

对拼波形钢板-混凝土异形柱单元轴压稳定性能研究

缪诚安,路冰*,赵宝成

(苏州科技大学 土木工程学院,江苏 苏州 215011)

摘要: 针对现有异形钢管混凝土柱、薄壁钢管混凝土柱在民用建筑应用中存在的不足,文中提出了一种新型对拼波形钢板-混凝土组合异形柱。选取异形柱单元开展轴压试验研究,设计了5个组合柱试件,研究长细比、含钢率对其轴压性能的影响。试验结果表明:组合短柱以混凝土剪切破坏为主,组合长柱易发生波形钢板局部屈曲;随长细比增大,试件轴压稳定承载力显著下降;随含钢率增加,试件轴压极限承载力稳步提高。采用ABAQUS有限元软件,建立并验证组合柱有限元模型,进一步开展参数化分析。数值模拟结果表明:增大外侧波形钢板厚度可以提高组合柱的轴压稳定承载力,但会降低其延性;当波谷宽度达到330 mm时,钢板厚度增加对混凝土的约束作用显著增强;当波谷宽度低于330 mm时,钢板厚度对混凝土约束作用影响有限。此外,当波谷宽度为330 mm时,随着长细比增大,组合柱的轴压稳定承载力下降速率显著加快。结合试验与数值模拟结果,推导该组合柱的轴压稳定承载力计算公式,计算结果与试验、模拟值吻合较好,验证了公式的合理性与准确性,为该组合异形柱的工程应用提供理论支撑。

关键词: 对拼波形钢板-混凝土组合柱;轴压试验;长细比;轴压稳定承载力;数值分析

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)09-0072-13

DOI: 10.13969/j.jzgigjz.20250209001

Study on Axial Compressive Stability Performance of Spliced Corrugated Steel Plate-Concrete Special-Shaped Column Elements

MIAO Cheng'an, LU Bing*, ZHAO Baocheng

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

*Corresponding author: lu_bing@usts.edu.cn

Abstract: To address the issues of existing special-shaped concrete-filled steel tubular columns and thin-walled concrete-filled steel tubular columns in civil buildings, a novel spliced corrugated steel plate-concrete composite special-shaped column was proposed. Five composite column specimens were designed for axial compression tests to study the effects of slenderness ratio and steel ratio on their axial compressive behavior. The tests showed that the composite short columns primarily exhibited concrete shear failure, and the corrugated steel plates of the medium-long columns were susceptible to local buckling. The axial compressive capacity decreased significantly with the slenderness ratio, whereas the ultimate axial compressive capacity increased steadily with the steel ratio. A finite element model of the composite column was established and validated using ABAQUS, followed by a parametric analysis. The

收稿日期:2025-02-09

基金项目:国家自然科学基金(52308516),苏州市科技计划项目(SJC2023002),江苏高校基础科学研究项目(21KJB560008)

作者简介:

缪诚安(2000—),男,硕士研究生,主要从事组合结构抗震方面的研究。E-mail:2223151567@qq.com。

通信作者:

路冰(1988—),男,博士,副教授,主要从事组合结构抗震方面的研究。E-mail:lu_bing@usts.edu.cn。

numerical results indicated that increasing the outer corrugated steel plate thickness improved the axial compressive stability capacity but reduced ductility. When the trough width was 330 mm, the steel plates provided significantly enhanced confinement to the concrete as the plate thickness increased. When the trough width was less than 330 mm, the plate thickness had little effect on concrete confinement. Also, at a trough width of 330 mm, the axial compressive stability capacity decreased more rapidly as the slenderness ratio increased. Based on the test and numerical results, a calculation formula for axial compressive stability capacity was derived. The calculated results agreed well with the test and numerical results, validating the rationality and accuracy of the formula and providing theoretical support for the practical application of this composite special-shaped column.

Keywords: spliced corrugated steel plate-concrete composite column; axial compressive test; slenderness ratio; axial compressive stability capacity; numerical analysis

在框架结构中,普通柱截面尺寸大于墙体厚度,柱体会凸出墙面,影响到住宅建筑的室内观感及空间利用率。钢管混凝土组合结构已在建筑工程中得到广泛应用,钢管混凝土异形柱^[1]能够有效解决柱体外凸问题,提升空间利用率^[2],同时契合国家大力推广装配式建筑的发展导向,具备良好的经济应用潜力^[3-6]。

近年来,众多学者针对不同构造形式的钢管混凝土异形柱开展了系列试验研究。刘林林等^[7]提出一种多腔式钢管混凝土异形柱,该构造可消除普通T形柱阴角带来的不利影响,减小板件宽厚比,有效改善构件整体受力性能;陈雨等^[8]通过对6根T形柱开展轴压试验研究发现,钢管阴角区域对混凝土约束效果较差,阳角位置混凝土易发生压溃破坏;黎志军等^[9]、蔡健等^[10]的研究表明,配置约束拉杆的异形柱,其承载力与延性均可得到较大提升;张旺等^[11]、刘君平等^[12]、朱荣军等^[13]的研究显示,设置加劲肋对钢管混凝土柱承载力提升作用有限,但可有效延缓钢管局部屈曲;曹兵等^[14]提出了由矩形钢管与U形钢管焊接组成的新型组合式钢管混凝土异形柱;周学军等^[15]开展了方钢管混凝土组合T形柱轴压试验研究,试验结果表明:短柱试件以局部鼓曲破坏为主,中长柱试件以失稳破坏为主;李补拴等^[16]提出部分包覆钢-混凝土组合柱,解决了传统矩形柱凸出墙体以及弱轴方向节点连接复杂的问题。但上述研究的试件普遍含钢率偏高,经济性不足,在民用低层建筑中应用优势不突出。

薄壁方钢管混凝土柱凭借经济性好、施工便捷的优势,受到国内外学者的广泛关注。张忠杰等^[17]完成了32根矩形薄壁钢管混凝土短柱轴压试验,发现薄壁钢管长边更易发生屈曲;基于试验建立核心混凝土约束分区模型,推导矩形钢管混凝土轴压构件承载力计算公式;宋国强等^[18]等以圆形、方形薄壁钢管混凝土短柱及约束短柱为研究对象开展试验研究,结果表明圆形钢管对混凝土约束效果优于方钢管对混凝土的约束效果,钢管外侧CFRP(碳纤维增强复合材料)约束对承载力提升有限,

主要作用为改善试件延性;陈俊等^[19]提出带对拉约束的方钢管混凝土短柱,试验表明:设置内置拉筋可以提升试件延性与承载力,且该提升效果随混凝土强度提高而减弱;吴丽丽等^[20]采用冷弯薄壁方钢管搭配两根U形钢管拼装形成L形钢管异形柱,用于改善异形钢管混凝土柱阴角对构件承载力的不利影响。

目前已研究的异形钢管混凝土柱与薄壁钢管混凝土柱,大多存在焊缝数量多、焊接残余应力大、施工工序复杂、含钢率高、经济性差等问题,制约该类构件在民用低层建筑中的推广应用。民用建筑在国内建筑总量中占比大,拥有广阔的市场空间。本文结合波形钢板面外刚度突出的优势,提出新型对拼波形钢板-混凝土组合异形柱,该构件采用两块预开孔波形钢板,在波峰位置通过螺栓对拼连接,内部空腔浇筑填充混凝土。依托波形钢板截面构型灵活的特点,可规避阴角构造,方便实现T形、L形等多种截面形式(图1),满足不同建筑结构的设计需求;构件采用螺栓对拼装配,施工工序简便,可实现模块化建造,经济效益良好。

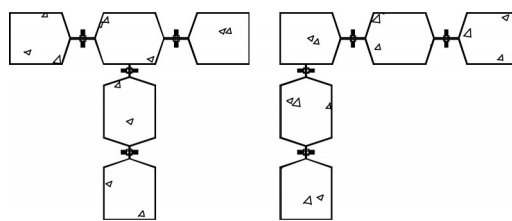


图1 对拼波形钢板-混凝土组合T、L形柱横截面

Fig. 1 Cross section of spliced corrugated steel plate-concrete composite T, L shaped columns

国内外尚未开展对拼波形钢板-混凝土柱的相关力学性能研究,鉴于该结构在民用低层建筑中的应用优势,有必要开展其轴压力学性能研究。

本文选取对拼波形钢板-混凝土组合异形柱的单元柱开展轴压稳定性能试验研究,分析长细比、含钢率对构件轴压稳定性能的影响(图2)。螺栓连接位置处钢板开设长圆孔,可在一定范围内允许单元柱构件产生相对错

动,起到延缓波形钢板屈曲的作用。同时采用ABAQUS建立有限元模型开展参数分析,提出对拼波形钢板-混凝土组合柱轴压稳定承载力计算公式,为后续该类组合异形柱的力学性能研究奠定基础。

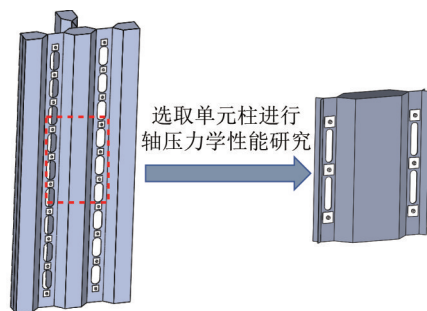


图2 对拼波形钢板-混凝土组合异形柱单元柱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of element column of spliced corrugated steel plate-concrete special-shaped column

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

根据《冷弯薄壁型钢技术结构技术规程》(GB/T 50018—2025)第4.3.2条规定,Q235钢材受压板件中加劲板件最大宽厚比不宜超过250;根据《波形钢板组合结构技术规程》(T/CECS 624—2019)第3.6.3条规定,波形钢板混凝土组合墙立面采用正交布置对拉螺栓时,满足相应构造规定后,承载力计算时可不考虑波形钢板局部屈曲的影响:

$$\frac{d_1}{t_w} \leq 130 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (1)$$

式中: d_1 为竖向螺栓的间距; t_w 为波形钢板的厚度; f_y 为波形钢板的屈服强度。

因此本文设计的对拼波形钢板-混凝土柱试件螺栓间距取260 mm,波谷宽度取330 mm。

以长细比、含钢率为变化参数,共设计了5个对拼波形钢板-混凝土组合柱试件(试件DPZ-1~DPZ-5)。设计长细比取13.0、17.3、21.7、26.0、12.9,设计含钢率取3.57%、5.35%;波形钢板的波谷宽度(B)为330 mm,波谷高度($H/2$)为75 mm,钢板厚度为2 mm、3 mm,采用热轧镀锌Q235B钢材;连接螺栓采用10.9级M10高强螺栓,螺栓间距为260 mm。试件设计参数见表1,尺寸示意图见图3。

在试件底端焊接尺寸为800 mm×300 mm×20 mm的盖板,在顶部焊接同尺寸开孔盖板;保证盖板中心与波形钢板截面形心几何对中,由上端盖板开孔位置浇筑混凝土,控制试件垂直度偏差不大于1/1 000^[17]。长细比较大的试件采用分段浇筑,每层浇筑后使用电动振捣

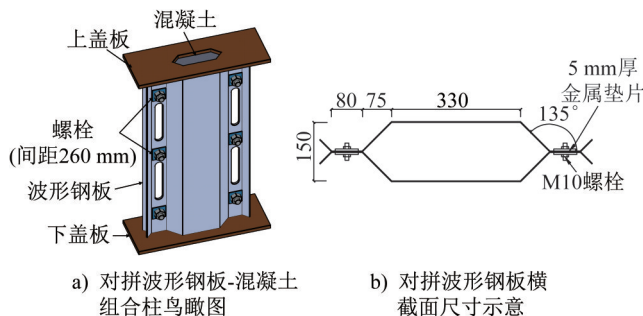


图3 对拼波形钢板-混凝土组合柱示意图
(试件DPZ-1)(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of spliced corrugated steel plate-concrete composite column (specimen DPZ-1) (unit: mm)

器振捣密实,再进行下一段浇筑。同步制作混凝土标准试块,与试件同条件养护。混凝土达到规定强度后,使用角磨机打磨试件顶面多余混凝土,采用环氧砂浆找平,使混凝土顶面与钢盖板齐平,保证加载初期波形钢板与混凝土协同受力。

表1 试件基本设计参数

Table 1 Basic design parameters of specimens

试件编号	L/mm	t/mm	f_{cu}/MPa	f_y/MPa	λ	α
DPZ-1	780	2		297	13.0	3.57%
DPZ-2	1 040	2		297	17.3	3.57%
DPZ-3	1 300	2	35.2	297	21.7	3.57%
DPZ-4	1 560	2		297	26.0	3.57%
DPZ-5	780	3		337	12.9	5.35%

注: L 为截面高度; t 为外侧波形钢板厚度; f_{cu} 为混凝土轴心抗压强度; f_y 为波形钢板屈服强度; λ 为试件设计长细比; α 为试件含钢率。

1.2 材料特性

波形钢板由弯折机加工成型,分别对2 mm、3 mm厚的波形钢板各制取3个标准拉伸试样,并依据《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)开展拉伸试验研究,波形钢板材料力学性能见表2。

混凝土采用P.O42.5R级水泥、天然河砂、最大粒径为28 mm的碎石及水拌合而成,混凝土配合比见表3。试验实测混凝土立方体抗压强度平均值 f_{cu} 为35.2 MPa。

1.3 加载及测量装置

轴压试验在苏州科技大学结构工程重点实验室5 000 kN压力试验机上开展,试验加载现场如图4a)所

表2 波形钢板材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of corrugated steel plate

波形钢板厚度设计值 t/mm	波形钢板厚度实测值 $t_{\text{实}}/\text{mm}$	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E_s/GPa	泊松比 ν
2	1.98	297	434	205	0.299
3	2.98	337	415	208	0.287

示。试验机上端配置球铰支座,保证球铰中心与试件几何形心对中。试件四角布置位移计,用于测量试件纵向变形。在试件上半段螺栓位置、相邻两排螺栓中间的波谷中心及波谷两侧中心布设横向、竖向应变片;试件下半段仅在波谷区域中心布设横向、纵向应变片。应变片、位移计布置见图4(以试件DPZ-1为例);应变片命名原则为L/M/R数字-S/H,L代表左侧区域,M代表中间波谷区域,R代表右侧区域,数字代表从上至下应变片排数,S代表竖向应变片,H代表横向应变片。

表3 混凝土配合比

Table 3 Concrete mix proportion

水胶比	砂率/%	水/kg	水泥/kg	砂/kg	碎石/kg
0.57	0.36	205	360	661	1 174

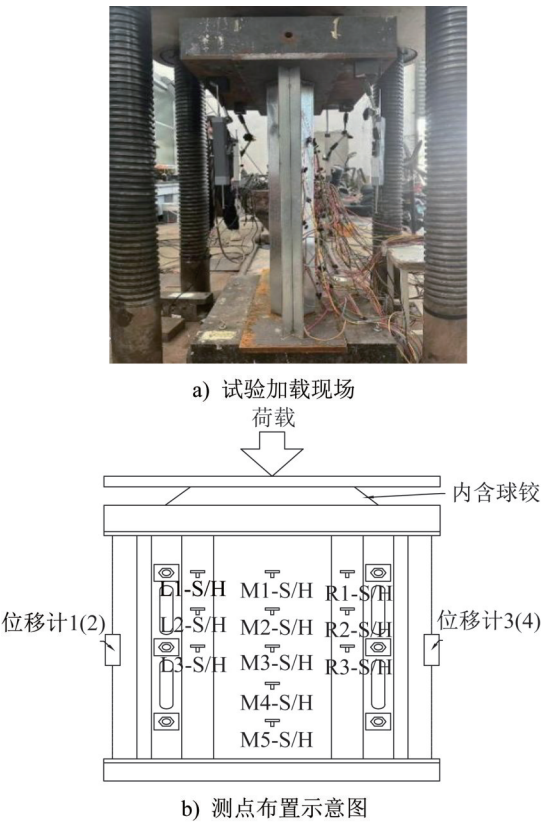


图4 试验装置和测点布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test setup and measurement point arrangement

试验分为预加载与正式加载两个阶段。预加载至100 kN,持荷2 min,检查位移、应变采集数据是否正常,确认无误后开始正式加载。正式加载采用位移控制模式,加载速率为 $0.2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;当试件无法继续加载或者荷载下降至极限承载力的75%时终止试验。

2 试验现象

图5为各试件破坏形态。所有试件在加载初期外观无明显变化,荷载近似呈线性增长趋势。荷载达到峰值荷载的50%~70%时,波形钢板最外侧肋板开始弯折,出现失稳迹象;荷载继续增大,波形钢板中部波谷区域逐步出现局部鼓曲,并向两侧扩展。

由图5可知,长细比不同,试件破坏模式存在一定差异,当试件长细比为13.0时,试件DPZ-1波形钢板主要发生中心区域斜向鼓曲与端部鼓曲,形成明显的斜向鼓曲带;长细比增大至17.3、21.7后,试件DPZ-2、DPZ-3端部发生了明显的横向鼓曲破坏,其余区域损伤不明显;长细比继续增大至26.0时,试件DPZ-4波形钢板上半段出现斜向鼓曲,相较于前两个试件端部鼓曲破坏不显著。原因在于长细比增大后,试件DPZ-4两侧肋板失稳位置不在同一高度,A面肋板失稳发生在二、三排螺栓之间,B面肋板失稳发生在一、二排螺栓之间,最终形成斜向鼓曲带。

增大外侧波形钢板厚度,当试件的外侧波形钢板厚度从2 mm增大至3 mm时,钢板发生局部屈曲的时刻延后。试件DPZ-1在荷载达到峰值的70%左右时,外侧波形钢板主体区域出现明显局部屈曲,而试件DPZ-5出现同类现象对应的荷载达到峰值荷载的85%左右;同时钢板厚度增大后,局部屈曲的损伤程度有所减轻。

试验结束后,利用角磨机切割一侧波形钢板,观察内部核心区混凝土破坏情况和裂缝发展情况,如图6所示。从图6中可以发现,混凝土裂缝出现位置、扩展形态与外部波形钢板鼓曲位置基本对应。长细比增大后,混凝土裂缝由试件中部向上端部转移;钢板厚度提高后,混凝土裂缝发展程度无明显变化。

结合试件的外侧波形钢板破坏情况及内部混凝土裂缝情况,可以发现:当试件波谷宽度较大、长细比较低时,试件DPZ-1、DPZ-5发生剪切破坏;长细比增大后,试件DPZ-2、DPZ-3、DPZ-4发生钢板局部屈曲破坏。

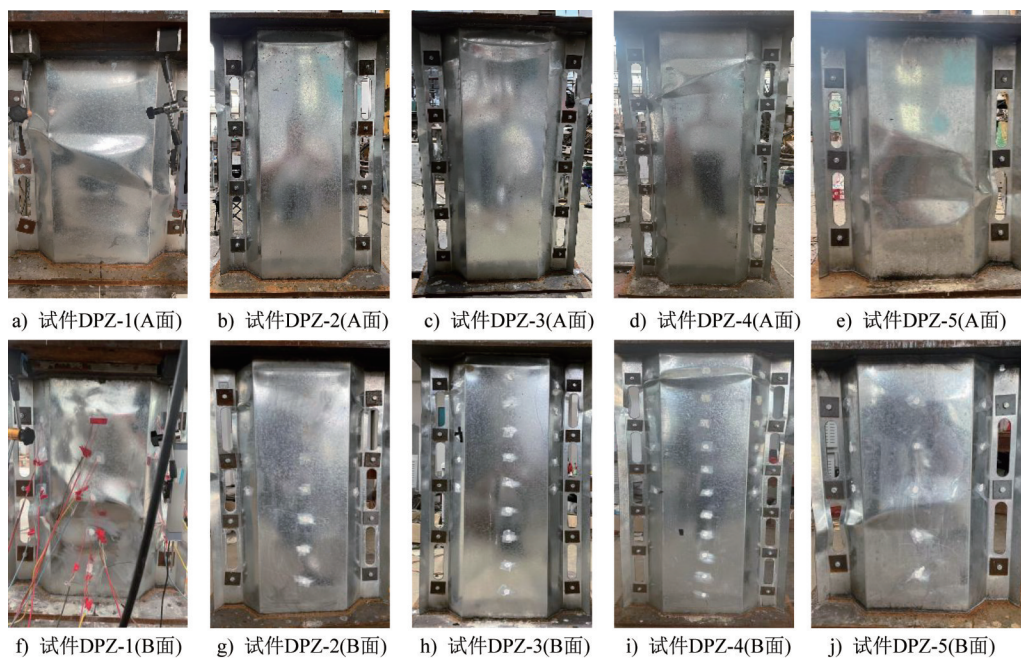


图5 各试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

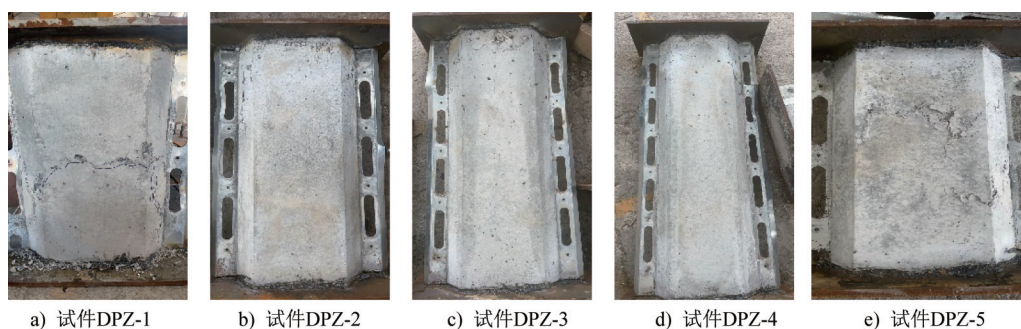


图6 各试件混凝土破坏形态

Fig. 6 Concrete failure modes of specimens

3 试验结果与分析

3.1 荷载-纵向位移曲线

图7a)为不同长细比试件的荷载-纵向位移曲线;图7b)为改变波形钢板厚度(改变宽厚比)条件下试件的荷载-纵向位移曲线。

从图7a)中可以看出,随着长细比的增大,试件的初始刚度降低,峰值荷载对应的位移向后推移。试件DPZ-2、DPZ-3的峰值承载力与试件DPZ-1的峰值承载力相比,分别降低了17%、21.5%;说明长细比小于21时,轴压稳定承载力随长细比提高下降显著。长细比增大至26.0后承

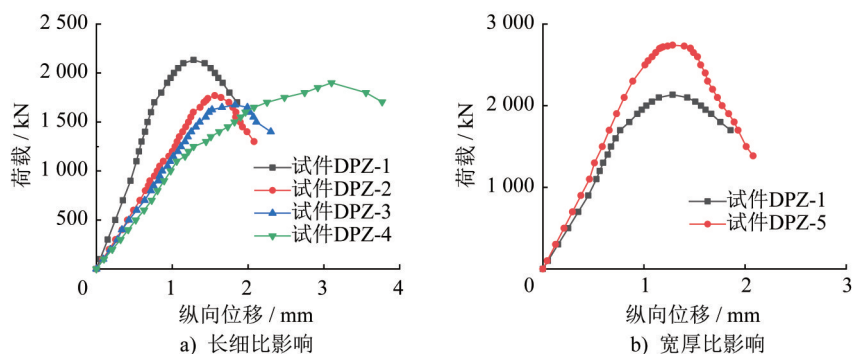


图7 各试件荷载-纵向位移曲线

Fig. 7 Load-longitudinal displacement curves of specimens

载力未继续降低,推测该现象由手工拌合混凝土强度离散性导致,造成试件DPZ-2、DPZ-3实测承载力偏低。

从图7b)中可以看出,试件DPZ-5与DPZ-1相比,含钢率增加了49.8%、承载力提高了26.9%,说明提高含钢率可有效提升试件的承载力。含钢率提高后,试件达到峰值荷载后的下降段曲线变陡,延性有所降低;原因在于钢板厚度增大,钢材内部晶粒尺寸加大、偏析加剧,应力集中效应更加突出,更易发生脆性破坏。

3.2 荷载-应变曲线

本试验重点采集试件上半段应变数据,在每一排螺栓高度处、两排螺栓中间高度处的波谷中部与两侧肋板中部布设横向、竖向应变片。应变片命名规则见1.3节。

图8为试件DPZ-2波谷中部测点的荷载-应变曲线。从图8可以发现,波形钢板波谷位置竖向传力并不均匀,仅钢板上端区域进入屈服,其余高度位置未达到屈服。该现象与有限元应力云图规律一致。主要原因为波形钢板约束效应由两角向中部逐步减弱,波谷中部约束最弱,不易进入屈服;屈服主要发生在钢板弯折位置。

图9为试件DPZ-2~DPZ-5第一排测点横向、竖向荷载-应变曲线。从图中可以看出,加载初期竖向应变均为负值,近似线性增长,截面整体处于均匀受压状态。试件

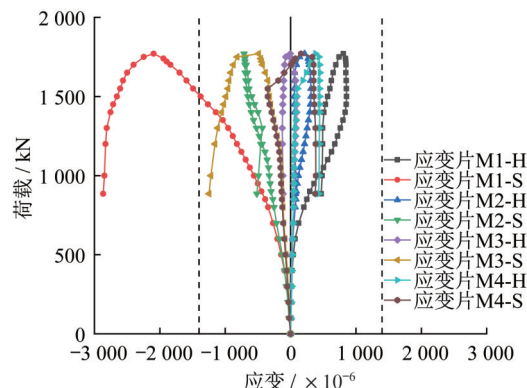


图8 试件DPZ-2波谷中部荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of specimen DPZ-2 at the middle trough

DPZ-2、DPZ-3在荷载接近峰值承载力的90%时,应变增长速率加快;且波谷及左侧肋板竖向应变超过钢板屈服应变,说明波形钢板对内部混凝土约束作用显著;波谷右侧肋板直到荷载下降至峰值荷载的70%左右,即试件破坏时才发生屈服,且左侧肋板纵向应变均大于右侧肋板纵向应变,推测由试件几何对中可能存在偏差,造成左右两侧受力不均。同等荷载下横向应变整体小于竖向应变,说明外侧波形钢板以承担竖向荷载为主,同时对混凝土形成一定约束。

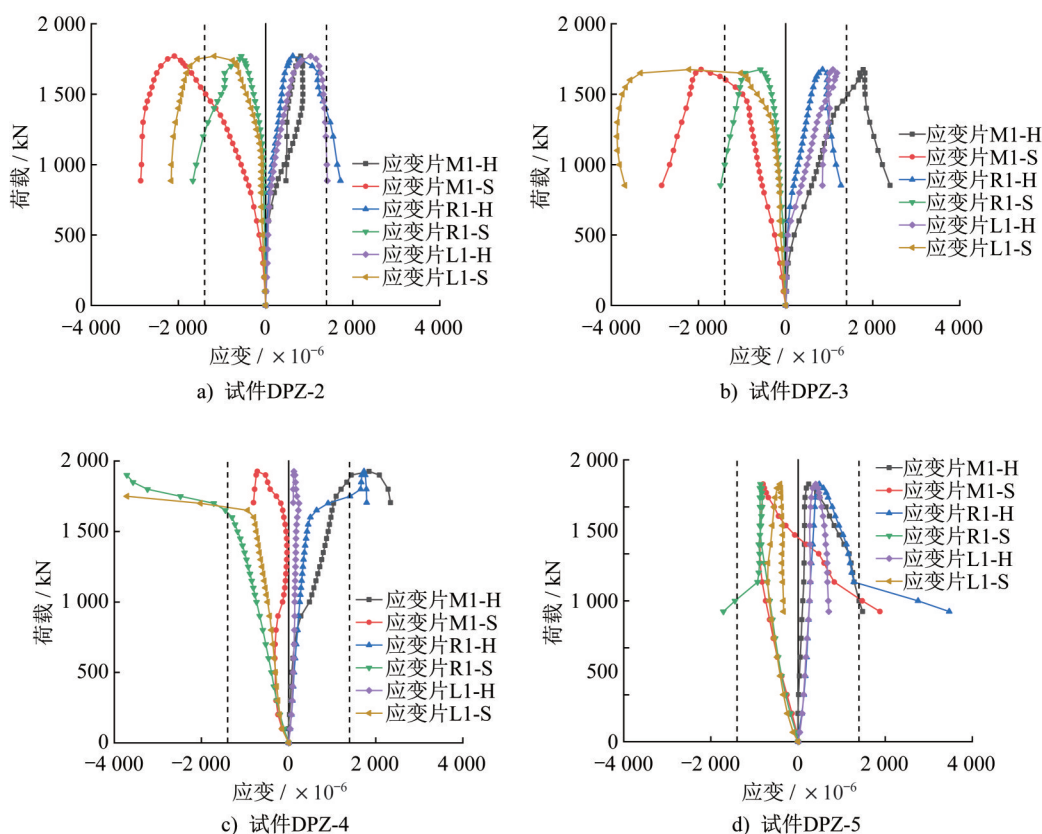


图9 试件第一排螺栓高度处应变片荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of the first-row bolts of specimens

对于试件DPZ-4,其两侧肋板在荷载达到峰值荷载的90%时进入屈服,波谷中部测点未屈服;这是因为试件在到达峰值荷载前波形钢板已经发生局部鼓曲,波谷位置钢板无法继续发展屈服变形。

对于试件DPZ-5,部分测点竖向应变未发生屈服,原因是该位置钢板发生局部鼓曲,竖向压应变向拉应变发生转化。

4 有限元分析

4.1 有限元模型的建立

采用ABAQUS建立对拼波形钢板-混凝土组合柱精细化有限元模型。外侧波形钢板采用S4R壳单元模拟;核心混凝土、螺栓、垫板、加载板采用C3D8R实体单元模拟。模型网格划分采用结构化划分技术,兼顾计算精度与计算效率;外侧波形钢板网格尺寸为20 mm,内部核心区混凝土网格尺寸为30 mm。加载板与试件间采用Tie绑定约束;加载板上下表面分别耦合至参考点,用于施加位移边界。组合柱采用位移加载,柱上端耦合点约束 x, y 向p平动自由度,施加沿 z 向竖向位移,释放全部转动自由度;柱下端耦合点全部自由度固定。钢板与混凝土之间采用面-面接触,切向采用库仑摩擦,摩擦系数取0.5,法向采用硬接触,允许界面产生微小滑移。有限元模型见图10。

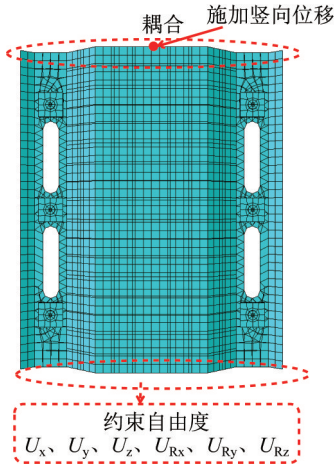


图10 有限元模型

Fig. 10 Finite element model

中长柱初始几何缺陷对力学性能影响显著,参考已有文献[21],采用 $L/1\ 000$ 初始偏心距[21]来模拟对拼波形钢板-混凝土组合柱的初始缺陷。

4.2 材料本构关系模型

混凝土由多种材料混合而成,且沿拉、压方向的受力力学性能存在差异,存在开裂、损伤、强化和软化等复

杂的受力行为。因此,构建准确的混凝土本构关系模型是有限元模拟的关键。本文选用混凝土塑性损伤模型(CDP)模拟混凝土受力行为。参考《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)[22],采用规范给出的素混凝土本构曲线;混凝土单轴受压应力-应变关系表达式如式(2)~(6)所示:

$$\sigma_c = (1 - D_c) E_c \epsilon \quad (2)$$

$$D_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + X^n} & X \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c n}{\alpha_c (X - 1)^2 + X} & X > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r}} \quad (4)$$

$$n = \frac{E_c \epsilon_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (5)$$

$$X = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c,r}} \quad (6)$$

式中: D_c 为受压损伤参数因子; E_c 为混凝土弹性模量; α_c 为混凝土单轴受压应力-应变曲线下降段参数值; $f_{c,r}$ 为混凝土单轴抗压强度代表值; $\epsilon_{c,r}$ 为与单轴抗压强度对应的峰值应变。

混凝土单轴受拉应力-应变关系表达式如式(7)~(10)所示:

$$\sigma_t = (1 - D_t) E_c \epsilon \quad (7)$$

$$D_t = \begin{cases} 1 - \rho_t (1.2 - 0.2X^5) & X \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (X - 1)^{1.7} + X} & X > 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \epsilon_{t,r}} \quad (9)$$

$$X = \frac{\epsilon}{\epsilon_{t,r}} \quad (10)$$

式中: D_t 为受拉损伤参数因子; α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段参数值; $f_{t,r}$ 为混凝土单轴抗拉强度代表值; $\epsilon_{t,r}$ 为与单轴抗压强度对应的峰值应变。

波形钢板的应力-应变关系[23]表达式如式(11)所示:

$$\sigma_i = \begin{cases} E_s \epsilon_i & \epsilon_i \leq \epsilon_y \\ f_s & \epsilon_y < \epsilon_i \leq \epsilon_{st} \\ f_s + \xi E_s (\epsilon_i - \epsilon_{st}) & \epsilon_{st} < \epsilon_i \leq \epsilon_u \\ f_u & \epsilon_i > \epsilon_u \end{cases} \quad (11)$$

式中: σ_i 为钢板的屈服应力; E_s 为钢板的弹性模量; f_s 为钢板的屈服强度,取 $f_u = 1.5f_s$; ϵ_i 为钢板的等效应变; ϵ_y 为钢板的屈服应变; ϵ_{st} 为钢板的强化应变; ϵ_u 为钢板的极限应变,取 $\epsilon_{st} = 12\epsilon_y$, $\epsilon_u = 120\epsilon_y$, $\xi = 1/216$ 。

4.3 模型验证

将5个试件的试验结果和有限元模拟结果进行比较,荷载-位移曲线见图11、破坏模式对比见图12。有限元得到的破坏位置、屈曲形态和试验现象吻合。试件DPZ-2、DPZ-3有限元得到的极限承载力高于试验实测

极限承载力,这主要是由于手工拌合混凝土存在强度离散性,造成试验承载力偏低。有限元模拟的初始刚度高于试验试件初始刚度,是因为试验机上部固定板存在微小倾斜,试件上盖板加载初期并未完全压实,加载中后期才完全接触,造成实测初始刚度偏低。

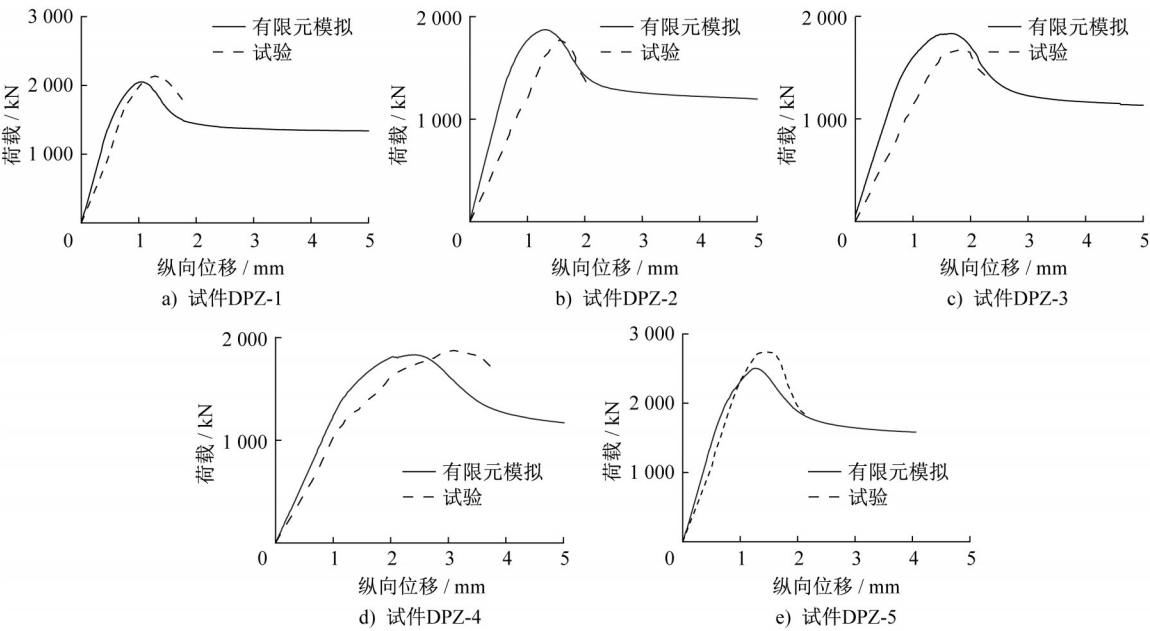


图 11 试验与有限元模拟荷载-位移曲线对比

Fig. 11 Comparison of load-displacement curves between test and finite element simulation

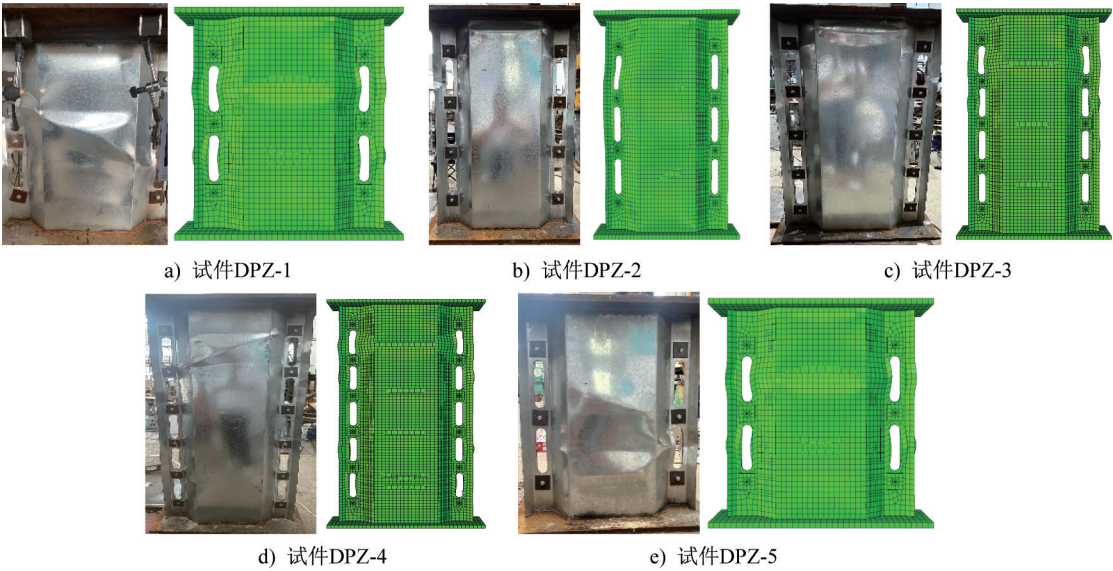


图 12 试验与有限元模拟破坏模式对比

Fig. 12 Comparison of failure modes between test and finite element simulation

综合来看,本文建立的有限元模型可以较好反映构件受力行为,模型有效。

4.4 参数分析

为研究宽厚比、长细比、含钢率对对拼波形钢板-混凝土组合柱轴压稳定承载力的影响,开展多组参数计算。改

变波形钢板的波谷宽度,分别从150 mm,以60 mm为步长增大至330 mm;同一波谷宽度下钢板厚度从1 mm逐步增加至5 mm(每次增加1 mm),分析含钢率的影响;改变模型高度,高度由520 mm增大至3 120 mm,分析长细比的影响,共计60组有限元计算模型。

不同波形钢板厚度下对拼波形钢板-混凝土组合柱的荷载-位移曲线(以波谷宽度 330 mm、150 mm 为例)如图 13 所示。从图中可以看出,随着钢板厚度增大,模型达到极限承载力后曲线下降段更加陡峭。轴压极限承载力随套箍系数、波谷宽度的变化见图 14,图中模型编号规定如下:DPZ-BK 数字-T 数字/H 数字,BK 表示波谷宽度(其后数字代表具体数值),H 表示模型整体高度(其后数字代表具体数值),T 表示钢板厚度(其后数字代表具体数值)。

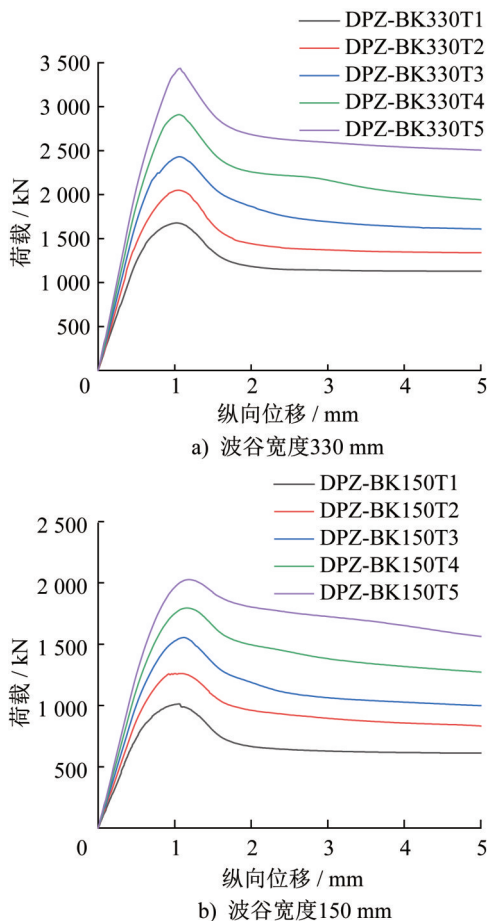


图 13 不同波形钢板厚度下模型的荷载-位移曲线
Fig. 13 Load-displacement curves under different waveform steel plate thicknesses of models

由图可知,当波谷宽度位于 210 mm~270 mm 区间时,随着波形钢板厚度增加,轴压极限承载力近似线性增长,且增长幅度相近。当波谷宽度为 330 mm 时,随着波形钢板厚度增加,轴压极限承载力提升效果进一步放大,说明钢板对混凝土约束效应显著增强。当波谷宽度为 150 mm 时,随着波形钢板厚度增加,轴压极限承载力提升幅度有所减弱,说明钢板对混凝土约束增强效果有限。

不同长细比下对拼波形钢板-混凝土组合柱的荷载-位移曲线(以波谷宽度 330 mm、150 mm 为例)如图 15 所

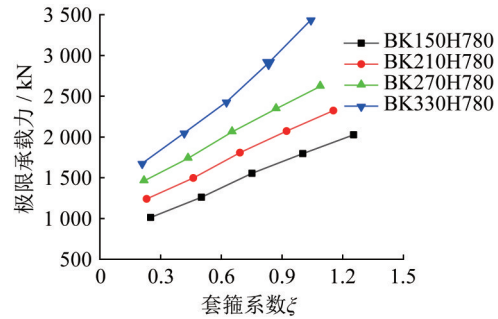


图 14 不同套箍系数下轴压极限承载力变化曲线

Fig. 14 Variation curves of axial compressive ultimate bearing capacity under different hoop coefficients

示;该组合柱高度为 2 340 mm、3 120 mm 时,对应的应力云图见图 16;轴压承载力稳定系数随长细比的变化如图 17 所示。其中轴压稳定系数定义为该组合柱极限承载力与高度为 520 mm 时的极限承载力比值。

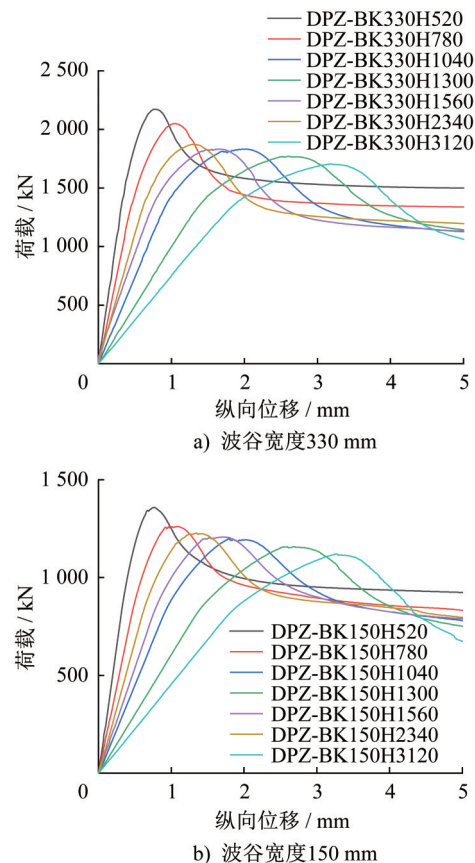


图 15 不同长细比下模型的荷载-位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curves under different slenderness ratios of models

从图 15 中可以看出,长细比越小,模型轴压极限承载力值越大,极限承载力对应位移越小,且达到极限承载力后曲线下降段越陡。随着长细比增大,极限承载力逐渐降低,达到峰值时位移增大,模型延性得到改善。从图

16中可以发现,长细比增大至39.0后,模型会出现整体失稳,必须考虑稳定效应对承载力的折减。由图17可知,当波谷宽度处于150~270 mm时,轴压承载力稳定系数的下降速率接近;当波谷宽度为330 mm时,轴压承载力稳定系数下降速度最快,说明波形钢板局部屈曲发展更迅速,因此,建议对拼波形钢板-混凝土组合柱波形钢板波谷宽度与钢板厚度比值不宜大于135。

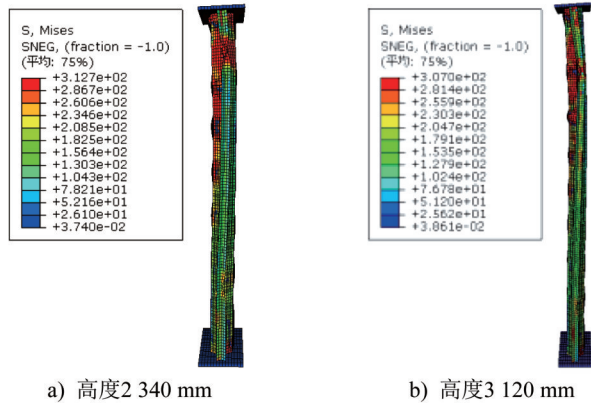


图16 长细比增大后应力云图(单位:MPa)

Fig. 16 Stress contours after increasing slenderness ratios (unit: MPa)

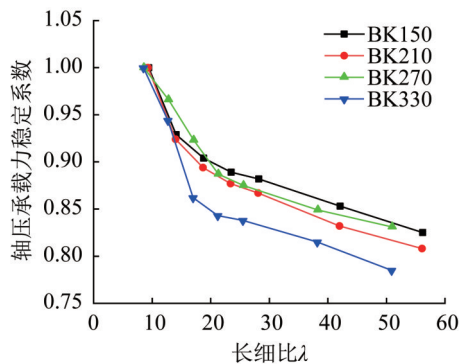


图17 不同长细比下轴压承载力稳定系数变化曲线

Fig. 17 Variation curves of axial compressive load stabilization coefficient under different slenderness ratios

5 轴压稳定承载力

结合试验结果与数值模拟分析结果,基于叠加原理建立对拼波形钢板-混凝土组合柱轴压极限承载力与轴压稳定承载力计算公式。其中,轴压极限承载力为 N_u 由外侧波形钢板约束下的混凝土承载力、波形钢板自身承载力两部分组成,计算公式如式(12)所示:

$$N_u = \left(1.25 + 0.75 \frac{H}{B} \xi \right) f_{ck} A_c + f_s A_s \quad (12)$$

式中: N_u 为对拼波形钢板-混凝土短柱轴压极限承载力; A_c 为混凝土截面面积; A_s 为钢材截面面积; f_{ck} 为混凝土

轴心抗压强度标准值; B 为试件长边方向长度; H 为试件短边方向长度; ξ 为试件套箍系数, $\xi = (A_s f_y) / (A_c f_{ck})$ 。

根据相关研究^[24-25],结合本文对长细比参数的模拟结果可知,长细比增大会降低组合长柱的轴压承载力,引入轴压稳定系数 φ_1 考虑长细比带来的折减效应。对拼波形钢板-混凝土组合中长柱轴压稳定承载力 $N_{u,cr}$ 按式(13)计算:

$$N_{u,cr} = \varphi_1 N_u \quad (13)$$

由图16中28组变长细比有限元结果可知,当波谷宽度小于等于270 mm时,各模型的轴压承载力稳定系数下降速率接近;当波谷宽度取330 mm时,轴压承载力稳定系数明显降低。将拟合结果整理为分段函数,对拼波形钢板-混凝土柱轴压承载力稳定系数 φ_1 值可按式(14)进行计算:

$$\varphi_1 = \begin{cases} 1.0 & \lambda \leq 10 \\ -0.0067\lambda + 1.067 & 10 < \lambda < 25 \\ -0.003\lambda + 0.975 & \lambda \geq 25 \end{cases} \quad (14)$$

表4为5个对拼波形钢板-混凝土组合柱试件轴压极限承载力试验结果、数值模拟结果、公式计算结果对比。受手工拌合混凝土强度离散影响,试件DPZ-2、DPZ-3实测承载力偏低。 $N_{u,e}/N_{u,c}$ 平均值为0.989; $N_{u,f}/N_{u,c}$ 平均值为1.014;公式计算结果与试验结果、模拟结果吻合良好。

由于本次试验具有局限性,本文提出的对拼波形钢板-混凝土组合柱轴压极限承载力、轴压稳定承载力公式适用条件如下:

- (1) 公式仅适用于波形钢板螺栓对拼形式的该类组合柱;
- (2) 试件属于薄壁构件,试件套箍系数 $\xi < 1.5$ 。

由于本文为初探性试验,仅研究了对拼波形钢板-混凝土异形柱中标准柱的轴压力学性能,后续还会对对拼波形钢板-混凝土异形柱非标准柱的轴压力学性能开展研究,结合对拼波形钢板-混凝土柱的轴压稳定承载力公式,对异形柱在实际工程中的应用进行指导。

借助ABAQUS有限元软件,进一步改变外侧波形钢板厚度 t 、波谷宽度 b 、长细比 λ 、钢材材料性能及混凝土强度等级,共建立69个有限元模型,其中 t 为1~5 mm, b 为150~330 mm, λ 为8.5~54.7,混凝土强度等级为C20~C50。将69个模型的轴压稳定承载力模拟结果与计算结果进行对比,发现轴压稳定承载力正向最大误差为13.7%(出现在波谷宽度为330 mm,波形钢板厚度为5 mm时),这主要是因为钢板厚度增大后,钢板对内部核心区混凝土的约束力显著增强;负向最大误差为-7.1%;误差平均值为0.996。公式计算精度处于合理区间。数值模拟结果与公式计算结果对比见图18。

表4 各试件轴压极限承载力对比结果

Table 4 Comparison results of axial compressive ultimate bearing capacity of specimens

试件编号	φ_1	$N_{u,e}/\text{kN}$	$N_{u,f}/\text{kN}$	$N_{u,c}/\text{kN}$	$N_{u,e}/N_{u,c}$	$N_{u,f}/N_{u,c}$
DPZ-1	0.950	2 068	2 050	2 048.4	1.009	1.001
DPZ-2	0.922	1 770	1 872	1 988.0	0.890	1.062
DPZ-3	0.894	1 675	1 831	1 927.6	0.869	1.052
DPZ-4	0.870	1 928	1 815	1 875.9	1.062	0.968
DPZ-5	0.981	2 742	2 430	2 462.5	1.113	0.987
平均值	—	—	—	—	0.989	1.014

注: φ_1 为试件考虑长细比带来的折减效应, 引入的轴压稳定系数; $N_{u,e}$ 为试件试验极限承载力; $N_{u,f}$ 为试件有限元模拟极限承载力; $N_{u,c}$ 为按式(12)计算的极限承载力。

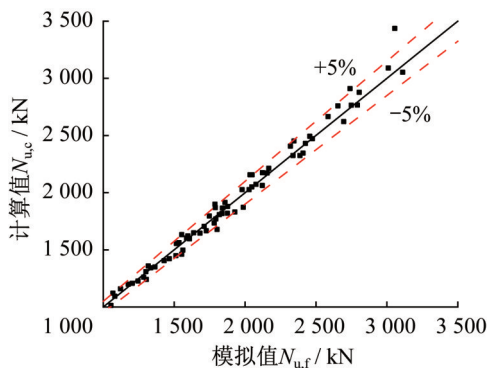


图18 极限承载力模拟值与计算值比较

Fig. 18 Comparison of ultimate bearing capacity between simulated and calculated results

6 结论

本文通过试验与数值模拟相结合的方法, 对对拼波形钢板-混凝土组合柱的轴压稳定性能开展系统研究, 主要结论如下:

(1) 对拼波形钢板-混凝土组合短柱的主要破坏模式为剪切破坏; 中长柱在受压破坏过程中易出现波形钢板局部屈曲现象。随着长细比增大, 组合柱轴压稳定承载力显著降低; 随着含钢率提升, 试件轴压极限承载力明显提高, 且钢板发生局部屈曲时对应的轴向压应变显著增大。

(2) 增大外侧波形钢板厚度可有效提升组合柱套箍系数, 使轴压稳定承载力呈上升趋势, 但整体延性随之降低。当波谷宽度为 330 mm 时, 增大钢板厚度能够进一步增强钢板对核心混凝土的约束效果。

(3) 组合柱轴压稳定承载力随长细比增大整体呈下降趋势, 且承载力下降速率存在明显分段特征: 以长细比 25 为临界值, 长细比小于 25 时, 承载力下降速率较快; 长细比大于 25 时, 承载力下降趋势趋于平缓。在波谷宽度为 330 mm 的工况下, 长细比增大会进一步降低试件的轴

压稳定承载力。

(4) 基于本文试验与数值模拟结果, 通过线性回归分析, 建立了对拼波形钢板-混凝土组合柱轴压稳定承载力简化计算公式。该公式计算结果与试验及数值模拟结果吻合良好, 验证了其合理性与精度, 可为该类组合构件的工程设计提供参考。

参考文献:

- [1] 叶全喜, 郝放, 薛炳勇, 等. 钢管混凝土异形柱及相关梁柱节点构造研究综述[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(9): 1083-1094. DOI: 10.11936/bjtxb.2020100010.
- YE Quanxi, HAO Fang, XUE Bingyong, et al. Review on configurations of concrete-filled steel tubular(CFST) special-shaped columns and corresponding beam-column joints [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(9): 1083-1094. DOI: 10.11936/bjtxb.2020100010. (in Chinese)
- [2] 程向东, 唐笑一, 王明, 等. 某超高层项目钢管混凝土组合柱应用[J]. 建筑结构, 2024, 54(4): 104-109. DOI: 10.19701/j.jzjg.20212098.
- CHENG Xiangdong, TANG Xiaoyi, WANG Ming, et al. Application of concrete filled steel tubular composite column in a super high-rise project [J]. Building Structure, 2024, 54(4): 104-109. DOI: 10.19701/j.jzjg.20212098. (in Chinese)
- [3] 陈云, 赵威, 董金爽, 等. 钢管混凝土柱、型钢混凝土柱、钢柱与钢筋混凝土梁连接节点研究现状综述[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(7): 1-13. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.07.001.
- CHEN Yun, ZHAO Wei, DONG Jinshuang, et al. Research review on the connection joints of concrete-filled steel tubular column, steel reinforced concrete column and steel column-reinforced concrete beam [J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(7): 1-13. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.07.001. (in Chinese)
- [4] 丁发兴, 许云龙, 王莉萍, 等. 钢-混凝土组合结构抗震性能研

- 究进展[J]. 钢结构(中英文), 2023, 38(12): 1-26. DOI: 10.132061/j.gjgs.23062902.
- DING Faxing, XU Yunlong, WANG Liping, et al. State of art and future insights of the seismic performance of steel-concrete composite structures[J]. Steel Construction (Chinese & English), 2023, 38(12): 1-26. DOI: 10.132061/j.gjgs.23062902. (in Chinese)
- [5] 陈志华, 杜颜胜, 吴辽, 等. 矩形钢管混凝土结构研究综述[J]. 建筑结构, 2015, 45(16): 40-46. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.16.009.
- CHEN Zhihua, DU Yansheng, WU Liao, et al. Review of the research on rectangular concrete-filled steel tube structures[J]. Building Structure, 2015, 45(16): 40-46. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.16.009. (in Chinese)
- [6] 赵迪, 张纪刚, 时成龙, 等. 钢管约束混凝土组合结构研究现状[J]. 建筑结构, 2023, 53(3): 41-51. DOI: 10.19701/j.jzjg.20201505.
- ZHAO Di, ZHANG Jigang, SHI Chenglong, et al. Research state of steel tube confined concrete composite structure[J]. Building Structure, 2023, 53(3): 41-51. DOI: 10.19701/j.jzjg.20201505. (in Chinese)
- [7] 刘林林, 屠永清, 叶英华. 多室式钢管混凝土T形短柱轴压性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 9-16. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.10.012.
- LIU Linlin, TU Yongqing, YE Yinghua. Experimental study of the properties of axially loaded multi-cell T-shaped concrete-filled steel tubular stub columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 9-16. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.10.012. (in Chinese)
- [8] 陈雨, 沈祖炎, 雷敏, 等. T形钢管混凝土短柱轴压试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 822-829. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.06.002.
- CHEN Yu, SHEN Zuyan, LEI Min, et al. Experimental investigation on concrete-filled T-shaped steel tube stubs subjected to axial compression[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(6): 822-829. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.06.002. (in Chinese)
- [9] 黎志军, 蔡健. 带约束拉杆异形钢管混凝土柱力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2001(A02): 124-129.
- LI Zhijun, CAI Jian. Experimental study on the mechanical properties of anisotropic steel tubular concrete columns with restrained ties[J]. Engineering Mechanics, 2001(A02): 124-129. (in Chinese)
- [10] 蔡健, 左志亮, 赵小芹, 等. 带约束拉杆L形钢管混凝土短柱偏压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 83-90. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.02.013.
- CAI Jian, ZUO Zhiliang, ZHAO Xiaoqin, et al. Experimental research on eccentrically loaded L-shaped concrete-filled steel tubular stub columns with binding bars[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 83-90. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.02.013. (in Chinese)
- [11] 张旺, 张晓虎, 桂海伟, 等. 内置开孔钢板加劲肋的L形宽肢钢管混凝土组合柱轴压性能研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 5192-5200. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2023.12.031.
- ZHANG Wang, ZHANG Xiaohu, GUI Haiwei, et al. Axial compressive behavior of wide-leg L-shaped columns composed of concrete-filled steel tubes with PBL[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(12): 5192-5200. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2023.12.031. (in Chinese)
- [12] 刘君平, 周宗源, 刘永健, 等. 开孔钢板加劲肋方钢管混凝土柱偏压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(11): 42-48. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.11.005.
- LIU Junping, ZHOU Zongyuan, LIU Yongjian, et al. Experimental study on concrete-filled square steel tubular column stiffened with PBL subjected to eccentric compressive load[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(11): 42-48. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.11.005. (in Chinese)
- [13] 朱荣军, 王双双, 张元植. 设平板加劲肋矩形钢管混凝土柱屈曲性能分析与设置原则研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 42-51. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2018.12.005.
- ZHU Rongjun, WANG Shuangshuang, ZHANG Yuanzhi. Analytical analysis of local buckling of rectangular section CFT column with longitudinal stiffener and design principle of longitudinal stiffener[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12): 42-51. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2018.12.005. (in Chinese)
- [14] 曹兵, 戴绍斌, 黄俊, 等. 改进组合式T形钢管内核心混凝土应力-应变关系[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 515-521. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2017.04.017.
- CAO Bing, DAI Shaobin, HUANG Jun, et al. Stress-strain relationship for core concrete of improved composite T-shaped steel tube[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(4): 515-521. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2017.04.017. (in Chinese)
- [15] 周学军, 王振, 魏方帅. 方钢管混凝土组合T形柱轴压力学性能研究[J]. 山东建筑大学学报, 2020, 35(2): 1-9. DOI: 10.12077/sdjz.2020.02.001.
- ZHOU Xuejun, WANG Zhen, WEI Fangshuai. Study on the mechanical property of T-shaped CFSST composite columns subjected axial load[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2020, 35(2): 1-9. DOI: 10.12077/sdjz.2020.02.001. (in Chinese)
- [16] 李补拴, 周伟, 赵根田, 等. 部分包覆钢-混凝土十字形和T形截面组合柱抗震性能及轴压比限值分析[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(8): 99-109. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0321.
- LI Bushuan, ZHOU Wei, ZHAO Gentian, et al. Seismic performance and limit values of axial ratio for partially encased composite steel-concrete cross-shaped and T-shaped section columns[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(8): 99-109.

- DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0321.(in Chinese)
- [17] 张忠杰,周新刚,宋振宇,等.矩形薄壁钢管混凝土短柱轴心受压性能试验研究[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2020,33(2):218-224.DOI:10.13951/j.cnki.37-1213/n.2020.02.014.
- ZHANG Zhongjie, ZHOU Xingang, SONG Zhenyu, et al. Experimental study on axially compressive behavior of rectangular concrete-filled thin-walled steel tube short column[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2020, 33(2): 218-224. DOI: 10.13951/j.cnki.37-1213/n.2020.02.014.(in Chinese)
- [18] 宋国强,周新刚,夏小龙,等.薄壁钢管混凝土短柱与薄壁钢管约束混凝土短柱轴压性能试验[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2023,36(1):104-111.DOI:10.13951/j.cnki.37-1213/n.210910.
- SONG Guoqiang, ZHOU Xingang, XIA Xiaolong, et al. Experiment on axially compressive behavior of concrete filled thin-walled steel tubular stub column and confined concrete stub column with thin-walled steel tube[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2023, 36(1): 104-111. DOI: 10.13951/j.cnki.37-1213/n.210910.(in Chinese)
- [19] 陈俊,倪家贵,刘哲,等.拉筋约束薄壁方钢管混凝土短柱轴压性能[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(1):170-177.DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20210559.
- CHEN Jun, NI Jiagui, LIU Zhe, et al. Axial compression performance of thin-walled concrete-filled square steel tube short columns confined by stirrup [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(1): 170-177. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20210559.(in Chinese)
- [20] 吴丽丽,刘艳霞,武海鹏,等.L形冷弯薄壁型钢组合钢管混凝土柱轴压性能[J].哈尔滨工业大学学报,2025,57(1):77-91.DOI:10.11918/202309070.
- WU Lili, LIU Yanxia, WU Haipeng, et al. Axial compressive performance of L-shaped concrete-filled cold-formed thin-walled steel tubular columns[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(1): 77-91. DOI: 10.11918/202309070.(in Chinese)
- [21] HASSANEIN M F, ELCHALAKANI M, PATEL V I. Overall buckling behaviour of circular concrete-filled dual steel tubular columns with stainless steel external tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 115: 336-348. DOI: 10.1016/j.tws.2017.01.035.
- [22] GB/T 50010—2010 混凝土结构设计标准[S].
- GB/T 50010—2010 Standard for design of concrete structures [S].(in Chinese)
- [23] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
- GB 50017—2017 Standard for design of steel structures [S].(in Chinese)
- [24] 朱浩川,许友武,姚谏.薄壁不锈钢圆管柱轴压稳定性能研究[J].建筑钢结构进展,2023,25(3):27-38.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.03.003.
- ZHU Haochuan, XU Youwu, YAO Jian. An investigation on mechanical property of thin-walled stainless steel circular hollow section columns subjected to axial compression [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(3): 27-38. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.03.003.(in Chinese)
- [25] 张文轩,石韵,苏明周,等.窄翼缘PEC中长柱轴压整体稳定性能试验研究[J].建筑钢结构进展,2023,25(6):1-12.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.001.
- ZHANG Wenxuan, SHI Yun, SU Mingzhou, et al. An experimental study on the overall stability performance of medium and long narrow flanged PEC columns under axial compression[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(6): 1-12. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.001.(in Chinese)