

# 历经长期持荷后钢骨混凝土柱的抗震试验研究

陈周熠<sup>1†</sup>,周宏<sup>1</sup>,贾晓峰<sup>1</sup>,陈昌萍<sup>1</sup>,张望喜<sup>2</sup>

(1. 厦门大学 土木工程系,福建 厦门 361005;2. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘要:**针对钢骨混凝土柱结构在长期荷载作用下,由于混凝土徐变和收缩引发的与时间相关的力学问题,开展了钢骨混凝土柱及钢筋混凝土柱对比试件历经轴向长期持荷后,在水平低周反复荷载下的抗震性能试验.试验监测了长期持荷期间由徐变和收缩引起的柱试件的轴向长期变形,考察了柱试件在抗震试验中的破坏形态、变形和强度等性能指标.试验结果表明,柱试件在持荷 1 年后,即已完成大部分徐变变形.抗震试验中,所有试件均发生弯剪破坏,无论其是否经历长期持荷,钢骨配置及试验轴压比对各柱试件的影响规律同以往相关研究所得到的结论基本一致:配置钢骨会提高柱试件的变形和耗能性能;随轴压比的增加,柱试件的变形和耗能性能降低,但抗剪承载力有所提高.长期持荷作用使钢筋混凝土柱对比试件的初始刚度减小,屈服位移增大,延性系数减小,但对于钢骨混凝土柱试件,由于配置了核心钢骨,长期持荷的影响被抑制和弱化.因此,相较于钢骨配置及轴压比等重要设计参数,长期持荷对钢骨混凝土柱抗震性能的影响在设计中可以忽略.

**关键词:**钢骨混凝土;柱;徐变;收缩;抗震性能

**中图分类号:**TU317

**文献标志码:**A

## Experimental Study on Seismic Performance of Steel Reinforced Concrete Columns after Axial Sustained Loading

CHEN Zhouyi<sup>1†</sup>, ZHOU Hong<sup>1</sup>, JIA Xiaofeng<sup>1</sup>, CHEN Changping<sup>1</sup>, ZHANG Wangxi<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

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

**Abstract:** In view of the time-dependent behavior of steel reinforced concrete (SRC) columns caused by creep and shrinkage under sustained loading, this paper provides an experimental study on the seismic behavior of SRC columns under low cyclic reversed loading, after they are subjected to axial sustained loading. Long-term axial deformations due to shrinkage and creep of the concrete were recorded, and the failure mode, deformation and strength of these columns in seismic test were analyzed. The test results indicate that the columns develop most of the creep deformation after 1 year of axial sustained loading. All columns fail in flexural-shear failure mode under the cyclic loading test. Whether or not the columns undergo sustained loading, the influence of steel reinforcement configuration and axial compression ratio on their seismic performance is similar to the conclusions drawn by previous studies. The deformation capacity and energy dissipation capacity of columns can be improved by adding steel tube in the columns. With the increase of axial compression ratio, the deformation capacity and energy dissipation capacity of columns de-

\* 收稿日期:2019-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50908197,51778551), National Natural Science Foundation of China(50908197,51778551)

作者简介:陈周熠(1974—),男,福建南平人,厦门大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: chenzy@xmu.edu.cn

crease, but the shear capacity is improved. Sustained loading can lead to enlargement of yielding displacement, while it can decrease the initial stiffness and ductility coefficient in reinforced concrete columns. However, for the steel reinforced concrete columns, the influence of sustained loading on their seismic performance is restricted and weakened owing to the contribution of steel tube. Therefore, compared with the important design parameters such as steel reinforcement configuration and axial compression ratio, the influence of sustained loading on the seismic performance of SRC columns can be neglected in design.

**Key words:** steel reinforced concrete; column; creep; shrinkage; seismic performance

钢骨混凝土结构是指在钢骨周围配置钢筋,并浇筑混凝土的结构,也称为型钢混凝土结构或劲性钢筋混凝土结构。由于钢骨混凝土结构具有强度高、刚度大的特点,以及良好的延性及耗能性能,因此在地震区高层及超高层建筑中应用越来越广泛。实际工程中的钢骨混凝土结构在遭受预期地震设计荷载时,通常已建成若干年,在正常服役荷载下,已经历了较长时间的收缩和徐变。由于徐变和收缩会导致柱中混凝土在长期荷载作用下变形持续增长,进而影响钢骨与混凝土之间的黏结滑移性能,引起柱中钢骨和混凝土之间的应力重分布<sup>[1]</sup>。因此,针对既有钢骨混凝土结构,有必要探究长期荷载作用对其各种力学性能,尤其是抗震性能的影响。

目前关于钢与混凝土组合柱结构在长期荷载作用下的力学性能研究,主要针对钢管混凝土柱开展。研究内容集中在两个方面<sup>[2-7]</sup>:一是研究长期荷载下钢管混凝土的徐变收缩规律,并从理论上构建相应的计算模型;二是研究长期荷载作用对钢管混凝土柱承载力及稳定性能的影响。这些研究工作卓有成效,但是这些结论不能简单移植到钢骨混凝土柱结构中。因为在钢骨混凝土结构中,混凝土是外包在钢骨之外,而钢管混凝土结构中混凝土则是浇筑在钢管之中,和大气环境隔离。两者在长期荷载作用下必然会表现出不同的力学特性。

但目前关于钢骨混凝土柱结构在长期荷载作用下力学性能的研究还较少,相关文献也主要报道了钢骨混凝土柱在长期荷载作用下的变形规律研究。其中,陈周熠等<sup>[8]</sup>开展了钢骨混凝土短柱的长期轴向荷载试验研究,监测了柱的轴向长期变形,并给出相应的数值模拟方法。韩林海等<sup>[9]</sup>完成了核心钢管外包混凝土短柱的徐变全过程有限元分析,讨论了应变发展、应力重分布以及钢管内外混凝土的约束效果等。An等<sup>[10]</sup>则基于宽翼缘钢骨对影响收缩徐变的水分扩散机制的阻碍作用,研究了宽翼缘钢骨的几何

形状对钢骨混凝土柱的长期变形发展的影响规律。

本文开展了钢骨混凝土柱及钢筋混凝土柱对比试件历经轴向长期持荷后,在水平低周反复荷载下的抗震性能试验。根据测试和分析得到各试件的变形和强度等性能指标,考察了长期荷载作用对钢骨混凝土柱抗震性能的影响。

## 1 试验研究概况

### 1.1 试件设计及材料特性

本次试验中,设计柱试件数量为6个,其中3个进行了长期荷载试验及抗震性能试验;另外3个作为对比试件,自由放置于同一环境中,最后一同进行抗震性能试验。试件参数列于表1,变化参量主要是长期持荷的轴压比,以及柱的核心是否配置钢骨(圆钢管)。

表1 试件参数及试验结果

Tab.1 Properties of specimens and their test results

试件	钢骨配置	长期持荷设计轴压比	抗剪试验设计轴压比	屈服位移/mm	延性系数	$P_0/kN$
U-N0	无	0	0.4	0.92	4.83	86.6
U-N1	无	0.4	0.4	1.38	2.66	91.4
T-N0-1	有	0	0.4	1.13	5.32	89.0
T-N1	有	0.4	0.4	1.12	4.81	83.3
T-N0-2	有	0	0.6	1.29	2.86	95.1
T-N2	有	0.6	0.6	1.48	2.76	103.4

注: $P_0$ 为抗剪极限承载力试验值。

柱断面尺寸160 mm×160 mm,断面形状如图1所示。试件设计成“⊥”形,上部柱身高度680 mm,下部底座尺寸为760 mm×200 mm×300 mm(长×宽×高)。试件T-N0-1、T-N1、T-N0-2、T-N2的钢骨采用 $\phi 75 \times 1.8$ 的无缝钢管。试件四角配置了直径12 mm的变形钢筋作为纵筋,采用直径8 mm的光圆钢筋作

为箍筋,按间距 100 mm 布置。

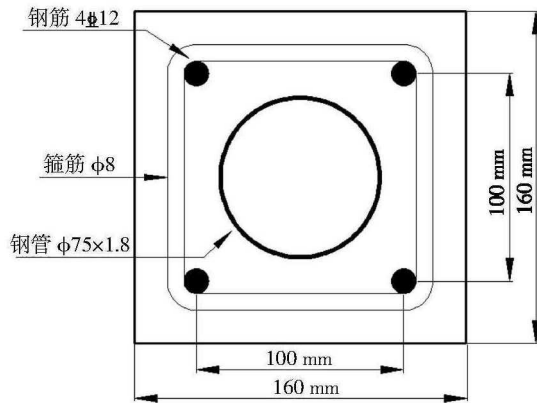


图 1 试件截面尺寸

Fig.1 Cross section of test specimens

试件混凝土采用最大粒径为 10 mm 的砾石作为粗骨料,混凝土配合比为水泥:水:砂:粗骨料=1:0.42:1.01:1.94(按质量),28 d 立方体抗压强度为  $f_{cm} = 26.4$  MPa。圆钢管切取试样的屈服强度为  $F_{ys} = 268$  MPa;所用直径 12 mm 变形钢筋的实测屈服强度为  $F_{yr} = 436$  MPa;所用直径 8 mm 光圆钢筋的实测屈服强度为  $F_{yh} = 325$  MPa。

### 1.2 长期荷载试验的加载及测试

对于长期荷载试验,持久荷载的施加和保持是关键所在。本试验中长期轴向荷载的施加是通过采用如图 2 所示的自反力徐变试验机来进行的。试验机由 4 根钢螺杆,1 个荷载传感器,4 片方钢板以及 4 组强力弹簧构成。加载的具体方法是:在对试件进行几何对中后,利用液压千斤顶施加轴向荷载,这时包括试件、荷载传感器及强力弹簧组在内都受到了等值的轴向荷载;通过监测荷载传感器的读数,当试件达到所需施加的荷载量值后,锁紧邻近试件及荷载传感器的那片钢板上方的螺帽,这样,利用下部强力弹簧组提供的弹性恢复力,即可维持对于试件的轴向长期加载;此时可卸除千斤顶,此后,通过监测荷载传感器读数,若发现荷载值损失超过 5%,即可重复上述步骤,及时给试件补加荷载。

试件加载期间的轴向应变值,是通过监测浇筑在试件侧面上的标距为 150 mm 的两个金属预埋件之间的长度变化来获得的。长度测读采用千分表进行,将千分表固定在其中一个预埋件上,千分表的滑杆则顶在固定于另一个预埋件的标杆上,每个试件都在其中两个对应侧面上安装了这套测量装置。试验环境的温湿度通过温湿度自动测试仪进行监测采集。

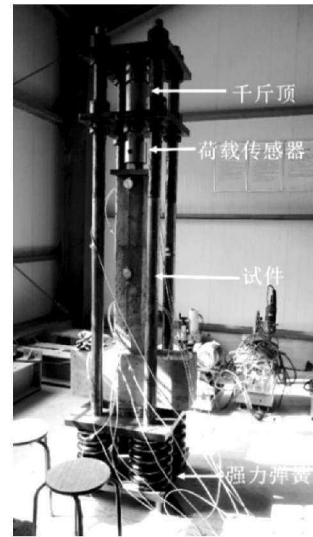


图 2 长期荷载试验装置

Fig.2 Long-term load test setup

实际工程中,框架柱承受的长期荷载在服役期内可能出现加卸载的情况,为此,对试件 U-N1、T-N1 及 T-N2 开展的长期荷载试验,采取两阶段长期持荷方式。在混凝土龄期达到 28 d 时,施加荷载首次持荷 349 d 后卸载,放置 583 d 后,继续对试件进行二次加载持荷 568 d,长期持荷设计轴压比(长期持荷值与加载时名义极限承载力的比值)参见表 1。持荷试验中,一阶段持荷时,对试件 U-N1、T-N1 及 T-N2 施加的实测轴向长期荷载分别为 286 kN、317 kN 和 450 kN,分别相当于试件在 28 d 龄期时的名义极限承载力的 45%、42%和 60%。二阶段持荷时,对试件 U-N1、T-N1 及 T-N2 施加的实测轴向长期荷载分别为 311 kN、318 kN 和 518 kN,按加载时预留混凝土试块测试得到的立方体抗压强度 32.9 MPa 计算,分别相当于试件名义极限承载力的 42%、37%和 60%。

### 1.3 抗震性能试验

在轴向长期持荷试验结束后,将所有试件从徐变试验机上卸除,与自由放置的对比试件一道实施水平低周反复荷载下的抗震性能试验。

试验在厦门大学结构工程实验室进行。试件固定通过两根压梁和两组螺栓将“⊥”形试件下部底座的两端固定在试验台座上来完成安装。柱子的竖向压力通过安装在加载框架上部的竖向作动器施加,该作动器与加载框架梁之间采用滚轴支座连接,可实现与柱顶的无摩擦跟动。柱子的水平荷载则通过固定在反力墙上的水平作动器来施加。

试验测试参量主要有:在柱的水平加载点处布

置位移计以测定其水平位移;在柱的底座处分别布置水平和竖向位移计以监测柱底是否发生水平滑动和上下转动;水平荷载值则由电液伺服加载系统的控制器实时输出信号,与上述各位移计的信号一起,同步由 DH3820 采集系统采集。

加载机制为恒定轴力下的水平低周反复加载。首先,通过竖向作动器在试件柱顶施加轴向力至试验设计荷载值。之后,采用荷载-位移混合控制方法施加水平荷载;试件屈服前由荷载控制加载,试件屈服后,取屈服位移的倍数为级差采用位移控制加载,对应于每个荷载步循环三次,直至某一级位移下荷载降到峰值荷载的 85% 以下时,试验结束。

试验中,各试件剪跨比统一取为 3.2,轴压比参见表 1。试验时,同期预留的混凝土试块抗压试验得到的立方体强度为 33.5 MPa,与第二阶段长期持荷加载时预留试块所得强度接近,说明混凝土强度随龄期增长的程度已趋于稳定。

## 2 长期荷载下试件的变形测量

各试件长期荷载试验得到的应变随持荷时间变化曲线参见图 3,其中,图 3(a)为各试件一阶段持荷变形曲线图,图 3(b)为各试件二阶段持荷变形曲线图。图中纵坐标表示的应变是荷载施加时的初始弹性应变和后期随时间增长的应变总和。

如图 3(a)所示,试件 U-N1、T-N1 和 T-N2 在一阶段加载 349 d 时最终的应变值分别达到了持荷初始弹性应变值的 3.06、2.48 和 2.50 倍,试验表明在长期荷载作用下柱试件的变形增长较为显著。试件 U-N1 和 T-N1 轴压比相同,但 T-N1 较 U-N1 增加了核心钢骨的配置,它们的试验结果比较表明,试件配置了核心钢骨,长期变形值有所降低。试件 T-N1 和 T-N2 则有相同的钢骨配置和不同的轴压比,它们的结果比较表明,随轴压比的增加,长期变形值相应增大,这主要是因为徐变受混凝土应力水平的影响很大。

如图 3(b)所示,试件 U-N1、T-N1 和 T-N2 在二阶段加载 568 d 时最终的应变值分别达到了二次持荷初始弹性应变值的 1.18、1.79 和 1.45 倍,表明各试件在持荷接近 1 年后卸载,二次再加载后的长期持荷变形增长已较为缓慢。根据文献[11]可知,试件在一阶段持荷接近 1 年时,大部分徐变已完成,此后卸载,大小约为卸载前徐变的 5%~30% 的可恢复徐变在卸载后的 1~2 个月即趋于稳定,而大部分徐变不

可恢复。这就从徐变理论上解释了再次加载后二阶段持荷变形增长缓慢的原因。

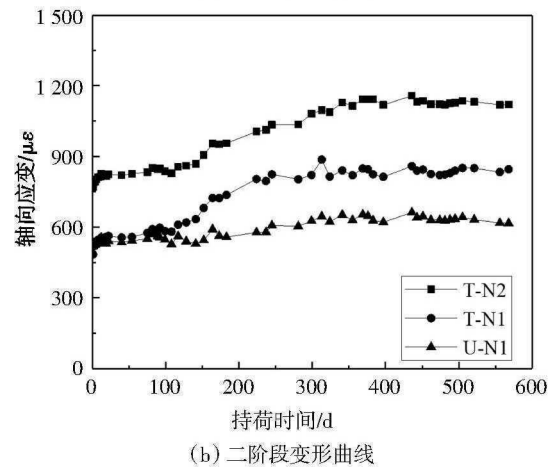
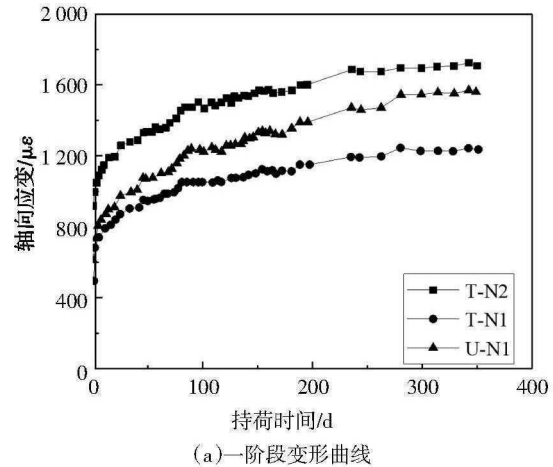


图 3 长期荷载试验变形曲线

Fig.3 Long-term strains during sustained load tests

上述长期持荷试验都是在室内进行的,温湿度自动测试仪监测结果表明,长期持荷试验环境的温湿度随季节发生波动。选取一个自然年度内的监测数据计算,室内平均温度为 24 ℃,平均相对湿度为 73%。

## 3 抗震性能试验结果

### 3.1 破坏形态

本次试验中,各试件无论其是否经历长期持荷作用,其破坏均表现为弯剪破坏的形式。各试件的剪跨比均为 3.2,是引起这种破坏的主要控制因素。以图 4 所示试件 U-N1 的破坏形态图为例,试件典型的破坏过程为:试件加载至混凝土起裂后,柱端位置水平和斜向裂缝交织出现,并随着加载幅值的增大,裂缝不断扩展和延伸,在试件强度达到极值后,裂缝扩展主要以斜向裂缝为主,局部伴随出现表面混凝土

土剥落,最后,试件以柱端混凝土沿斜向裂缝的溃落而导致承载力丧失破坏。



图 4 试件 U-N1 破坏形态  
Fig.4 Failure mode of specimen U-N1

### 3.2 滞回曲线和骨架曲线

各试件试验得到的滞回曲线如图 5 所示,纵坐标为水平荷载  $P$ ,横坐标为水平加载点的水平位移  $\Delta$ 。总体来看,与它们弯剪的破坏形式相对应,各试件的滞回曲线以纺锤形为主,没有出现明显的捏缩现象。从试验参数变化来看,是否配置核心钢骨和试验轴压比这两个参数,较之是否经历长期持荷这一参数,对试件滞回曲线的影响更为明显。

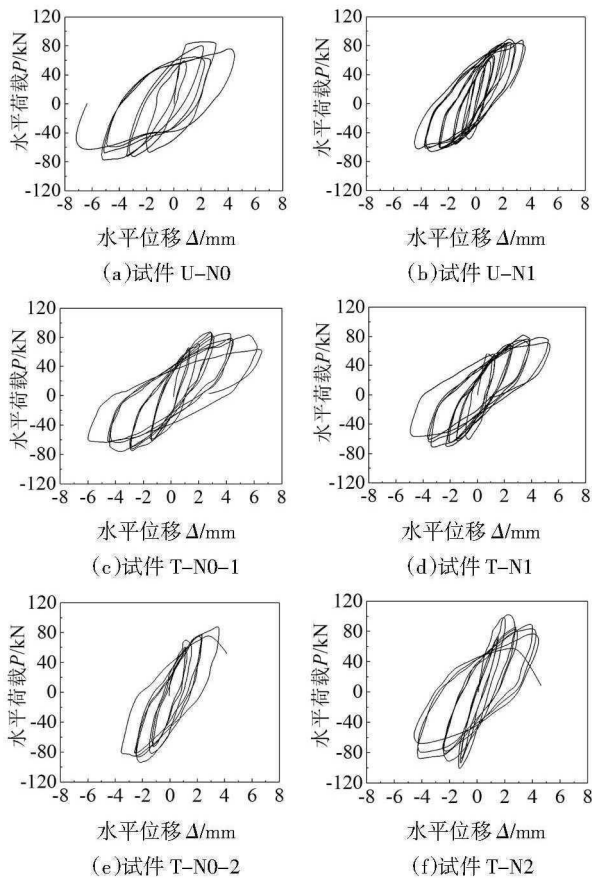


图 5 滞回曲线  
Fig.5 Hysteretic curves

试件 U-N0 和 T-N0-1,以及 U-N1 和 T-N1 两组试件各自的持荷历史和试验轴压比相同,差异在于是否配置了核心钢骨,由它们的曲线比较可知,配置了核心钢骨的试件,其极限变形能力和耗能性能得到很大程度的提升。

试件 T-N0-1 和 T-N0-2,以及 T-N1 和 T-N2 两组试件各自的持荷历史和核心钢骨配置相同,试验轴压比不同,由它们的曲线比较可知,随轴压比增大,试件的极限变形能力和耗能性能减弱,但极限承载力有所提高。

试件 U-N0 和 U-N1,T-N0-1 和 T-N1,以及 T-N0-2 和 T-N2 三组试件各自的核心钢骨配置和试验轴压比相同,持荷历史不同。各组对比试件之间的曲线比较表明,它们各自在极限变形能力和承载力等性能指标上的差异不明显。

为了进一步考察长期持荷的影响,根据滞回曲线做出骨架曲线,并按照试件 U-N0 和 U-N1,T-N0-1 和 T-N1,以及 T-N0-2 和 T-N2 三组试件的对比给出,如图 6 所示。由图 6(b)可知,对于未配置核心钢骨的试件 U-N0 和 U-N1,历经长期持荷的试件 U-N1 的初始刚度明显小于对比试件 U-N0,相应地,其屈服位移值也有所增大。这一试验结果与文献[12]关于长期持荷对钢筋混凝土柱滞回性能影响的试验研究所得到的结论一致。但对于配置了核心钢骨的两组对比试件 T-N0-1 和 T-N1,以及 T-N0-2 和 T-N2,如图 6(c)和(d)所示,却未发现长期持荷对其初始刚度及屈服位移等指标有明显的影响规律。

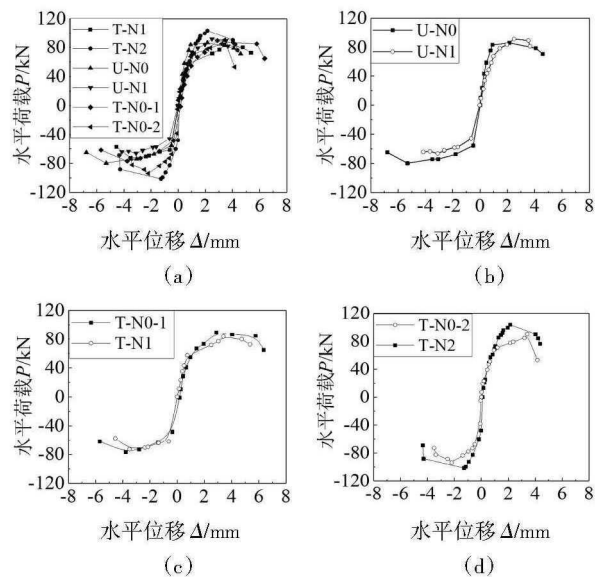


图 6 骨架曲线  
Fig.6 Skeleton curves

针对上述长期持荷的试验结果,以下简单分析其产生的可能原因.对于未配置核心钢骨的钢筋混凝土柱试件 U-N1,在长期持荷作用下,由于混凝土产生徐变变形,为了满足变形协调条件,会导致柱中混凝土和钢筋之间的应力发生重分布,即柱中混凝土的压应力将减小,转而由钢筋承担更多的压应力.其后,在准备抗震试验时,试件需要先从徐变试验机上卸载,此时,混凝土只能恢复其压缩变形中的弹性变形和部分可恢复徐变,可恢复徐变的量值约为卸载前徐变变形值的 5%~30%<sup>[11]</sup>,而大部分徐变变形不能恢复,钢筋的回弹将会使混凝土产生拉应力<sup>[13]</sup>.因此,抗震试验中,在试验轴压比相同的情况下,经历长期持荷的柱试件 U-N1 较之自由放置的对比柱试件 U-N0,混凝土部分的轴压力相对要小.而轴压力的存在,会推迟柱中混凝土斜裂缝的出现,因此混凝土轴压力相对要小的试件 U-N1 较之 U-N0,刚度更易衰减,侧向屈服变形也相对增大.但对于配置了核心钢管的试件,由于钢管内外混凝土不连续,加之钢管的约束作用,上述长期持荷影响的因素可能被弱化.因此,在 T-N0-1 和 T-N1,以及 T-N0-2 和 T-N2 两组试件中,则未见长期持荷对试件性能有显著的影响规律.

### 3.3 延性系数

延性是反映结构抗震性能的重要指标,通常以极限位移与屈服位移之比作为延性系数.屈服位移可以利用骨架曲线按“通用屈服弯矩法”<sup>[14]</sup>确定,极限位移可取骨架曲线中荷载值下降至峰值荷载 85% 对应的位移.计算得到各试件的屈服位移及延性系数,列于表 1 中.

比较各试件的延性系数,可得到钢骨配置、试验轴压比以及长期持荷等参数对试件延性的影响趋势.试件 U-N1 和 T-N1,以及试件 U-N0 和 T-N0-1 各自的延性系数比较表明,配置了核心钢骨的试件,在其他试验参数相同的情况下,延性系数明显增大,体现了钢骨混凝土的优越性.其原因在于,对于配置了核心钢骨的试件,在达到最大荷载之后,尽管试件表面混凝土开始逐渐剥落,但由于钢骨与纵筋、箍筋以及箍筋约束区内的混凝土能够形成良好的抗力机制,从而确保了此类构件具有较大的变形能力<sup>[15]</sup>.此外,试验表明,钢筋混凝土构件最后的破坏,通常是由于混凝土的突然压溃而导致承载力的丧失.但对于钢骨混凝土构件而言,由于柱内埋有刚度较大的钢骨,构件不会产生过大的轴向压缩变形,破坏时钢骨与残余混凝土一起仍能使构件保有一定的承载

力,从而增加了构件的延性<sup>[16]</sup>.试件 T-N1 和 T-N2,以及试件 T-N0-1 和 T-N0-2 各自的延性系数比较表明,试验轴压比大的试件,在其他试验参数相同的情况下,延性系数明显减小,体现了轴压比对试件延性的不利影响.实质上,由于轴压比反映了柱截面中混凝土受压区相对高度的大小,轴压比越大,混凝土受压区相对高度越大,因此,试件更易于提前发生柱中混凝土在受压区的压缩破坏,从而降低了试件的延性<sup>[17-18]</sup>.试件 U-N0 和 U-N1 的比较表明,对未配置核心钢骨的钢筋混凝土试件,在其他试验参数相同的情况下,经历了长期持荷,延性系数减小,说明长期持荷对试件的延性不利,其原因在于屈服位移的增大,使延性系数相对减小.由于试验试件数量有限,这一初步结论还有待进一步扩充试验加以验证.试件 T-N0-1 和 T-N1,以及试件 T-N0-2 和 T-N2 各自的延性系数比较表明,由于配置了核心钢骨,长期持荷虽然也会不同程度地减小试件的延性系数,但影响规律已不明显.

### 3.4 极限承载力

各试件的抗剪极限承载力  $P_u$  参见表 1,比较可知,抗震试验轴压比较大的试件 T-N0-2 和 T-N2 的极限承载力值较之其他 4 个试件有较明显的增加,体现了轴压力对试件极限抗剪强度的提升作用.关于是否配置核心钢管,从试件 U-N0 和 T-N0-1,以及 U-N1 和 T-N1 两组试件的承载力比较看,没有发现核心钢管对试件的抗剪承载力有增强作用.其原因可能在于,本文试件核心圆钢管所约束混凝土的面积大约只为柱截面面积的 17%,在试件受荷过程中,无法有效遏制外围混凝土的裂缝扩展和剪切破坏,因此,无助于提高试件的极限承载力.但核心钢管的存在,可以确保试件在达到极限承载力后不至于立即崩溃,保有一定的承载力及变形能力,从而增加试件的延性,以往的相关研究也得出过类似的结论<sup>[19]</sup>.

此外,关于持荷历史的影响,从试件 U-N0 和 U-N1, T-N0-1 和 T-N1,以及 T-N0-2 和 T-N2 三组试件的承载力比较来看,没有发现长期持荷和极限承载力之间存在确定的影响规律.因此,在计算历经长期持荷的钢骨混凝土柱的抗剪极限承载力时,可以沿用现有相关规范的计算公式,而无需考虑长期持荷的影响.

## 4 结论

本文开展了钢骨混凝土柱试件历经轴向长期持荷后,在水平低周反复荷载下的抗震性能试验.研究

得出了以下主要结论:

1)在长期持荷作用下,柱试件早期的变形增长较为显著,在持荷接近1年后卸载,二次再加载后的长期持荷变形增长已较为缓慢.长期变形值随含钢率的增加有所降低,但随轴压比的增加而相应增大.

2)无论试件是否经历长期持荷,配置钢骨都会提高柱试件的极限变形能力,增强其延性和耗能性能;随着轴压比的增加,各柱试件的极限变形能力、延性和耗能性能都显著降低,但抗剪极限承载力则有所提高.

3)对未配置核心钢骨的钢筋混凝土柱试件,长期持荷作用可降低其初始刚度,增大其屈服位移,使得延性系数减小,但未发现长期持荷作用对其抗剪极限承载力存在确定的影响规律.相较于钢筋混凝土柱,由于内置圆钢管的存在,上述长期持荷作用对于钢骨混凝土柱试件力学性能的影响极大程度地受到抑制和弱化.因此,相较于钢骨配置及轴压比等重要设计参数,长期持荷对钢骨混凝土柱抗震性能的影响在设计中可以忽略.

## 参考文献

- [1] GILBERT R I, RANZI G. Time-dependent behaviour of concrete structures [M]. London: Taylor & Francis Group, 2010: 5—18.
- [2] UY B. Static long-term effects in short concrete-filled steel box columns under sustained loading [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(1): 96—104.
- [3] 王元丰. 钢管混凝土徐变[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1—302  
WANG Y F. Creep of concrete filled steel tube [M]. Beijing: Science Press, 2006: 1—302. (In Chinese)
- [4] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 404—439.  
HAN L H. Concrete-filled steel tube structure—theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2007: 404—439. (In Chinese)
- [5] LIU H, WANG Y X, HE M H, *et al.* Strength and ductility performance of concrete-filled steel tubular columns after long-term service loading [J]. Engineering Structures, 2015, 100 (10): 308—325.
- [6] HOU C C, HAN L H, WANG Q L, *et al.* Flexural behavior of circular concrete filled steel tubes (CFST) under sustained load and chloride corrosion [J]. Thin-Walled Structures, 2011, 107(10): 182—196.
- [7] 丁敏, 汪友弟, 代春辉, 等. 钢管混凝土轴心受压构件的徐变预测模型及其徐变性能分析 [J]. 工程力学, 2017, 34(6): 166—177.  
DING M, WANG Y D, DAI C H, *et al.* Creep calculation and behavior analysis of concrete-filled steel tubular member under axial compression [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34 (6): 166—177. (In Chinese)
- [8] 陈周熠, 代堂珍, 雷鹰, 等. 钢骨混凝土短柱在长期轴向荷载作用下的试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 74—79.  
CHEN Z Y, DAI T Z, LEI Y, *et al.* Experimental study on the time-dependent behavior of short steel-reinforced concrete columns under sustained axial loading [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32 (8): 74—79. (In Chinese)
- [9] MA D Y, HAN L H, LI W, *et al.* Behaviour of concrete-encased CF-ST stub columns subjected to long-term sustained loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 151(9): 58—69.
- [10] AN G H, KWON S H, KIM J K. Effect of wide-flange-steel geometry on the long-term shortening of steel-reinforced concrete columns [J]. Magazine of Concrete Research, 2015, 67(23): 1242—1256.
- [11] 黄国兴, 惠荣炎. 混凝土徐变与收缩[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 56—65.  
HUANG G X, HUI R Y. Creep and shrinkage of concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 56—65. (In Chinese)
- [12] SCHULTZ A E, WELTON S S, REY L E. Long-term effects on response of reinforced concrete columns to cyclic loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(9): 1320—1332.
- [13] 任治章. 考虑徐变和卸载影响时钢筋砼柱最大配筋率的探讨 [J]. 力学与实践, 1997, 19(4): 27—28.  
REN Z Z. Discussion on the maximum reinforcement ratio of reinforced concrete columns considering the effects of creep and unloading [J]. Mechanics and Practice, 1997, 19 (4): 27—28. (In Chinese)
- [14] 姚谦峰, 陈平. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 219—220.  
YAO Q F, CHEN P. Structural experiment in civil engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 219—220. (In Chinese)
- [15] 贾金青, 马英超, 封硕. 高轴压比作用下型钢超强混凝土框架抗震试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(9): 1—9.  
JIA J Q, MA Y C, FENG S. Study of seismic performance of steel ultra high strength concrete frames under the effect of high axial compression ratio [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(9): 1—9. (In Chinese)
- [16] 赵世春. 型钢混凝土组合结构计算原理[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2004: 114—117.  
ZHAO S C. Calculation principle of steel reinforced concrete structures [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2004: 114—117. (In Chinese)
- [17] 孙克俭. 钢筋混凝土抗震结构的延性与延性设计 [M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1991: 227—229.  
SUN K J. Ductility and ductility design of reinforced concrete seismic structures [M]. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 1991: 227—229. (In Chinese)
- [18] 汪梦甫, 张旭. 高轴压比下PVA-ECC柱抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 1—9.  
WANG M F, ZHANG X. Experimental study on seismic performance of PVA-ECC columns with high axial load ratio [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44 (5): 1—9. (In Chinese)
- [19] 金向前, 陈忠范. 配有圆钢管的钢骨混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2001, 18(S): 175—180.  
JIN X Q, CHEN Z F. Experimental research on seismic performance of SRC columns with circles steel tubes [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(S): 175—180. (In Chinese)