



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401349

引用格式:吕俊强,李振宝,杨贝贝,等.适于双钢板组合剪力墙水平连接的承插式方形半灌浆套筒抗拉性能[J].科学技术与工程,2025,25(4):1595-1601.

Lü Junqiang, Li Zhenbao, Yang Beibei, et al. Tensile performance of a socket grouted sleeve suitable for horizontal joints in double skin composite shear walls[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1595-1601.

建筑科学

适于双钢板组合剪力墙水平连接的承插式 方形半灌浆套筒抗拉性能

吕俊强,李振宝*,杨贝贝,唐贞云

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100124)

摘要 使用双钢板组合剪力墙作为建筑主要抗侧力构件时,墙体水平连接至关重要,而目前用于该墙体的主要水平连接方式还是传统的螺栓连接和焊接,这在施工上具有较大的不便性,且未能充分发挥该墙体的结构优势。根据这种墙体的结构特点,设计一种新型的上下层墙体水平缝连接节点,承插式方形半灌浆套筒连接,利用有限元模拟探究钢筋直径、套筒长度、灌浆料强度和套筒形式对该新型连接节点抗拉性能的影响。结果表明:该节点能较好地连接双钢板组合剪力墙的水平拼缝,具有施工便捷、性能可靠的优点,且节点破坏主要发生在连接钢筋上,能够使装配式双钢板组合剪力墙实现“等同现浇”的目标。

关键词 双钢板组合剪力墙;水平缝;套筒连接;有限元分析

中图分类号 TU398; 文献标志码 A

Tensile Performance of a Socket Grouted Sleeve Suitable for Horizontal Joints in Double Skin Composite Shear Walls

LÜ Jun-qiang, LI Zhen-bao*, YANG Bei-bei, TANG Zhen-yun

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

[Abstract] When utilizing double skin composite shear walls as the primary components for resisting lateral forces in buildings, it is crucial to ensure proper horizontal connection of the walls. Currently, traditional bolt connections and welding are the main methods used for horizontal connection of these walls. However, these methods present significant challenges during construction and do not fully exploit the structural advantages of the wall. Based on the structural characteristics of this type of wall, a new type of horizontal joint connection node was designed for the upper and lower layers of the wall. This new design featured a socket-type square semi-grouted sleeve connection. The influence of steel bar diameter, sleeve length, grouting material strength, and sleeve form on the tensile performance of this new connection node was explored using finite element simulation. The results indicate that this new node effectively connects the horizontal joints of double skin composite shear walls with several advantages including convenient construction and reliable performance. Furthermore, it is observed that failure mainly occurs on connecting steel bars which achieves an “equivalent cast-in-place” goal for prefabricated double skin composite shear walls.

[Keywords] double skin composite shear wall; horizontal joint; sleeve connection; finite element analysis

双钢板混凝土组合剪力墙作为组合剪力墙的一种结构形式,能有效结合钢与混凝土的性能特点,与钢筋混凝土剪力墙相比,其承载能力、耗能能力及延性都有所提高,同时具有施工简便、相对经济、自重较轻的优势^[1]。近年来,众多学者针对其

力学性能和结构形式开展了大量研究。盖彤彤等^[2]对圆管支撑钢板仓组合剪力墙的抗震性能进行有限元分析,得到剪力墙的承载能力、变形能力与钢板强度、厚度,以及混凝土强度、轴压比等参数之间的关系,并对墙体的抗剪承载力计算公式进行

收稿日期:2024-02-29; 修订日期:2024-11-19

基金项目:国家自然科学基金(51978014)

第一作者:吕俊强(1998—),男,汉族,河南周口人,硕士研究生。研究方向:防灾减灾工程及防护工程。E-mail:junqiang@emails.bjut.edu.cn。

*通信作者:李振宝(1962—),男,汉族,山东济宁人,博士,教授。研究方向:结构与工程抗震。E-mail:lizb@biut.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

修正。文献[3-4]对使用哑铃型拉结件的双钢板组合剪力墙的抗震性能和“墙梁”连接节点进行了试验研究,并提出了墙体的抗弯承载力计算公式,结果表明:双钢板组合剪力墙具有较高的承载力,墙体的破坏模式主要是外部钢板的局部屈曲和内部混凝土压碎。

虽然双钢板组合剪力墙在高层及超高层建筑中的性能优越,但该结构存在构件尺寸大、运输和加工困难等缺点^[5],因此有学者以墙体的拼缝连接为对象展开了研究。文献[6-8]研究了螺栓连接下,不同水平缝和竖向缝连接的双钢板组合剪力墙的抗震性能,并分析了不同参数对一字形水平缝墙体抗震性能的影响,结果表明:水平缝的形状对墙体力学性能无明显影响,而不同的水平缝连接方式对墙体的承载能力、变形能力和刚度均有影响。朱峰岐等^[9]结合螺栓连接、焊接和后灌浆工艺,设计了一种适用于双钢板组合剪力墙的承插式水平缝连接节点,介绍了使用该节点时墙体的施工流程,并对连接节点进行有限元分析,结果表明:所设计的连接节点可有效连接组合墙体的水平缝。

为了提升施工便宜性,避免现场焊接和螺栓连接,并充分发挥双钢板组合剪力墙的结构优势,在以往研究的基础上,提出一种新型的承插式方形半灌浆套筒连接方式。因剪力墙承受水平荷载时,该连接节点所受的竖向拉力是其受力薄弱环节,因此对不同参数下该连接节点的抗拉性能进行分析。研究成果可为实际工程应用提供理论依据和技术支持。

1 承插式方形半灌浆套筒节点构造

双钢板组合剪力墙是由外侧钢板和内部的混凝土构成,其中钢板为主要的抗侧力构件,混凝土为主要承压构件。针对这种结构特点,提出一种承插式方形半灌浆套筒连接的水平缝连接方式,图1(a)为墙体钢板预处理后的示意图,措施是将垫板焊接到钢板下部(装配时起到定位和限位的作用),连接钢筋焊接在垫板上,方形套筒焊接在钢板上部。图1(b)为墙体钢构件部分的示意图,两侧钢板可使用拉结件进行连接,能在浇筑内部混凝土时充当模板。图1(c)为上下层墙体通过方形半灌浆套筒连接示意图,施工时,在下层剪力墙浇筑混凝土后,向其套筒内加入灌浆料,之后通过吊装的形式将上层组合剪力墙的连接钢筋插入方形套筒内。拼装完成后,再进行上层墙体混凝土的浇筑,以此类推,直至完成整个建筑剪力墙水平缝的连接。承插式方形半灌浆套筒连接节点如图1(d)所示,该节点由4部分构成,分别是套筒、垫板、连接钢筋和灌浆料。因连接钢筋上端通过焊接连接到垫板上,只有下端是通过浆锚形式与套筒连接,因此称为半灌浆套筒连接。又因为与传统的灌浆套筒先连接后注浆不同,该连接方式是先灌浆后插入,因此称为承插式连接。该节点中垫板可传递连接钢筋与上层钢板之间的相互作用,并在装配时调节和固定连接钢筋的位置,保证拼装时连接钢筋能够插入套筒的正中央和灌浆料初凝前剪力墙钢板不移动。

由文献[10]可知,影响套筒锚固性能的因素有

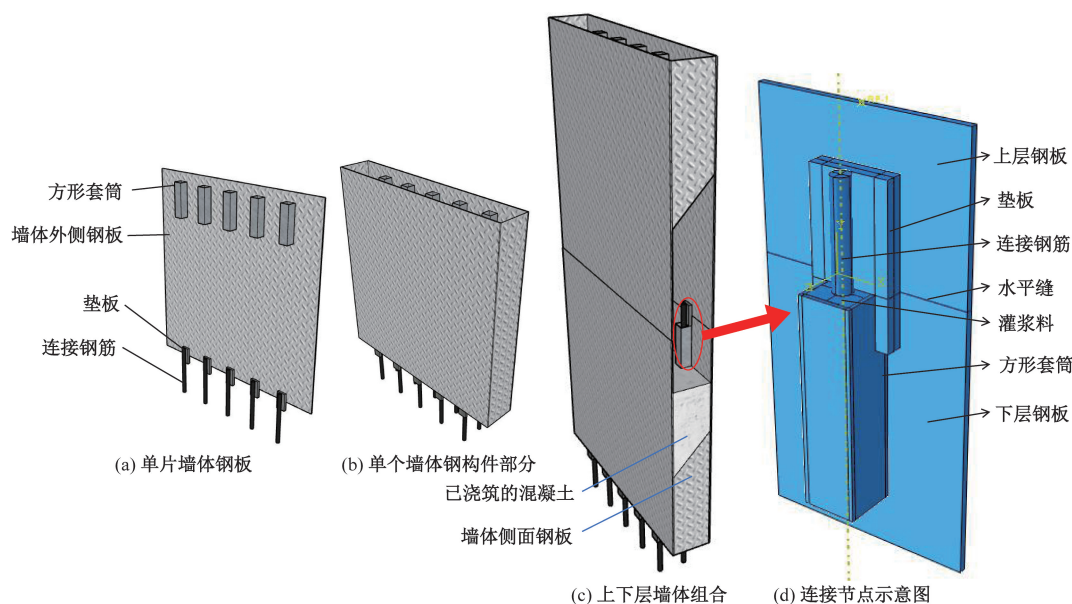


图1 承插式方形半灌浆套筒连接组合剪力墙水平拼缝示意图

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal joint of composite shear wall connected by socket type square semi grouting sleeve

套筒壁厚度、锚固长度、套筒内直径大小、灌浆料的材料性能、套筒内壁形式、受力钢筋表面粗糙度等。在此基础上,考虑到套筒与钢板连接的难易程度,将传统的圆形套筒改为方形套筒,并探究方形与梯形的套筒形式对连接性能的影响。

2 承插式方形半灌浆套筒有限元模拟方法

2.1 模型设计

考虑到承插式方形半灌浆套筒连接为一种新型的连接方式,单个连接节点的连接强度未知,因此取出单个节点,如图 2 所示,利用 ABAQUS 有限元软件进行分析。

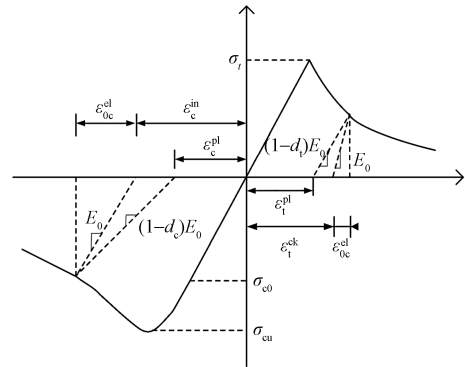
依据钢结构规范要求,为保证构件有足够的净截面面积,不使板件被拉断,节点模型上层钢板取宽 160 mm、高 120 mm 的部分,下层钢板取宽 160 mm、高 200 mm 的部分。方形套筒的边长 40 mm×40 mm,高度为 160 mm,厚度为 3 mm。因方形套筒中心距剪力墙钢板的距离为 20 mm,所以在保证装配时连接钢筋能够插入方形套筒正中央的条件下,连接钢筋的半径与垫板厚度之和为 20 mm。标准试件中钢筋直径为 14 mm,垫板厚度为 13 mm。

2.2 模型验证

2.2.1 材料本构关系

灌浆套筒中所用的灌浆料具有微膨胀性,结合灌浆料的粘接作用,使得灌浆料与套筒和连接钢筋之间能够相互挤压,因此当连接钢筋受拉时,灌浆料会受到剪切力和双向侧压力,工程中常用的灌浆料强度通常在 80 MPa 以上,而现有规范给出的本构模型只适用于强度在 80 MPa 以下的混凝土,当强度

超过 80 MPa 时,规范中的损伤参数变为负值,无法应用于 ABAQUS 中的塑性损伤模型。根据文献[11],得到适用于灌浆料的本构模型,如图 3 所示。



σ_t, σ_{cu} 分别为峰值拉、压应力; σ_{e0} 为初始屈服应力; ϵ_c^{in} 为非弹性应变; $\epsilon_{oc}^{el}, \epsilon_{ot}^{el}$ 受拉和受压弹性应变; $\epsilon_c^{pl}, \epsilon_t^{pl}$ 分别为受压和受拉塑性应变; ϵ_t^{ck} 为受拉开裂应变; d_t, d_c 分别为受拉和受压损伤系数; E_0 为初始弹性模量

图 3 灌浆料本构关系曲线

Fig. 3 Constitutive relationship curve of grouting material

如图 4 所示,为了充分考虑钢材的包兴格效应及屈服、硬化与软化特性,连接钢筋采用 Esmaeily-Xiao 本构模型,套筒和剪力墙钢板材料本构关系选择双斜线模型[11]。

2.2.2 本构关系验证

如图 5 所示,根据刘轩[10]对方形和圆形钢管套筒连接性能的研究,分别选取不同钢筋直径下,套筒长度为 315 mm 的方形灌浆套筒试验试件进行有限元模拟。有限元模拟结果与试验结果对比如图 6 所示,可以看出,有限元模型可以较好地模拟承载力、刚度,以及连接节点屈曲后承载力的退化现象,

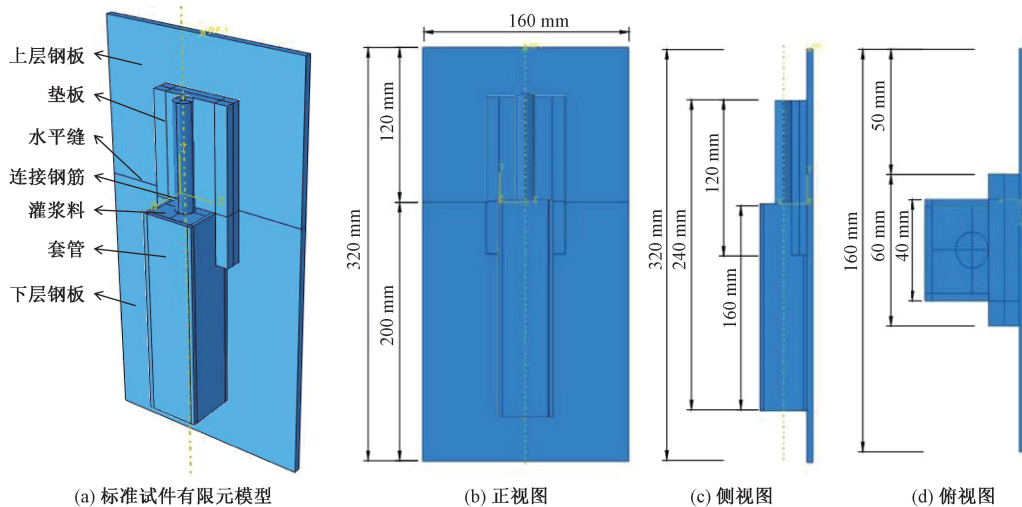
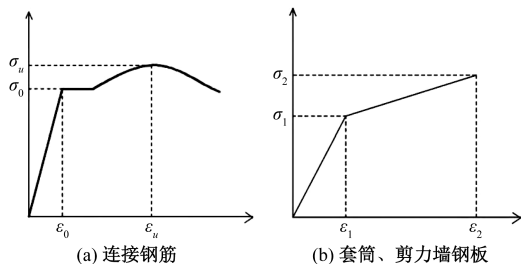


图 2 承插式方形半灌浆套筒连接节点设计

Fig. 2 Design of socket type square semi grouted sleeve connection node



σ_u, σ_2 分别为钢筋、套筒的极限应力; σ_0, σ_1 分别为钢筋、套筒的屈服应力; ϵ_0, ϵ_1 分别为钢筋、套筒的弹性应变; ϵ_u, ϵ_2 分别为钢筋、套筒的极限应变

图4 钢材本构关系曲线

Fig. 4 Constitutive relationship curve of steels

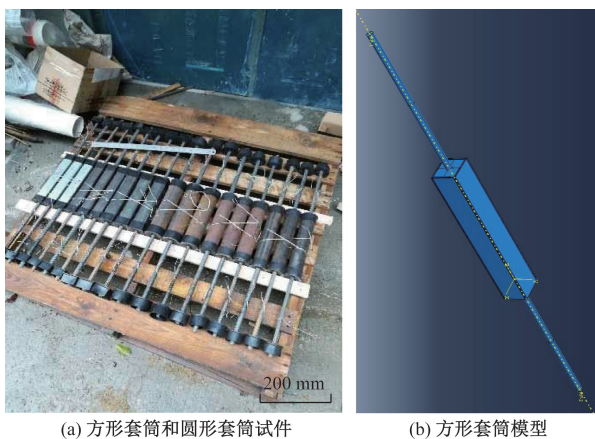


图5 试验试件及有限元模型图

Fig. 5 Test specimen and finite element model diagram

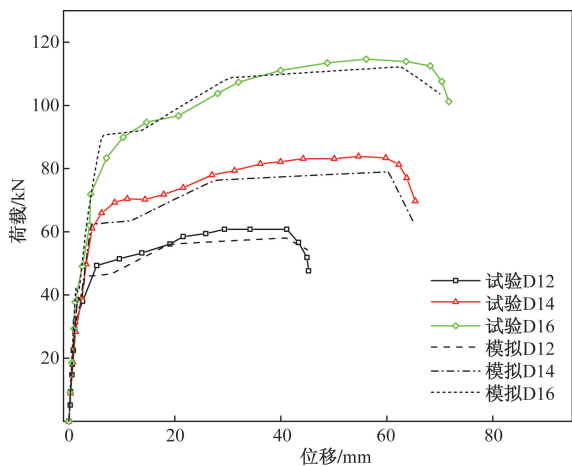


图6 荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of Load Displacement Curve

说明本文有限元建模方法有效。

并且由试验及有限元结果可知,连接节点的破坏均发生在连接钢筋上,说明可以通过对节点某些参数的设计,使节点强度与连接钢筋强度一致,进而实现承插式方形半灌浆套筒连接下装配式组合剪力墙等同现浇的目标。

3 承插式方形半灌浆套筒抗拉性能分析

对于灌浆套筒连接来说,抗拉性能是其受力薄弱环节,因此采用规范中给出的材料强度及上述材料本构模型,研究钢筋直径、套筒长度、灌浆料强度及套筒形状对承插式方形半灌浆套筒抗拉性能的影响。各试件信息如表1所示。

表1 试件基本信息

Table 1 Basic information of specimens

试件编号	钢筋直径 /mm	套筒长度 /mm	灌浆料强度 /MPa	套筒形状
JD-D1	12	160	80	方形
JD-D2	14	160	80	方形
JD-D3	16	160	80	方形
JD-T1	14	160	80	方形
JD-T2	14	200	80	方形
JD-T3	14	240	80	方形
JD-C1	14	200	60	方形
JD-C2	14	200	80	方形
JD-C3	14	200	100	方形
JD-X1	14	160	60	方形
JD-X2	14	160	60	梯形

3.1 模拟结果与分析

3.1.1 钢筋直径对承插式方形半灌浆套筒抗拉性能的影响

在轴向拉力作用下,节点的荷载-位移曲线如图7所示。图8为连接节点破坏时连接钢筋的Mises应力云图。随着钢筋直径的增加,承插式方形半灌浆套筒连接节点的极限强度不断增加,而屈服强度基本一致,说明增大连接钢筋的直径能有效提高连接节点的极限强度。当连接钢筋的直径是16 mm时,极限强度是直径14 mm的1.3倍,是直径12 mm

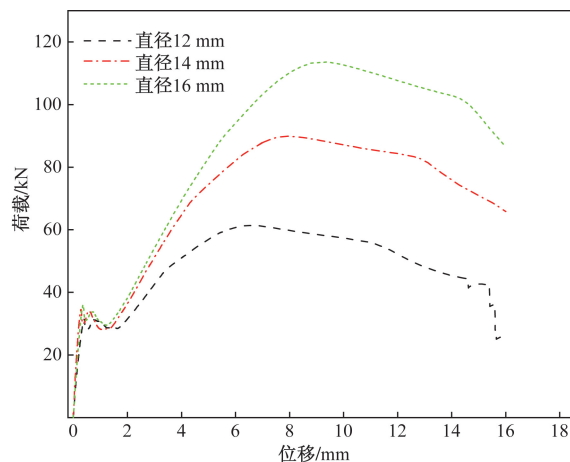


图7 连接钢筋直径不同时节点荷载-位移曲线

Fig. 7 Load displacement curve of nodes with different diameters of connecting steel bars

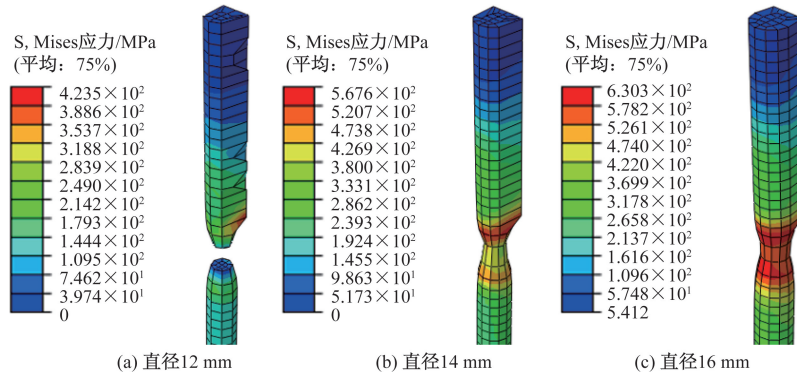


图8 连接钢筋 Mises 云图

Fig. 8 Mises cloud map of connecting steel bars

的1.9倍。当位移达到14.62 mm时,直径为12 mm的连接钢筋发生断裂;直径为14 mm和16 mm的连接钢筋均未发生断裂。

3.1.2 套筒长度对承插式方形半灌浆套筒抗拉性能的影响

在轴向拉力作用下,节点的荷载-位移曲线如图9所示,随着套筒长度即锚固长度的增加,承插式方形半灌浆套筒连接节点的屈服强度不断增加,而极限强度基本一致,说明增加套筒长度可提高连接节点的屈服强度。套筒长度为240 mm的连接节点,屈服强度是长度为200 mm的1.1倍,是长度为160 mm的1.4倍,说明在套筒长度为200 mm的基础上减小套筒长度,对节点屈服强度影响较为明显。

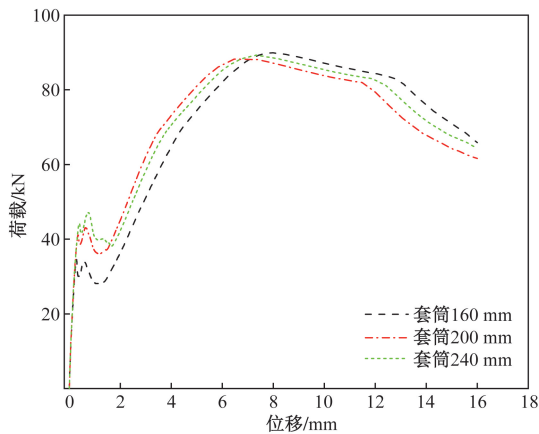


图9 套筒长度不同时节点荷载-位移曲线

Fig. 9 Load displacement curve of nodes with different sleeve lengths

3.1.3 灌浆料强度对承插式方形半灌浆套筒抗拉性能的影响

在轴向拉力作用下,连接节点的荷载-位移曲线如图10所示,当灌浆料的强度为60~80 MPa时,灌浆料强度对连接节点的屈服强度和极限强度均有影响,但都较小。主要表现为灌浆料强度越大屈服

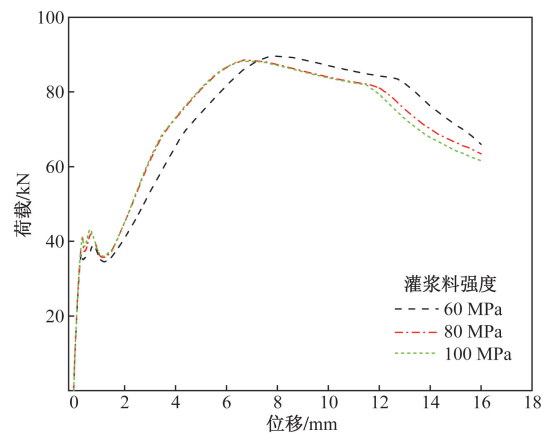


图10 灌浆料强度不同时节点荷载-位移曲线

Fig. 10 Load displacement curve of nodes with different strength of grouting materials

强度越高,极限强度会较早出现,即连接节点的延性有所下降。当灌浆料的强度为80~100 MPa时,灌浆料强度变化对连接节点的影响几乎一致,说明此时改变灌浆料强度已无法提高连接节点的性能。

3.1.4 套筒形状对承插式方形半灌浆套筒抗拉性能的影响

为探究套筒形状对承插式半灌浆套筒连接强度的影响,在方形套筒的基础上,建立了梯形套筒连接试件,设计原则是保证其与方形套筒所能灌入的灌浆料总量相同,为保证连接钢筋顺利插入,上端开口为30 mm x 40 mm,则下端尺寸为50 mm x 40 mm。

在轴向拉力作用下,连接节点的荷载-位移曲线如图11所示,可见套筒形式的改变对连接节点屈服强度和极限强度都有影响。当连接套筒由方形改变为梯形时,连接节点的屈服强度降低而极限强度提高。图12为连接节点破坏时套筒的Mises应力云图。

3.2 连接节点屈服阶段分析

模拟中采用的钢筋型号为 HRB400, 屈服强度为 400 MPa, 而实际加载时, 荷载在 40 kN 时, 连接节点发生屈服, 此时换算到钢筋上的应力约为 260 MPa, 与屈服强度标准值差距较大。对此, 以钢筋直径 14 mm、套筒长度 200 mm 的试件为例, 对连接节点的屈服阶段进行分析。

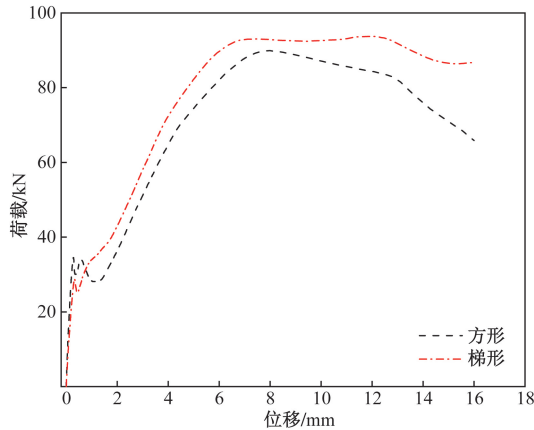


图 11 套筒形状不同时节点荷载-位移曲线
Fig. 11 Load displacement curve of nodes with different sleeve shapes

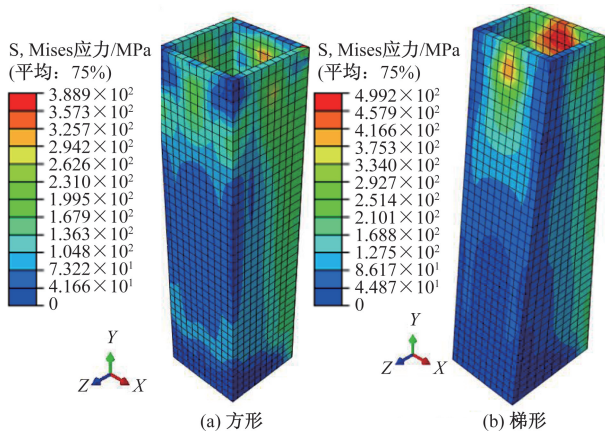


图 12 套筒的 Mises 应力云图
Fig. 12 Mises stress cloud map of the sleeve

如图 13 所示, 在试件的荷载位移曲线上, 将屈服阶段的拐点标记为 1~4, 并将每个拐点下连接节点的应力云图调出, 逐步进行分析。

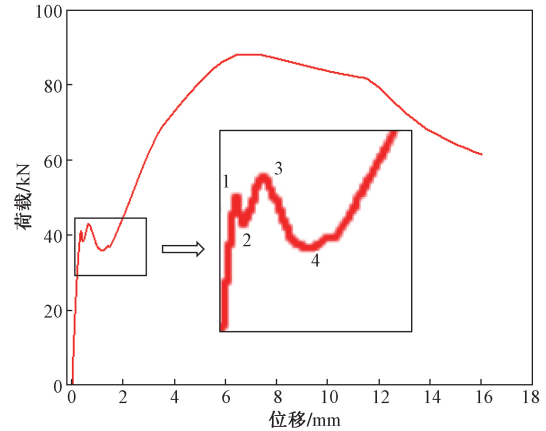


图 13 屈服阶段曲线拐点分布图
Fig. 13 Distribution of inflection points in the yield stage curve

分析图 14(a)、图 14(b) 可知, 拐点 1 时, 连接钢筋的局部达到了屈服, 而拐点 2 时, 屈服部分基本消失, 即由拐点 1 到拐点 2 的过程中, 连接钢筋局部屈服, 位移增大的情况下承载力反而下降; 由图 14(b)、图 14(c) 可知, 随着位移持续增大, 在拐点 2 消失的屈服部分又开始了出现, 直至拐点 3 屈服部分达到最大; 由图 14(c)、图 14(d) 可知, 随着位移的继续增大, 屈服部分又消失, 直至拐点 4, 屈服部分全部消失。综上可知, 节点的屈服是由于连接钢筋发生局部屈服导致的。

4 结论

(1) 根据双钢板组合剪力墙结构特点设计的承插式方形半灌浆套筒连接, 具有施工方便、连接整体效果好的优点, 可通过控制连接钢筋直径和套筒长度使节点强度与连接钢筋强度一致, 从而实现等同现浇的目标。

(2) 连接钢筋的直径对承插式方形半灌浆套筒

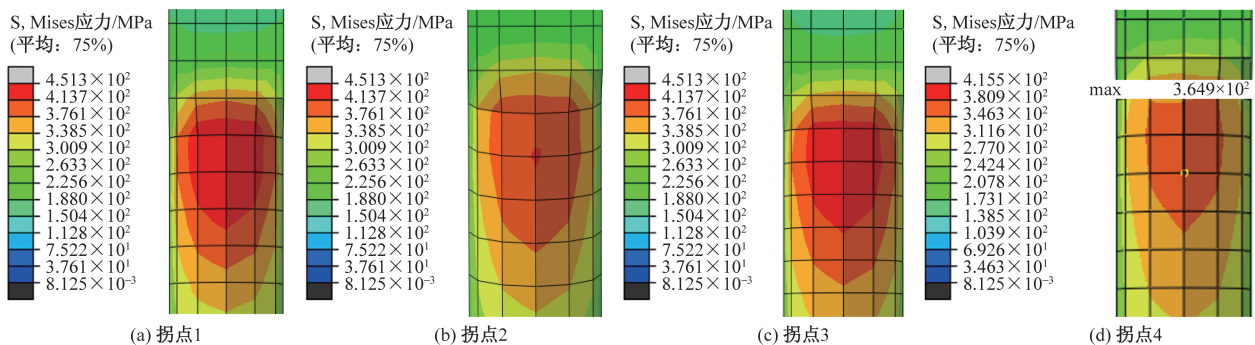


图 14 各拐点连接钢筋 Mises 应力云图
Fig. 14 Mises stress cloud map of connecting steel bars at various turning points

连接的极限强度有明显影响,随着直径增大,极限强度也会相应提高;连接钢筋的锚固长度对节点的屈服强度有较大影响,锚固长度越大,屈服强度越高。灌浆料强度达到 80 MPa 时,即可满足该节点的强度需求。梯形套筒在受力性能上要略优于方形套筒。

(3)连接节点出现屈服阶段是由于连接钢筋出现了局部屈服,随着位移的增大,最终能够实现连接钢筋材料性能的充分发挥。

参 考 文 献

- [1] 雷升祥,张艳青,刘勇,等. 双钢板-混凝土组合构件面外受力性能研究综述[J]. 建筑结构, 2022, 52(13): 32-42, 20.
Lei Shengxiang, Zhang Yanqing, Liu Yong, et al. Review of study on the out-of-plane mechanical performance of steel-concrete-steel sandwich composite members [J]. Building Structure, 2022, 52(13): 32-42, 20.
- [2] 盖彤彤,于德湖,毛鲁宁,等. 圆管支撑钢板仓组合剪力墙抗震性能分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 275-282.
Gai Tongtong, Yu Dehu, Mao Luning, et al. Seismic performance analysis of combined shear wall of round tube supported steel silo [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(1): 275-282.
- [3] Zhao Y K, Li Z B, Liu P, et al. The seismic behaviors of steel-concrete-steel composite walls with dumbbell-shaped connectors[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 211: 108182.
- [4] 赵玉坤,李振宝,马华,等. 外包 U 形钢组合梁与双钢板组合墙连接节点抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(2): 262-269.
Zhao Yukun, Li Zhenbao, Ma Hua, et al. Experimental study on seismic performances of U-shaped steel composite beam and double steel plate composite wall joints[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(2): 262-269.
- [5] 郝际平,薛强,郭亮,等. 装配式多、高层钢结构住宅建筑体系研究与进展[J]. 中国建筑金属结构, 2020(3): 27-34.
Hao Jiping, Xue Qiang, Guo Liang, et al. Research and progress on prefabricated multi story and high rise steel structure residential building systems [J]. China Construction Metal Structure, 2020(3): 27-34.
- [6] 黄少腾. 水平缝螺栓连接双层钢板混凝土组合剪力墙力学性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2021.
Huang Shaoteng. Mechanical properties of steel-concrete-steel composite shear wall with horizontal joint connected by bolts [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [7] 黄少腾,黄炎生,蔡健,等. 设置竖向通缝的螺栓连接双层钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(7): 164-172.
Huang Shaoteng, Huang Yansheng, Cai Jian, et al. Seismic behavior test of steel-concrete-steel composite shear wall with vertical seams and horizontal bolt connections [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(7): 164-172.
- [8] Huang S T, Huang Y S, He A, et al. Experimental study on seismic behavior of an innovative composite shear wall [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 165-179.
- [9] 朱峰岐,王喆,郁银泉,等. 承插式预制钢板组合剪力墙抗震性能及其工程应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S1): 71-80.
Zhu Fengqi, Wang Zhe, Yu Yinquan, et al. Seismic behavior and engineering application of inserting type precast double skin composite shear wall [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(S1): 71-80.
- [10] 刘轩. 方形和圆形钢管套筒连接性能试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.
Liu Xuan. Experimental study on the performance of square and circular steel tube sleeve connections [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [11] 王腾辉,陈权,夏文传,等. 基于 ABAQUS 塑性损伤的半灌浆套筒力学性能有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3709-3715.
Wang Tenghui, Chen Quan, Xia Wenchuan, et al. Finite element analysis of mechanical properties of semi grouted sleeves based on ABAQUS plastic damage [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3709-3715.