

弧形钢板-混凝土-波纹钢板复合 筒壁构件轴压性能研究

罗 健¹, 罗俊杰², 赵思琪², 曾琳惠^{2,3}, 陈 俊²

(1. 湖南中科工程检测有限公司, 湖南 长沙 410023; 2. 湘潭大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411105;
3. 中国电建集团江西省电力设计院有限公司, 江西 南昌 330096)

摘要:随着风电机组功率与叶轮直径的突破性增长, 风电塔筒结构技术面临更高、更强的极限挑战。基于组合结构原理, 提出一种新型“弧形钢板-混凝土-波纹钢板”复合筒壁结构。该结构由弧形钢板、混凝土、波纹钢板及T形加劲肋组成。为研究其轴压性能, 设计6个模型试件并开展轴压试验, 分析了钢板厚度、波纹钢板位置及高厚比等参数对受力性能的影响。试验结果表明: 增加钢板厚度能有效提高试件极限承载力, 钢板厚度为2.5 mm的试件相较于1.5 mm的试件, 极限承载力提升幅度为24.89%; 波纹钢板位于筒壁内侧的试件极限承载力为1 407.50 kN, 较位于筒壁外侧的试件(极限承载力1 150.90 kN)提高了22.30%; 试件高厚比越大, 极限承载力越低, 试件高度从450 mm增加至900 mm时, 极限承载力由965.30 kN下降至823.00 kN, 减小了14.74%。

关键词:组合结构; 复合筒壁; 波纹钢板; 轴压力学性能; 轴压试验

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)04-0001-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.04.035

Research on axial compression performance of curved steel plate-concrete-corrugated steel plate composite cylinder wall members

LUO Jian¹, LUO Junjie², ZHAO Siqu², ZENG Linhui^{2,3}, CHEN Jun²

(1. Hunan Zhongke Engineering Testing Co., Ltd., Changsha 410023, Hunan, China;

2. College of Civil Engineering Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;

3. Power China Jiangxi Electric Power Engineering Co., Ltd., Nanchang 330096, Jiangxi, China)

Abstract: With the breakthrough growth of wind turbine power and impeller diameter, wind turbine tower structure technology is facing higher and stronger limit challenges. Therefore, this paper proposes a new type of “curved steel plate-concrete-corrugated steel plate” composite cylinder wall structure based on the composite structure principle. The structure consists of curved steel plate, concrete, corrugated steel plate and T-shaped stiffening ribs. In order to study its axial compression performance, six model specimens were designed to carry out axial compression tests to investigate the effects of steel plate thickness, corrugated steel plate position, height-thickness ratio and other parameters on its stress performance. The test results show that: the thickness of steel plate can effectively improve the ultimate bearing capacity of the specimen, the specimen with the thickness of 2.5 mm compared with the specimen with the thickness of 1.5 mm, the ultimate bearing capacity is increased by 24.89%; the ultimate bearing capacity of the specimen with the corrugated steel plate on the inner side of the cylinder wall is 1 407.50 kN, which is increased by 22.30% compared with that with the

收稿日期: 2025-07-11

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2024JJ9067)

作者简介: 罗 健(1992—), 男, 工程师, 从事工程检测加固方面工作。

通信作者: 曾琳惠(1999—), 女, 工程师, 从事海上风电塔筒基础设计的研究。

specimen with the corrugated steel plate on the outer side of the cylinder wall of 1 150.90 kN; the ultimate bearing capacity of the specimen with the corrugated steel plate on the outer side of the cylinder wall is increased by 22.30%. The higher the height-to-thickness ratio of the specimen, the lower the ultimate load carrying capacity, the height of the specimen increases from 450 mm to 900 mm, the ultimate load carrying capacity decreases from 965.30 kN to 823.00 kN, which is a decrease of 14.74%.

Key words: composite structure; composite cylinder wall; corrugated steel sheet; axial compression mechanical properties; axial compression test

风能是一种重要的清洁能源,截至 2024 年 9 月底,我国风电装机约 4.8 亿千瓦^[1]。随着全球能源转型加速推进和我国“双碳”战略的布局,风电技术作为可再生能源的核心支柱之一,正朝着大型化、高效化方向快速发展。早期风电以 80 m 以下低塔筒为主,但随着风资源优质区开发饱和,向高处要风成为共识,风电机组的功率和叶轮的直径也随之呈现突破性增长,塔筒高度亦从 80 m 向 120、160 m 甚至 200 m 突破,塔筒技术正面临更高、更强的极限挑战。

风电塔筒常用有全钢结构(柔塔)、混凝土与钢结构(混塔)等形式。柔塔的主要矛盾集中在高度与运输的博弈,柔塔的最优运输直径约为 4.5 m,超过 120 m 后,如果保持直径不变,壁厚需要 50 mm 以上,一方面会增加加工难度,另一方面会急剧增加单塔重量;若增加直径,一方面受避免叶片扫塔的要求限制,直径增加幅度有限,另一方面运输难度将飙升。混凝土部分采用预制模板一次成型,建设周期较长,安装费用也相对较高。混塔优势在于现场施工建造的灵活性,虽能够降低运输成本和整体造价,但混凝土与钢结构的搭接部分可能形成应力吸收的薄弱环节,且混凝土部分不刷漆时整体美观度不如柔塔。

在建筑工程和桥梁工程领域,中空夹层钢管混凝土和钢板剪力墙等组合结构应用较广泛,国内外学者亦开展了大量研究。王灿灿等^[2]通过对 6 个高强中空夹层钢管混凝土组合构件进行轴压实验和有限元计算,发现中空夹层钢管混凝土构件达到极限承载力时,外钢管对混凝土的变形有较强的约束作用,而内钢管对混凝土的变形几乎没有支撑作用。王宇航等^[3]设计了中空夹层钢管混凝土塔筒缩尺试件的轴压试验,发现内钢板的局部稳定性能优于外钢板的局部稳定性能。ZHANG 等^[4]对带加劲外管的超高强度混凝土填充双钢柱

(UHS-CFDSST)进行了数值研究,发现增加外钢管的厚度会增加夹层混凝土的约束,内钢管厚度对核心混凝土的约束影响轻微。李心洁等^[5]研究了开孔钢板加劲中空夹层圆钢管混凝土柱的轴压性能,得出开孔钢板可以增强钢管和混凝土的共同受力和约束效应。陈庆胜等^[6]进行了高强锥形中空夹层薄壁钢管混凝土轴压短柱的试验研究,得出带肋试件和无肋试件相比,在相同空心率的情况下,极限承载力能提高约 7%~11%。张潇等^[7]提出并设计了薄壁方套方中空夹层多腔钢管混凝土短柱(MCFDST),对其轴压力学性能进行了试验研究,发现 MCFDST 短柱中设置连接内外钢管的纵向拉肋试件的极限承载力提升 10.5%。还有众多学者研究了新型 CFDST 柱的各种受力性能,并研究了各参数对其的影响^[8-11]。王轩等^[12]建立了 T 形钢板仓组合剪力墙的有限元分析模型,发现 T 形钢板仓组合剪力墙主要受力构件为腹板,对其抗震性能有较大影响,翼缘能有效约束住腹板,其对变形能力、稳定性和延性性能有较大影响;谢志文等^[13]提出一种新型内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙并进行数值模拟,结果发现:与普通双钢板-混凝土组合剪力墙相比,内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙的水平承载力提高了 26.9%,耗能能力提升了 28.6%,具有更高的承载力和更好的抗震性能。

前人对中空夹层钢管混凝土和钢板剪力墙等组合结构开展了大量研究,然而在波纹钢板应用于风电塔筒方面的系统性研究尚显不足。本文借鉴相关组合结构设计理念,提出一种由弧形钢板、混凝土、波纹钢板及 T 形加劲肋构成的复合筒壁结构,并通过 6 个模型试件的轴压试验研究其受力性能,以期可为风电塔筒等工程结构的创新设计与应用提供借鉴与参考。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

选取直径 10 m 的风电塔为研究原型, 按照 1:10 进行缩尺, 取实际缩尺模型的 1/8 片状结构为研究对象, 研究该结构的轴压性能及钢板厚度、波纹钢板位置, 高厚比等影响参数对其受力性能的影响。

设计制作 6 个“弧形钢板 – 混凝土 – 波纹钢板”复合筒壁结构试件, 由弧形钢板、混凝土、波纹钢板、T 形加劲肋组成, 试件两侧筒壁结构一侧为弧形钢板, 另一侧为波纹钢板, 通过与连接板焊接形成封闭空腔结构, 中间填充 C50 混凝土, 在试件上下两端分别设置厚度为 10 mm 的端板, 端板形心与弧形钢板和波纹钢板形心重合, T 形加劲肋焊接在波纹钢板波谷中间位置。试件实物如图 1 所示, 试件三维示意图如图 2 所示, 试件主要参数如表 1 所示。

1.2 材料力学性能

试件中的钢板和波纹钢板强度均为 Q235, 按照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228.1—2021)的相关规定取样并进行标准拉伸试验, 试验结果如表 2 所示。按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)制作标准立方体试块, 与试件在相同养护条件下自然养护 28 d,



图 1 试件实物

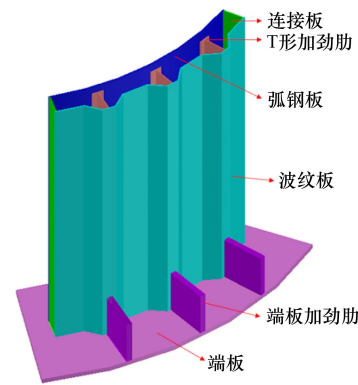


图 2 试件三维示意图

由试验测得 28 d 混凝土立方体抗压强度平均值为 54 MPa。

1.3 试验装置及加载方案

采用湘潭大学结构实验室的 4 000 kN 多通道电液伺服试验装置对试件进行轴压试验(图 3),

表 1 试件主要参数

试件编号	S/mm	t/mm	t_1/mm	t_2/mm	h/mm	H/mm	波纹钢板位置
BP – TC20S15H90	1.5	1.5	20	40	20	900	外侧
BP – TC20S25H90	2.5	1.5	20	40	20	900	外侧
BP – TC20S25H45	2.5	1.5	20	40	20	450	外侧
PB – TC20S25H45	2.5	1.5	20	40	20	450	内侧
PB – TC20S15H45	1.5	1.5	20	40	20	450	内侧
PB – TC20S15H90	1.5	1.5	20	40	20	900	内侧

注: 试件编号中, BP 表示波纹钢板位置在筒壁外侧, PB 表示波纹钢板位置在筒壁内侧; TC 表示波纹钢板波峰长度小于波谷长度, 后紧跟数字 20 表示波纹钢板波幅为 20 mm; S 为钢板厚度, 试件编号中 S 后紧跟 15 或 25, 表示钢板厚度为 1.5 mm 和 2.5 mm; H 为试件高度, 试件编号中 H 后紧跟数字 45 或 90 表示试件高度为 450 mm 和 900 mm; t 为加劲肋厚度; t_1 为翼缘长度; t_2 为腹板长度; h 为波纹钢板波幅。

表 2 钢板材性试验结果

钢材厚度/mm	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	强屈比	伸长率/%
1.5	213	312	1.47	30.5
2.5	299	333	1.11	29.0



图 3 加载装置

加载前将试件置于加载承台上,在试件加工过程中,试件端板往往难以保持理想的水平状态,需要通过铺设细砂来进行相应的调整。在正式开展加载操作前,为校验测量装置能否正常运作,需在弹性范围内实施预加载。即缓慢将荷载施加至预估承载力的 10%,往复进行 3 次,此预估承载力通过简单叠加方式得出。在正式加载阶段,首先采用位移控制模式,将竖向荷载逐步加载至预定数值。在弹性范围之内,每级荷载设定为预计极限荷载的 1/10,加载速率控制为 1.5 mm/min。一旦观察到荷载-位移曲线的斜率出现显著降低的情况,随即把加载速度调整为 1 mm/min。当荷载下降至峰值荷载的 80% 以下,或者试件出现严重变形时,立即停止加载,试验结束。在试件的整个加载过程中,荷载、应变以及位移等各项数据,均通过东华 DH3816N 静态应变测试系统实现自动同步采集与保存。

1.4 测点布置

在试件的内外两侧分别竖直放置 3 个位移计,用来测量试件的竖向位移,位移计的布置如图 4 所示。

2 试验现象与分析

2.1 试验现象

图 5 为各试件弧形钢板和波纹钢板的破坏形态。由图可知,试件破坏现象基本相同,均为试件筒壁内外两侧弧形钢板和波纹钢板出现鼓曲变形,变形处部分混凝土被压碎,加载前期试件无明显现象,随着荷载增大,连接内外两侧弧形钢板和波纹钢板的连接板焊缝处出现裂缝,裂缝不



图 4 位移计测点布置

断扩大,沿着连接板延伸为“半凸形”裂缝,在达到峰值荷载之后继续发展,内外两侧钢板和波纹钢板鼓曲变形迅速增大,最终因试件出现局部屈曲使得试件发生破坏。

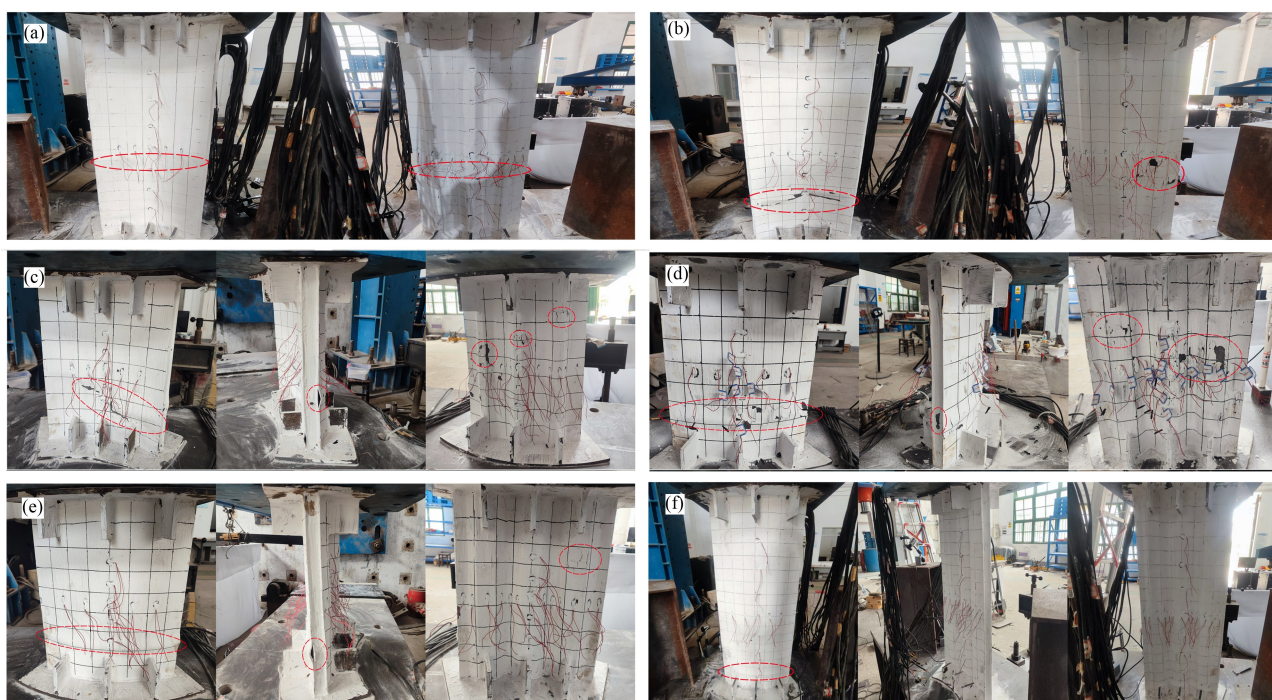
2.2 典型试件荷载位移曲线

选用试件上部设置的 6 个位移计测量的试件竖向位移的平均值,选用试件 BP-TC20S25H45 的荷载-位移曲线为典型曲线(图 6),对“弧形钢板-混凝土-波纹钢板”复合筒壁结构在轴压荷载作用下的荷载-位移曲线进行分析,可将曲线大致分为如下 3 个阶段。

(1) 弹性阶段(OA):从曲线上 O 点开始施加荷载,直到曲线上 A 点,试件的荷载-位移曲线基本呈一条斜直线,试件处于线弹性受力阶段,竖向位移和变形增长缓慢。在该阶段,两侧筒壁的弧形钢板和波纹钢板及核心混凝土一般为分开承担荷载,三者之间还未表现出相互作用。

(2) 弹塑性阶段(AB):随着荷载的增加,试件进入弹塑性受力状态,当荷载增至曲线上 B 点左右时,两侧筒壁的弧形钢板和波纹钢板出现局部鼓曲变形,核心混凝土内部微裂缝不断发展,弧形钢板、波纹钢板和混凝土三者间的相互作用增强,试件荷载-位移曲线斜率减小。

(3) 达到峰值后的破坏阶段(BC):当荷载达到峰值后,由于试件产生局部鼓曲变形,导致承载力开始下降,随着荷载不断增加,两侧筒壁的弧形钢板和波纹钢板鼓曲变形增大,由于左右两端连接板焊缝开裂,导致试件内外两侧筒壁结构与核心混凝土的相互作用减弱,试件承载力急剧下降,最终发生破坏。



(a) BP-TC20S15H90; (b) BP-TC20S25H90; (c) BP-TC20S25H45;
(d) PB-TC20S25H45; (e) PB-TC20S15H45; (f) PB-TC20S15H90

图 5 各试件破坏现象

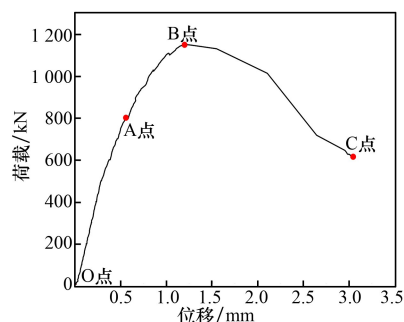


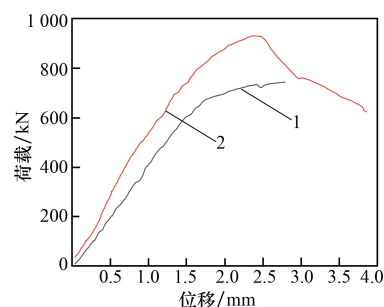
图 6 典型试件 BP-TC20S25H45 荷载 - 位移曲线

2.3 影响参数分析

2.3.1 钢板厚度的影响

试验所得不同钢板厚度对“弧形钢板 - 混凝土 - 波纹钢板”复合筒壁结构在轴压荷载作用下荷载 - 位移曲线的影响如图 7 所示。试件 BP-TC20S15H90 和 BP-TC20S25H90 的高度、混凝土厚度、波纹钢板位置均相同, 钢板厚度分别为 1.5 mm 和 2.5 mm。由图 7 可以看出, 试件的极限承载力随钢板厚度的增加而增加, 钢板厚度为 2.5 mm 的试件 BP-TC20S25H90 与厚度为 1.5 mm 的试件 BP-TC20S15H90 相比, 极限承载力由 745.60 kN 提高至 931.20 kN, 提升幅度为 24.89%。这说明钢板厚度能有效提高试件极限承载力, 钢板厚度增加, 截

面积线性增加, 可直接有效地增大结构抗压能力。



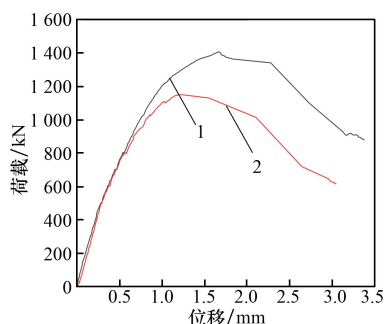
试件编号: 1—BP-TC20S15H90; 2—BP-TC20S25H90。

图 7 钢板厚度对荷载 - 位移曲线的影响

2.3.2 波纹钢板位置的影响

试验所得不同波纹钢板位置对“弧形钢板 - 混凝土 - 波纹钢板”复合筒壁结构在轴压荷载作用下荷载 - 位移曲线的影响如图 8 所示, 试件 BP-TC20S25H45 和试件 PB-TC20S25H45 的高度、混凝土厚度和钢板厚度均相同, 波纹钢板分别位于试件筒壁外侧和内侧。由图 8 可以看出: 波纹钢板在筒壁内侧的试件 PB-TC20S25H45 的极限承载力 1 407.50 kN, 与波纹钢板在筒壁外侧的试件 BP-TC20S25H45 的极限承载力为 1 150.90 kN 相比, 提升了 22.30%。说明波纹钢板在筒壁内侧能

有效提高试件的极限承载力,当波纹钢板位于试件筒壁内侧时,其波状截面惯性矩和抗弯刚度较高,且其高抗弯刚度优先承担由混凝土膨胀引起环向拉应力,形成稳定的“加劲肋”效应,显著提高结构抗局部屈曲能力。同时,混凝土填充波纹钢板凹槽,抑制波纹钢板自身屈曲变形。

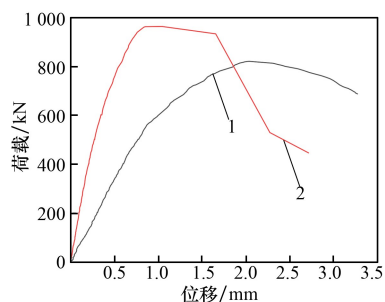


试件编号:1—PB—TC20S25H45;2—BP—TC20S25H45。

图 8 波纹钢板位置对荷载—位移曲线的影响

2.3.3 高厚比的影响

试验所得不同高厚比对“弧形钢板—混凝土—波纹钢板”复合筒壁结构在轴压荷载作用下荷载—位移曲线的影响如图 9 所示,试件 PB—TC20S15H45 和 PB—TC20S15H90 的钢板厚度、混凝土厚度、波纹钢板位置均相同,试件高度分别为 450 mm 和 900 mm。



试件编号:1—PB—TC20S15H90;2—PB—TC20S15H45。

图 9 高厚比对荷载—位移曲线的影响

由图 9 可以看出,试件的极限承载力随试件高度的增加而减小,试件高度从 450 mm 增加至 900 mm,极限承载力试件 PB—TC20S15H45 的 965.30 kN 下降至试件 PB—TC20S15H90 的 823.00 kN,减小了 14.74%。这说明随着试件高度的增加,高厚比显著增加,试件在轴压作用下的稳定性变差,更容易发生屈曲变形。高度增加使得筒壁与混凝土之间的相互作用减弱,约束效果降低。

3 结 论

本文开展了 6 个“弧形钢板—混凝土—波纹钢板”复合筒壁结构试件的轴压试验,主要研究参数为钢板厚度、波纹钢板位置和高厚比,通过分析试验结果,得出结论如下。

(1) 各试件破坏模式基本相同,表现为试件内外两侧筒壁的弧形钢板和波纹钢板发生不同程度的鼓曲变形,变形处部分混凝土被压碎。

(2) 钢板厚度由 1.5 mm 增加至 2.5 mm 时,试件的极限承载力由 745.60 kN 提高至 931.20 kN,提升幅度为 24.89%。为提高极限承载能力,建议使用厚度不小于 2.5 mm 的钢板制作复合筒壁结构。

(3) 波纹钢板置于筒壁内侧的试件与筒壁外侧的试件相比,极限承载力由 1 150.90 kN 提高至 1 407.5 kN,提升幅度为 22.30%。在设计制作相似复合筒壁结构时,建议将波纹钢板置于筒壁内侧,弧形钢板置于筒壁外侧。

(4) 试件高度由 450 mm 增加至 900 mm 时,极限承载力由 965.30 kN 下降至 823.00 kN,减小了 14.74%。这表明高厚比越大,试件的极限承载能力越低;同时,高度为 900 mm 的试件弯曲变形也更明显,筒壁与混凝土之间的相互作用减弱,约束效果降低。

参考文献:

- [1] 张翼. 全国风电、太阳能发电装机超 12 亿千瓦[N]. 光明日报. 2024-11-04(4).
- [2] 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.
- [3] 王宇航,吕晰,王姝琪,等. 风电机组中空夹层钢管混凝土塔筒钢板稳定性能研究[J]. 特种结构,2021,38(4):24-30.
- [4] ZHANG J H,SHAO Y B,HASSANEIN M F,et al. Axial compressive performance of ultra-high strength concrete-filled dual steel tubular short columns with outer stiffened tubes and inner circular tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research,2023,203:107848.
- [5] 李心洁,王卫永. 开孔钢板加劲中空夹层圆钢管混凝土柱轴压性能[J]. 工业建筑,2024,54(7):1-12.

(下转第 12 页)

当纤维长度由 6 mm 增至 18 mm 时,试件破坏荷载呈现先升后降的非线性变化特征,其中 12 mm 纤维试样表现出 7、28 d 抗压强度增幅分别达 12.1%、9.5%。

这一现象可通过复合材料界面力学理论进行解释,当增强相尺寸过小时(如 6 mm 试样),比表面积不足导致纤维-基体界面粘接性能下降,同时单位体积内纤维根数增加引发的团聚效应,会在基体内形成应力集中点,反而降低结构致密性。当纤维长度超过临界值(12 mm)后,搅拌工艺引发的纤维弯折缺陷会显著削弱其增强效果,这解释了长纤维试样强度回落的现象。由此可知,聚丙烯纤维的最佳长度为 12 mm。

3 结 论

(1) 土聚物水泥砂浆早期强度要明显高于普通水泥砂浆,同时土聚物水泥砂浆的 28 d 收缩率、黏结强度和保水率也明显好于普通水泥砂浆。

(2) 在经历高温耐久性实验后,土聚物水泥砂浆的抗压强度显著高于普通水泥砂浆。特别是在 800 ℃ 的高温处理后,土聚物水泥砂浆能够保持高达室温时 61.6% 的抗压强度,而普通水泥砂

浆则仅保留 25.5% 的抗压强度。

(3) 经 5 次冻融循环后,土聚物水泥砂浆试件质量变化率及相对动弹性模量的检测结果均好于普通水泥砂浆。

(4) 添加长度为 15 mm 聚丙烯纤维时,其抗折强度增长率最大,7、28 d 抗折强度增长率分别为 22.9%、16.7%。添加长度为 12 mm 聚丙烯纤维时,其抗压强度增长率最大,7、28 d 抗压强度增长率分别为 12.1%、9.5%。

参考文献:

- [1] 闵永涛,张勇,王鹏,等.矿物外加剂-中热水泥组合胶凝材料的砂浆基本性能对比[J].工程建设,2024,56(2):41-46.
- [2] 徐丽娜,TATENDA K.地聚物固化软土的工程性能研究进展综述[J].四川水泥,2023(11):79-81;166.
- [3] 易鹏,刘成舟,邹小平,等.阻凝剂在水泥净浆及砂浆中流变性能研究[J].江西建材,2021(7):40-41;43.
- [4] 周吉.偏高岭土基土聚水泥的制备及早期强度研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [5] 龚建清,郭丽,杨倩,等.复掺纳米 SiO_2 和玻璃粉对水泥砂浆性能的影响研究[J].公路工程,2023,48(4):121-126;150.
- [6] 陈庆胜,庞亚红,孔龙,等.高强锥形中空夹层薄壁钢管混凝土轴压短柱试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(2):306-316.
- [7] 张潇,龚俊,邵永波,等.多腔中空薄壁方钢管混凝土短柱轴压性能研究[J].重庆大学学报,2025,48(2):86-101.
- [8] JIN K Y,ZHOU X H,JI W D,et al. Experimental study of large-scale stiffened thin-walled CFST columns under axial compression [J]. Engineering Structures, 2023, 291(18):116418.
- [9] DING J N,WANG Q H,REN Q X,et al. Behavior of circular concrete-encased concrete-filled double-skin steel tube stub columns under eccentric compression [J]. Structures, 2024, 69(11):107493.
- [10] LI B F,WANG X T,XIE C D,et al. Compressive behaviour and design of tapered lightweight concrete-filled double-skin stiffened steel tubular short columns with large hollow ratio [J]. Structures, 2024, 64(6):106527.
- [11] ALQAWZAI S,YANG B,CHEN K,et al. Testing and strength prediction of polygonal UHPCFST short columns under concentric and eccentric compression [J]. Engineering Structures, 2025, 325(4):119473.
- [12] 王轩,杨文秀. T 形钢板仓组合剪力墙的抗震性能有限元分析[J]. 工程建设,2020,52(3):5-12.
- [13] 谢志文,汪小平,吴宏睿,等. 内套钢管的装配式钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J]. 工程建设, 2025, 57(3):38-43.