

# 冷挤压套筒连接装配式剪力墙精细有限元分析

黄炎生,郭倩倩

(华南理工大学土木与交通学院,广东 广州 510641)

**摘要** 目的 优化冷挤压套筒连接装配式剪力墙的有限元分析模型,研究采用该连接方式下装配式剪力墙结构的抗震性能。**方法** 基于冷挤压套筒连接件的单轴拉伸试验,采用多因素回归分析的方法构建等效本构关系,结合 Clough 滞回规则构建冷挤压套筒连接件“三折线”滞回本构模型,在 ABAQUS 中完成该材料模型的二次开发后放入冷挤压套筒连接装配式剪力墙精细化有限元模型中,进行低周往复荷载下的受力性能分析。**结果** 有限元模拟试件的屈服荷载、峰值荷载、极限荷载的误差均在 7% 以内,模拟滞回环面积的误差在 14% 以内,模拟结果与试验较吻合;冷挤压套筒连接装配式剪力墙在剪跨比为 1.35、轴压比在 0.26~0.44 时,延性系数均大于 3。**结论** 采用笔者建议的有限元模型可以较好地反映冷挤压套筒连接装配式剪力墙的抗震性能,此类装配式剪力墙抗震性能良好。

**关键词** 冷挤压套筒连接件;三折线滞回本构模型;精细化有限元模型;ABAQUS 二次开发;装配式剪力墙

中图分类号 TU375

文献标志码 A

## Finite Element Model of Shear Wall Matched with Cold Extrusion Sleeve Connection

HUANG Yansheng, GUO Qianqian

(Department of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, China, 510641)

**Abstract:** To optimize the finite element analysis model of the cold extrusion sleeve connection prefabricated shear wall, and to study the seismic performance of the prefabricated shear wall structure using the connection method. Based on the uniaxial tensile test of cold extrusion sleeve connector, the corresponding equivalent constitutive relationship was constructed by multi-factor regression analysis, and the "tri-fold" hysteresis constitutive model of cold extrusion sleeve connector was constructed by combining the Tight hysteresis rule, and the secondary development of the material model was completed in the general commercial finite element platform ABAQUS,

收稿日期:2022-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(52108143)

作者简介:黄炎生(1963—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事结构分析的可视化等方面研究。

and then put into the fine finite element model of the cold extrusion sleeve connection assembly shear wall, and the force performance simulation study under low cycle reciprocating load was carried out. The errors of the yield load, peak load and limit load of the finite element simulation specimen are within 7%, and the error of the simulated hysteresis loop is within 14%, and the simulation results are more consistent with the test; When the cold extrusion sleeve connection assembly shear wall is 1.35 and the axial pressure ratio is 0.26~0.44, the ductility coefficient is greater than 3. The finite element model proposed in this paper can better reflect the seismic performance of the cold extrusion sleeve connection prefabricated shear wall, and the seismic performance of such prefabricated shear wall is good.

**Key words:** cold extrusion sleeve connection; tri-fold hysteresis constitutive model of the cold extrusion sleeve connection; refined finite element model; ABAQUS secondary development

随着装配式结构的不断发展,其连接件形式也逐渐多样化,但现有的一些连接形式存在一定的局限性,例如螺栓连接对施工精度有较高的要求,其拧紧程度也较难控制,在正常使用状态下有松动的可能<sup>[1-3]</sup>;常用的套筒灌浆连接和预留孔浆锚连接也存在套筒长度过长、预留孔面积过大、灌浆质量不易保证的缺点<sup>[4-12]</sup>。相比而言,冷挤压套筒外径、筒长等尺寸较小,依靠套筒与钢筋的机械咬合作用传递荷载,具有操作简便、施工速度快,耗材少的优点。但目前对于冷挤压套筒连接件的研究较少<sup>[13-15]</sup>,要推广这种连接方式,需开展进一步的试验研究和理论探讨。

笔者通过对冷挤压套筒连接件单轴拉伸试验结果的多因素线性统计分析,构建了该种连接件在单轴拉伸下的本构关系。同时结合 R. W. Clough<sup>[13]</sup>提出的钢筋滞回规则建立了冷挤压套筒连接件的应力-应变“三折线”滞回本构模型,并在有限元平台 ABAQUS 中完成该材料模型的二次开发,将本构模型应用于冷挤压套筒连接装配式剪力墙有限元模型中。考虑钢筋的滞回特性、新旧混凝土连接界面处的相互作用对剪力墙抗震性能的影响,建立了三个冷挤压套筒连接装配式剪力墙的有限元模型,对其进行拟静力试验后与已有试验结果进行对比验证。研究结果表明,采用冷挤压套筒连接件应力-应变“三折线”滞回本构模型建立的精细化有限元模型能够较好地表征剪力

墙模型的抗震性能。

1 单向拉伸试验及等效本构

1.1 单向拉伸试验结果及分析

江少坤<sup>[14]</sup>对 28 个冷挤压套筒连接件进行了单轴拉伸试验,部分试件的应力-应变曲线如图 1 所示。其应力-应变曲线与钢筋相似,都经历了应力-应变曲线呈线性增长、达到屈服阶段和达到极限强度破坏的过程。

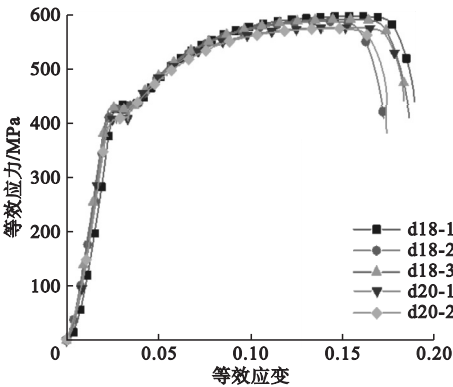


图 1 冷挤压套筒应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of cold extrusion sleeve

研究表明,冷挤压套筒连接件表现出与钢筋类似的特性,因此可采用类似于钢筋的“三折线”本构模型模拟此类连接件在单向拉伸下受力性能。

为更好地表征冷挤压套筒连接件呈“三折线”的受力特性,将试验值中表征该种特性的三个特征点—等效屈服点、等效屈服平台结束点、等效极限荷载点统计于图 2 中,为

后文该类连接件材料本构的推导提供验证数据。其中A点与C点分别对应于冷挤压套筒的等效屈服点与极限荷载点,AB段为冷挤压套筒的屈服平台。

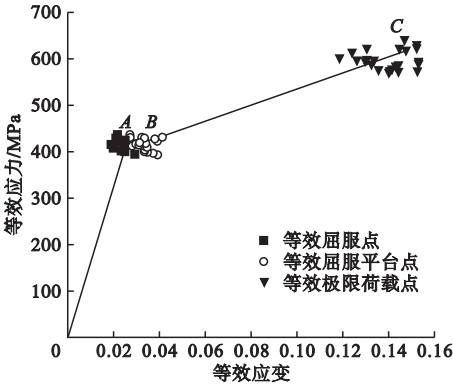


图2 冷挤压套筒连接三折线本构模型

Fig.2 Cold extrusion sleeve connection tri-foldline constitutive model

1.2 特征点参数的取值

使用统计学软件 SPSS 考察连接钢筋屈服应变、钢筋直径、套筒长度、钢筋锚固长度、挤压应力等因素对冷挤压套筒连接件受力本构的影响,研究发现,冷挤压套筒连接件屈服应力与钢筋屈服强度的相关,故选择钢筋屈服强度作为自变量进行回归分析,得到拟合结果见式(1)、式(2)。根据显著性分析结果选择钢筋的屈服应变及钢筋的直径作为特征点应变的自变量进行回归分析,得到特征点应变的拟合结果见式(3)~式(5)。

$$\sigma_A = \sigma_B = 0.617f_y + 156.042. \tag{1}$$
$$\sigma_C = 1.035f_y + 163.443. \tag{2}$$
$$\varepsilon_A = 22.161\varepsilon_y + 0.001d - 0.04. \tag{3}$$
$$\varepsilon_B = 28.224\varepsilon_y - 0.026. \tag{4}$$
$$\varepsilon_C = 82.349\varepsilon_y - 0.033. \tag{5}$$

式中: $\sigma_A(\varepsilon_A)$ 、 $\sigma_B(\varepsilon_B)$ 分别为屈服平台起始点、结束点处的应力(应变); $\sigma_C(\varepsilon_C)$ 为极限应力(应变); $f_y$ 、 $\varepsilon_y$ 为钢筋屈服应力、应变; $d$ 为连接钢筋的直径。

2 滞回本构模型构建

R. W. Clough<sup>[13]</sup>提出了一种带有加载刚

度退化的“双折线”滞回模型,纵轴为应力,横轴为应变(见图3)。其滞回规则为在加载曲线卸载后,反向再加载时,若试件已经屈服,曲线则指向该方向加载历史的最大应变点;若试件未屈服,再加载曲线则指向屈服点。

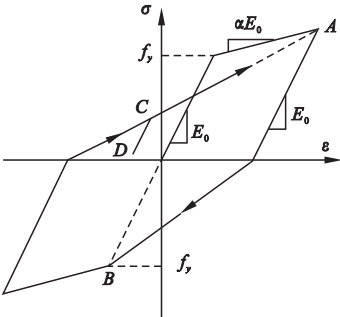


图3 Clough 滞回本构模型

Fig.3 Clough lags back to the constitutive model

冷挤压套筒连接件是由钢制的套筒与连接钢筋通过冷挤压工艺产生咬合力后形成的一个钢筋应力传递媒介,形成冷挤压套筒连接件的材料均为钢材,故其滞回本构也遵循Clough滞回规则,结合该规则和冷挤压套筒连接件的“三折线”等效本构模型,推导出的冷挤压套筒连接件的滞回本构模型如图4所示。

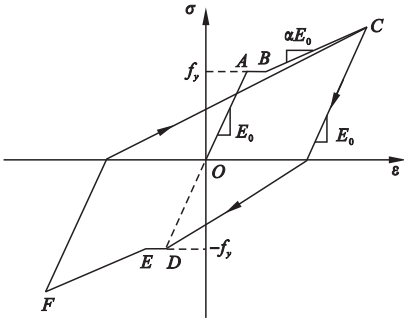


图4 冷挤压套筒连接件滞回本构模型

Fig.4 Cold extrusion sleeve connectors are stuck back to the constitutive model

3 有限元模型验证

3.1 模型及参数选取

以许明智<sup>[15]</sup>试验中的3个冷挤压套筒连接装配式剪力墙试件W2-0.26-1.35、W-0.44-1.35、W3-0.44-1.13b为验证模型,建

立精细化有限元模型进行对比,预制墙体与地梁伸出钢筋通过冷挤压套筒进行连接,该连接方式需要预留足够的施工空间供予冷挤压器械对套筒连接件进行加工处理,冷挤压套筒加工完成后在预留空间中浇筑混凝土。试件 W2-0.26-1.35、W-0.44-1.35、W3-0.44-1.13b 的轴压比分别为 0.26、0.44、0.44,剪跨比分别为 1.35、1.35、1.13,其中 W3-0.44-1.13b 与前两个试件相比竖向构件墙体宽度每边增加了 120 mm,墙体高度不变。预制构件混凝土设计强度等级为 C35,后浇区混凝土设计强度等级为 C45,剪力墙体内所用钢筋均为 HRB400,箍筋均为 HPB300,W2-0.26-1.35 试件参数如图 5 所示。

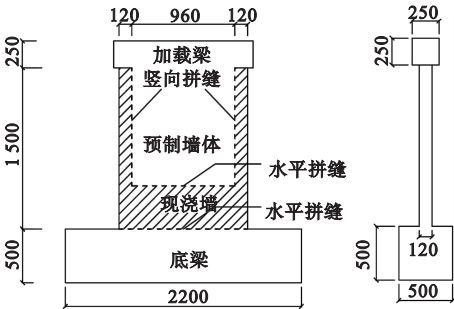


图 5 W2-0.26-1.35 试件参数

Fig. 5 W2-0.26-1.35 specimen parameter diagram

3.2 精细有限元建模

3.2.1 精细有限元建模

混凝土模型使用 ABAQUS 自带的混凝土塑性损伤模型,采用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[16]</sup>中规定的混凝土应力-应变本构作为混凝土墙体本构,为考虑边缘构件处箍筋对混凝土强度的约束作用,采用 Mander 本构<sup>[17]</sup>作为试件边缘构件处的混凝土本构。为反映钢筋与混凝土间的相互作用以及钢筋在低周往复作用下的加卸载特性,以 R. W. Clough<sup>[13]</sup>提出的钢筋双线性滞回模型为依据,利用 Fortran 语言编写 UMAT 钢筋子程序作为钢筋的滞回本构(见图 3)。以图 4 中冷挤压套筒连接件的应力-应变“三折线”滞回本构模型为依据,采用 Fortran 语言编写 UMAT 冷挤压套筒连接件的材料子

程序作为文中冷挤压套筒连接件的应力-应变滞回本构模型。

3.2.2 新旧混凝土结合面的模拟

文献[18]研究表明,新旧混凝土的粘结作用主要是由后浇混凝土水泥浆水化作用产生的粘结力、钢筋与水泥砂浆之间的粘结力、骨料间的机械咬合力组成。其受力情况与整浇混凝土不同,笔者采用 ABAQUS 中的 Spring2 弹簧单元模拟先后浇混凝土界面的接触(见图 6)。弹簧的本构采用范亮<sup>[19]</sup>建立的先后浇混凝土界面抗剪强度公式进行计算:

$$\tau_u = 0.114\Delta \cdot f_{td} + \frac{1}{L}2.464 \times \Delta E_s \mu_s f_{td} + 0.013\mu_s \lambda_{coi}^2 \quad (6)$$

式中: $f_{td}$ 为先后浇混凝土抗拉强度中的较小值; $\Delta$ 为先后浇界面的粗糙度; $L$ 为钢筋长度; $E_s$ 为横穿交接界面钢筋的弹性模量; $\mu_s$ 为横穿交接界面钢筋的有效配筋率; $\lambda_{coi}$ 为构件的侧限参数。

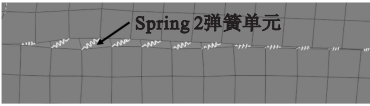


图 6 Spring2 弹簧单元

Fig. 6 Spring2 element

3.2.3 单元选择

套筒的连接方式如图 7 所示。

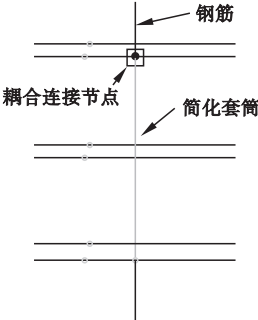


图 7 套筒连接方式

Fig. 7 Sleeve connection method

混凝土采用 C3D8R 实体单元,钢筋采用 T3D2 桁架单元,由于文献[15]已验证了冷挤压套筒连接件的可靠连接性,故在有限

元模型中将其简化 T3D2 桁架单元,该桁架单元与冷挤压套筒等长,连接钢筋通过点与点的耦合作用与冷挤压套筒桁架单元相连(见图 7)。精细有限元模型如图 8 所示。

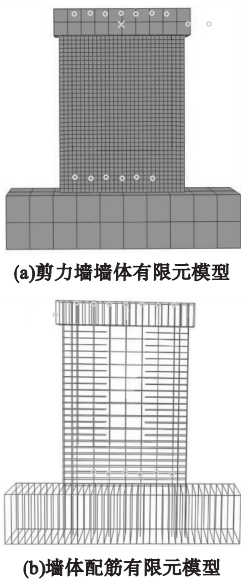


图 8 剪力墙精细有限元模型

Fig. 8 Fine finite element model of a shear wall

4 计算结果与分析

4.1 试验现象

在荷载作用初期,装配式墙体能从左上

角到右下角有效传递应力,其中墙体后浇带底部所受应力最大(见图 9(a));墙体破坏时,脚部混凝土压碎,边缘构件处钢筋屈服(见图 9(b))。试件在低周往复荷载作用下发生压弯破坏,与试验所述的破坏特征相同(见图 10),有限元模型可以以构件损伤的形式模拟出裂纹发展的情况。

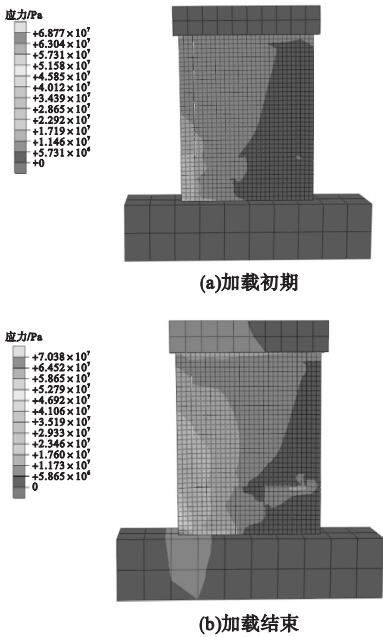
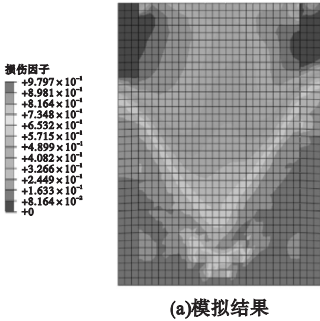
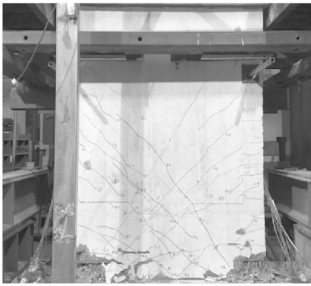


图 9 有限元模拟应力图

Fig. 9 Finite element simulation stress diagram



(a)模拟结果



(b)试验结果

图 10 有限元模拟损伤云图

Fig. 10 Finite element simulated damage plot

4.2 承载力与延性

冷挤压套筒连接装配式混凝土剪力墙的骨架曲线对比结果如图 11 所示。从图中可以看出,三个试件在加载至峰值荷载前的试验骨架曲线基本和有限元模型基本重合,说

明采用笔者提出的有限元模拟方法可以较好地模拟试件的初始刚度和峰值荷载;但在有限元模拟中为简化建模、高运算效率,采用各项同性材料进行模拟,故与各项异性的混凝土材料特性相比略有出入,也较难模拟各向



异性材料的性能失效。从图 11 还可以得出, 曲线下降段与实际结果间存在一定的差距, 笔者选取骨架曲线的三个荷载特征值—屈服荷载、峰值荷载、极限荷载进行误差分析, 对比结果见表 1。从表中可以得出, 模拟结果与试验结果误差均在 6.77% 以内, 拟合效果良好。部分试件的骨架曲线的位移特征值和延性系数对比见表 2、表 3、表 4, 从表中可以得出, 模拟结果与试验结果误差均小于 10%, 故有限元模型可以较好地表征结构的延性性能。

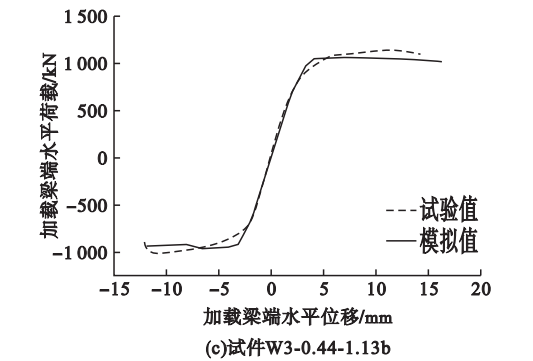
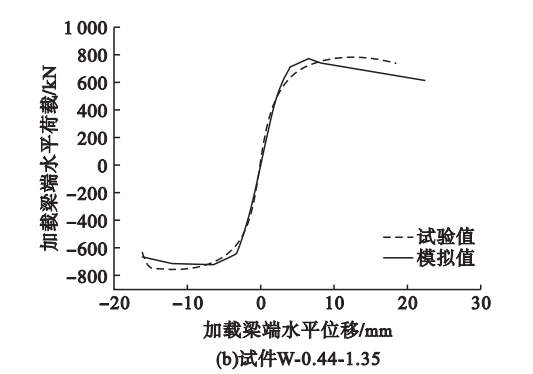
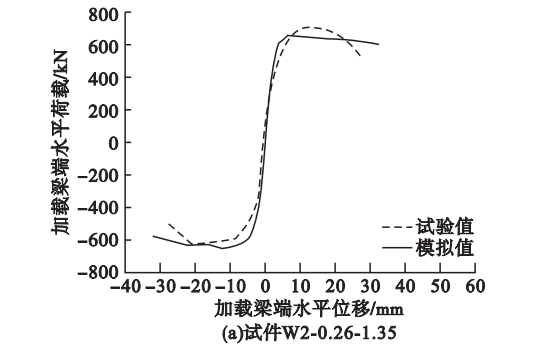


图 11 骨架曲线对比结果

Fig. 11 Comparison results of the skeleton curves

表 1 承载力对比结果

试件	屈服荷载			峰值荷载			极限荷载		
	试验值/ kN	模拟值/ kN	误差/ %	试验值/ kN	模拟值/ kN	误差/ %	试验值/ kN	模拟值/ kN	误差/ %
W2-0.26-1.35(+)	524.31	543.07	3.45	709.99	661.88	6.77	603.49	604.16	0.11
W2-0.26-1.35(-)	-521.34	-533.96	2.36	-626.34	-653.76	4.19	-540.95	-576.81	6.22
W-0.44-1.35(+)	602.15	589.70	2.07	786.91	770.59	2.07	715.52	700.53	2.09
W-0.44-1.35(-)	-612.90	-642.70	4.64	-754.83	-720.85	4.50	-632.52	-663.95	4.73
W3-0.44-1.13b(+)	1 036.22	974.31	5.97	1 147.75	1 069.47	6.82	1 087.72	1 022.23	6.02
W3-0.44-1.13b(-)	-774.55	-747.91	3.44	-1 026.77	-964.98	6.02	-903.76	-944.38	4.30

注:试件“+”表示该试件正向骨架曲线的承载力参数情况,符号“-”表示该试件负向骨架曲线的承载力参数情况。

表 2 试件 W-0.44-1.35 正向骨架曲线对比结果

屈服位移			极限位移			延性系数		
试验值/mm	模拟值/mm	误差/%	试验值/mm	模拟值/mm	误差/%	试验值	模拟值	误差/%
3.70	3.64	1.62	19.93	17.98	9.78	5.39	4.94	8.30

表 3 试件 W-0.44-1.35 负向骨架曲线对比结果

屈服位移			极限位移			延性系数		
试验值/mm	模拟值/mm	误差/%	试验值/mm	模拟值/mm	误差/%	试验值	模拟值	误差/%
-3.60	-3.43	4.72	-16.15	-16.25	0.62	4.49	4.74	5.31

表4 试件 W3-0.44-1.13b 负向骨架曲线对比结果

屈服位移			极限位移			延性系数		
试验值/mm	模拟值/mm	误差/%	试验值/mm	模拟值/mm	误差/%	试验值	模拟值	误差/%
-3.60	-3.43	4.72	-16.15	-16.25	0.62	4.49	4.74	5.31

4.3 荷载-位移滞回曲线

冷挤压套筒连接装配式钢筋混凝土剪力墙的滞回曲线对比结果如图 12 所示,模拟滞回环面积与试验滞回环面积的对比结果见表 5,表中  $\theta$  表示试验的加载位移角。从表中可知,模拟滞回环与试验滞回环的面积误差均小于 14%,且在加载末期滞回环出现了“捏缩现象”。

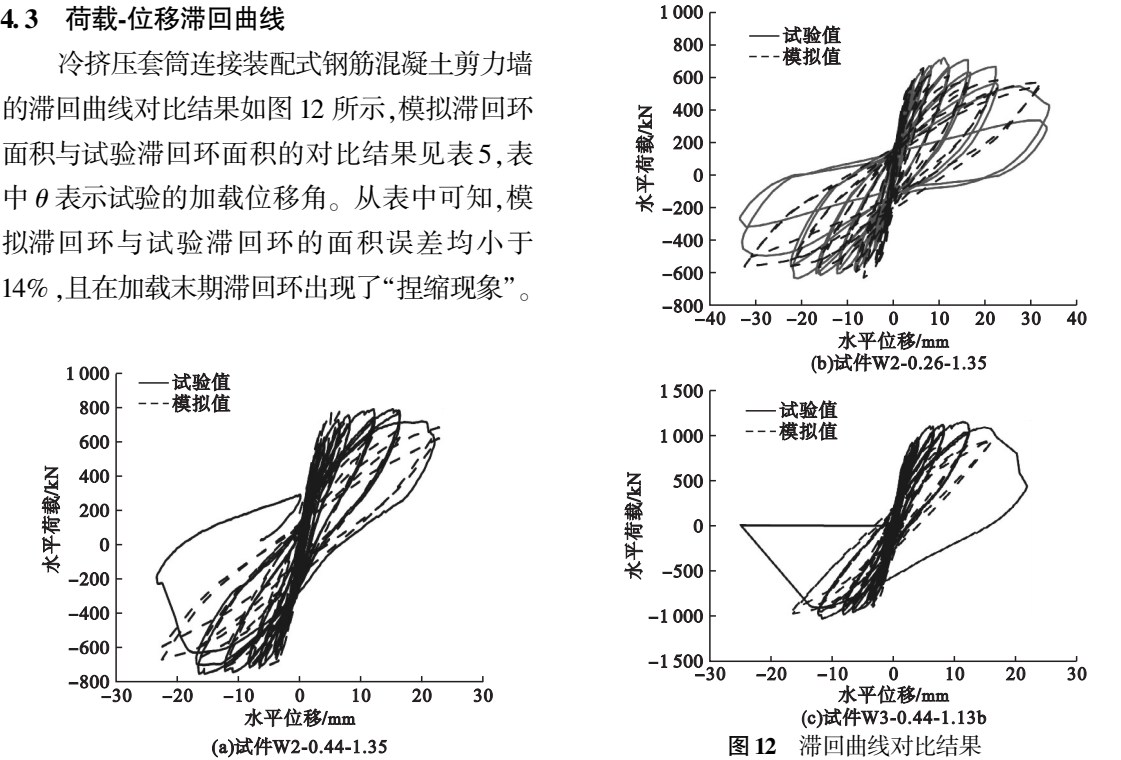


图 12 滞回曲线对比结果

Fig. 12 Hysteresis curves comparison results

表5 耗能能力对比结果

试件	$\theta=1/500$ 时滞回环面积			$\theta=1/400$ 时滞回环面积			$\theta=1/250$ 时滞回环面积		
	试验值	模拟值	误差/%	试验值	模拟值	误差/%	试验值	模拟值	误差/%
W2-0.26-1.35(+)	524.31	543.07	3.45	709.99	661.88	6.77	603.49	604.16	0.11
W2-0.26-1.35	36.29	40.06	9.41	48.66	50.38	3.41	89.32	97.23	8.14
W-0.44-1.35	47.17	46.79	0.81	56.99	58.82	3.11	127.67	129.32	1.28
W3-0.44-1.13b	52.01	45.11	13.48	100.47	88.37	12.04	157.12	155.9	0.78

5 结 论

- (1)冷挤压套筒连接件的应力与连接钢筋的屈服强度显著相关,应变与钢筋的屈服应变以及钢筋的直径显著相关。
- (2)有限元模型的应力分布情况、裂缝分布情况、试件的破坏模式、破坏时的应变分布情况与试验结果基本相同;有限元模型与

- 试验试件在正负向加载过程中的屈服荷载、峰值荷载、极限荷载模拟误差均小于 7%,其中滞回环的包络面积误差均在 14% 以内,表明有限元模型拟合良好。
- (3)采用 TRUSS 桁架单元模拟套筒连接件,在一定程度上简化了模拟难度,节省了计算时间,规避了由于存在较为繁琐的接触而存在的不收敛情况,具有一定的适用性。

## 参考文献

- [1] 方强,邱洪兴,孙建,等.有限滑动螺栓连接装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(4):559-565.  
(FANG Qiang, QIU Hongxing, SUN Jian, et al. Experimental study on seismic performance of prefabricated concrete shear wall with limited sliding bolted connection [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2021, 51(4): 559-565.)
- [2] 吴宏伟.钢板及螺栓连接装配式混凝土剪力墙结构抗震性能研究[D].广州:华南理工大学,2020.  
(WU Hongwei. Study on seismic performance of steel plate and bolted prefabricated concrete shear wall structure [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.)
- [3] 赵均海,胡壹,张冬芳.装配式复式钢管混凝土框架-梁端螺栓连接钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(7):109-118.  
(ZHAO Junhai, HU Yi, ZHANG Dongfang. Experimental study on seismic performance of reinforced concrete shear wall of prefabricated compound steel pipe concrete frame-beam end bolted connection [J]. Journal of building structures, 2021, 42(7): 109-118.)
- [4] SAYADI A A, RAHMAN A B. The relationship between interlocking mechanism and bond strength in elastic and inelastic segment of splice sleeve [J]. Construction and building materials, 2014, 55: 227-237.
- [5] ALIAS A, SAPAWI F, KUSBIANTORO A. Performance of grouted splice sleeve connector under tensile load [J]. Journal of mechanical engineering and sciences, 2014, 7: 1094-1102.
- [6] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction [J]. Engineering structures, 2015, 83: 154-162.
- [7] TULLINI N, MINGHINI F. Grouted sleeve connections used in precast reinforced concrete construction-experimental investigation of a column-to-column joint [J]. Engineering structures, 2016, 127: 784-803.
- [8] NAM S S, KIM S K. Tensile strength of the grout-filled head-splice-sleeve [J]. Construction and building materials, 2016, 124: 155-166.
- [9] 黎立.预制装配式混凝土结构钢筋约束浆锚连接有限元分析[D].西安:长安大学,2017.  
(LI Li. Finite element analysis of reinforced slurry anchor connection of prefabricated concrete structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.)
- [10] 李然,田春雨,马云飞.竖向接缝钢锚环灌浆连接装配式多层剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(增刊2):123-132.  
(LI Ran, TIAN Chunyu, MA Yunfei. Experimental study on seismic performance of vertical seam steel anchor ring grouting connection prefabricated multilayer shear wall [J]. Journal of building structures, 2020, 41(S2): 123-132.)
- [11] 李威威,潘一君,王曙光,等.灌浆缺陷影响下装配式混凝土框架抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(7):123-130.  
(LI Weiwei, PAN Yijun, WANG Shuguang, et al. Experimental study on seismic performance of prefabricated concrete frame structure considering grouting defects [J]. Journal of building structures, 2022, 43(7): 123-130.)
- [12] 王远哲.灌浆套筒连接装配式钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D].广州:华南理工大学,2020.  
(WANG Yuanzhe. Experimental study on seismic performance of grouting sleeve connected assembled reinforced concrete shear wall [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.)
- [13] CLOUGH R W. Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements [C]. Proceedings of Japan earthquake engineering symposium. Japan: [s. n.], 1966.
- [14] 江少昆.竖向钢筋挤压套筒连接装配式剪力墙抗震性能研究[D].广州:华南理工大学,2021.  
(JIANG Shaokun. Study on seismic performance of vertical steel extrusion sleeve connection assembly shear wall [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.)
- [15] 许明智.冷挤压套筒连接装配式混凝土剪力墙结构抗震性能研究[D].广州:华南理工大学,2020.  
(XU Zhiming. Study on seismic performance of cold extrusion sleeve connected assembled concrete shear wall structure [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.)
- [16] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范:GB50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.  
(China Academy of Building Research. Concrete structure design code: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.)
- [17] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of structural engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [18] 侯小磊.带施工缝框架结构抗震性能的有限元分析[D].天津:河北工业大学,2014.  
(HOU Xiaolei. Finite element analysis of seismic performance of frame structure with construction joints [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.)
- [19] 范亮.先后浇混凝土界面抗剪性能研究[D].重庆:重庆交通学院,2004.  
(FAN Liang. Study on shear resistance of successively poured concrete interface [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)