



空间结构压杆的套管加固失效模式试验研究

曾滨 许庆 陈映 王春林

EXPERIMENTAL STUDY ON FAILURE MODES OF COMPRESSION MEMBERS IN SPACE STRUCTURES STRENGTHENED WITH SLEEVES

ZENG Bin, XU Qing, CHEN Ying, WANG Chun-lin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.08.0598>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

布置压杆的弧形钢闸门静动力特性分析

ANALYSIS OF STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF RADIAL STEEL GATE WITH COMPRESSION BARS

工程力学. 2021, 38(S): 144-150 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.04.S025>

掉层RC框架结构基于典型失效模式的失效概率评估

FAILURE PROBABILITY EVALUATION OF RC FRAME SUPPORTED BY FOUNDATIONS WITH DIFFERENT ELEVATIONS BASED ON TYPICAL FAILURE MODES

工程力学. 2020, 37(5): 74-81 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.05.0244>

冷弯薄壁型钢受弯构件承载力与延性优化研究

OPTIMIZATION ON BEARING CAPACITY AND DUCTILITY OF COLD-FORMED THIN-WALLED STEEL FLEXURAL MEMBER

工程力学. 2021, 38(4): 93-101 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.05.0327>

钢桁腹杆-劲性骨架混凝土(SRC)组合拱极限承载力及简化计算研究

RESEARCH ON THE ULTIMATE BEARING CAPACITY AND SIMPLIFIED DESIGN FORMULAE OF STEEL TRUSS WEB-STEEL REINFORCED CONCRETE (SRC) COMPOSITE ARCHES

工程力学. 2017, 34(10): 200-206,216 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.01.0085>

失效模式约束下层级褶皱结构的多目标优化

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF HIERARCHICAL CORRUGATED STRUCTURE UNDER FAILURE MODES CONSTRAINTS

工程力学. 2017, 34(5): 226-234 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2015.11.0909>

基于Kresling折纸构型的空间结构可控失稳模式研究

PROGRAMMABLE INSTABILITY OF SPATIAL STRUCTURES BASED ON KRESLING ORIGAMI

工程力学. 2021, 38(8): 75-84 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.08.0545>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2022)11-0212-10

空间结构压杆的套管加固失效模式试验研究

曾 滨¹, 许 庆¹, 陈 映², 王春林²

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

摘 要: 空间结构压杆失稳是结构失效的重要原因之一。利用套管加固空间结构压杆以抑制压杆屈曲, 增加构件的极限承载能力和延性。通过对不同壁厚、套管与内压杆间隙和内压杆外伸段长度的 12 根试件进行轴压试验, 得到加固前后试件的极限承载能力、破坏模式和延性变化。加固后试件的极限承载能力最大提高了 147%, 且外套管壁厚越大, 内压杆外伸段越短, 承载力越高; 内压杆与外套管间隙越大, 承载力略有下降。加固试验中构件的破坏模式由加固前的整体屈曲失稳变化为加固后的整体失稳、内压杆端部外伸段失稳和两种耦合失稳, 且壁厚越小, 易发生整体失稳, 外伸段越长, 易发生内压杆端部失稳, 间隙对失稳形态影响不明显。此外, 加固后试件延性均大于未经加固内压杆, 经过合理设计延性指标能够增加一倍以上。

关键词: 空间结构; 压杆; 套管加固; 失效模式; 极限承载力; 延性

中图分类号: TU392.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.08.0598

EXPERIMENTAL STUDY ON FAILURE MODES OF COMPRESSION MEMBERS IN SPACE STRUCTURES STRENGTHENED WITH SLEEVES

ZENG Bin¹, XU Qing¹, CHEN Ying², WANG Chun-lin²

(1. Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group, Beijing 100088, China;

2. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: The instability of compression members of space structures is one of the important causes of structural failure. The sleeves were applied to reinforce the compression members in space structures to restrain the buckling of the compression members, and to improve the ultimate bearing capacity and the ductility of the components. Thusly, axial compression tests were conducted on 12 specimens to investigate the ultimate bearing capacity, the failure modes and, the ductility of the compression members with and without sleeves. Key parameters include the sleeves thickness, the gap between the inner compression members and sleeves, and the overhang length of the inner compression members. The maximum increment for the ultimate bearing capacity of the specimens after reinforcing was 146%. Besides, the bearing capacity increased with the increase of the sleeves thickness and, with the decrease of the overhang length of the inner compression members. The bearing capacity decreased slightly with the gap between the inner compression members and the sleeves. After reinforcing the compression members, the failure modes of the components changed from the overall instability of the compression members to the coupling instability of compression members and their inner overhangs. Moreover, the overall instability was prone to occur with the decrease of the sleeves thickness. The instability of the overhang of the inner compression members was likely to be observed with the overhang length. The influence of gap on the failure modes was not obvious. In addition, the ductility of all specimens with sleeves is larger than that of the specimens without sleeves, and the ductility index could be more than doubled with reasonable design.

收稿日期: 2021-08-04; 修改日期: 2021-12-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52038010); 国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心开放基金课题项目(YZA2017KY04)

通讯作者: 曾 滨(1968—), 男, 福建人, 教授级高工, 博士, 博导, 总工, 主要从事预应力技术研究 (E-mail: zengbin@cricb.com).

作者简介: 许 庆(1978—), 男, 山西人, 教授级高工, 硕士, 主要从事预应力诊治研究 (E-mail: xuqing@cricb.com);

陈 映(1990—), 男, 四川人, 博士生, 主要从事预应力预制结构研究 (E-mail: chenying90@seu.edu.cn);

王春林(1980—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 博导, 主要从事预应力预制结构研究 (E-mail: chunlin@seu.edu.cn).

Key words: space structure; compression member; sleeve reinforcement; failure mode; ultimate bearing capacity; ductility

空间结构中关键压杆构件的稳定对整个结构的极限承载力有较大影响。空间结构中构件超载将会诱发单根杆件率先失稳,而这一失稳迅速引发荷载重分布并可能带来后续结构破坏^[1-3],如图1所示。传统的加固压杆的方法有焊接钢板^[4]、外粘钢板^[5]或者纤维增强复合材料^[6],但是焊接会产生残余应力、粘贴结构胶存在耐久性问题,阻碍了上述技术在空间结构压杆加固中的应用。所以,研发空间结构压杆构件加固新技术,提升结构的安全系数有着重要意义。

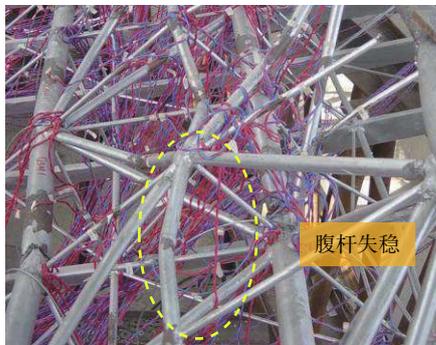


图1 空间结构模型腹杆失稳

Fig. 1 The instability of brace in space structure

作为压杆稳定控制的一种方法,限制失稳技术也常被用来研发新型不失稳构件,如屈曲约束支撑^[7-11]。如何利用限制失稳技术来提高空间结构压杆承载能力,从而提高结构极限承载力是本文重点关注的问题。如图2(a)所示,空间结构也可采用组装套管加固来限制压杆失稳^[12],形成套管构件提升压杆的承载能力。套管构件首次由SRIDHARA^[13-14]提出,如图2(b)所示,由内压杆及外套管组成,两者之间预留一定间隙,当内压杆发生弯曲变形时,外套管为其提供侧向支承,限制其侧向变形,从而达到提高内压杆稳定承载能力的目的。

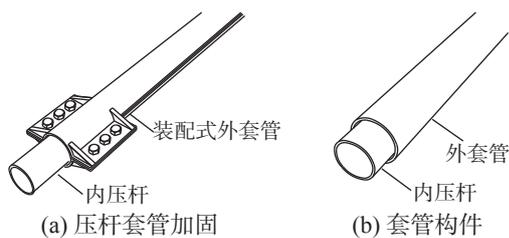


图2 套管侧向支承

Fig. 2 The lateral constraints by the outer sleeve

受压杆采用套管加固具有如下优点:①经套管加固后形成的构件与原受压杆具有相同的初始刚度,带有套管加固构件的结构在承受设计地震作用时,其动力特性与原结构相同;②套管加固方法不会引入新的应力集中源,不存在二次受力问题,也不用考虑加固构件与原构件的连接可靠性问题;③套管加固可以作为结构的第二道防线;④地震或强风荷载作用下结构中的受压杆件因为外套管的存在会延迟或者不会出现受压屈曲,实现了多道设防。

国内外学者对套管加固压杆及结构研究相对较少。SRIDHARA等^[14]的试验表明:套管构件失效时,内压杆截面上的平均应力已经超过材料的屈服应力。PDRASA^[15]试验研究表明套管构件的受压承载能力相对于传统受压构件有大幅度提高。内压杆外伸段长度也是限制套管构件承载力的一个因素。申波^[16]的研究表明:外套管的约束作用会提高内压杆的弯曲刚度,内压杆外伸段的存在会导致内核端部的局部屈曲破坏,从而影响套管构件的承载力。套管加固结构的研究目前主要停留在数值分析层面。胡波^[17]分析了未加固和对应的用套管加固较危险受压杆件的空间结构模型,发现采用套管加固的方式能有效控制受压杆件的失稳问题,以及提高结构的极限承载力。

综上所述,受压杆经过套管加固后受压承载力有了显著提高,其空间结构的极限承载力也有了大幅提升,但是空间结构压杆套管加固试验仍然很少,其约束机制和失效模式仍不够明确。本文作为初探研究,将圆管作为加固外套管,直接搁置在内压杆外围,可在内压杆上自由滑动,如图2(b)所示。

通过12根试件的试验研究,对比分析了外套管壁厚、内压杆与外套管之间的净间隙和内压杆外伸段长度等参数对套管加固压杆的极限承载能力和延性的影响,在此基础上提炼出套管加固压杆的失效模式。本文试验也将作为后续装配式外套管加固压杆试验研究的基础。

1 试件设计和加载

1.1 试件设计

如图3所示,本文研究的套管试件主要由内

压杆及外套管组成。表 1 给出了所有套管构件 S2~S12 的外套管设计尺寸，而 S1 作为对比试件，仅有内压杆，表中并未给出。所有试件的内压杆尺寸相同，其杆长 L_c 、外径 r 和壁厚 t_0 分别为 2660 mm、70 mm 和 4 mm。为了区分试件，按照外套管设计尺寸对试件进行命名。譬如试件 L2400g2.5T2.5 表示该试件外套管长度 L 和厚度 T 分别为 2400 mm 和 2.5 mm，内压杆与外套管之间的间隙值 g 为 2.5 mm。进一步，表 2 给出了试件加工完毕后的实测尺寸，S1* 为所有内压杆实测尺寸平均值。

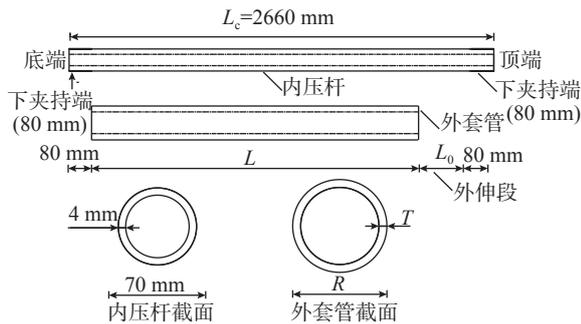


图 3 试件构造
Fig. 3 Specimen configuration

表 1 套管设计尺寸 /mm
Table 1 Design values of sleeves

试件号	试件名	外套管总长度 L	外套管外径 R	外套管壁厚 T	内压杆外伸端长度 L_0	间隙值 g
S2	L2400g2.5T2.5		80	2.5		2.5
S3	L2400g2.5T4		83	4		2.5
S4	L2400g2.5T10		95	10		2.5
S5	L2400g5.5T4	2400	89	4	100	5.5
S6	L2400g8.5T4		95	4		8.5
S7	L2400g10T2.5		95	2.5		10
S8	L2400g2.5T6		87	6		2.5
S9	L2350g2.5T6	2350	87	6	150	2.5
S10	L2450g2.5T6		87	6		2.5
S11	L2450g2.5T4	2450	83	4	50	2.5
S12	L2450g2.5T10		95	10		2.5

注： L 、 R 和 T 分别为外套管总长度、外径和壁厚； L_0 为内压杆外伸端长度； g 为外套管与内压杆之间间隙值，为外套管内径与内压杆外径差值的一半。

1.2 材料性能

本次试验的内压杆和外套管都选用 20# 无缝钢管制作。依照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228.1—2010)^[8] 中相关规定加工试样，并进行了标准拉伸试验，材性试验结果如表 3 所示。拉伸试样的命名遵循以下规则：RxTy 代表试样由外径和壁厚分别为 x mm 和 y mm 的无缝钢管加工

表 2 试件实测尺寸 /mm
Table 2 Measured values of specimens

试件号	外套管总长度 L	外套管外径 R	外套管壁厚 T	内压杆外伸端长度 L_0	间隙值 g
S1*	2660.53	69.86	4.26	—	—
S2	2400.17	80.05	2.68	100.00	2.34
S3	2397.60	83.56	4.32	103.40	2.61
S4	2398.90	96.23	10.93	100.63	2.23
S5	2397.87	88.95	4.18	103.70	5.26
S6	2399.13	94.80	4.31	101.93	8.09
S7	2399.07	94.86	2.54	100.93	9.89
S8	2389.67	89.02	6.36	101.40	3.24
S9	2350.07	89.42	6.52	151.47	3.24
S10	2451.20	89.23	6.48	48.83	3.19
S11	2451.43	83.44	4.55	49.57	2.23
S12	2449.40	95.40	10.92	51.33	1.90

注：S1* 行中为所有试件的内压杆实测尺寸平均值。

表 3 材料性能参数
Table 3 Material constants

试样	弹性模量 E/GPa	名义屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉极限强度 σ_b/MPa	断后伸长率 $\delta/(%)$
R70T4	190.87	303.98	462.05	21.04
R80T2.5	206.51	327.56	488.04	19.66
R83T4	193.03	310.89	476.52	18.81
R89T4	203.62	336.56	465.94	24.33
R87T6	195.55	276.02	451.10	21.42
R95T2.5	206.34	342.03	471.09	19.61
R95T4	205.08	276.38	459.85	21.17
R95T10	209.44	314.93	476.22	18.17

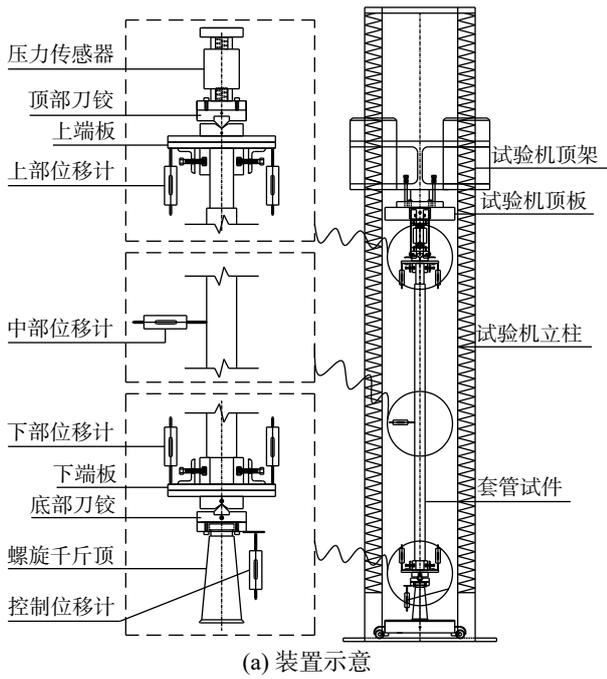
注： R 为试件外径尺寸； T 为试件壁厚。

而成。以试样 R70T4 为例，表示该试样由外径和壁厚分别为 70 mm 和 4 mm 的无缝钢管加工而成。

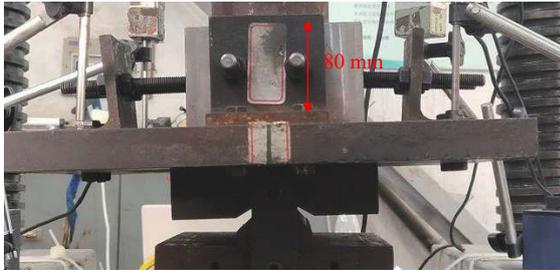
1.3 加载装置及量测方案

本次试验为铰接构件的单向受压试验。图 4 给出了此次试验的加载装置，试验利用了 500 T 液压长柱压力试验机的反力架，为了实现试件两端铰接，同时防止加载过程中的试件端部滑动，分别布置了单向刀铰和夹持装置，分别如图 4(b) 和图 4(c) 所示。构件下端刀铰板底部安装 100 T 螺旋千斤顶，为防止千斤顶加载过程中失稳，在其顶部与试验机四个立柱之间设置了侧向支撑装置。

构件的实际转动中心位于刀铰的刀尖部位，端板厚 20 mm，刀铰板厚 25 mm，构件的计算长度应为构件的几何尺寸加上顶、底部两端的端板及刀铰板厚度，即两端分别加 45 mm 可得实际计算长度。



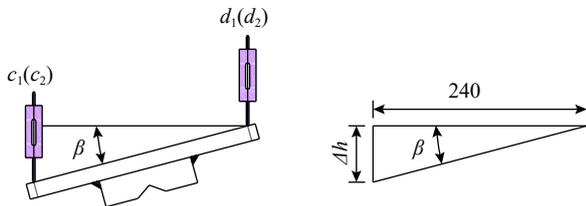
(a) 装置示意



(b) 底部刀铰



(c) 夹持装置



(d) 端板位移和转角计算示意

图 4 试验装置

Fig. 4 Testing setup

试验的量测布置方案如图 4(a) 所示, 构件的荷载 F 通过安装在试件顶部的压力传感器记录。构件跨中分别设置 2 个水平方向的中部位移计用于测量套管构件在铰接方向的侧移。

在构件上下两端的端板四个角分别布置了 4 个位移计用来测得端板的位移和转角。如图 4(d) 所示, 以上端板为例, 4 个位移计读数的平均值即上端板竖向位移 h ; 4 个位移计读数也可以计算得到上端板转动过程中两侧边产生的竖向位移差值, 竖向位移差值与端板两侧位移计水平间距 (240 mm) 的比值为端板的转角 β 。上端板的竖向位移 h 和转角 β 的计算公式如下所示:

$$h = \frac{c_1 + c_2 + d_1 + d_2}{4} \quad (1)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{(d_1 + d_2) - (c_1 + c_2)}{480}\right) \quad (2)$$

式中, c_1 、 c_2 、 d_1 和 d_2 分别为上端板 4 个位移计的读数。

试验过程中采取手动控制加载, 分别读取压力传感器和位移计的数据, 以获得构件的荷载-位移曲线。

1.4 加载模式

图 5 给出了试件的加载制度^[19]。加载前, 为消除试件、连接件和试验机之间的空隙, 需要对试件进行 5 kN 的预加载, 然后将荷载降到接近 0 kN, 荷载和位移计的读数清零。试验加载前先对试件进行了有限元模拟, 预估了不同试件的峰值承载力。试验加载采用力控制和位移控制两阶段, 第一阶段为施加荷载至 20 kN 后降至 10 kN, 再施加荷载至 30 kN 后降至 10 kN, 施加荷载至 40 kN 后降至 10 kN; 接着开始第二阶段的加载, 施加荷载达到模拟峰值承载力 80% 后, 减缓加载速率, 直至构件荷载下降到实测极限承载力的 80% 以下, 停止加载, 此时判定为试件破坏。此外, 若加载

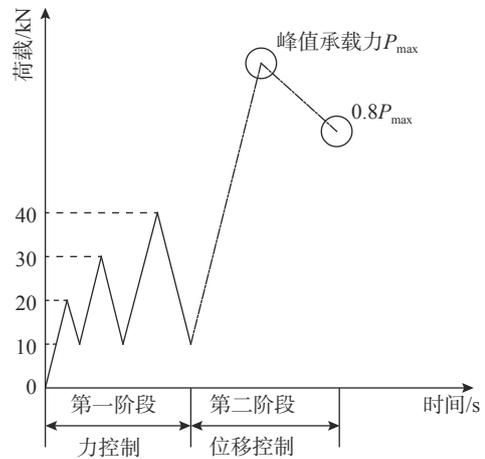


图 5 加载制度

Fig. 5 Loading patterns

过程中跨中侧移超过构件长度的 1/25 或者内压杆端部外伸段局部变形过大时立即停止加载。

2 试件结果

2.1 峰值承载力

表 4 给出了试件的极限承载力。由表 4 可知, 试件 S2-S12 的极限承载力远高于试件 S1, 即压杆经外套管加固后, 极限承载力提升较大。试件的荷载-位移曲线将在 3.1 节中给出。

表 4 试件试验结果
Table 4 Test results of specimens

试件号	试件名	试件峰值承载力 P_{max}/kN	试件延性指标 u
S1	—	107.54	1.67
S2	L2400g2.5T2.5	164.13	2.55
S3	L2400g2.5T4	200.13	3.04
S4	L2400g2.5T10	265.34	2.07
S5	L2400g5.5T4	203.85	2.12
S6	L2400g8.5T4	189.23	3.95
S7	L2400g10T2.5	157.54	3.22
S8	L2400g2.5T6	227.69	4.28
S9	L2350g2.5T6	214.15	2.71
S10	L2450g2.5T6	220.00	1.82
S11	L2450g2.5T4	232.15	3.45
S12	L2450g2.5T10	260.22	2.35

注: P_{max} 为试件峰值承载力; u 为试件的延性指标, 相关讨论见 3.3 节。

2.2 破坏模式

表 5 进一步总结了所有试件的破坏模式, 特别是给出了构件的整体失效图, 以及内压杆上端部变形图。根据外套管变形和内压杆上端部变形初步将试件的失稳形态分为构件整体失稳、内压杆外伸段端部局部失稳、以及端部局部失稳与整体失稳耦合的破坏模式。

3 试件结果分析

3.1 试验参数分析

结合表 2 和表 4 可知, 套管加固试件承载能力的提高受到多个参数的影响, 其中包括外套管壁厚、内压杆与外套管之间的净间隙和内压杆外伸段长度等, 分别对比讨论如下。

图 6 对比了不同外套管壁厚对套管试件承载力的影响。其中, 图 6(a) 对比了外套管长度相同, 内压杆与外套管间隙相同时, S2、S3 和 S4 的荷载-位移曲线, 同时也给出了无外套管试件

表 5 试件破坏模式
Table 5 Failure modes of specimens

试件	S1	S2	S3	S4
整体形态				
端部形态				
模式	整体失稳	整体失稳	端部失稳	端部失稳
试件	S5	S6	S7	S8
整体形态				
端部形态				
模式	耦合失稳	端部失稳	整体失稳	端部失稳
试件	S9	S10	S11	S12
整体形态				
破坏形态				
模式	端部失稳	端部失稳	耦合失稳	端部失稳

S1 的曲线。由图可知: 1) 进行套管加固后的试件承载力显著提高, 相比试件 S1, 试件 S2、S3 和 S4 的极限承载力分别提高到 1.53 倍、1.86 倍和 2.47 倍; 2) 加载初期, 未加固的试件与套管加固试件的刚度接近, 初始刚度即为内压杆的轴向刚

度；3) 对于外伸段长度相同、内压杆与外套管间隙相同的试件，外套管壁厚越大，承载力越高，这是因为外套管越厚，抗弯刚度越大；4) 结合表5的失效模式可知，内压杆外伸段长度和间隙相同时，套管壁厚较小时易发生套管试件整体失稳，套管壁厚较大时避免了整体失稳，但易发生内压杆外伸段局部失稳。图6(b)对比了S11和S12的荷载-位移曲线，也可以得到同样的规律。

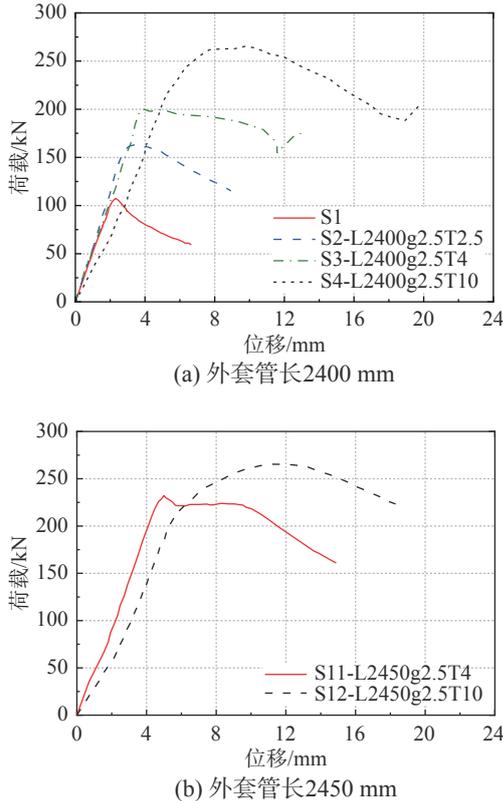


图6 不同壁厚套管试件荷载-位移曲线
Fig. 6 Load-displacement curves of different wall thickness

图7分析了内压杆与外套管之间间隙的差异对套管加固试件承载力的影响。图7(a)给出试件S1、S2和S7的荷载-位移关系曲线。由图可知，试件S2和S7的间隙分别为2.5 mm和10 mm，其极限承载力分别为164.13 kN和157.54 kN，相对于试件S1分别提高到极限承载力提高到1.53和1.46倍，而S7相对于S2，极限承载力仅降低了4%。

图7(b)对比了试件S3、S5和S6的荷载-位移曲线，内压杆外伸段长度均为100 mm，外套管壁厚均为4 mm。由图可知，试件S3、S5和S6的间隙分别为2.5 mm、5.5 mm和8.5 mm，其极限承载力分别为200.13 kN、203.85 kN和189.23 kN。其中，间隙分别为2.5 mm和5.5 mm的两个试件S3和S5，极限承载力相差不大，而间隙为8.5 mm

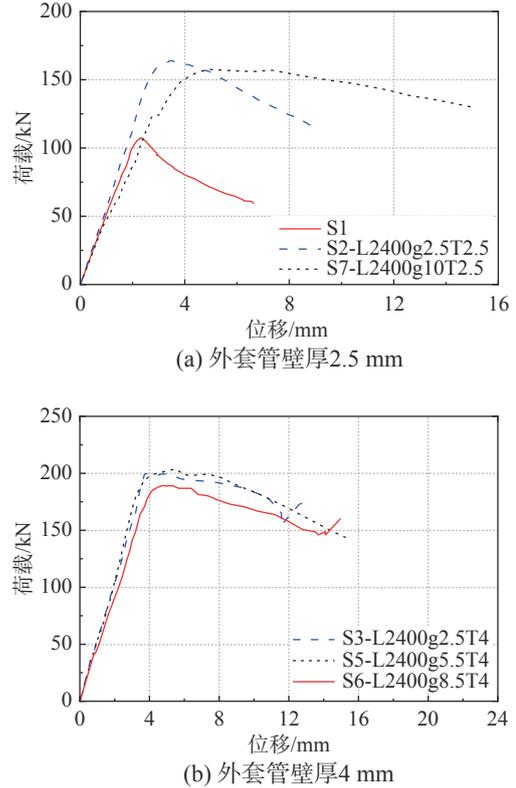


图7 不同间隙套管试件荷载-位移曲线
Fig. 7 Load-displacement curves of different gap

的试件S6，相对于试件S3，其极限承载能力仅下降了5%。

由此可得，当外套管壁厚与外伸段长度相等时，内压杆与外套管间隙对极限承载力影响较小，甚至当间隙分别为8.5 mm和10 mm时，其极限承载能力略有下降，分别降低了约5%和4%。考虑到对空间结构杆件进行套管加固，较大的容许间隙能够方便施工，但导致性能略有下降。

图8对比了内压杆外伸段长度的差异对套管加固试件承载力的影响。图8(a)对比了试件S1、S3和S11的荷载-位移曲线，试件S3和S11的外套管壁厚都为4 mm，内压杆与外套管间隙都为2.5 mm，外伸段长度分别为100 mm和50 mm，极限承载力分别为200.13 kN和232.15 kN。由此可得，当压杆外伸段越短，承载力略有增加，增加了16%。

图8(b)对比了试件S4和S12的荷载-位移曲线，试件S4和S12的外套管壁厚为10 mm，间隙为2.5 mm，外伸段长度分别为100 mm和50 mm，对应的极限承载力分别为265.34 kN和260.22 kN，二者的极限承载力相差不大。对比试件S3和S11的外套管壁厚4 mm，表明S4和S12的外套管壁

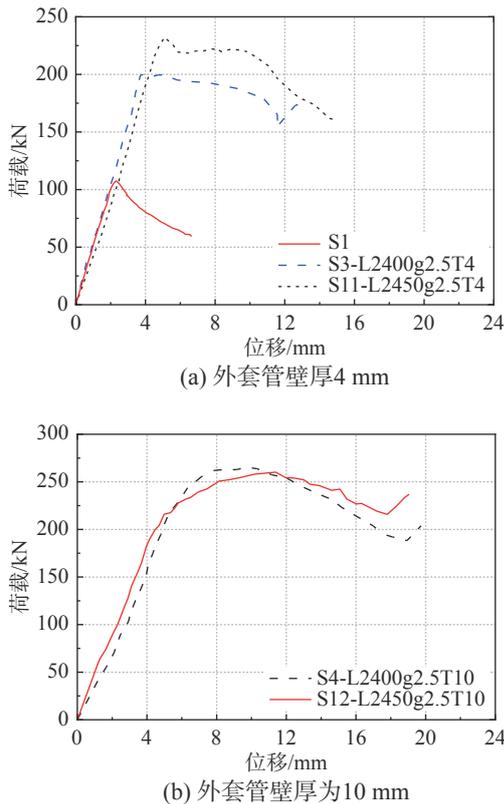


图 8 不同外伸段长度套管试件荷载-位移曲线
Fig. 8 Load-displacement curves of different overhang length

厚 10 mm，对上部内压杆外伸段下端有着更强的约束，而这种更强的支承使得试件极限承载能力有所增加，同时也弱化了外伸段长度对极限承载能力的影响。

3.2 失效模式分析

图 9 根据试验中试件的变形模式，给出了试件的整体失稳、内压杆外伸段端部失稳和端部失稳与整体失稳耦合的失效模式示意图，并结合试件的设计参数解释如下。

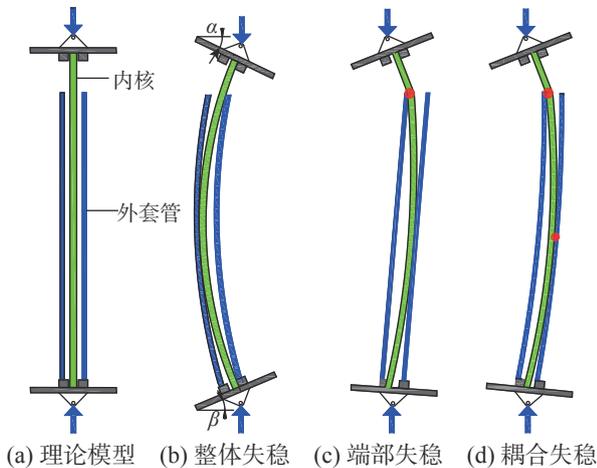


图 9 套管构件变形模式

Fig. 9 Flexural deformation modes of the sleeved bar

对比外伸段长度相同、内压杆与外套管间隙相同的试件 S2、S3 和 S4 发现，三个试件的外套管壁厚分别为 2.5 mm、4 mm、10 mm，破坏形式分别为整体失稳 (图 9(b))、端部失稳和端部失稳 (图 9(c))，当外套管壁厚越薄时，越容易发生整体失稳。此规律也可以在 S11 和 S12 两构件中验证，其外套管壁厚分别为 4 mm 和 10 mm，破坏模式分别为整体失稳和端部失稳。

比较试件 S2 和 S7，外套管壁厚与内压杆外伸段长度相同，内压杆与外套管间隙相差较大，破坏模式都是整体失稳破坏；试件 S3、S5 和 S6 只有间隙有差别，但是破坏模式以端部失稳为主，因此，套管构件内压杆和外套管之间的间隙对破坏模式的影响不大。

试件 S3 和 S11 外套管壁厚相同，内压杆与外套管之间的间隙相同，外伸段长度为 100 mm 的试件 S3 的破坏模式为端部失稳，外伸段长度为 50 mm 的试件 S11 的破坏模式为耦合失稳，即当套管构件其他尺寸相同时，内压杆外伸段长度越长，越容易发生耦合失稳破坏，反之，容易发生整体失稳。

进一步将上述试验现象总结如下：

如图 9(a) 所示，加载初期，存在初始缺陷的内压杆在一定的轴向压力作用下开始发生侧向变形，由于内压杆与外套管存在一定的间隙，初始阶段外套管并不受力，随着荷载的增大，内压杆侧向变形逐渐变大，外套管受到内压杆与外套管接触力的作用，从而发生侧向挠曲，内压杆与外套管的侧向挠曲随着荷载的增大缓慢发展。

当外套管厚度较小时，外套管不足以承担内压杆的作用力，导致外套管发生较大的弯曲变形，此时到达峰值荷载，承载力将逐渐下降，试件发生整体失稳，试件的失稳形态如图 9(b) 所示；当外套管厚度较大时，外套管弯曲刚度较大，内压杆与外套管接触力作用下弯曲变形也较小，而此时内压杆的外伸段由于没有套管约束，也会发生绕外伸段底部的转动，当外伸段底部形成塑性铰时，试件成为机构，试件发生端部失稳，承载力将逐渐下降，试件的失稳形态如图 9(c) 所示；当外套管厚度适中时，在内压杆与外套管接触力作用下外套管发生较大弯曲变形同时，外伸段底部也形成塑性铰，试件发生套管整体失稳与外伸段失稳的耦合失稳，承载力将逐渐下降，试件的失稳形态如图 9(d) 所示。

3.3 延性分析

图 10 定义了荷载下降到 $85\%P_{max}$ [20] 时的轴向位移 Δ_2 与试件开始屈服时的轴向位移 Δ_1 之比为延性指标 u (若荷载未下降到 $85\%P_{max}$, 则取试验结束时的位移)。根据文献 [21] 确定屈服点, 具体方法为: 令极限承载力的 0.75 倍在曲线上对应的点为 A 点, 原点与 A 点相连的直线过极限承载力点的水平线于 B 点, B 点向横轴做垂线与曲线的交点为屈服点, 对应位移为屈服位移 Δ_1 。延性系数越大, 表示试件可以承受更大的塑性变形而不破坏。表 4 给出了根据上述方法得到的延性系数 u , 采取套管加固的试件, 延性系数均大于内压杆试件的延性系数。譬如, 试件 S6、S9 和 S11 的延性系数比 S1 分别增加了 137%、156% 和 107%, 都分别增加 2 倍以上, 表明套管加固压杆的方法有利于提高内压杆试件的延性。

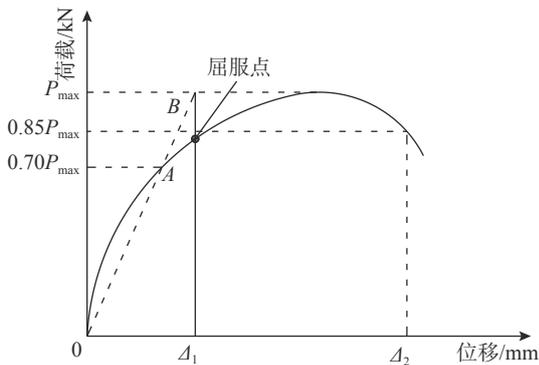


图 10 延性指标示意图

Fig. 10 Schematic plot of ductility index

4 试件数值模拟

4.1 数值模型

如图 11 所示, 给出了套管构件的数值模型。内压杆、外套管、上(下)夹持装置和上(下)端板均使用 C3D8R 实体单元, 网格尺寸均为 10 mm 左右, 内压杆和外套管均沿径向划分为 2 层单元。数值模型使用的材料属性如表 3 所示。为考虑内压杆的几何初始缺陷, 对内压杆进行线弹性屈曲分析, 在进行套管构件静力分析时, 引入内压杆的一阶屈曲模态作为内压杆的初始缺陷, 内压杆的初始缺陷幅值为 $L_0/1000$, 未考虑外套管的初始缺陷。

夹持装置与端板在试验加载过程中未产生相对滑动, 建模时使用绑定约束 (Tie) 功能, 将夹持

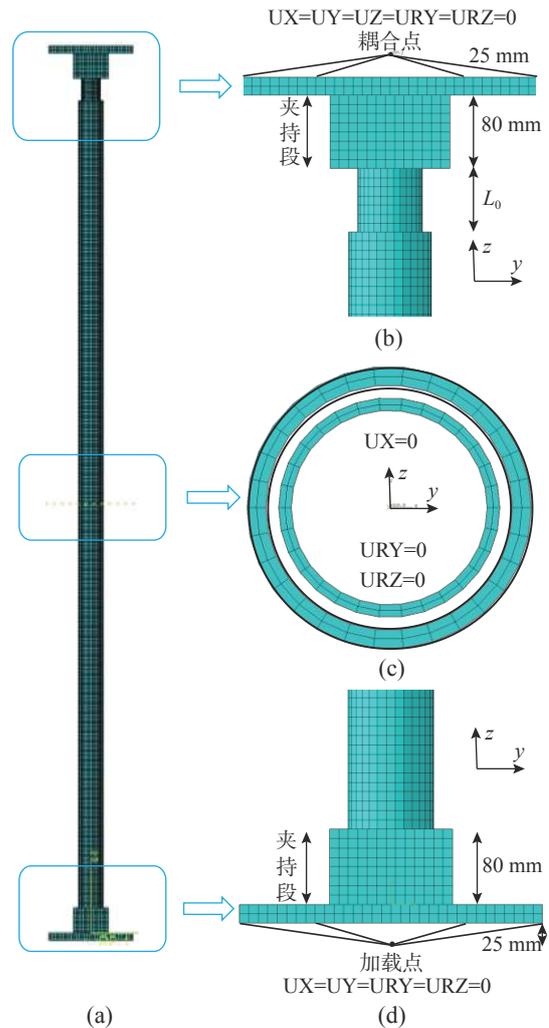


图 11 有限元模型

Fig. 11 Finite element model

装置与端板的接触面进行绑定约束。内压杆、外套管、和端板(夹持装置)之间通过接触传递压力, 使用通用接触 (Contact) 功能, 接触面间的法向 (Normal) 定义为硬接触, 接触面间的切向 (Tangential) 定义为罚函数接触算法。

如图 11 所示, 在套管试件加载装置刀铰的刀尖位置分别建立两个参考点, 其与内压杆上、下端面的距离均为 45 mm, 通过耦合 (Coupling) 功能, 将上、下参考点分别与上、下端板端面的 6 个自由度进行耦合。对于套管试件下端的加载点, 约束沿 X 、 Y 轴的平动自由度以及绕 Y 、 Z 轴的转动自由度 ($UX=UY=URY=URZ=0$); 对于套管试件上端的耦合点, 约束沿 X 、 Y 、 Z 轴的平动自由度以及绕 Y 、 Z 轴的转动自由度 ($UX=UY=UZ=URY=URZ=0$)。

根据外套管的受力特性, 约束外套管跨中截面沿 X 轴的平动自由度以及绕 Y 、 Z 轴的转动自由

度 ($UX=UY=URZ=0$)。通过在试件下端加载点施加位移荷载对套管试件进行轴向加载,采用自动增量步进行非线性数值分析。

4.2 荷载-位移曲线对比

如图 12 所示,给出了典型试件的荷载-位移曲线对比图。由图 7 知,试件 S2 数值模拟的荷载-位移曲线与试验结果差异不大;试件 S11 和 S6 数值模拟的极限承载力与试验结果差异不大,荷载下降阶段曲线略低于试验结果。

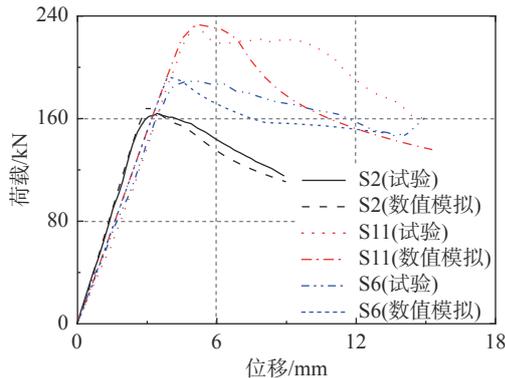


图 12 荷载-位移曲线对比

Fig. 12 Comparison of load-deformation curves

4.3 试件失效模式对比

如图 13 所示,给出了典型试件的失效模式对比图。由图 13 可知,试件 S2 外套管跨中截面边缘纤维进入塑性,试件发生整体屈曲破坏;试件 S11 外套管跨中截面边缘纤维进入塑性,试件发生整体屈曲破坏,同时,内压杆外伸段与外套管接触截面边缘纤维进入塑性,试件发生端部屈曲破坏,最终发生耦合屈曲破坏;试件 S6 内压杆外伸段与外套管接触截面边缘纤维进入塑性,试件发生端部屈曲破坏。

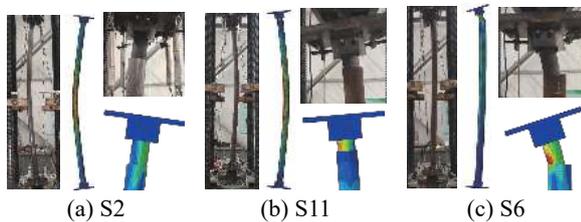


图 13 失效模式对比

Fig. 13 Comparison of failure modes

5 研究展望

第 3 和 4 节将简单圆管作为外套管,通过试验和数值模拟证明了采用圆管加固能高效提升压杆的承载能力。图 14 为装配式套管构件构造,将

无缝钢管切割成两个半圆钢管,在半圆钢管两侧边焊接带有螺栓孔的缀板,通过螺栓锚固形成装配式套管,直接搁置在压杆上。使用该类装配式外套管,可实现在役状态下对压杆进行加固,提升空间结构压杆加固的工作效率。

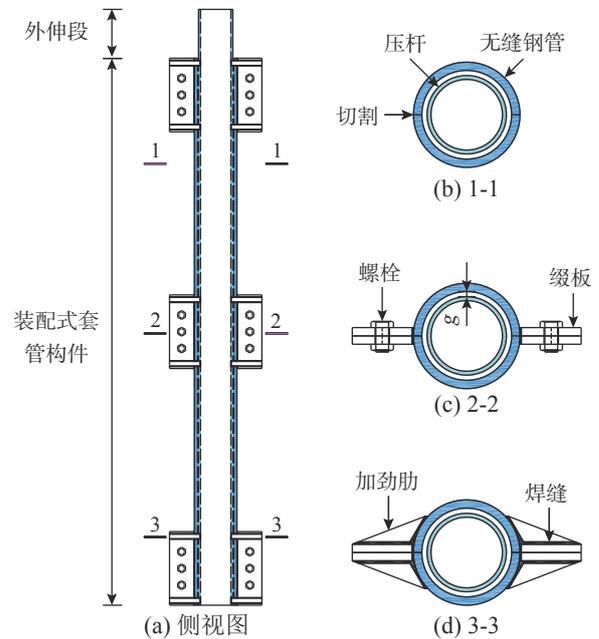


图 14 装配式套管构件

Fig. 14 Assembled sleeve member

6 结论

文针对空间结构的压杆研究了采用套管进行加固后的性能。通过 12 根试件轴压试验对比研究发现,此方法能显著提高构件的极限承载能力,加固后试件的极限承载能力最高提高了 147%,延性指标最高提高了 156%。并进一步分析了关键参数对试件的承载力、失效模式和延性指标的变化。建立了套管构件的数值模型,并与试验结果进行了对比。主要结论如下:

(1) 所有经过套管加固的试件,承载力均有大幅度提高:对于外伸段长度相同、内核与外套管间隙相同的试件,外套管壁厚越大,承载力越高;外套管壁厚与外伸段长度相等时,内核与外套管间隙越大,承载力越低;外套管壁厚与间隙相等时,外伸段越长,承载力越低。

(2) 结合试验现象,套管试件的破坏模式有,整体失稳、内压杆外伸段端部失稳和两种失稳状态耦合破坏。当外套管壁厚越薄,越容易发生整体失稳破坏,内压杆外伸段长度越长,越容易发生端部失稳破坏,加固试件的内压杆和外套管之

间间隙对破坏模式影响较小。

(3) 套管加固试件的延性系数均大于未经加固的内压杆, 加固后构件可以承受更大的塑性变形而不破坏, 经过合理设计延性指标能够增加一倍以上。

(4) 根据试件的受力特性, 建立了套管构件的数值模型, 得到极限承载力和失效模式与试验结果一致, 表明该建模方法能有效模拟轴压套管构件的静力性能和失效模式。

参考文献:

- [1] 赵宪忠, 闫伸, 陈以一. 大跨度空间结构连续性倒塌研究方法与现状[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(4): 1 — 14.
ZHAO Xianzhong, YAN Shen, CHEN Yiyi. A review on progressive collapse study for large-span space structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(4): 1 — 14. (in Chinese)
- [2] MURTHA-SMITH E. Alternate path analysis of space trusses for progressive collapse [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114(9): 1978 — 1999.
- [3] ABEDI K, PARKE G A R. Progressive collapse of single-layer braced domes [J]. *International Journal of Space Structures*, 1996, 11(3): 291 — 306.
- [4] BHOWMICK A K, GRONDIN G Y. Limit state design of steel columns reinforced with welded steel plates [J]. *Engineering Structures*, 2016, 114(2): 48 — 60.
- [5] 王元清, 宗亮, 施刚, 等. 钢结构加固新技术及其应用研究[J]. *工业建筑*, 2017, 47(2): 1 — 6, 22.
WANG Yuanqing, ZONG Liang, SHI Gang, et al. Application research on new strengthening technologies for steel structures [J]. *Industrial Construction*, 2017, 47(2): 1 — 6, 22. (in Chinese)
- [6] ZHAO X L, ZHANG L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(11): 1808 — 23.
- [7] 黄波, 陈泉, 李涛, 等. 国标Q235钢屈曲约束支撑低周疲劳试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(6): 29 — 34, 43.
HUANG Bo, CHEN Quan, LI Tao, et al. Low-cycle fatigue test of Q235 steel buckling-restrained braces [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(6): 29 — 34, 43. (in Chinese)
- [8] WANG C L, USAMI T, FUNAYAMA J, et al. Low-cycle fatigue testing of extruded aluminium alloy buckling-restrained braces [J]. *Engineering Structures*, 2013, 46(9): 294 — 301.
- [9] 朱博莉, 郭彦林. 梭形空间桁架约束型防屈曲支撑的性能研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(7): 35 — 46.
ZHU Boli, GUO Yanlin. Investigation on the performance of spatial-truss confined BRBS with shuttle shape longitudinally [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(7): 35 — 46. (in Chinese)
- [10] 高向宇, 李杨龙, 李建勤, 等. 钢支撑动力屈曲致扭机理及BRB减扭机理的研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(11): 83 — 96, 107.
GAO Xiangyu, LI Yanglong, LI Jianqin, et al. Study on the mechanism of torsion induced by steel brace dynamic buckling and the mechanism of torsion reduction supplied by BRB [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(11): 83 — 96, 107. (in Chinese)
- [11] 金双双, 李盈开, 周建庭, 等. 全装配式自复位防屈曲支撑滞回模型及其性能试验研究[J]. *工程力学*, 2021, 38: 1 — 11.
JIN Shuangshuang, LI Yingkai, ZHOU Jianting, et al. Hysteresis model and experimental investigation of assembled self-centering buckling-restrained braces [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38: 1 — 11. (in Chinese)
- [12] 聂祺, 罗开海, 郭浩, 等. 某剧场平板网架屋盖鉴定与修复[J]. *工程抗震与加固改造*, 2017, 39(增刊 1): 125 — 130.
NIE Qi, LUO Kaihai, GUO Hao, et al. Identification and Reinforcement of A Theater Grid Structure Roof [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2017, 39(Suppl 1): 125 — 130. (in Chinese)
- [13] SRIDHARA B N. Sleeved compression member [P]. U. S. Patent: 5175972, 1984-7-2.
- [14] SRIDHARA B N, RAMASWAMY M A. Sleeved column as compression member [R]. Bangalore, India: Bangalore University, 1982.
- [15] PRASAD B K. Experimental investigation of sleeved column [D]. Tucson: University of Arizona, 1989.
- [16] 申波. 轴压套管构件静力稳定性的理论与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
SHEN Bo. Theoretical and Experimental Investigations on the Static Stability of Sleeved Compression Members [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [17] 胡波. 轴心受压套管构件力学性能精细化分析与试验研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2013.
HU Bo. Refined analysis on structural behavior and experimental study of axial compressed sleeved member [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [18] GB/T 228.1—2010, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
GB/T 228.1—2010, Metallic materials Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [19] 张涌泉. 双相型不锈钢轴心受压构件承载力试验研究与理论分析[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHANG Yongquan. Theoretical and experimental investigations on the duplex stainless steel axial compression members [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [20] HAN L H, HUANG H, TAO Z, et al. Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) beam-columns subjected to cyclic bending [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(12): 1698 — 1714.
- [21] 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 Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(3): 36 — 46. (in Chinese)