



波纹管通孔柱的抗震性能及承载力分析

洪艳¹, 卢旦², 李昆松³, 崔暘⁴, 杨博¹

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 华东建筑设计研究院有限公司上海建筑科创中心, 上海 200002;
3. 广州华商职业学院智能工程学院, 广州 511300; 4. 浙江华临建设集团有限公司, 杭州 311100)

摘要: 针对波纹管通孔柱的抗震性能及承载力是否能够达到“等同现浇”的问题, 通过拟静力试验分析波纹管通孔柱试件(包含 1 个无缺陷柱和 1 个含有 30% 灌浆缺陷的预制柱)的滞回性能、骨架曲线、位移延性、刚度退化、耗能能力等各项抗震性能指标, 给出波纹管通孔柱的承载力计算公式。拟静力试验表明: 波纹管可以产生有效的环向约束作用, 波纹管通孔柱可达到“等同现浇”的要求; 波纹管内含 30% 及以下的灌浆缺陷会削弱预制柱的抗震性能, 但影响较小; 波纹管通孔柱承载力公式计算结果与试验结果较吻合。该研究可为波纹管通孔柱在装配式结构领域中的应用及相应规范的编制提供一定的理论依据。

关键词: 波纹管通孔柱; 拟静力试验; 抗震性能; 灌浆缺陷; 承载力

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2024)11-0820-12

引文格式: 洪艳, 卢旦, 李昆松, 等. 波纹管通孔柱的抗震性能及承载力分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(6): 820-831.

Reference Format: HONG Yan, LU Dan, LI Kunsong, et al. Seismic performance and bearing capacity analysis of corrugated pipe through-hole columns[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(6): 820-831.

Seismic performance and bearing capacity analysis of corrugated pipe through-hole columns

HONG Yan¹, LU Dan², LI Kunsong³, CUI Yang⁴, YANG Bo¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Shanghai Architecture Technology Innovation Center of East China Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 3. School of Intelligent Engineering, Guangzhou Huashang Vocational College, Guangzhou 511300, China; 4. Zhejiang Hualin Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: In response to the question of whether the seismic performance and bearing capacity of corrugated pipe through-hole columns can achieve "equivalent cast-in-place", this paper analyzed the hysteresis performance, skeleton curve, displacement ductility, stiffness degradation, energy dissipation capacity and other seismic performance indexes of corrugated pipe through-hole column specimens (including one column without defects and one prefabricated column with 30% grouting defects) by means of quasi-static test, and given the formula for calculating the bearing capacity of the corrugated pipe through-hole columns. The quasi-static tests show that the pipe can produce effective circumferential restraint, and the corrugated pipe through-hole column can meet the requirements of "equivalent cast-in-place"; the grouting defects of 30% or less in the pipe will weaken the seismic performance of the prefabricated columns, but the effect is relatively small; the results of the calculation of the bearing

收稿日期: 2024-02-28 网络出版日期: 2024-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808499); 广西科学技术计划项目(桂建科[2020]5 号)

作者简介: 洪艳(1998—), 女, 杭州人, 硕士研究生, 主要从事装配式混凝土结构方面的研究。

通信作者: 杨博, E-mail: youngbo@zstu.edu.cn

capacity formula for corrugated pipe through-hole columns coincide well with the test results. This study can provide some theoretical basis for the application of corrugated pipe through-hole columns in the field of assembled structures and the preparation of corresponding specifications.

Key words: corrugated pipe through-hole column; quasi-static test; seismic performance; grouting defects; bearing capacity

0 引 言

在装配式结构中,预制混凝土柱作为常用的竖向受力构件,其抗震性能是整体结构抵御地震作用的关键要素。震后调查表明,在强震作用下部分钢筋混凝土柱端会出现塑性铰,导致柱内纵筋受压屈曲,从而降低了结构的承载和变形能力^[1-3]。预制混凝土柱的抗震性能与柱内纵筋连接方式的可靠程度密切相关,目前预制柱中纵筋连接的主要方式有套筒灌浆连接和浆锚搭接连接。国内外学者对这两种连接技术开展了大量试验研究,赵勇等^[4]对钢筋套筒灌浆连接预制柱的施工工艺及抗震性能进行了研究,结果表明坐浆法的施工工艺能够保证预制柱的各项抗震性能与现浇柱相近。王传林等^[5]对螺旋箍筋约束下的浆锚连接技术进行了研究,结果表明该连接技术能够有效连接预制柱,保证其抗震性能;当对柱脚纵筋设置无黏结处理时,预制柱承载力的提高幅度更为显著。Lu 等^[6]对钢筋套筒灌浆预制柱试件进行了拟静力加载试验,并对试件的抗震性能进行了分析,结果表明采用套筒灌浆连接的预制柱位移延性及耗能能力均优于现浇柱。Ameli 等^[7-8]对套筒位于基础面上及埋置在基础面下两种情况分别设计了试验方案,并对相应的试件进行拟静力试验,结果表明这两种试验中预制柱所表现出的延性性能均与现浇柱相当。Alias 等^[9]对预制混凝土结构中有无横向钢筋的套筒灌浆构造性能进行研究,结果表明横向钢筋能有效改善灌浆料与钢筋的黏结性能,表现出良好的约束作用。总体而言,套筒灌浆连接和浆锚搭接连接是安全可靠、性能优良的连接技术。

然而,在实际工程中,套筒灌浆连接和浆锚搭接连接均对工人施工质量提出了较高要求,在灌浆过程中极易出现漏浆、灌浆不密实等灌浆缺陷问题^[10],进而影响预制柱的整体抗震性能。李威威等^[11]对含有 30% 环向灌浆缺陷的试件开展了拟静力试验,结果表明灌浆缺陷会大幅削弱结构的变形能力和承载力。郑清林等^[12]对 4 个灌浆缺陷预制柱试件进行低周往复荷载试验,发现灌浆缺陷会增加钢筋与灌浆料间的滑移,进而削弱预制柱抗震性

能。Xu 等^[13]对 126 个不充分灌浆的试件进行了单轴拉伸试验,研究发现灌浆缺陷程度是影响试件破坏模式与黏结能力的主要原因,并给出了非充分灌浆体积比的临界值。肖顺等^[14]、解琳琳等^[15]、李向民等^[16]对套筒灌浆缺陷试件进行了试验研究,结果表明不同程度的灌浆缺陷均会降低预制柱试件的抗震性能。唐和生等^[17]建立了灌浆缺陷预制柱的有限元模型,通过试验结果与数值模拟结果的对比,分析了套筒灌浆缺陷对预制柱抗震性能的影响,结果表明当预制柱模型进入塑性阶段后,灌浆缺陷对预制柱抗震性能、承载力的削弱最为明显。瞿浩川等^[18]建立了装配式柱的有限元模型,并将模拟结果与拟静力试验结果进行对比,发现在塑性阶段,预制柱承载力及位移延性的降幅会随着灌浆缺陷程度的增大而提高,该模型可有效评估灌浆缺陷对预制柱整体抗震性能影响。Zheng 等^[19]提出了一种填补灌浆材料修复灌浆缺陷的方法,试验结果表明修补后的套筒表现出与无灌浆缺陷套筒相同的机械性能,表明重新填补灌浆料能够改善灌浆缺陷。由上述研究可知,灌浆缺陷会降低预制柱的抗震性能,因此寻找一种既能简便施工又能有效提高预制柱抗震性能的连接方式是十分有必要的。

本课题组提出了一种新型波纹管通孔柱,并采用数值模拟手段对波纹管通孔柱相关性能进行了研究^[20]。与传统现浇柱在施工现场浇筑不同,该新型预制柱的制作过程可与现场施工同步进行,大大节省施工时间;与传统预制柱选用的套筒灌浆连接相比,该新型预制柱采用波纹管连接,提高了施工容错率,同时通过约束纵筋屈曲,提高了预制柱的抗震性能。本文利用试验手段与理论分析进一步研究该波纹管通孔柱的抗震性能及承载力,设计制作了 2 个波纹管通孔柱试件和 1 个用于对比的现浇柱试件,采用拟静力试验研究了波纹管通孔柱的各项抗震性能,分析了波纹管内 30% 灌浆缺陷情况对预制柱抗震性能的影响,并给出了波纹管通孔柱的承载力计算公式。该研究可为波纹管通孔柱在装配式混凝土结构中的实际工程应用提供一定的理论依据。

1 拟静力试验概述

1.1 试件设计与制作

设计并制作 3 个钢筋混凝土柱试件。该试件由柱帽、柱身和地梁 3 部分组成。试件总高度为 2550 mm,其中:柱帽尺寸为 700 mm×400 mm×450 mm;柱身尺寸为 400 mm×400 mm×1600 mm;地梁尺寸为 1400 mm×600 mm×

500 mm。预制柱试件内置 8 根波纹管,材质为包塑镀锌铜,净长 1600 mm,外径 60 mm,壁厚 10 mm。柱身内配置 8 根直径为 16 mm 的 HRB400 钢筋,分别穿插在波纹管内;箍筋采用直径为 8 mm 的 HRB400 钢筋。现浇柱试件的几何尺寸、混凝土强度等级及配筋情况与预制柱试件完全相同。试件几何尺寸及配筋如图 1 所示,主要参数见表 1。

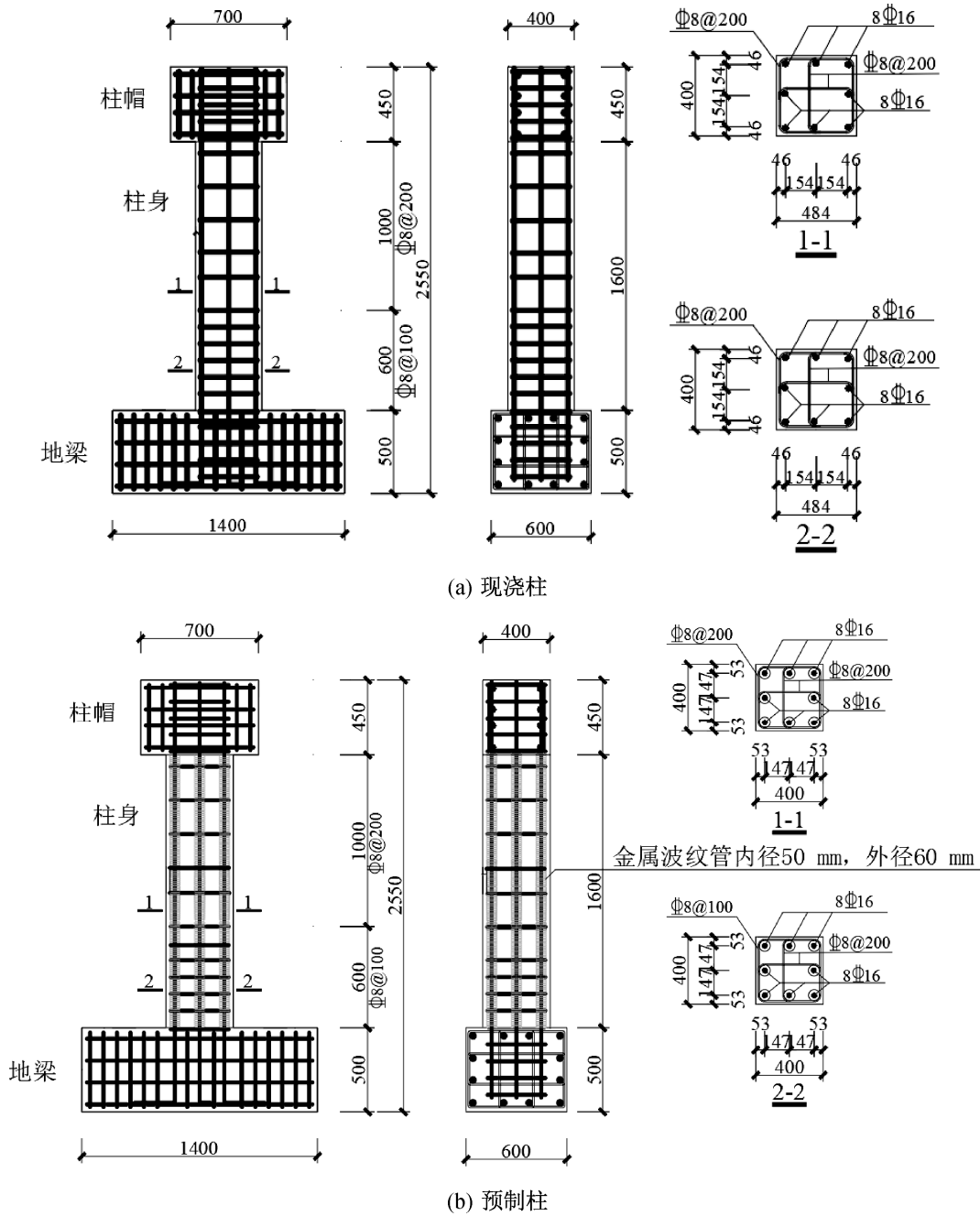


图 1 试件几何尺寸及配筋图(单位:mm)

表 1 试件主要参数			
试件编号	试件类别	轴压比	灌浆缺陷情况
CIP-0	现浇柱	0.2	完好无缺陷
PC-1	预制柱	0.2	
PC-2	预制柱	0.2	

波纹管通孔柱的连接过程为:在施工现场将

预制柱上部分吊装至预制柱下部分的正上方;然后缓慢落下,使得下部分预留纵筋能够对应穿入上部分的波纹管中,柱内纵筋通过直螺纹套筒连接;最后往波纹管内注入灌浆料,待灌浆料养护成型后即制作完成。波纹管通孔柱的连接过程如图 2 所示。

灌浆缺陷模拟旨在还原实际工程场景中因波纹管管径较小而无法充分振捣的情况。在实际工程中,波纹管管径较小无法振捣,使得灌浆料可能存在气泡,这种气泡一般较为均匀地分散在整根波纹管内,从而导致灌浆缺陷。本文重点研究波纹管内 30% 的灌浆缺陷率对预制柱抗震性能的影响。30% 的灌浆缺陷通过在波纹管中灌注含有定量木屑的灌浆料进行模拟,木屑体积占灌浆料总体积的 30%。

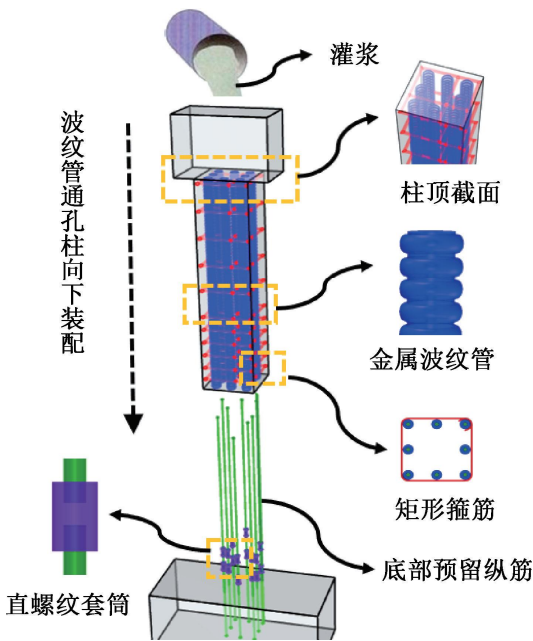


图 2 波纹管通孔柱连接过程示意图

1.2 材料强度

试件采用 C30 级商品混凝土,依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)对其进行抗压强度测量,经标准养护后实测混凝土试块抗压强度平均值为 35.82 MPa。选用 CGM—300A 灌浆料,依据《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T 50448—2015)对其进行抗压强度测量,经标准养护测得无缺陷灌浆料试块抗压强度平均值为 35.89 MPa,含 30% 缺陷灌浆料试块抗压强度平均值为 13.26 MPa。

纵筋实测屈服强度为 416.10 MPa,实测抗拉强度为 621.50 MPa,弹性模量 $E = 2.05 \times 10^5$ MPa;箍筋实测屈服强度为 427.00 MPa,实测抗拉强度为 642.40 MPa,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa。

1.3 加载装置

试验采用水平低周往复加载方式,加载装置如图 3 所示。地梁按固定支座考虑,柱帽上表面由 500 t 的液压千斤顶施加竖向轴力,柱帽右侧面中心采用 200 t 的水平作动器施加水平往复推

拉力,水平力加载点距地梁顶面距离为 1825 mm。试验全程采用位移控制,竖向荷载全程保持恒定。

试验正式开始时,首先在试件顶部由竖向作动器施加竖向荷载至预定轴力 766.70 kN,然后进行水平位移加载,加载位移依次取 4.60 mm (0.25%)、7.00 mm (0.38%)、9.10 mm (0.50%)、11.00 mm (0.60%)、13.70 mm (0.75%)、16.00 mm (0.88%)、18.30 mm (1.00%)、23.00 mm (1.26%)、27.40 mm (1.50%)、32.00 mm (1.75%)、36.50 mm (2.00%)、40.00 mm (2.19%)、45.60 mm (2.50%)、54.80 mm (3.00%),各级水平位移往复 3 次。水平荷载下降至水平峰值荷载的 85% 以下或构件出现明显破坏征兆时,认为构件破坏,加载至本级位移完成,即试验结束。试验加载制度如图 4 所示。

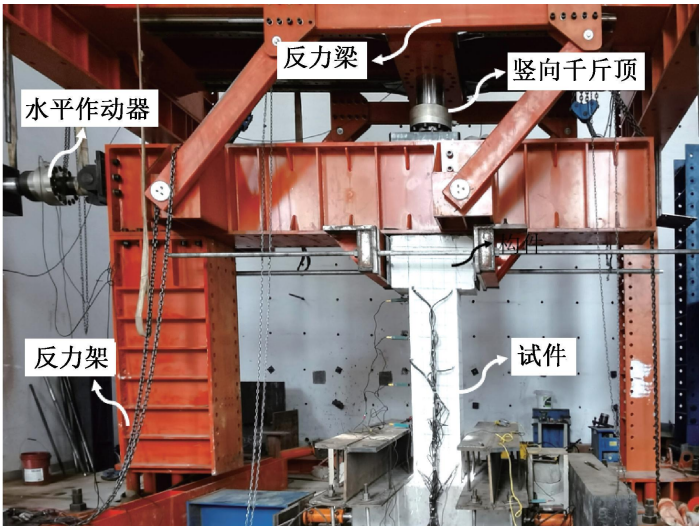


图 3 拟静力试验加载装置现场照片

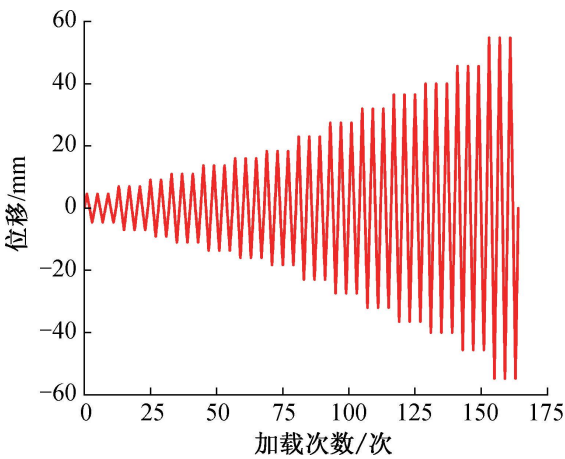


图 4 试验加载制度

1.4 测点布置

每个试件布置 7 个位移计,编号为 D1—D7,分别置于地梁、柱身与柱帽。D1—D3 测量地梁水平滑移和转动,D4—D6 测量柱身水平位移,D7 测量

柱顶水平位移。加载过程中,位移数据由采集仪自动采集记录。位移计布置如图 5 所示。

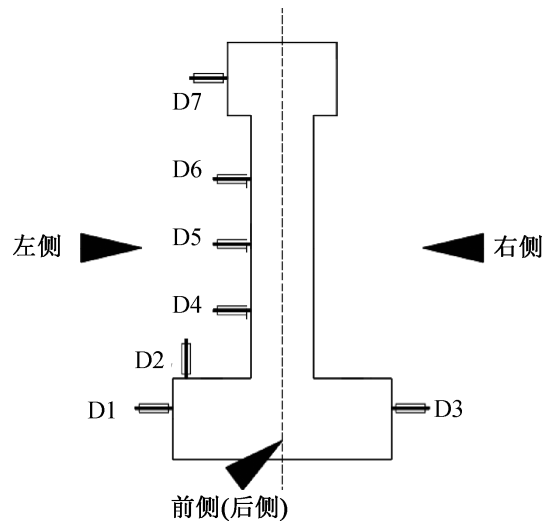


图 5 位移计布置简图

2 试验结果分析

2.1 破坏过程和破坏形态

对比分析 3 柱试件的裂缝发展及破坏形态差异。
CIP-0 试件的裂缝发展照片如图 6 所示。从图 6 可以看出:对于 CIP-0 试件,加载位移为 13.70 mm 时,柱根部出现首条裂缝,长度约为 13.00 cm;加载位移为 18.30 mm 时,柱身不同高度均出现多条裂缝,但并未贯通;加载位移为 36.50 mm 时,柱身斜裂缝继续发展,柱脚出现竖向裂缝;加载位移为 40.00 mm 时,柱根部裂缝呈多条贯穿形式,受压区混凝土表面剥离;加载位移为 54.80 mm 时,柱脚混凝土严重脱落,箍筋受拉变形,柱内纵筋因缺乏有效的侧向约束而受压屈曲,试件最终表现为压弯破坏,停止试验。

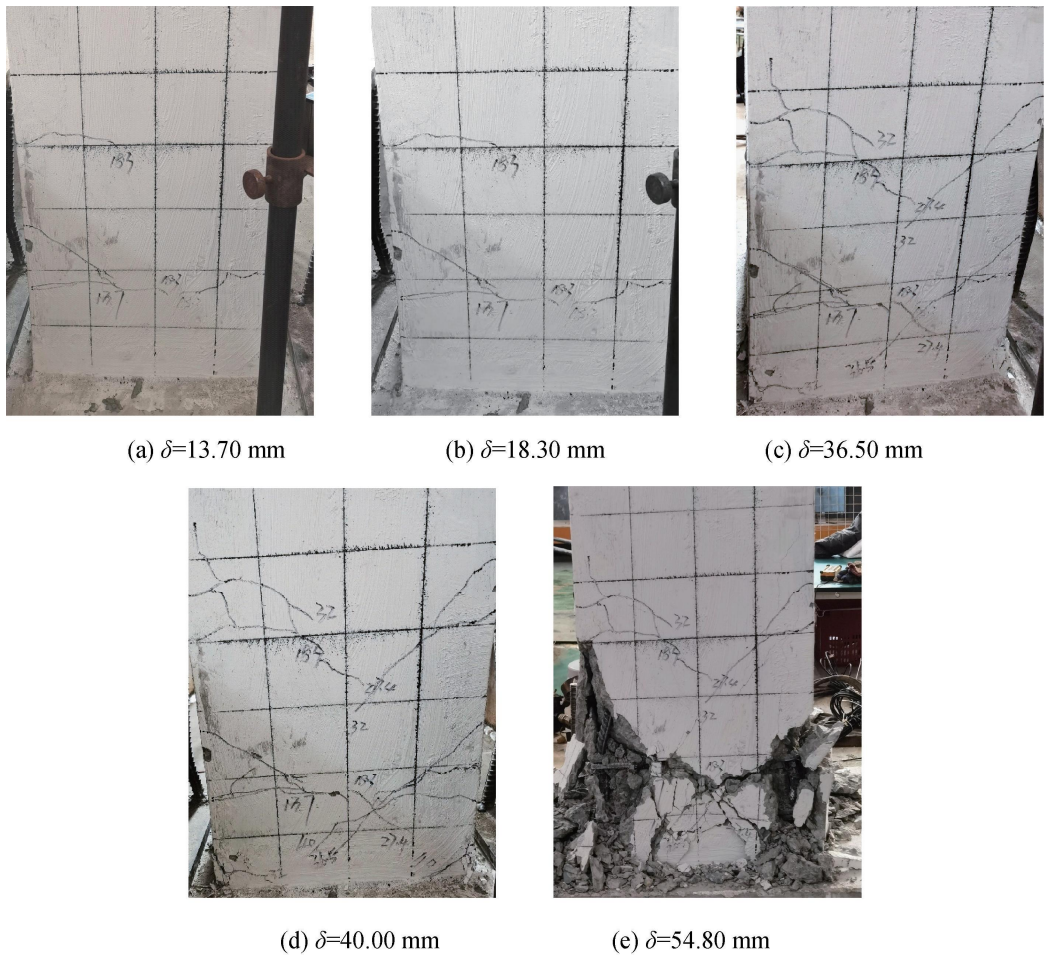


图 6 现浇柱试件 CIP-0 的裂缝发展照片

PC-1 试件的裂缝发展照片如图 7 所示。从图 7 可以看出:对于 PC-1 试件,加载位移为 7.00 mm 时,柱根部出现首条肉眼可见的裂缝;加载位移达到 13.70 mm 时,柱底以上 400.00 mm 范围混凝土出现多条裂缝,以水平裂缝为主;加载位移为 18.30 mm 时,柱根部裂缝开始斜向下发展,形成首条斜裂缝;加载位移达到 36.50 mm 时,柱顶以下

200.00 mm 范围内出现两条明显的水平裂缝;加载位移为 40.00 mm 时,柱身贯穿裂缝由柱底左下方斜向右上发展;加载位移为 54.80 mm 时,柱底混凝土在水平侧向位移下发生胀裂,箍筋圈无法继续约束波纹管内纵筋而受拉变形,箍筋弯钩被胀开,纵筋在轴压力和水平往复力的作用下发生屈曲失稳破坏,试件最终被压垮,停止试验。

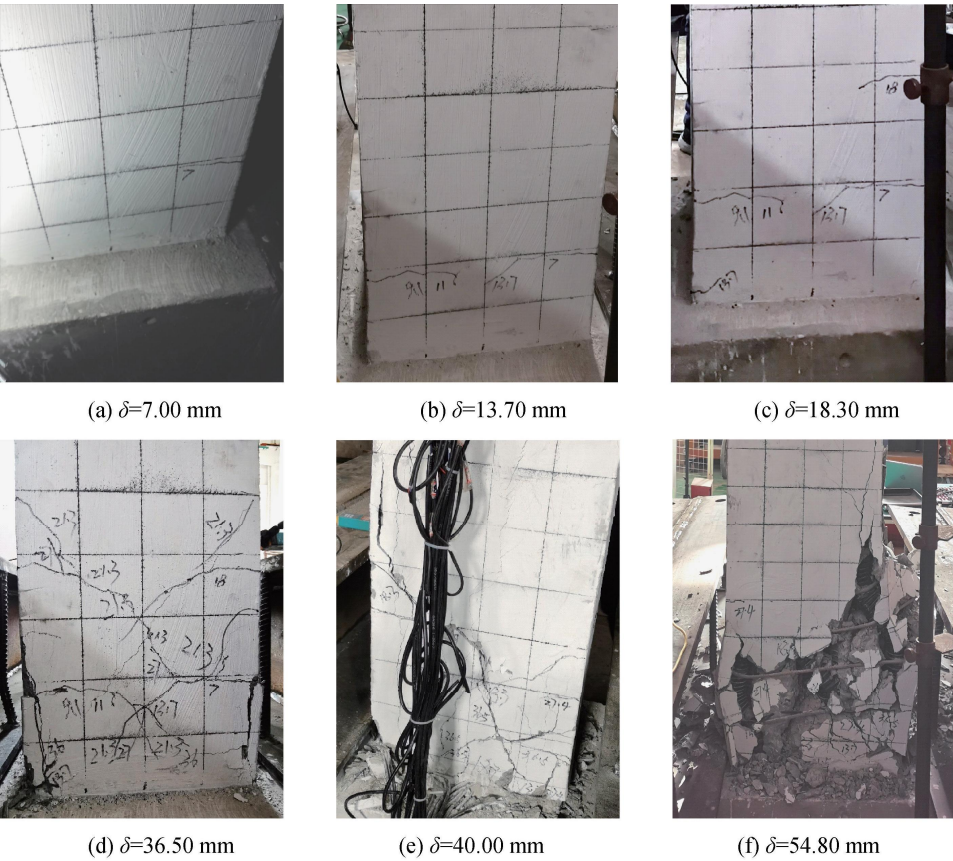


图 7 预制柱 PC-1 的裂缝发展照片

PC-2 试件的裂缝发展照片如图 8 所示。从图 8 可以看出:对于 PC-2 试件,加载位移为 13.70 mm 时,柱底出现肉眼可观测的水平裂缝;加载位移达到 18.30 mm 时,距柱底 400.0 mm 处出现明显的斜裂缝;加载位移为 36.50 mm 时,柱身裂缝继续发展,柱脚混凝土出现轻微脱落;加载位移达到

40.00 mm 时,出现根部贯穿裂缝,此时裂缝集中于柱底以上 400.00 mm 范围内,柱身主斜裂缝呈 45° 斜向上发展;加载位移为 54.80 mm 时,柱根部混凝土被压溃,伴有大量混凝土掉落,波纹管底部受压屈曲,柱底箍筋发生变形,破坏现象与 PC-1 类似,停止试验。

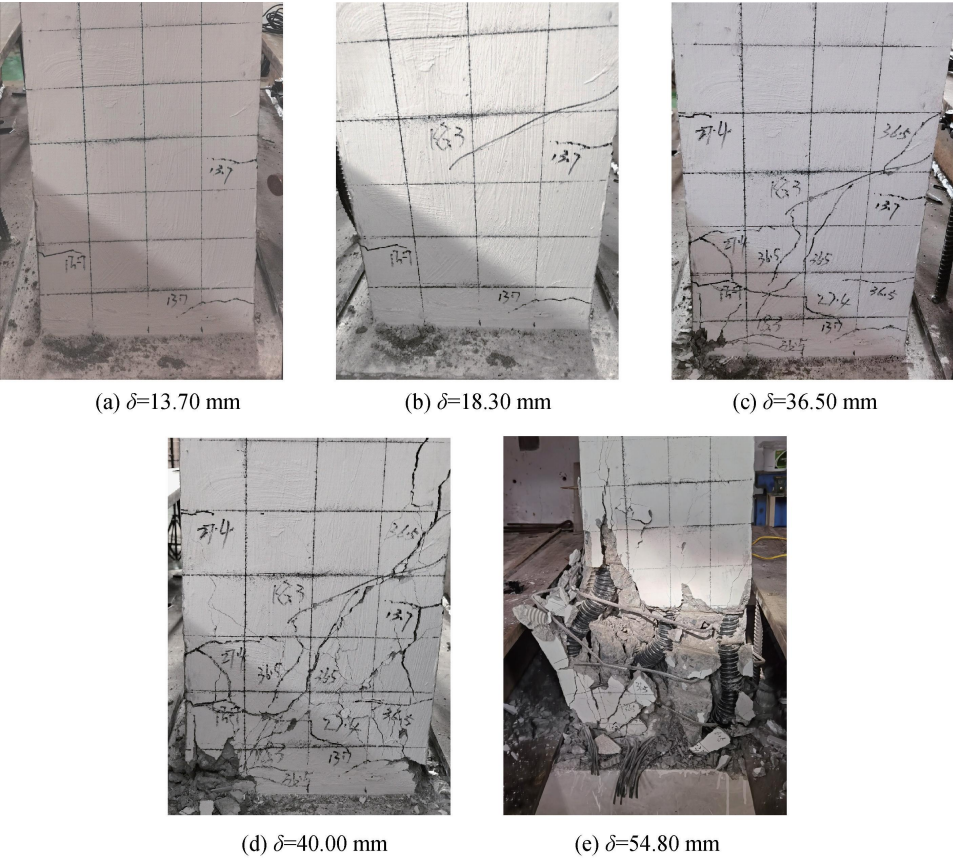


图 8 预制柱 PC-2 的裂缝发展照片

对比3根柱试件的破坏形态,不难发现两类试件破坏形态不同,现浇柱试件破坏时,柱内纵筋局部屈曲,柱底混凝土被压碎,整体呈现为倒置的锥体;预制柱试件在加载中期柱身出现明显的主斜裂缝,后期柱底混凝土在水平侧向位移下发生胀裂,柱脚混凝土出现大面积剥落现象。导致预制柱试件和现浇柱试件破坏形式不同的原因有:a)两种柱试件的抗震设计不同,预制柱采用内置波纹管约束纵筋屈曲的构造措施来提高其抗震性能,而现浇柱是整体浇筑而成的,这可能导致两种柱试件在拟静力试验下出现不同的破坏形式;b)两种柱试件在荷载传递

方面存在差异,预制柱内纵筋通过直螺纹套筒连接,力的传递直接由上层柱纵筋传递到下层柱纵筋,而现浇柱的荷载传递更具整体性,这也可能导致两种柱试件的破坏形式不同。

2.2 滞回曲线

各试件滞回曲线如图9所示。从图9可以看出:所有试件在同级位移下的滞回环几乎重合,承载能力大致相同。在同等位移级的3次循环中,极限荷载依次下降,说明同级循环下试件承载力逐渐退化,但总体上承载力仍随着位移增加呈现缓慢上升趋势。

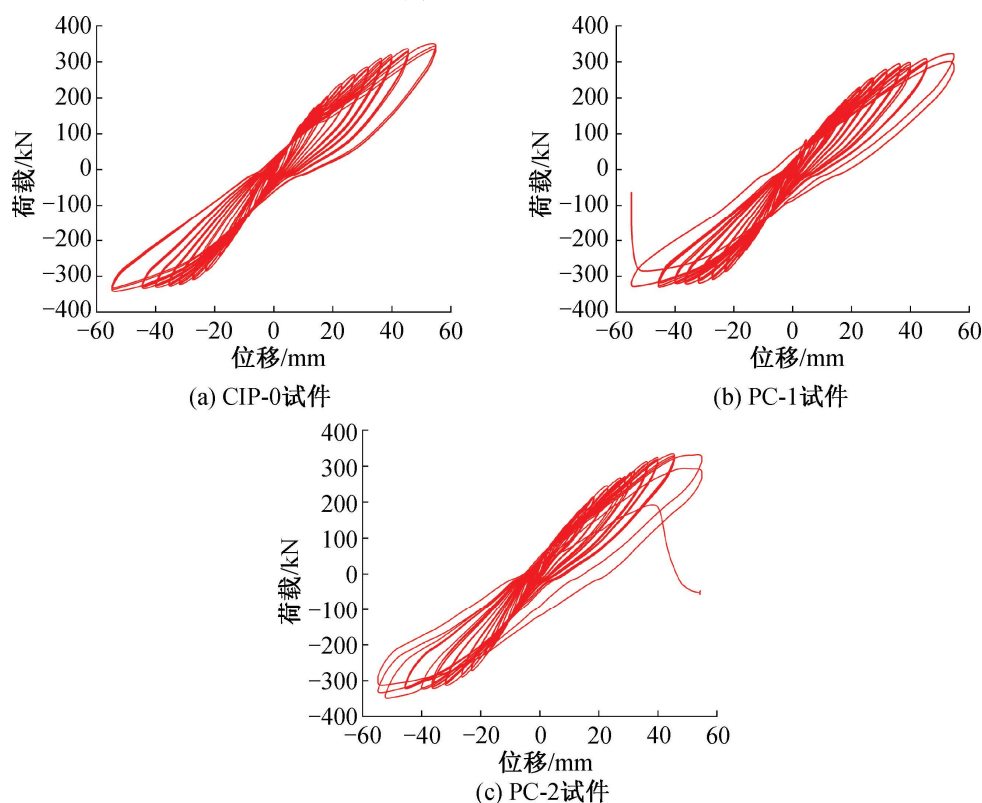


图9 各试件滞回曲线

PC-1与CIP-0的滞回曲线几乎重合。正向加载时PC-1的承载力略低于CIP-0,反向加载略高于CIP-0。总体而言,波纹管通孔柱的抗震性能能够达到“等同现浇”的能力。

PC-2的滞回曲线在加载后期出现轻微捏缩现象,逐渐向弓形发展,但形状仍与PC-1相似,这表明波纹管内不超过30%的灌浆缺陷对预制柱抗震性能的不利影响较小。

2.3 骨架曲线

各试件骨架曲线如图10所示。从图10可以看出:所有试件的骨架曲线十分接近,说明波纹管通孔柱试件与现浇柱试件的抗震能力相当。

PC-1在正向加载时骨架曲线略低于CIP-0,差值在10%以内;负向加载时两者曲线重合度很高,这表明波纹管通孔柱的承载力基本达到现浇柱的水

平;PC-1与PC-2的骨架曲线走势基本一致。

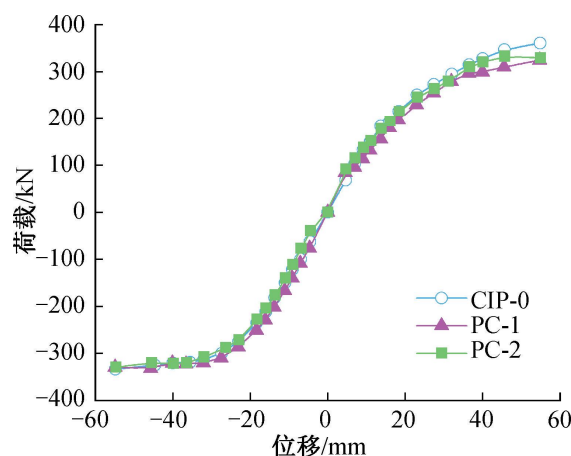


图10 各试件骨架曲线

各试件荷载特征点参数见表2,其中: F_y 为试件屈服荷载,采用R. Park法计算得出; F_p 为试件峰值荷载; δ_y 、 δ_p 为 F_y 、 F_p 对应的位移; δ_u 为试件

极限位移,即当试件承载力下降至峰值荷载的 85% 54.80 mm 时荷载并未下降到峰值荷载的 85%,因此处所对应的位移。由于本试验中试件加载到此极限位移均取位移加载最大值,即 54.80 mm。

表 2 各试件荷载特征点参数

试件 编号	加载 方向	屈服荷载点			峰值荷载点			极限荷载点		延性系数 μ
		F_y/kN	δ_y/mm	θ_y/rad	F_p/kN	δ_p/mm	θ_p/rad	δ_u/mm	θ_u/rad	
CIP-0	正	288.12	30.16	1/61	360.96	54.80	1/33	54.80	1/33	1.82
	负	287.90	24.90	1/74	337.73	54.80	1/33	54.80	1/33	2.20
PC-1	正	270.57	30.00	1/61	324.72	54.70	1/33	54.80	1/33	1.83
	负	286.24	23.01	1/79	332.32	45.70	1/40	54.80	1/33	2.38
PC-2	正	265.04	27.74	1/66	329.59	54.80	1/33	54.80	1/33	1.98
	负	289.30	27.80	1/66	329.92	54.66	1/34	54.80	1/33	1.97

注: θ 为加载位移点所对应的位移角,且 $\theta=\delta/h$,其中 h 为柱底面至水平加载点的距离, $h=1825\text{ mm}$ 。

由表 2 可以看出:CIP-0 的平均峰值荷载为 349.35 kN,平均屈服荷载为 288.01 kN;PC-1 的平均峰值荷载为 328.52 kN,平均屈服荷载为 278.41 kN;PC-2 的平均峰值荷载为 329.76 kN,平均屈服荷载为 277.17 kN。

PC-1 承载力略低于 CIP-0,但峰值荷载及屈服荷载与 CIP-0 非常接近,差值仅为 6%与 3%,这表明波纹管通孔柱基本具有等同现浇柱的承载能力。

PC-2 负向承载力表现较好,正向承载力与 PC-1 仅相差 2%,这是由于波纹管内灌浆不充分,进而导致钢筋与灌浆料间的滑移增大,从而引发这一问题。总体而言,30%的灌浆缺陷并未导致预制柱承载能力明显下降。这表明当波纹管内灌浆缺陷不大于 30%时,对预制柱的承载力影响较小。

2.4 位移延性

本文采用位移延性系数来体现结构的变形能力,位移延性系数可用式(1)计算:

$$\mu=\frac{\delta_u}{\delta_y} \tag{1}$$

其中: μ 为各试件位移延性系数; δ_u 为试件极限位移,mm; δ_y 为试件屈服位移,mm。

各试件位移延性系数见表 2。从表 2 可以看出:现浇柱和预制柱试件的平均延性系数分别为 2.01 与 2.11,均大于 2.00,说明试件变形能力良好。各试件极限荷载点对应的极限位移均为 54.80 mm,所对应的位移角为 1/33,高于《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)所规定位移角极限值 1/50,这表明预制柱试件破坏时的位移角大于规范要求的极限位移角,即预制柱试件的位移性能是达标的。

PC-1 的正向延性系数与 CIP-0 基本一致,负向提高了 8%,平均延性系数提高了 5%,这表明波纹管通孔柱的变形能力良好,能够达到传统现浇柱的

延性性能。

PC-2 的延性系数在正向加载时与 PC-1 相差不大,但负向加载时降低了 20%,平均延性系数为 PC-1 的 94%,这表明灌浆缺陷削弱了钢筋与灌浆料间的黏结,纵筋失去侧向约束,导致试件变形能力减弱,但影响较小。

2.5 刚度退化

本文采用平均割线刚度^[21]来分析试件刚度退化趋势。平均割线刚度可用式(2)计算:

$$K_i=\frac{|+F_i|+|-F_i|}{|+X_i|+|-X_i|} \tag{2}$$

其中: K_i 为平均割线刚度; $+F_i$ 、 $-F_i$ 为第 i 次循环的正、负峰值荷载值,kN; $+X_i$ 、 $-X_i$ 为 $+F_i$ 、 $-F_i$ 对应的最大正、负位移值,mm。

各试件平均割线刚度退化曲线如图 11 所示。从图 11 可以看出:预制柱试件与现浇柱试件的刚度退化与加载位移成反比,整体降幅呈现出先快后慢的趋势。

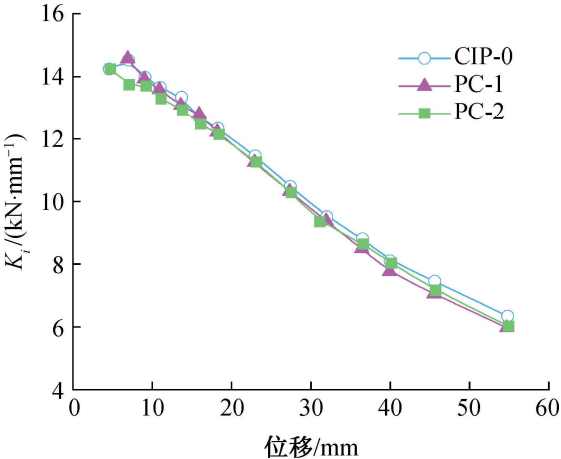


图 11 各试件平均割线刚度退化曲线

对比 CIP-0 与 PC-1,PC-1 各点刚度为 CIP-0 的 95%~99%,这是由于预制柱中波纹管产生的有效环向约束增加了柱身整体刚度,进而提高预制柱抗震性能。

对比 PC-1 与 PC-2,除初始刚度外,PC-2 各点刚度均达到 PC-1 的 98%及以上,当加载至极限位移时,二者刚度几乎一致,这表明 30%的灌浆缺陷对预制柱刚度退化性能无明显不利影响。

2.6 耗能能力

2.6.1 累计耗能量

混凝土结构的耗能能力是影响其抗震性能的因素之一。累计耗能量可用于描述结构在地震荷载作用下所吸收的能量大小,即滞回曲线中滞回环的包络面积总和。累计耗能量可用式(3)计算:

$$E_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_i^j \quad (3)$$

其中: E_{sum} 为累计耗能量, $\text{kN}\cdot\text{mm}$; E_i^j 为第 i 级加载位移第 j 次循环的滞回环所包围的面积, $\text{kN}\cdot\text{mm}$ 。

各试件累计耗能量曲线如图 12 所示。从图 12 可以看出:各试件耗能量十分接近,随着加载位移增加而不断增长,表明各试件的耗能能力良好。

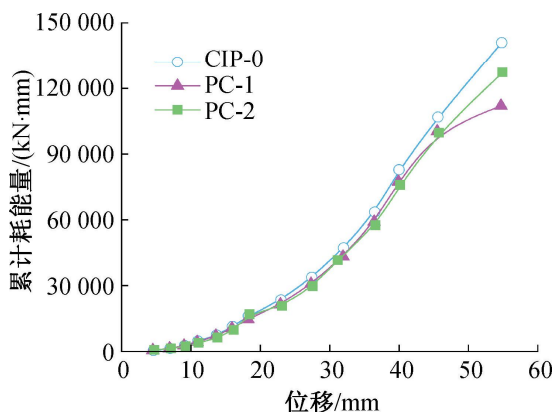


图 12 各试件累计耗能量曲线

PC-1 的耗能量与 CIP-0 相差并不大。加载初期,二者的累计耗能基本一致;当加载位移大于 18.30 mm 时,PC-1 累计耗能增速小于 CIP-0 试件;达到极限位移时,PC-1 的累计耗能为 CIP-0 的 80%。这表明预制柱耗能能力与现浇柱基本相当。

PC-2 与 PC-1 的耗能曲线几乎重合,只有在极限位移时,PC-2 的耗能量达到 PC-1 的 1.1 倍。这是由于 PC-1 在加载到极限位移的第 2 次循环就发生了破坏,而 PC-2 的破坏则发生在第 3 次循环,PC-1 少 1 次循环加载导致累计耗能低于后者。总体而言,PC-1 与 PC-2 的耗能能力基本一致,这表明波纹管内不超过 30%灌浆缺陷对预制柱耗能能力的削弱较小。

2.6.2 等效黏滞阻尼系数

等效黏滞阻尼系数可用于评估混凝土结构在地

震作用下的耗能能力。等效黏滞阻尼系数可用式(4)计算:

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (4)$$

其中: h_e 为等效黏滞阻尼系数; $S_{(ABC+CDA)}$ 为滞回环所包围的面积,即图 13 中的阴影部分, $\text{kN}\cdot\text{mm}$; S_{OBE} 、 S_{ODF} 为 $\triangle OBE$ 、 $\triangle ODF$ 的面积, $\text{kN}\cdot\text{mm}$ 。

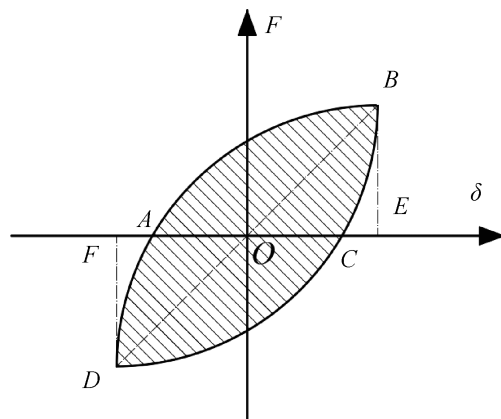


图 13 等效黏滞阻尼系数计算图

各试件等效黏滞阻尼系数变化曲线如图 14 所示。从图 14 可以看出:在加载初期,各试件的等效黏滞阻尼系数均呈现出复杂的波动形式。这是因为等效黏滞阻尼系数对试验数据是十分敏感的,较小的试验误差都会对等效黏滞阻尼系数有明显的影响^[22]。在加载后期,随着耗能量不断增大,试件的等效黏滞阻尼系数也随之增大。

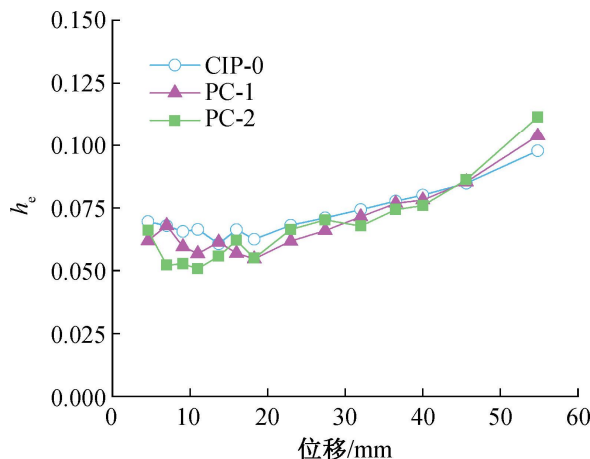


图 14 各试件等效黏滞阻尼系数变化曲线

PC-1 的等效黏滞阻尼系数在加载初期略低于 CIP-0;在加载后期,随着加载位移的增大,柱身混凝土裂缝继续发展,试件耗能量逐渐增大,最终达到 CIP-0 的 1.06 倍。这表明 PC-1 试件的耗能能力较好。

PC-2 与 PC-1 的等效黏滞阻尼系数平均值分别为 0.068 和 0.069,两者相差仅为 2%。这表明当灌浆缺陷率不超过 30%时,缺陷预制柱的耗能能力与无缺陷预制柱相当。

3 承载力理论公式

3.1 承载力公式推导

波纹管通孔柱是由波纹管及约束灌浆料、纵筋、混凝土 3 部分组成。基于叠加原理,波纹管通孔柱承载力可用式(5)–(7)计算:

$$N \leqslant N_1 + N_{\text{core}} \tag{5}$$

$$M \leqslant M_1 + M_{\text{core}} \tag{6}$$

$$F = \frac{M}{H} \tag{7}$$

其中: N_1 为纵筋和混凝土的轴力,kN; N_{core} 为波纹管和灌浆料的轴力,FN; M_1 为纵筋和混凝土的弯矩,kN·m; M_{core} 为波纹管和灌浆料的弯矩,kN·m; F 为柱承载力,kN; H 为柱高,mm。

为便于计算,可将波纹管及约束灌浆料部分圆形截面简化为等效方形空洞截面,并保持形心位置一致^[23]。截面受力状态简图如图 15 所示,其中: b 为柱截面宽度,mm; b_c 为等效方形空洞截面边长,mm; h 为柱截面高度,mm; h_0 为截面有效高度,mm; x 为受压区高度,mm; x_s 为受压区钢筋距受压边缘距离,mm; x_c 为约束灌浆料形心距受压边缘距离,mm; t 为混凝土层厚度,mm。

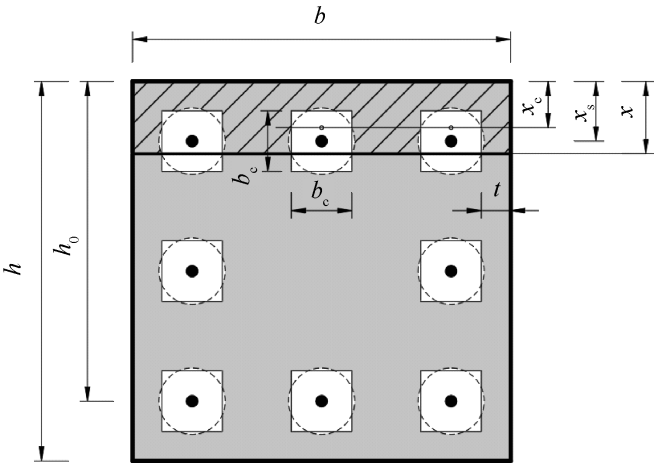


图 15 截面受力状态简图

参考 Mander 模型^[24],约束灌浆料部分的轴心抗压强度可用式(8)–(9)计算:

$$f_{\text{core}} = f_{\infty} \left[-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_r}{f_{\infty}}} - \frac{2f_r}{f_{\infty}} \right] \tag{8}$$

$$f_r = \frac{2tf_y}{(D - 2t)f_{\infty}} \tag{9}$$

其中: f_{core} 为约束灌浆料部分的轴心抗压强度,MPa; f_{∞} 为非约束灌浆料轴心抗压强度,MPa; f_r 为约束应力,MPa; D 为波纹管直径,mm。

根据截面轴力平衡条件,纵筋和混凝土的轴力

可用式(10)计算:

$$N_1 = \alpha f_c (b - 3b_c)(\beta x) + 3\alpha f_c b_c t + f_{y1} A_{s1} + f_{y2} A_{s2} \tag{10}$$

其中: α 、 β 为系数,取值参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010); f_{y1} 为受压区钢筋抗拉强度,MPa; A_{s1} 为受压区钢筋截面面积,mm²; f_{y2} 为受拉区钢筋抗拉强度,MPa; A_{s2} 为受拉区钢筋截面面积,mm²。

波纹管及约束灌浆料部分截面面积可用式(11)计算:

$$A_{\text{core}} = \int_0^{x-t} \sqrt{R^2 - (a - R)^2} da \tag{11}$$

其中: A_{core} 为波纹管及约束灌浆料部分截面面积,mm²; R 为波纹管半径,mm; a 为波纹管及约束灌浆料部分截面高度,mm。

波纹管和约束灌浆料的轴力可用式(12)计算:

$$N_{\text{core}} = 3f_{\text{core}} A_{\text{core}} \tag{12}$$

根据截面弯矩平衡条件,纵筋和混凝土的弯矩可用式(13)计算:

$$M_1 = \alpha f_c (b - 3b_c)(\beta x) \left(h_0 - \frac{\beta x}{2} \right) + 3\alpha f_c b_c t \left(h_0 - \frac{t}{2} \right) + f_y A_s (h_0 - x_s) \tag{13}$$

波纹管和约束灌浆料的弯矩可用式(14)计算:

$$M_{\text{core}} = 3f_{\text{core}} A_{\text{core}} (h_0 - x_c) \tag{14}$$

联立式(5)、式(10)与式(12),经反复试算求得 x ,结合式(13)–(14)求得截面弯矩后,代入式(7)可求得柱承载力计算值。

3.2 承载力公式验证

波纹管通孔柱及现浇柱的承载力计算值与试验结果如表 3 所示。

表 3 承载力计算结果与试验结果

试件 编号	截面 轴力/kN	承载力/kN		计算值与试验 值的比值
		计算值	试验值	
CIP-1	766.70	235.95	288.01	0.82
PC-1	766.70	233.84	278.41	0.84
PC-2	766.70	225.00	277.17	0.81

从表 3 可以看出,基于承载力公式得出的波纹管通孔柱承载力计算值与试验值能够较好吻合,说明该承载力公式可用于波纹管通孔柱的承载力计算。

4 结 论

本文提出了一种新型波纹管通孔柱,利用拟静力试验,研究了波纹管通孔柱的抗震性能,分析了波

纹管内灌浆缺陷对预制柱抗震性能的影响,给出了波纹管通孔柱的承载力计算公式。所得主要结论如下:

a)波纹管通孔柱的初始刚度最大,各项荷载特征值与现浇柱相当,位移延性系数提高了5%,等效黏滞阻尼系数最终可达到现浇柱的1.06倍,这表明波纹管能为纵筋提供有效的环向约束作用,增大了结构整体的抗侧刚度,使得波纹管通孔柱的抗震能力得到有效提高,可达到“等同现浇”的要求。

b)灌浆缺陷预制柱和无缺陷预制柱的骨架曲线重合率较高,两者的刚度和耗能量相当,缺陷预制柱的位移延性是无缺陷预制柱的94%,这表明当波纹管存在30%(远超施工现场的缺陷率)及以下灌浆缺陷率时,灌浆缺陷会削弱预制柱的位移延性等抗震性能指标,但影响较小。

c)给出了波纹管通孔柱的承载力计算公式,对比试验结果验证了公式的准确性,说明该公式可用于波纹管通孔柱的承载力计算。

本文提出一种新型的波纹管通孔柱,该预制柱抗震性能可达到“等同现浇”的要求。本文为提高装配式混凝土结构整体抗震性能给出了全新的构件选择,同时也为波纹管通孔柱的实际工程应用提供了一定的理论基础。波纹管通孔柱的承载力计算公式考虑了波纹管的环向约束作用,可为该新型预制柱的工程应用及相应规范的编写提供参考。

参考文献:

- [1] 安晓文,李丹. 鲁甸6.5级地震建筑典型震害现象分析[J]. 建筑结构,2020,50(7): 28-36.
- [2] 陈昉健,李若威,吴必辉,等. 混凝土柱中箍筋约束下纵筋的受压屈曲分析[J]. 建筑科学,2021,37(7): 21-26.
- [3] Sezen H, Mochle J P. Seismic tests of concrete columns with light transverse reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(6): 842-849.
- [4] 赵勇,刘科,王晓锋,等. 坐浆法钢筋套筒灌浆连接预制柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(S2): 282-296.
- [5] 王传林,宋梅梅. 螺旋箍筋约束波纹管浆锚搭接技术抗震性能研究[J]. 工业建筑,2021,51(4): 126-131.
- [6] Lu Z, Wang Z X, Li J B, et al. Studies on seismic performance of precast concrete columns with grouted splice sleeve[J]. Applied Sciences, 2017, 7(6): 571.
- [7] Ameli M J, Pantelides C P. Seismic analysis of precast concrete bridge columns connected with grouted splice sleeve connectors[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(2): 04016176.
- [8] Ameli M J, Parks J E, Brown D N, et al. Seismic evaluation of grouted splice sleeve connections for reinforced precast concrete column-to-cap beam joints in accelerated bridge construction[J]. PCI Journal, 2015, 60(2): 80-103.
- [9] Alias A, Zubir M A, Shahid K A, et al. Structural performance of grouted sleeve connectors with and without transverse reinforcement for precast concrete structure[J]. Procedia Engineering, 2013, 53: 116-123.
- [10] 李虎,谢相峰,林拥军,等. 装配式混凝土结构套筒灌浆连接质量检测技术研究进展及发展趋势[J]. 施工技术(中英文),2023,52(8): 1-9.
- [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.
- [12] 郑清林,王霓,陶里,等. 套筒灌浆缺陷对装配式混凝土柱抗震性能影响的试验研究[J]. 土木工程学报,2018,51(5): 75-83.
- [13] Xu F, Wang K, Wang S G, et al. Experimental bond behavior of deformed rebars in half-grouted sleeve connections with insufficient grouting defect [J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 264-274.
- [14] 肖顺,李向民,许清风,等. 套筒灌浆缺陷对预制混凝土柱抗震性能影响的试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(5): 112-121.
- [15] 解琳琳,钟勃健,陈曦,等. 套筒灌浆缺陷连接足尺预制混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2023,40(8): 68-76.
- [16] 李向民,高润东,许清风,等. 灌浆缺陷对钢筋套筒灌浆连接接头强度影响的试验研究[J]. 建筑结构,2018,48(7): 52-56.
- [17] 唐和生,凌塑奇,王霓. 考虑灌浆缺陷的装配式混凝土柱抗震性能数值模拟[J]. 建筑结构,2018,48(23): 33-37.
- [18] 瞿浩川,杨学林,王震,等. 基于钢筋套筒灌浆连接的装配式混凝土柱试验的数值拟合优化分析模型[J]. 建筑结构,2021,51(S1): 1166-1171.
- [19] Zheng G Y, Kuang Z P, Xiao J Z, et al. Mechanical performance for defective and repaired grouted sleeve connections under uniaxial and cyclic loadings [J]. Construction and Building Materials, 2020, 233: 117233.
- [20] 杨博,张亚飞,卢旦,等. 波纹管通孔柱轴压性能和滞回性能数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(5): 99-107.
- [21] 赵立东,曹万林,阚文亮,等. 不同构造复式钢管混凝土

- 土足尺柱抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(12): 35-45.
- [22] 贾俊峰, 郭扬, 宋年华, 等. 基于灌浆波纹管锚固连接的预制拼装 RC 墩柱抗震试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 211-220.
- [23] 王泽源. 复材约束核心增强钢筋混凝土柱轴压及抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2019: 189.
- [24] 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.

(责任编辑:康 锋)