

引用本文:李 兵,田立明,周 博.中空夹层钢套铝管混凝土短柱轴压性能试验研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(6):35-44.

LI Bing, TIAN Liming, ZHOU Bo. Experimental study on axial compression performance of concrete short columns with hollow sandwich steel jacketed aluminum tubes[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6): 35-44.

DOI:10.19815/j.jace.2021.12082

中空夹层钢套铝管混凝土短柱轴压性能试验研究

李 兵,田立明,周 博

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:为研究中空夹层钢套铝管混凝土短柱的轴压性能,通过改变参数的方法对8根构件开展了轴压试验,构件中空率为0.38、0.51、0.78,混凝土强度为普通混凝土C30、轻质混凝土C30,内铝合金管壁厚为5 mm和3 mm;依据中空夹层钢管混凝土短柱的轴压承载力公式,对约束效应系数进行修正,最终得出拟合性较好的中空夹层钢套铝管混凝土短柱轴压承载力计算公式。结果表明:构件的破坏形态为跨中部或端部发生鼓曲,其中外钢管向外鼓曲,核心混凝土被压碎,内铝合金管向内凹陷;中空率为0.78和0.51的构件较中空率为0.38的构件极限承载力分别提高29%、19%,普通混凝土构件的极限承载力相较于轻质混凝土构件提升60%;内管壁厚为5 mm的构件相较于内管壁厚为3 mm的构件承载力提高约2%;构件的承载力大小随着中空率的减小而增加,随着混凝土强度等级的增加而增加,随着内铝合金管壁厚的增加而增加。

关键词:组合结构;中空夹层钢套铝管混凝土;短柱;轴压试验;承载力计算

中图分类号:TU312

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)06-0035-10

Experimental study on axial compression performance of concrete short columns with hollow sandwich steel jacketed aluminum tubes

LI Bing, TIAN Liming, ZHOU Bo

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the axial compression performance of concrete short columns with hollow sandwich steel jacketed aluminum tubes, an axial compression test on eight members by varying the parameters was carried out. The axial compression test was conducted on components with hollow ratios of 0.38, 0.51, 0.78, concrete strength of ordinary concrete C30 and lightweight concrete C30, and inner aluminum alloy tube thickness of 5 mm and 3 mm. Based on the axial compression load capacity formula of the concrete short column of hollow sandwich steel tube, the restraint effect coefficient in the formula was modified, and finally a better fitting formula for the calculation of the axial compression load capacity of the concrete short column with hollow sandwich steel jacketed aluminum tube was derived. The results show that the failure mode of the component is bulging at the middle or end of the span, with the outer steel pipe bulging outward, the core concrete being crushed, and the inner aluminum alloy tube sinking

收稿日期:2022-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52027811);辽宁省重点研发计划项目(2019JH8/10100099);

沈阳市科技计划项目(20-206-4-13);辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJKZ0568)

作者简介:李 兵(1974-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:bingleesy@163.com。

inward. The ultimate load capacity of the members with hollow ratio of 0.78 and 0.51 is increased by 29% and 19% respectively compared with the members with hollow ratio of 0.38, and the ultimate load capacity of ordinary concrete members is increased by 60% compared with that of lightweight concrete members. The load capacity of members with inner pipe wall thickness of 5 mm is increased by about 2% compared with that of members with inner pipe wall thickness of 3 mm. The load bearing capacity of the member increases with the decrease of the hollow ratio, the increase of the concrete strength grade and the increase of the inner aluminum alloy tube thickness.

Key words: composite structure; hollow sandwich steel jacketed aluminum tube concrete; short column; axial compression test; load capacity calculation

0 引言

中空夹层钢管混凝土柱是由一个空心钢管代替中间核心混凝土的组合构件,这种结构在强度和延性上均表现出良好的性能,最初在沉管隧道和桥墩上应用,并且在平台柱、建筑结构和高层结构领域也具有广阔的应用前景^[1]。很多学者^[2-7]已经对其进行了研究,然而随着建筑行业的不断发展,结构轻量化、耐久性好、耐腐蚀性强已经成为未来发展的一种趋势。在这种趋势下,铝合金组合结构应运而生,铝合金材料具有很多优点,如自重轻、耐腐蚀、耐低温、可塑性强、绿色环保等^[8-11]。由于中空夹层结构^[12-17]在工程中一旦发生内管破坏或在中空部分放置重大仪器导致内管被侵蚀,对整个结构造成的危害将不可挽救,维修内管将会耗费大量的人力、财力,因此有必要将内管用轻质高性能材料代替。本文将中空夹层钢管混凝土结构的内层钢管用铝合金管替代,并将这种组合结构与钢管混凝土及铝管混凝土进行比较,在保证满足承载力的情况下大幅减轻结构质量。本文选取填充普通混凝土和轻质混凝土的中空夹层钢套铝管混凝土短柱构件进行研究,以期为今后工程中应用轻质高性能组合结构提供参考。

表1 中空夹层钢套铝管混凝土短柱试件尺寸

Table 1 Hollow sandwich steel jacketed aluminum tube concrete short column specimen size

试件编号	试件高度 H/mm	外管直径 D_1/mm	外管壁厚 t_1/mm	内管直径 D_2/mm	内管壁厚 t_2/mm	中空率	混凝土强度等级
HSCAC1-1	600	200	4	150	5	0.78	普通 C30
HSLCAC1-1	600	200	4	150	5	0.78	轻质 C30
HSCAC2-1	900	300	4	150	5	0.51	普通 C30
HSLCAC2-1	900	300	4	150	5	0.51	轻质 C30
HSCAC2-2	900	300	4	150	3	0.51	普通 C30
HSLCAC2-2	900	300	4	150	3	0.51	轻质 C30
HSCAC3-1	1 200	400	4	150	5	0.38	普通 C30
HSLCAC3-1	1 200	400	4	150	5	0.38	轻质 C30

注:试件编号中 H 代表中空,S 代表钢管,C 代表混凝土,A 代表铝合金管,LC 代表轻质混凝土。

1 试验概况

1.1 试件设计

标准短柱试件的长细比 L/B 一般取 $3\sim 3.5$,大部分试验构件都取 $3^{[18-23]}$,因此本文设计构件 $L/B=3$ 。本次试验共设计了 8 个中空夹层钢套铝管混凝土短柱试件,钢管的截面尺寸为 $\phi 200\times 4$ 、 $\phi 300\times 4$ 、 $\phi 400\times 4$;铝合金管的截面尺寸为 $\phi 150\times 3$ 、 $\phi 150\times 5$;混凝土强度等级为普通 C30 和轻质 C30。构件详细参数见表 1,混凝土配合比见表 2。

1.2 试件制作过程

试验的 8 个中空夹层钢套铝混凝土短柱构件制作过程主要分为 5 个部分,分别为:切割铝合金管、卷制钢管、将铝合金管和钢管与垫板连接起来、混凝土的浇筑及养护、制作端板。制作完成的构件如图 1 所示。

1.2.1 铝合金管制作过程

将 6 m 长的铝合金管按照构件所需长度加 10 mm 进行切割,切割完成后再将管件进行打磨,使得管件长度最终满足所需长度,并在所切割管件上截出一根用于制作标准试验拉伸试件,为后期材料力学性能试验做准备。

表 2 混凝土配合比
Table 2 Concrete mix ratio

等级	各材料用量/(kg·m ⁻³)									
	水泥	砂	粉煤灰	石	大陶粒	中陶粒	小陶粒	尾矿粉	减水剂	水
普通 C30	284	795	72	1 124					5.0	150
轻质 C30	486	389			83	122	122	85	5.8	170



(a) 未浇筑混凝土构件



(b) 混凝土养护完毕

图 1 试验构件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test components

1.2.2 钢管制作过程

将各个构件所需要的钢板长度和宽度计算好,在一整块钢板上进行排列,之后按照排列顺序进行切割,切割完毕后将切好的钢板卷制成圆形并在接口处进行焊接来制作钢管。

1.2.3 部件间连接

该构件内管为铝合金管,外管为钢管,在浇筑混凝土之前需要将它们与底板进行连接。通过查找文献发现钢管与底板的连接大多采用焊接形式,但铝合金管具有不可焊接性,因此铝合金管和底板的连接采用另外一种形式。整体连接过程为:首先采用角钢和自攻钉将铝合金管与底板连接,然后粘贴铝合金管外壁的应变片,最后再进行钢管和底板之间的焊接。

1.2.4 混凝土成型及养护

将试件的各个部分连接完毕后进行混凝土的浇筑,为了更好地与实际工程相对比,所采用的混凝土

是沈阳博泰混凝土制造厂生产的两种商用混凝土,一种是普通混凝土 C30,另外一种轻质混凝土 C30。对试件进行浇筑时,将试件竖直放置在地面上,将混凝土从上端进行逐层浇筑并使用振捣棒进行振捣使其均匀密实分布,最终浇筑平面应该略高于管件 3 mm 左右,这是为了防止混凝土在养护阶段收缩导致混凝土平面低于管件平面。浇筑构件混凝土的同时将普通混凝土和轻质混凝土两种材料分别制作 6 个标准混凝土试块,用来进行材料力学性能试验,混凝土养护 28 d 后,采用角磨机将混凝土表面以及上端打磨平整,保证在轴压试验时构件能够整体受力。

1.2.5 端板制作过程

由于该构件铝合金管外壁贴有应变片,为防止导线损坏情况的发生,端板设计为十字形凹槽截面,内管外壁导线可以通过凹槽顺出来与应变采集仪相连接,保证了试验数据的可获取性。

1.3 试验加载装置及过程

本次中空夹层钢套铝管混凝土短柱轴压试验的加载装置为 500 t 压力机,在铝合金管外壁以及钢管外壁中间相同位置四周分别布置 1 组纵向和横向应变片,并在钢管外壁跨中位置间隔 90°布置 4 个横向位移计,底板上两个对角点布置 2 个竖向位移计,测点布置如图 2 所示。

中空夹层钢套铝管混凝土短柱轴压试验过程中,需要测得的主要数据为试件在达到破坏状态下极限承载力的大小、试件跨中部位的横向应变和纵向应变,以及试件跨中部位的横向位移和整个试件的竖向位移,进而得出荷载与应变、荷载与位移之间的关系。

在正式加载之前需要对该组合结构进行预加载,预加载力的大小为理论计算出的实际承载力的 5% 左右,确保机器正常工作、各部分接触良好后则卸载再正式加载。本文正式加载过程采用分级加载,可以更好地保证力的传递性,每一级荷载大约为极限承载力的 10%,持载时间为 2 min;当发现构件刚度发生明显变化时,将取消持载时间,改为连续加载,在连续加载过程中,构件的承载力达到极限值后

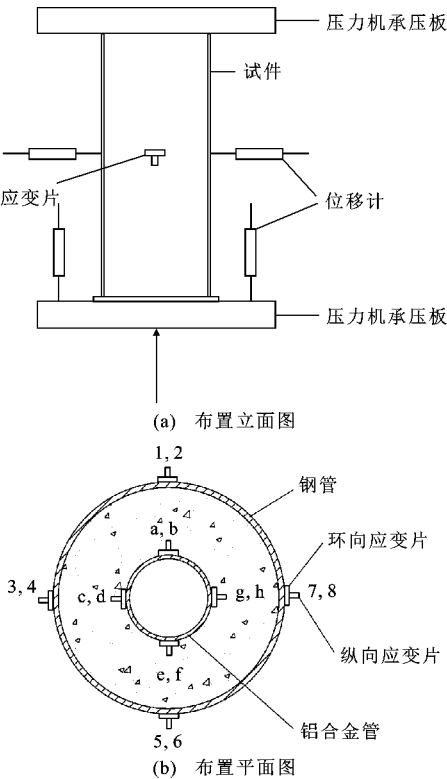


图 2 测点布置

Fig. 2 Measurement point layout

开始缓慢下降,当下降到最高点的 85%时,认为构件达到完全破坏状态,卸载,试验结束。

表 3 铝合金材料力学性能

Table 3 Mechanical properties of aluminum alloy materials

试件编号	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
AL1	77.9	161.8	65 446	0.35
AL2	113.5	223.0	74 645	0.32

2 材料性能试验

2.1 铝合金材料性能

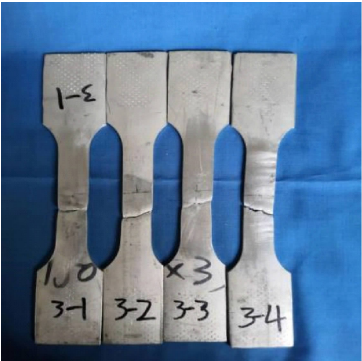
本次试验铝合金材料取自 2 根铝合金管,尺寸分别为 $\phi 150\times 3$ 、 $\phi 150\times 5$,试验依据《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T228. 1—2010)^[24]规定的方法进行。本文所用的铝合金材料为在 2 根长 6 m 的铝合金管上截得,因此将每根管所剩材料分别制作 3 个标准拉伸试件,经过实测以及计算取平均值,得出的铝合金材料力学性能如表 3 所示,拉伸破坏形态如图 3(a)所示。

2.2 钢材材料性能

本次试验钢管选用的钢板型号为 Q235,厚度为 4 mm,试验依据《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T228. 1—2010)^[24]规定的方法进行。在所用钢板上截取 3 个标准试件进行试验,经过实测以及计算取平均值,得出的钢材材料力学性能如表 4 所示,拉伸破坏形态如图 3(b)所示。通过表 4 中数据可以发现,钢材的弹性模量实测值偏低,这可能是由于钢板初始缺陷以及测试过程所造成的误差。

2.3 混凝土材料性能

该构件浇筑的混凝土是按照设计规程来设计



(a) 铝合金破坏形态



(b) 钢材破坏形态



(c) 混凝土破坏形态

图 3 材料性能构件破坏形态

Fig. 3 Failure modes of material performance components

表 4 钢材力学性能

Table 4 Mechanical properties of steel

试件	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/ 10^5 MPa	泊松比
钢板	306	434	1.64	0.34

的,设计配合比参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[25]。依据现行《普通混凝土力学性能试验方法》^[26]制作标准混凝土试块并进行材料性能试验,本次试验采用的 2 种混凝土材料配合比如表 2 所示,经计算得出 C30 普通混凝土的实际抗压强度为 43.8 MPa,C30 轻质混凝土的实际抗压强度为 24.6 MPa,混凝土块破坏形态如图 3(c)所示。

3 轴压试验结果及分析

3.1 试验过程及破坏形态

对 8 个中空夹层钢套铝管混凝土短柱轴压试验过程进行分析,观察各构件的试验现象,发现各构件虽有细微差别,但在整体上试验现象是一致的,即在加载初期,间断性地会听到几声轻微的响声,分析其

原因为压力机将构件与混凝土压实,此时构件处于弹性阶段,试件也并没有发出声响以及表现出肉眼可见的变形;继续加载过程中,钢管和铝管相继发生屈服,伴随着混凝土开裂声音的出现,荷载-位移曲线斜率明显变小,试件可以进入连续加载状态;试件中部和端部发生鼓曲,连续加载达到试件极限承载力,钢管局部鼓曲变形有所增加,混凝土破碎声音更加明显;继续加载,此时荷载开始下降,位移继续增大,钢管中部出现明显鼓曲,端部也有少量鼓曲现象。将加载完毕的构件进行剖切处理,观察混凝土和内铝合金管的破坏形态可以发现:在外钢管鼓曲位置的核心混凝土发生破碎,内铝管也发生向内凹陷的变形。本次中空夹层钢套铝管混凝土轴压短柱试验典型构件的具体破坏情况如图 4 所示。

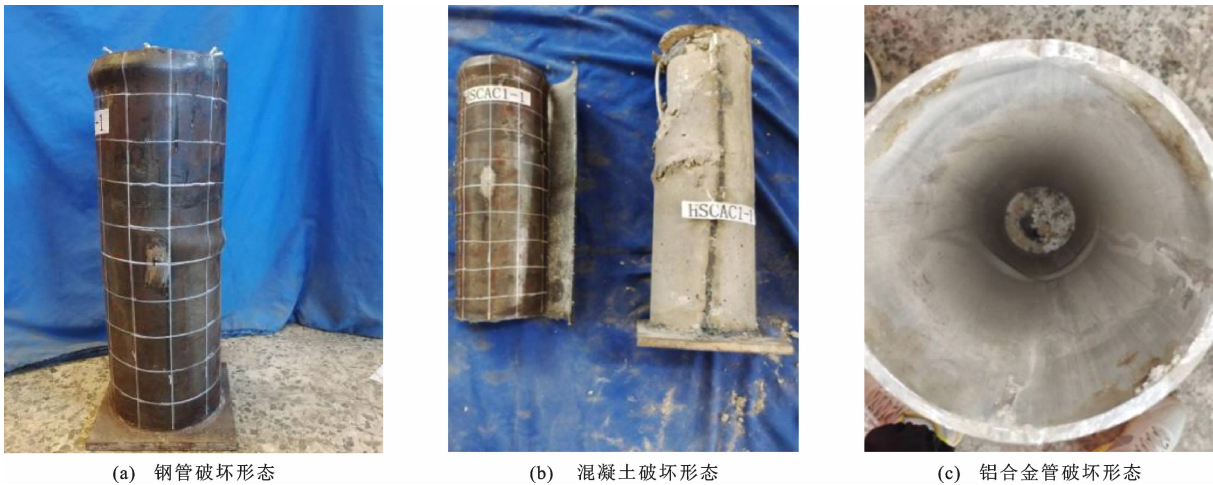


图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of specimen

3.2 荷载-位移关系曲线

由于本次试验的构件为中空夹层钢套铝混凝土短柱构件,试验为轴压试验,因此主要考虑其竖向位移,竖向位移大小由 2 只竖向位移计采集的数据进行对比,舍去无效数据,剩下的数据求平均值取得。构件轴向试验所得承载力如表 5 所示,并将试验所得结果分为 3 类进行对比分析。

3.2.1 中空率对比

对比普通混凝土构件与轻质混凝土构件 2 组试验,研究中空率对构件承载力的影响,构件中空率分别为 0.38、0.51、0.78 时的对比曲线如图 5 所示。通过荷载-位移($P-\Delta$)对比曲线可以得出:随着中空率的减小,构件的承载力呈现下降趋势,延性也在下降,线弹性刚度在增加。普通混凝土构件中,中空率为 0.78 和 0.51 的构件较中空率为 0.38 的构件极限承载力分别提高 43%、25%,中空率为 0.78 的构

件较中空率为 0.51 的构件极限承载力提高 17%。轻质混凝土构件中,中空率为 0.78 和 0.51 的构件较中空率为 0.38 的构件极限承载力分别提高 29%、19%,中空率为 0.78 的构件较中空率为 0.51 的构件极限承载力提高 15%。

3.2.2 混凝土强度对比

通过 4 组试验分别研究在不同尺寸的构件中混凝土强度对承载力的影响,对比曲线如图 6 所示。通过荷载-位移曲线可以得出:无论是在哪一种尺寸,普通混凝土构件的承载力和线弹性刚度均大于轻质混凝土,但轻质混凝土构件的延性要好于普通混凝土;在外钢管尺寸为 $\phi 200 \times 4$ 、内铝合金管尺寸为 $\phi 150 \times 5$ 的构件中,普通混凝土构件的极限承载力相较于轻质混凝土构件提升 8%;在外钢管尺寸为 $\phi 300 \times 4$ 、内铝合金管尺寸为 $\phi 150 \times 5$ 的构件中,普通混凝土构件的极限承载力相较于轻质混凝土构

表 5 试验结果
Table 5 Test results

试件编号	核心混凝土类型	内管壁厚/mm	中空率	极限承载力/kN	线弹性刚度/(kN·mm ⁻¹)
HSCAC1-1	普通 C30	5	0.78	1 310	359.28
HSLCAC1-1	轻质 C30	5	0.78	1 209	330.48
HSCAC2-1	普通 C30	5	0.51	3 189	746.72
HSLCAC2-1	轻质 C30	5	0.51	2 320	637.80
HSCAC2-2	普通 C30	3	0.51	3 013	644.68
HSLCAC2-2	轻质 C30	3	0.51	2 210	558.55
HSCAC3-1	普通 C30	5	0.38	5 624	1 169.06
HSLCAC3-1	轻质 C30	5	0.38	3 535	844.03

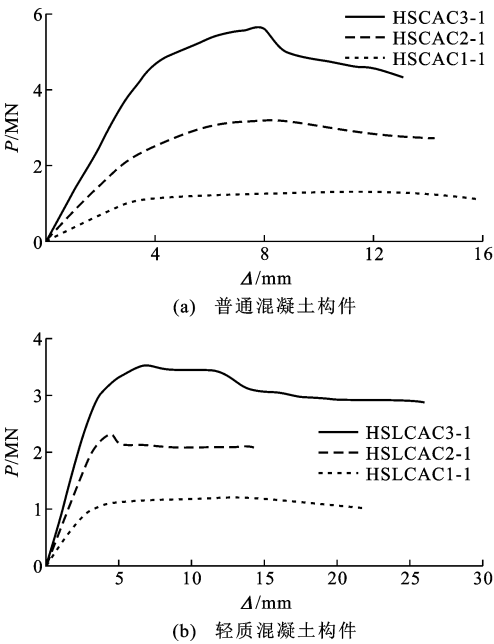


图 5 不同中空率下的荷载-位移曲线
Fig. 5 Load-displacement curves under different hollow ratio

件提升 40%；在外钢管尺寸为 $\phi 300 \times 4$ 、内铝合金管尺寸为 $\phi 150 \times 3$ 的构件中,普通混凝土构件的极限承载力相较于轻质混凝土构件提升 44%；在外钢管尺寸为 $\phi 400 \times 4$ 、内铝合金管尺寸为 $\phi 150 \times 5$ 的构件中,普通混凝土构件的极限承载力相较于轻质混凝土构件提升 60%。

3.2.3 内铝合金管厚度对比

通过 2 组试验对比研究内铝合金管壁厚对普通混凝土和轻质混凝土构件的影响,对比曲线如图 7 所示。通过荷载-位移曲线可以得出:无论是普通混凝土还是轻质混凝土,构件的承载力、线弹性刚度均随着内铝合金管壁厚的增加而增大;在普通混凝土构件中,内管壁厚为 5 mm 的构件相较于内管壁厚为 3 mm 的构件承载力提高约 2%,线弹性刚度提高约 15%;在轻质混凝土构件中,内管壁厚为 5 mm

的构件相较于内管壁厚为 3 mm 的构件承载力提高约 5%,线弹性刚度提高约 15%。

3.3 轴压全过程分析

通过典型构件的荷载-位移曲线以及应力云图进行中空夹层钢套铝管短柱轴压全过程分析,图 8 为构件典型荷载-位移曲线。可以看出,轴压过程主要分为 3 个阶段,分别为弹性阶段 OA、弹塑性阶段 AB 以及下降阶段 BC。

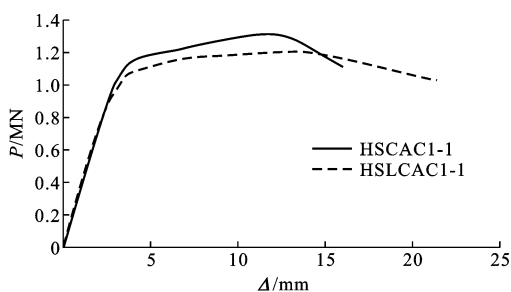
本文所研究的中空夹层钢套铝管混凝土短柱在轴压过程中各个阶段具体受力情况如下:

(1)弹性阶段(OA 段)

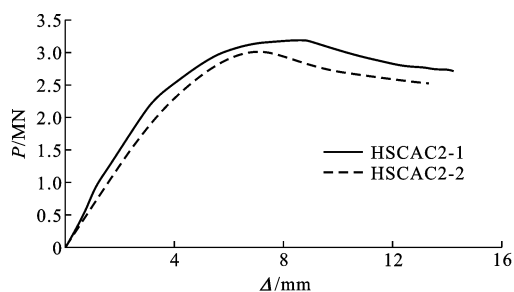
在预加载卸载完毕后,开始正式加载,此时构件各材料均处于弹性阶段,表现出良好的受力性能,外钢管、夹层混凝土以及内铝合金管处于单独受力状态,荷载-位移曲线显示出线性变化,表明此时部件的每种材料都处于弹性阶段。从荷载-位移曲线可以看到:弹性阶段的最大荷载为极限荷载的 80%~90%,即该类组合构件的比例极限为极限荷载的 80%~90%,在达到比例极限之前组合结构各材料间一般不发生相互挤压,各材料以及材料间也不发生明显的变形。

(2)弹塑性阶段(AB 段)

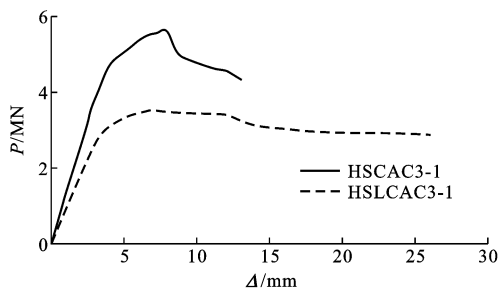
当加载到比例极限时,继续加载,发现当荷载持续增大时,荷载-位移曲线不再是线性的,而是随着位移继续等量增加时,荷载增量逐渐降低,直至荷载值达到极限荷载值,荷载值便不再增加,此过程为该种组合结构轴压过程的弹塑性阶段。在这个阶段,构件仍然可以保持正常工作,构件各种材料间为混凝土对内外管进行挤压,并且外管对夹层混凝土的约束效应较大,受到的挤压更加明显;内外管对夹层混凝土产生的约束效应开始发生作用,限制夹层混凝土的变形,提高整体承载力;混凝土从单向受压状态转变为三向受压状态,钢管外壁出现了明显的局部凸起,其承载能力已接近极限。



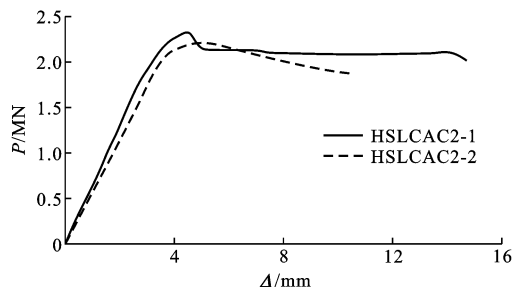
(a) 长度为600 mm的构件



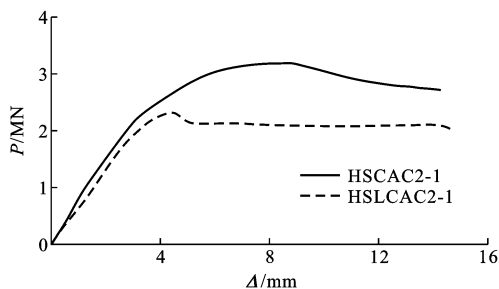
(a) 普通混凝土构件



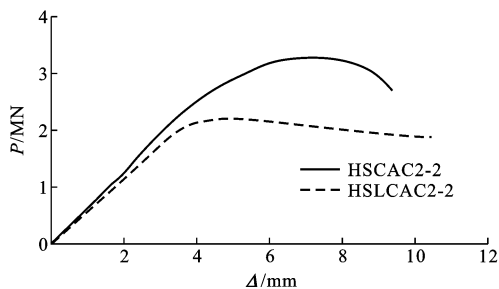
(b) 长度为1200 mm的构件



(b) 轻质混凝土构件



(c) 长度为900 mm的构件(内管壁厚5 mm)



(d) 长度为900 mm的构件(内管壁厚3 mm)

图6 不同混凝土强度下的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves under different concrete strength

图7 不同内铝合金管厚度下的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves under different inner aluminum alloy tube thickness

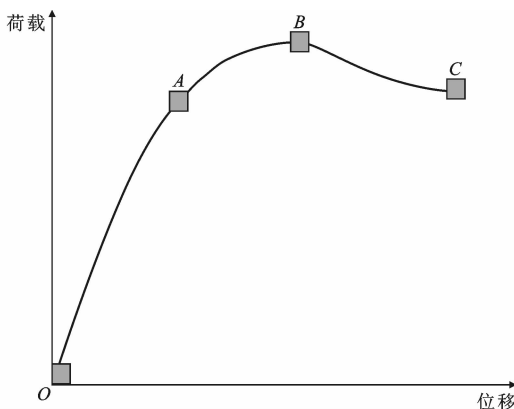


图8 构件典型荷载-位移曲线

Fig. 8 Typical load-displacement curve for component

定的约束效应,由于这种效应作用的有限性,只能使得破坏进程减慢,内外管以及新型铝合金材料的加入使得构件在整个过程中的性能有所提高,具有较强的承载能力。

3.4 轴压承载力计算

通过对相关学者^[27-29]提出的中空夹层钢管混凝土柱承载力计算公式进行对比研究发现,黄宏^[27]提出的公式与本文试验结果更加接近,因此本文承载力计算公式采用黄宏^[27]提出的公式,并对其约束效应系数进行修正,具体公式为

$$N_u = A_{sco} f_{scy} + A_{al} f_{al} \quad (1)$$

$$A_{sco} = A_{so} + A_c \quad (2)$$

$$f_{scy} = C_1 \chi^2 f_{yo} + C_2 (1.14 + 1.02 \xi') f_{ck} \quad (3)$$

(3)下降阶段(BC段)
在荷载达到极限后,第二阶段结束,进入下降阶段。在这个阶段,构件的荷载开始逐渐降低,但竖向位移仍然不断增大,外钢管同时承受纵向受压与环向受压,并且环向的挤压一直在持续增大;当环向应力达到屈服极限时,混凝土被压碎,内外管鼓曲不再继续发展,说明此时构件整体破坏,下降段结束。

从中空夹层钢套铝管混凝土短柱轴压过程的各阶段可以看出:在试件的加载后期,虽然外钢管和内铝合金管发生屈服,但其对夹层混凝土仍然具有一

$$C_1=\alpha/(1+\alpha) \tag{4}$$
$$C_2=(1+\alpha_n)/(1+\alpha) \tag{5}$$
$$\alpha=A_{so}/A_c \tag{6}$$
$$\alpha_n=A_{so}/A_{ce} \tag{7}$$
$$\alpha_{al}=A_{al}/A_c \tag{8}$$
$$\xi=\alpha_n f_{yo}/f_{ck} \tag{9}$$

式中： N_u 为轴压承载力； A_{sco} 为钢管和混凝土的面积； A_{al} 铝合金管的面积； f_{scy} 为钢管和混凝土的组合强度； f_{al} 为铝合金管的屈服强度； A_{so} 和 A_c 分别为钢管截面面积和核心混凝土截面面积； χ 为中空率； f_{ck} 和 f_{yo} 分别为混凝土立方体抗压强度标准值和钢管屈服强度； C_1 和 C_2 为计算系数； α 和 α_n 分别为含钢率和名义含钢率； A_{ce} 为钢管内径所包围的面积； α_{al} 为构件含铝率；对于普通混凝土，修正系数 $\xi'=a\xi$ ，其中 $a=0.45\alpha_{al}^2-0.85\alpha_{al}+1.97$ ；对于轻质混凝土，修正系数 $\xi'=b\xi$ ，其中 $b=-0.94\alpha_{al}^2+0.45\alpha_{al}+1.2$ 。

按照修正公式计算的各构件承载力计算值 N_u 与试验值 N_y 如表 6 所示。通过对比发现，使用修正后约束效应系数的承载力与试验所得出的承载力相差在 10% 以内，满足要求，可以将此公式应用于中空夹层钢套铝管短柱的承载力计算中。

表 6 极限承载力对比

Table 6 Comparison of ultimate bearing capacity

试件编号	N_y/kN	N_u/kN	N_u/N_y
HSCAC1-1	1 310	1 451	1.108
HSLCAC1-1	1 209	1 271	1.051
HSCAC2-1	3 189	3 493	1.095
HSLCAC2-1	2 320	2 404	1.036
HSCAC2-2	3 013	3 305	1.097
HSLCAC2-2	2 210	2 272	1.028
HSCAC3-1	5 624	5 631	1.001
HSLCAC3-1	3 535	3 762	1.064

4 结 语

(1)中空夹层钢套铝合金管混凝土短柱在轴压过程中的主要破坏现象为：在接近或达到构件承载力后，外钢管端部或跨中部位发生局部鼓曲，混凝土被压碎，内铝合金管在相应位置也出现局部鼓曲变形。

(2)根据试验各构件的荷载-位移曲线分析可以得出：随着中空率的降低、混凝土强度的提高和铝合金管材厚度的增大，极限承载力和刚度都会随之增大。

(3)将试验结果代入中空夹层钢管承载力计算公式进行分析，得到约束效应系数的影响，通过修正

约束效应系数得出中空夹层钢套铝合金管混凝土短柱轴压承载力计算公式。

参考文献：
References:

[1] 陶 忠,韩林海,黄 宏.圆中空夹层钢管混凝土柱力学性能研究[J].土木工程学报,2004,37(10):41-51.
TAO Zhong,HAN Linhai,HUANG Hong. Mechanical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular columns with circular sections[J]. China Civil Engineering Journal,2004,37(10):41-51.

[2] UENAKA K,KITOH H,SONODA K. Concrete filled double skin circular stub columns under compression [J]. Thin-walled Structures,2010,48(1):19-24.

[3] WAN C Y,ZHA X X,DASSEKPO J B M. Analysis of axially loaded concrete filled circular hollow double steel tubular columns exposed to fire[J]. Fire Safety Journal,2017,88:1-12.

[4] LIANG W,DONG J F,WANG Q Y. Mechanical behaviour of concrete-filled double-skin steel tube (CFDST) with stiffeners under axial and eccentric loading [J]. Thin-walled Structures, 2019, 138: 215-230.

[5] 钱稼茹,张 扬,纪晓东,等.复合钢管高强混凝土短柱轴心受压性能试验与分析[J]. 建筑结构学报, 2011,32(12):162-169.
QIAN Jiaru,ZHANG Yang,JI Xiaodong,et al. Test and analysis of axial compressive behavior of short composite-sectioned high strength concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Building Structures, 2011,32(12):162-169.

[6] 王志滨,郭俊涛,高扬虹,等.中空夹层薄壁钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑钢结构进展,2018, 20(2):53-59.
WANG Zhibin,GUO Juntao,GAO Yanghong,et al. Study on the behavior of concrete-filled double-skin thin-walled steel tubular stub columns under axial compression [J]. Progress in Steel Building Structures,2018,20(2):53-59.

[7] 方 旭.圆中空夹层钢管超高性能混凝土柱轴压力学性能研究[D].南昌:华东交通大学,2020.
FANG Xu. Study on the axial compression behavior of UHPC columns with circular hollow sandwich steel tubes[D]. Nanchang:East China Jiaotong University, 2020.

[8] 郭小农,宗绍晗,成张佳宁,等.铝合金结构耐腐蚀性能研究现状简述[J]. 建筑钢结构进展,2021,23(6): 1-12,60.

- GUO Xiaonong, ZONG Shaohan, CHENG Zhangjia-ning, et al. State-of-the-art of the research on corrosion resistance of aluminum alloy structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(6): 1-12, 60.
- [9] 徐剑佩, 吴 将, 郭 勇, 等. 高强铝合金结构在输变电工程中的应用与发展研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2021, 34(5): 67-73.
- XU Jianpei, WU Jiang, GUO Yong, et al. Application and development of high strength aluminum alloy structure in power transmission and transformation engineering [J]. Journal of Ningbo University (NESS), 2021, 34(5): 67-73.
- [10] ZHOU F, YOUNG B. Concrete-filled aluminum circular hollow section column tests[J]. Thin-walled Structures, 2009, 47(11): 1272-1280.
- [11] YUAN H X, WANG Y Q, CHANG T, et al. Local buckling and postbuckling strength of extruded aluminium alloy stub columns with slender I-sections [J]. Thin-walled Structures, 2015, 90: 140-149.
- [12] 黄 宏, 左 勇, 陈梦成, 等. 大空心率方中空夹层钢管超高性能混凝土短柱轴压力学性能研究[J]. 实验力学, 2021, 36(4): 543-552.
- HUANG Hong, ZUO Yong, CHEN Mengcheng, et al. Research on mechanical properties of large hollow ultra-high performance concrete filled double skin square steel tubes short column under axial loading [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(4): 543-552.
- [13] 王灿灿, 梁旭东, 朱培红, 等. 圆形高强中空夹层钢管混凝土构件轴压性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(3): 366-378.
- WANG Cancan, LIANG Xudong, ZHU Peihong, et al. Study on the axial compression behavior of circular high strength concrete-filled double skin steel tubular members[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 366-378.
- [14] 罗 靓, 程博汉, 吕 辉. 圆钢管混凝土组合框架拟动力性能有限元分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(3): 124-135.
- LUO Liang, CHENG Bohan, LU Hui. Finite element analysis for quasi dynamic behavior of concrete filled circular steel tubular composite space frame [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(3): 124-135.
- [15] 陈德劲, 查晓雄, 侯宪安, 等. 钢管混凝土 X 形交叉柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增 1): 351-360.
- CHEN Dejing, ZHA Xiaoxiong, HOU Xian'an, et al. Compression behavior of the concrete-filled steel tubular X-column [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(S1): 351-360.
- [16] 秦 鹏, 周 昱, 李开琼, 等. CFRP 约束圆钢管高强混凝土短柱轴压试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 47-54.
- QIN Peng, ZHOU Yu, LI Kaiqiong, et al. Experimental study on axial compression behavior of CFRP-high strength concrete filled circular steel tube short columns[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(5): 47-54.
- [17] 陈全有, 李吉人, 王庆利. 方套方中空夹层钢管混凝土压扭力学性能试验研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(5): 99-107.
- CHEN Quanyou, LI Jiren, WANG Qingli. Experimental study on compression-torsion mechanical properties of concrete filled double skin steel tubes columns with square set square sections[J]. Building Science, 2021, 37(5): 99-107.
- [18] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- ZHONG Shantong. The concrete-filled steel tubular structures[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [19] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- CAI Shaohuai. Modern steel tube concrete structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [20] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- HAN Linhai. Concrete-filled steel tubular structure: theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [21] 任庆新, 魏秋宇, 丁纪楠. 圆中空钢管混凝土叠合构件纯弯性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(3): 437-444.
- REN Qingxin, WEI Qiuyu, DING Jinan. Study on circle hollow concrete-encased CFST members subject to pure bending[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2021, 37(3): 437-444.
- [22] 李晓丽, 陈 莉. 高强方钢管-混凝土-圆钢管组合短柱轴压性能[J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(1): 112-122.
- LI Xiaoli, CHEN Li. Axial compression behavior of high-strength square-steel-tube-concrete-circular-steel-tube combination short column [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(1): 112-122.

[23] 闫维明,孔令旭,慈俊昌,等. 大径宽比钢管混凝土叠合柱轴压试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(6):21-28.
YAN Weiming, KONG Lingxu, CI Junchang, et al. Experiment on axial compression of concrete filled steel tube composite columns with large diameter width ratio[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 21-28.

[24] 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法:GB/T 228. 1—2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
Metallic materials — tensile testing — part 1: method of test at room temperature: GB/T 228. 1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

[25] 普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[26] 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.
Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.

[27] 黄 宏. 中空夹层钢管混凝土压弯构件的力学性能研究[D]. 福州:福州大学, 2006.
HUANG Hong. Behavior of concrete filled double-skin steel tubular beam-columns[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.

[28] 赵均海,魏 锦. 中空夹层钢管混凝土柱极限承载力研究[J]. 中国科技论文在线, 2007, 2(9):688-692.
ZHAO Junhai, WEI Jin. Analysis of ultimate bearing of concrete filled double skin steel tubular columns [J]. Sciencepaper Online, 2007, 2(9): 688-692.

[29] 聂建国,廖彦波. 双圆夹层钢管混凝土柱轴压承载力计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(3): 312-315.
NIE Jianguo, LIAO Yanbo. Bearing capacity calculations for concrete filled double skin tubes[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(3): 312-315.