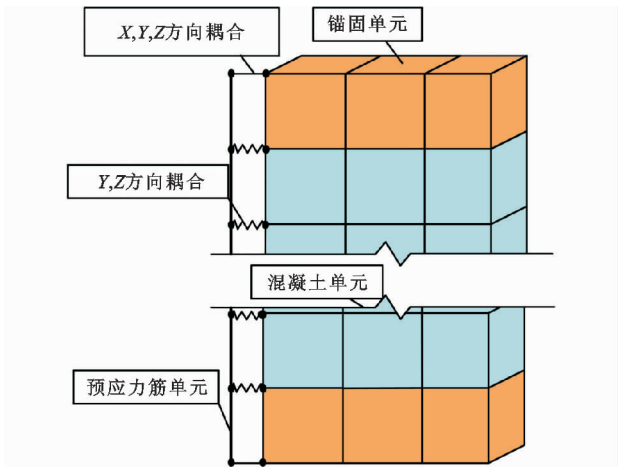


图 2 无黏结预应力筋有限元模型

Fig. 2 Finite Element Model of Unbonded Prestressed Tendon

1.5 耗能角钢设置

带耗能角钢 UPT 墙体构造如图 3 所示, 其中, l_{gv} 为竖向耗能角钢群螺栓中心至耗能角钢水平边缘距离, l_{gh} 为横向耗能角钢群螺栓中心到角钢竖向边缘距离, W_{ab} 为螺帽宽度, K_a 为圆弧端点至角钢水平边缘距离, t_a 为耗能角钢厚度, l_a 为角钢水平肢长度。

根据试验对角钢破坏形式的研究, 角钢破坏时形成三塑性铰机构, 角钢力学示意如图 4 所示, 其中, κ 为角钢塑性转角, N_{ap} 为角钢轴力, M_{ap} 为塑性弯矩, M_a 为角钢纯弯曲塑性弯矩, T_{ayy} , T_{ayx} 分别为角钢水平肢所受剪力及轴力, V_{ap} 为塑性剪力, δ_{ayx} 为角钢水平向变形, l_{g2} 为塑性变形。

根据文献[11]所述, 在有限元分析中可将耗能角钢转换成零长度非线性拉压弹簧。不考虑耗能角钢水平滑移的影响, 图 5 为耗能角钢简化本构模型, 其中, T_{ax} , δ_{ax} 分别为与梁平行的角钢水平肢承受的

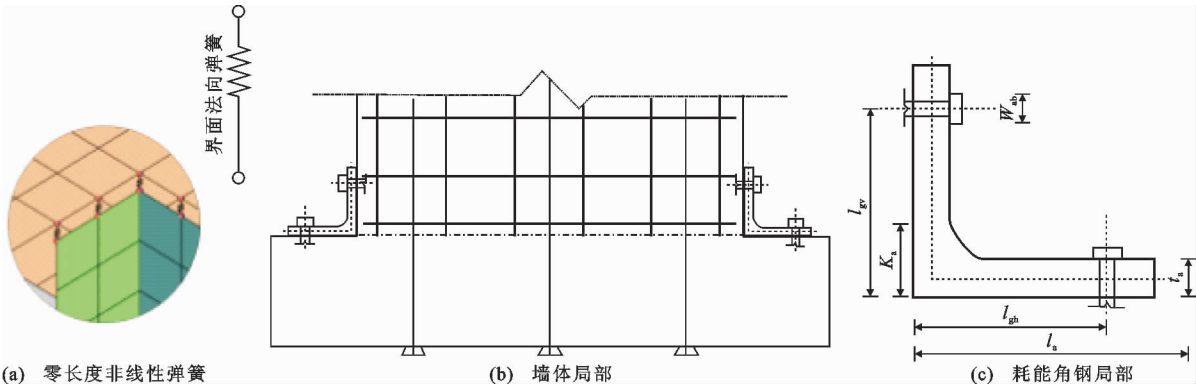


图 3 带耗能角钢墙体构造

Fig. 3 Construction of Wall with Energy Dissipation Angle Steel

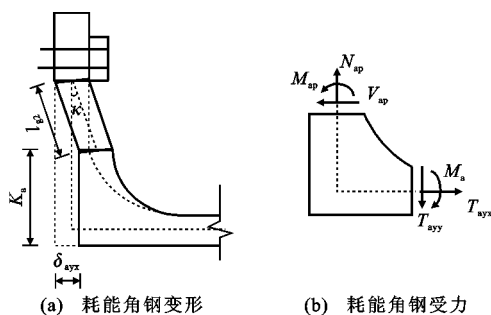


图4 耗能角钢力学示意

Fig. 4 Mechanics Diagram of Energy Dissipation Angle Steel

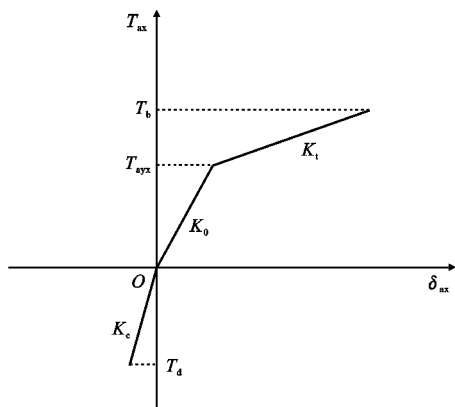


图5 耗能角钢简化本构模型

Fig. 5 Simplified Constitutive Model of Energy Dissipation Angle Steel

轴向荷载和轴向变形, T_b 为角钢受拉承载力, T_d 为受压屈服力, K_0 为弹簧的受拉初始刚度, K_c 为受压角钢初始刚度, K_i 为受拉角钢屈服后刚度, T_{ayx} 为角钢屈服荷载。

考虑剪切刚度及弯曲刚度后弹簧的受拉初始刚度 K_0 为

$$\frac{1}{K_0} = \frac{1}{K_{i, shear}} + \frac{1}{K_{i, bend}} \quad (1)$$

式中: $K_{i, bend}$ 为弯曲刚度; $K_{i, shear}$ 为剪切刚度, 具体计算公式参考文献[12]。

受压角钢初始刚度 K_c 为

$$K_c = \frac{1}{40} \frac{E_a A_a}{l_{gh}} \quad (2)$$

式中: E_a 为弹性模量; A_a 为角钢截面面积。

受拉角钢屈服后刚度 K_i 采用文献[12]公式计算, 即

$$K_i = \frac{dT_{ax}}{d\Delta\delta_{gh}} = 0.047T_{ayx} \quad (3)$$

当 $T_{ax} > T_{ayx}$ 时, 根据文献[12]所提出的经验计算公式, 将其修正后得

$$T_{ax} = (1.0 + 0.047\delta_{ax})T_{ayx} \quad (4)$$

2 有限元模型验证

2.1 UPT 墙体试验模型验证

由于带耗能角钢 UPT 墙体受力性能的试验研究还未见报道, 因此, 本文将分别采用耗能角钢试验模型和 UPT 墙体试验模型验证墙体的受力性能。Henry^[4]进行了 UPT 墙体的水平静力加载试验。UPT 墙体的模型验证将在宏观与微观 2 个层面进行。宏观层面验证主要为模型的荷载-位移曲线对比, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 有限元计算荷载-位移曲线与试验曲线吻合良好, 初始刚度和极限承载力相对误差控制在 5% 以内, 说明有限元模型中材料参数和单元的设置合理。微观层面验证主要为 UPT 墙体中预应力筋应力对比, 如图 7 所示。预应力筋的应力-位移曲线与试验曲线也基本一致, 说明有限元模型能够准确模拟 UPT 墙体中无黏结预应力筋的受力性能。在加载的初始阶段, 预应力存在一定的差异, 主要因为试验中张拉预应力筋的时候可能出现预应力损失, 而有限元软件中的初始预应力只存在由混凝土初始微缩产生的预应力损失。为进一步验证有限元模型的准确性, 对文献[4]中另外 4 个预制试件也进行了有限元模拟, 表 1 为 8 个预制试件的分析结果与试验结果对比。从表 1 可知, 8 个预制试件的分析结果与试验结果均吻合良好。因此, 本文的有限元模型能够合理并准确地模拟 UPT 预制混凝土剪力墙的受力性能。

2.2 角钢试验模型验证

Garlock 等^[12]针对角钢进行了拉压受力性能试验, 结果表明, 角钢厚度的增加能提高角钢初始刚度。试验中角钢锚固螺栓长度与角钢厚度之比均为 4, 从试验数据可知, 角钢初始刚度随着锚固长度的增加而变小^[13-14]。本文所采取的简化分析模型与角钢拉压试验曲线对比如图 8 所示。从图 8 可知, 简化数值模型计算所得角钢等效拉压关系能较好地反映试验中角钢所展现的基本受力特性。这说明简化角钢拉压等效本构模型可用来模拟带耗能角钢 UPT 墙体的抗震性能。

3 参数分析

为了更为全面地了解带耗能角钢 UPT 墙体的抗震性能, 本文以 B-3 为基准模型进行参数分析, 主要研究带耗能角钢 UPT 墙体的抗侧承载能力及延性。在参数分析中, 对于延性的计算, 本文采用文献[15]提出的“最远点”法进行屈服位移确定; 延性系

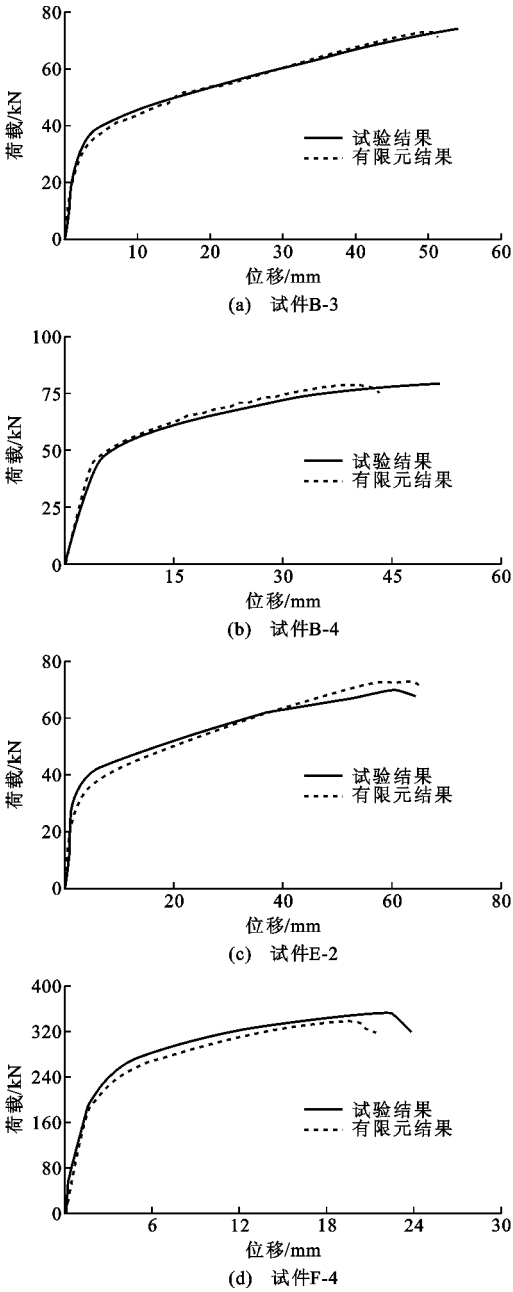


图 6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement Curves

数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, Δ_u 为荷载-位移曲线峰值点位移, Δ_y 为带耗能角钢 UPT 墙体的屈服位移。该方法具有明确的物理含义,且适用性比较广,适合电算。根据带耗能角钢 UPT 墙体的特点,本文分析的参数为:耗能角钢参数设置、预应力筋张拉控制应力、轴压比、预应力筋位置、墙体高度。

3.1 耗能角钢参数设置

针对耗能角钢的选型,本文初步选取边长为 203 mm 的等边角钢。耗能角钢的参数设置主要从螺栓的锚固距离及角钢的厚度考虑^[11],具体设置如表 2 所示,其中塑性变形 $l_{g2} = l_{gv} - K_a - W_{ab}$ 。

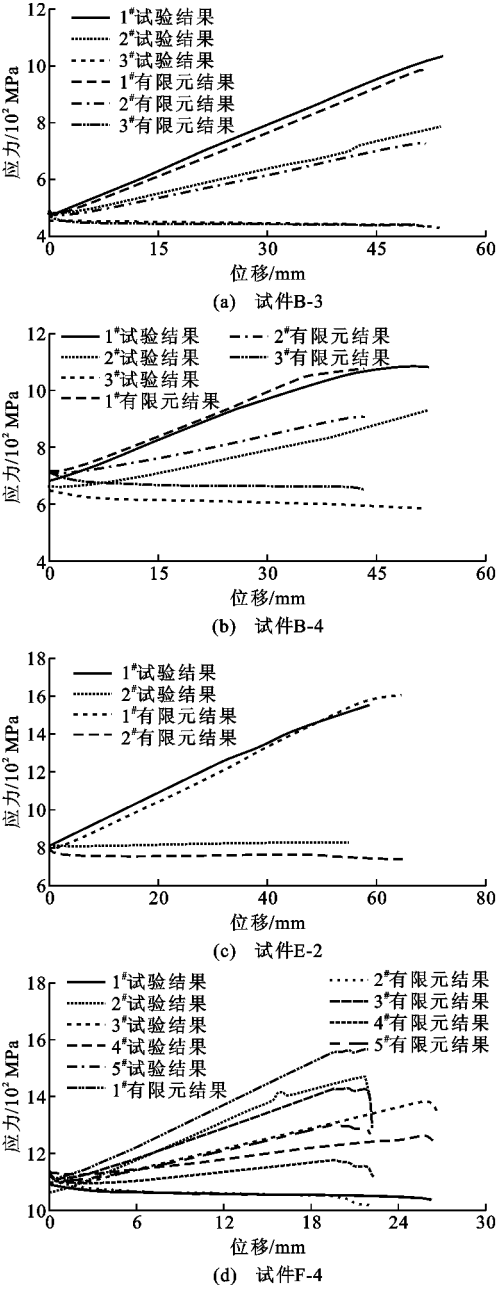


图 7 墙体预应力筋应力

Fig. 7 Stresses of Prestressed Tendons in Walls

在不同耗能角钢参数设置下,预制墙体荷载-位移曲线如图 9 所示,与之对应的位移延性系数见表 3。通过对比分析可知:与不带耗能角钢 UPT 墙体相比,带耗能角钢墙体的承载力提高了将近 20%,这主要是因为耗能角钢可以提供抵抗弯矩,并且能限制墙体底部水平接缝的张开;延性系数稍有降低,这主要是因为耗能角钢的添加延缓了 UPT 墙体屈服,同时增大了墙体的受压区高度;随着 l_{g2} / t_a 的减小或 t_a 的增加,预制墙体的抗侧承载能力将会增大,这主要是由于耗能角钢竖向水平群螺栓至耗能角钢外侧边缘距离的减小或角钢厚度 t_a 的增加提

表 1 试验结果与有限元结果对比

Tab. 1 Comparison Between Experiment and Finite Element Results

试件 编号	峰值位移/mm		峰值荷载/kN		Δ_2/Δ_1	V_2/V_1
	试验值 Δ_1	模拟值 Δ_2	试验值 V_1	模拟值 V_2		
B-3	54.3	50.4	70.5	69.7	0.93	0.99
B-4	47.8	41.8	79.3	78.1	0.87	0.98
E-2	60.5	63.1	79.3	78.2	1.04	0.99
F-4	21.7	18.7	327.0	312.0	0.86	0.95
F-2	30.2	32.5	212.3	200.6	1.07	0.94
F-3	28.6	24.5	283.3	270.2	0.86	0.95
E-3	51.5	43.5	83.3	82.4	0.85	0.99
E-3	34.9	35.7	96.8	100.2	1.02	1.04
平均值					0.94	0.98
标准差					0.09	0.03

注:峰值位移为荷载-位移曲线上峰值荷载对应的位移值。

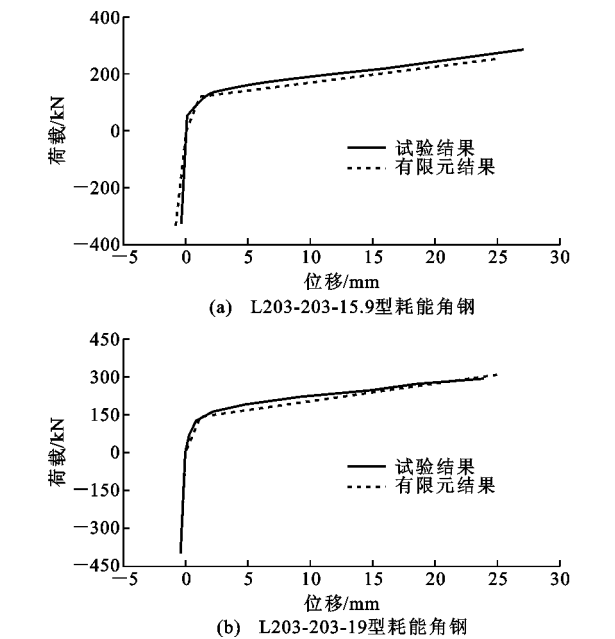


图 8 耗能角钢简化本构模型验证

Fig. 8 Verification of Simplified Constitutive Model of Energy Dissipation Angle Steel

表 2 耗能角钢参数设置

Tab. 2 Parameter Setting of Energy Dissipation Angle Steel

角钢型号	t_a/mm	l_{g2}/t_a
L203-203-15.9	15.9	4.0
L203-203-15.9	15.9	7.0
L203-203-19	19.0	4.0
L203-203-19	19.0	5.8
L203-203-24	24.0	4.0

高了耗能角钢的承载能力,进而使得角钢对墙体抗侧承载力的贡献增大。带耗能角钢 UPT 墙体的预应力筋最大应力 f_p 与抗拉强度标准值 f_{ptk} 的比值

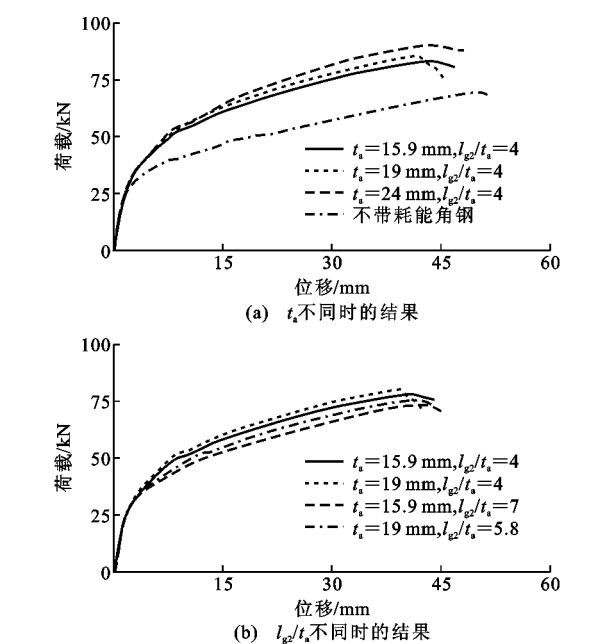


图 9 不同角钢参数下的墙体荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement Curves of Wall with Different Angle Steel Parameters

表 3 不同角钢规格下的分析结果

Tab. 3 Analysis Results with Different Specifications of Angle Steel

角钢规格	峰值荷载/kN	f_p/f_{ptk}	Δ_y/mm	Δ_u/mm	μ
不带耗能角钢	69.6	0.92	7.2	50.5	7.0
$t_a=15.9\text{ mm}, l_{g2}/t_a=4$	83.2	0.86	8.3	44.4	5.3
$t_a=15.9\text{ mm}, l_{g2}/t_a=7$	78.4	0.88	7.9	45.4	5.7
$t_a=19\text{ mm}, l_{g2}/t_a=4$	85.6	0.84	8.5	42.0	4.9
$t_a=19\text{ mm}, l_{g2}/t_a=5.8$	80.4	0.87	10.7	44.5	4.2
$t_a=24\text{ mm}, l_{g2}/t_a=4$	90.2	0.86	8.4	43.2	5.1

都小于 UPT 墙体,这表明添加耗能角钢能够减小无黏结预应力筋的最大拉应力,从而使无黏结预应力筋能更好地处于弹性受力状态,保证了预制剪力墙结构变形的可恢复性。

3.2 张拉控制应力

带耗能角钢 UPT 墙体中预应力筋的张拉控制应力不宜超过其屈服强度,过低的预应力筋张拉控制应力也不利于预制结构的稳定。本文依据文献[16],设置张拉控制应力值为 $0.4f_{ptk}$, $0.5f_{ptk}$, $0.6f_{ptk}$, $0.7f_{ptk}$,其荷载-位移曲线如图 10(a)所示,其中张拉控制应力从低到高分别对应的抗侧承载力为 85.2,92.4,96.7,100.8 kN。随着张拉控制应力的增大,抗侧承载力也随之增大。这是因为随着预应力筋张拉控制应力增加,墙体受压区的抗弯力矩得到了提升,从而使带耗能角钢 UPT 墙体的抗侧承载力增加。预制墙体位移延性系数的计算结果如

图 10(b)所示,位移延性系数随着预应力筋张拉控制应力增加而略有减小。

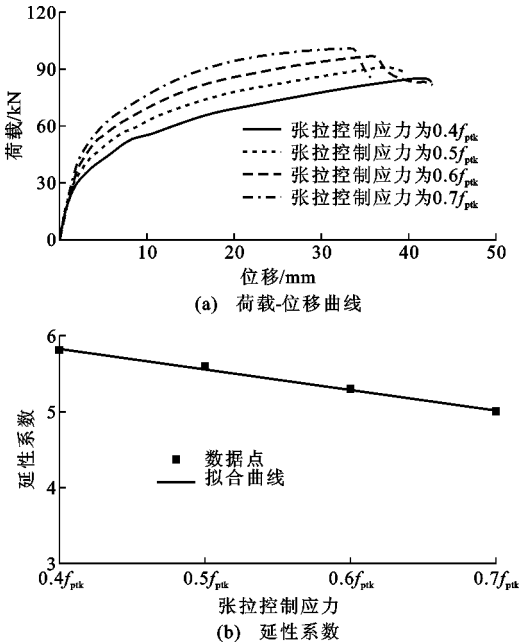


图 10 不同张拉控制应力下的有限元分析结果
Fig. 10 Finite Element Analysis Results Under Different Tension Control Stresses

3.3 轴压比

依据文献[17],在水平荷载作用下,剪力墙的轴压比是影响结构刚度、延性以及承载力的重要因素。本文剪力墙轴压比的取值分别设置为 0.1,0.2,0.3,0.4,对应的荷载-位移曲线及延性系数分别如图 11(a),(b)所示。轴压比增大,承载力、刚度都有提升,轴压比在 0.1~0.4 时,其承载力增加了 60%,延性减少了 40%,主要原因是:轴压比的增大增加了墙体竖向轴力,当墙体产生变形时,为墙体提供了水平方向的力矩,而延性的降低主要是随着水平接缝的张开,墙体变形增大,墙体受压侧耗能角钢拉压弹簧受力随之增加,并且受压区混凝土所承担的压力也将会增大,在墙体侧移较小时,受压区混凝土达到压溃状态。

3.4 预应力筋位置

预制 UPT 墙体结构受力性能将受到预应力筋位置的影响,若布置不当,则会增加预制构件的装配成本,不利于预制构件受力性能的改善^[18]。本文用偏心率 e 来表示预应力筋的位置,其计算公式为

$$e=\frac{r}{L_w}$$
 (5)

式中: r 为预应力筋距离墙体中心的距离; L_w 为墙体截面长度。

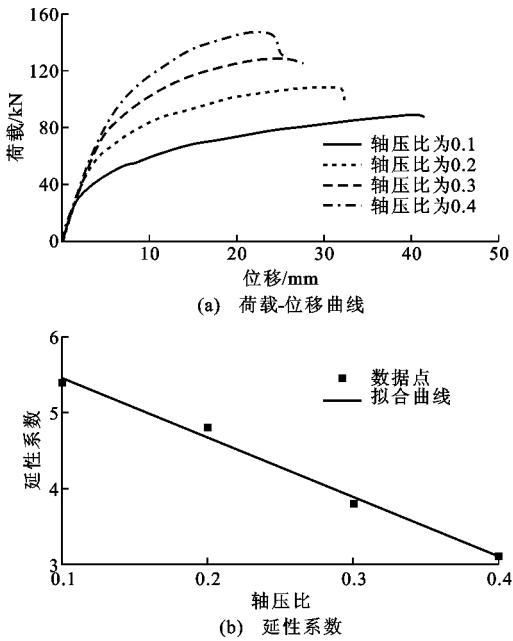


图 11 不同轴压比下的有限元分析结果
Fig. 11 Finite Element Analysis Results Under Different Axial Compression Ratios

预应力筋布置情况如图 12 所示,其中 H_w 为墙体截面宽度。为了确保预应力筋有足够的保护层厚度,将偏心率的取值分别设置为 0.2,0.4,0.6。不同偏心率时的墙体荷载-位移曲线和延性系数分别如图 13(a),(b)所示。随着偏心率 e 的增加,承载力增加,而延性系数逐渐减小,这主要是因为预应力筋偏心率越大,其对墙体抗弯承载力的贡献越大,但这也会使预应力筋更早进入塑性阶段,从而使墙体更早进入屈服阶段。预应力筋位置宜兼顾承载力及延性需求,过大的偏心率不能让墙体结构受力性能得到很好发挥。

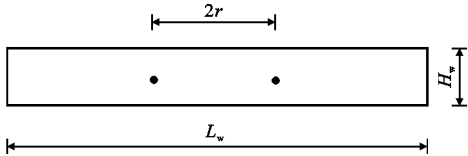


图 12 预应力筋位置
Fig. 12 Layout of Prestressed Reinforcement

3.5 墙体高度

预应力筋长度对预应力筋的变形及受力性能存在一定影响,为考察预应力筋长度对带耗能角钢 UPT 墙体受力性能影响,本文利用墙体高度的变化来表征预应力筋长度变化。对基础模型进行设计,保持其他参数一定的情况下改变墙体高度。根据文献[19],当高宽比小于 2 时,墙体破坏形式表现为剪切破坏,为此将墙体高宽比设置为 3,分别设置墙体

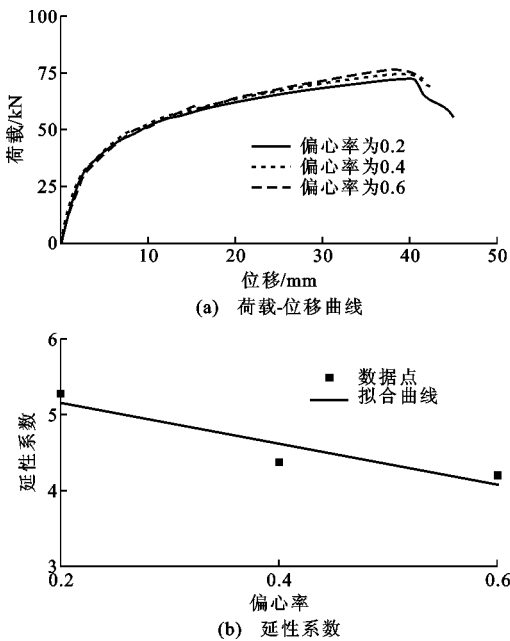


图 13 不同偏心率下的有限元分析结果
Fig. 13 Finite Element Analysis Results Under Different Eccentricity Ratios

高度 H 为 3 000, 3 300, 3 600, 3 900 mm。分析数据如表 4 所示, 分析结果如图 14 所示。

表 4 不同墙体高度下的分析数据

Tab. 4 Analysis Data with Different Wall Heights

墙体高度/mm	峰值荷载/kN	f_p/f_{ptk}
3 000	88.9	0.62
3 300	89.6	0.61
3 600	91.2	0.59
3 900	92.8	0.58

通过分析可知: 墙体高度的增加, 即预应力筋长度的提升, 对承载能力、墙体延性影响较小, 对预应力筋受力影响较大; 随着墙体高度的增加, 即预应力筋长度增加, f_p/f_{ptk} 值降低, 这是因为预应力筋长度增加时, 荷载作用下预应力筋应变将较小, 从而降低了预应力筋的最大应力。

4 结 语

(1) 有限元模型能很好地模拟 UPT 墙体在水平荷载作用下的受力性能, 包括墙体整体荷载-位移曲线及局部预应力筋的应力-应变关系。同时耗能角钢简化拉压本构模型也能很好地模拟耗能角钢的受力性能。

(2) 与不带耗能角钢 UPT 墙体相比, 带耗能角钢 UPT 墙体的抗侧承载能力有明显提高, 设置耗能角钢也能提高墙体的抗侧刚度, 增强墙体的整体

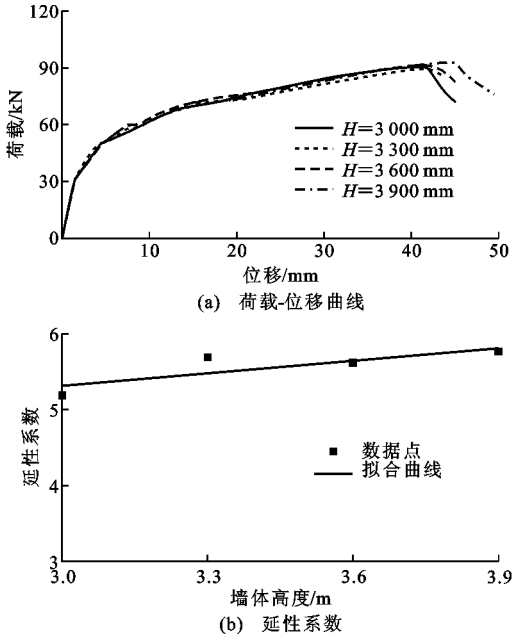


图 14 不同墙体高度下的有限元分析结果
Fig. 14 Finite Element Analysis Results of Different Wall Heights

性, 有效降低预应力筋的最大应力。

(3) 随着耗能角钢厚度的增加或者耗能角钢竖向水平群螺栓至角钢外边缘的距离减小, 以及张拉控制应力和轴压比的增加, 带耗能角钢 UPT 墙体的抗侧承载力将增大。

(4) 预应力筋偏心率较小时墙体延性较好。较大的预应力筋偏心率虽然能够提高墙体的抗侧承载能力, 但将大幅降低墙体延性, 不利于改善墙体抗震性能。

(5) 墙体长度的增加降低了荷载作用下预应力筋应变, 能有效控制预应力筋最大应力, 维持墙体自复位性能。

参考文献:

References:

[1] 蒋欢军, 刘其舟. 可恢复功能剪力墙结构研究进展[J]. 振动与冲击, 2015, 34(7): 51-58.
JIANG Huan-jun, LIU Qi-zhou. State-of-the-art of the Research Advances on Resilient Shear Walls[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(7): 51-58.
[2] 马 昕, 吕西林. 软钢阻尼器对自复位剪力墙性能影响研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(4): 63-69.
MA Xin, LU Xi-lin. Effects of the Mild Steel Damper on the Self-centering Wall Performance[J]. Structural Engineers, 2013, 29(4): 63-69.
[3] KURAMA Y, PESSIKI S, SAUSE R, et al. Seismic Behavior and Design of Unbonded Post-tensioned Pre-

- cast Concrete Walls[J]. PCI Journal, 1999, 38(3): 72-93.
- [4] HENRY R. Self-centering Precast Concrete Walls for Buildings in Regions with Low to High Seismicity [D]. Auckland: University of Auckland, 2011.
- [5] RESTREPO J I, RAHMAN A. Seismic Performance of Self-centering Structural Walls Incorporating Energy Dissipators[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1560-1570.
- [6] 党像梁, 吕西林, 周颖. 底部开水平缝摇摆剪力墙抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 182-189.
- DANG Xiang-liang, LU Xi-lin, ZHOU Ying. Study on Seismic Performance of a Rocking Wall with Bottom Horizontal Slits[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(5): 182-189.
- [7] 吴浩, 吕西林, 蒋欢军, 等. 预应力预制混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 208-217.
- WU Hao, LU Xi-lin, JIANG Huan-jun, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Prestressed Precast Concrete Shear Walls[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 208-217.
- [8] 蒋路. 带缝钢板剪力墙应用技术分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 118-122.
- JIANG LU. Analysis of Application Techniques of Steel Plate Shear Wall with Slits[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(2): 118-122.
- [9] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analyse[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [10] 汪训流, 叶列平, 陆新征. 预应力筋粘结形式对框架复位性能的影响[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 57-60.
- WANG Xun-liu, YE Lie-ping, LU Xin-zheng. Influence by Bonding Styles of Prestressed Strands/Steels on Re-centering Behavior of PC Frames[J]. Building Structure, 2008, 38(8): 57-60.
- [11] 蔡小宁, 孟少平, 孙巍巍, 等. 顶底角钢连接半刚性钢结构抗震性能数值分析[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 124-129, 146.
- CAI Xiao-ning, MENG Shao-ping, SUN Wei-wei, et al. Numerical Analysis for Seismic Behavior of Semi-rigid Steel Beam-to-column Connection with Top-and-seat Angles [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 124-129, 146.
- [12] GARLOCK M M, RICLES J M, SAUSE R. Cyclic Load Tests and Analysis of Bolted Top-and-seat Angle Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(12): 1615-1625.
- [13] KISHI N, CHEN W F. Moment-rotation Relations of Semirigid Connections with Angles [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(7): 1813-1834.
- [14] VIDJEAPRIYA R, JAYA K P. Experimental Study on Two Simple Mechanical Precast Beam-column Connections Under Reverse Cyclic Loading[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(4): 402-414.
- [15] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46.
- FENG Peng, QIANG Han-lin, YE Lie-ping. Discussion and Definition on Yield Points of Materials Members and Structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46.
- [16] JGJ 369—2016, 预应力混凝土结构设计规范[S].
- JGJ 369—2016, Code for Design of Prestressed Concrete Structures[S].
- [17] 刘家彬, 陈云钢, 郭正兴, 等. 竖向新型连接装配式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 16-24.
- LIU Jia-bin, CHEN Yun-gang, GUO Zheng-xing, et al. Test on the Seismic Performance of Precast Shear Wall with Vertical Reinforcement Lapping in Pore-forming on Steel Plate [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(4): 16-24.
- [18] ERKMEN B, SCHULTZ A E. Self-centering Behavior of Unbonded Precast Concrete Shear Walls[J]. Earthquake Resistant Engineering Structures, 2007, 93: 185-194.
- [19] 劳晓春, 韩小雷. 延性 RC 剪力墙构件的性能指标限值[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 157-164.
- LAO Xiao-chun, HAN Xiao-lei. The Performance Index Limits for Ductile RC Shear Wall Components [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 157-164.