

中空夹层钢管钢渣混凝土 T 形节点抗震性能研究

曾武华^{1,2}, 王伟^{1,3}, 陈庆熠², 王军芳^{1,2}, 吴应雄⁴, 卓卫东⁴

(1. 三明学院建筑工程学院, 福建 三明 365004;

2. 工程结构智能建造与监控福建省高校重点实验室, 福建 三明 365004;

3. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 4. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 将钢渣混凝土灌入中空夹层钢管混凝土结构, 充分利用钢渣混凝土的微膨胀性和中空夹层内外钢管对混凝土的约束作用, 有效解决了钢渣混凝土工程应用中的安定性问题。以混凝土类型、空心率、支主管直径比和轴压比为参数变量, 共进行了 5 个中空夹层钢管混凝土 T 形节点试件(1 个普通混凝土试件, 4 个钢渣混凝土试件)拟静力试验研究。试验结果表明: 与灌注普通混凝土相比, 灌注钢渣混凝土对试件节点承载力影响不大, 但位移延性和耗能能力明显增加, 提高幅度分别达 69.46% 和 48.20%; 当空心率从 0.3 增大到 0.5 时, 试件位移延性系数提高 9.69%; 当支主管直径比从 0.40 增大到 0.68 时, 位移延性系数提高 82.44%; 当轴压比从 0.1 增大到 0.2 时, 试件位移延性系数降低 17.98%。建立有限元模型对试件的滞回性能进行了模拟, 模拟结果与试验结果基本符合, 验证了所建有限元模型的有效性。进而开展了节点承载力影响参数分析, 得到最佳空心率为 70% 左右。钢渣在钢管混凝土结构中应用, 可大幅提高其抗震性能。

关键词: 抗震性能; 中空夹层钢管混凝土; 钢渣混凝土; 滞回特性; 拟静力试验

中图分类号: TU352.11; TU398⁺.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)06-1023-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.06.013

引言

中国钢渣年产量超过 1 亿吨, 累计堆存超过 19 亿吨, 但钢渣综合利用率仅为 30%, 钢渣闲置蚕食了大量土地, 造成环境污染^[1-2]。因此, 对钢渣资源化利用, 是保护环境, 实现碳达峰碳中和的重要举措之一。钢渣中含有大量具有凝胶性质的钙, 用于制备高性能混凝土材料的潜力巨大^[3]。然而, 由于游离氧化钙的存在, 与水反应容易导致体积膨胀, 安定性是限制钢渣混凝土大规模应用的关键性问题之一^[4]。已有研究结果表明^[5-6], 将钢渣混凝土浇筑于钢管中形成钢管钢渣混凝土组合结构, 可以利用钢管的密闭性和套箍效应消除钢渣混凝土体积不安定性问题, 可在工程结构中大量推广应用, 具有巨大经济价值与重要现实意义。

中空夹层钢管混凝土 (Concrete-Filled Double-Skin Steel Tube, CFDST) 是将两层钢管同心放置, 并在钢管夹层之间填充混凝土而形成的中空构件, 与实心钢管混凝土构件相比, CFDST 具有抗弯刚度大、自重轻和防火性能好等优点^[7-8]。CFDST 常用于组合框架、风电塔架和海洋平台支架等高耸柱

结构中^[9-12]。研究者对 CFDST 压弯构件力学性能^[13]、长期荷载作用下的力学性能^[14]以及耐火性能^[15]等开展了相关研究。风电塔架、高墩和海洋平台支架等高耸柱结构中广泛采用 T 形节点, 而节点的抗震性能直接影响其所在结构体系的安全可靠性。但目前对灌注钢渣混凝土的 CFDST 结构 T 形节点抗震性能研究还不够深入。

为探究 CFDST 结构 T 形节点的抗震性能, 本文综合采用拟静力试验和有限元模型参数分析方法, 共设计了 5 组试件, 研究了混凝土类型 (普通混凝土与钢渣混凝土)、空心率、支主管直径比和轴压比对节点承载力、位移延性和滞回能量的影响, 建立有限元模型对试件的滞回性能进行了模拟, 并开展了节点承载力影响参数分析, 为钢管钢渣混凝土结构大规模工程应用提供理论支撑。

1 拟静力试验

1.1 试件设计

共设计 5 根 CFDST 结构 T 形节点, 其构造和尺寸如图 1 所示。试验以混凝土类型 (普通混凝土与

钢渣混凝土)、空心率、支主管直径比、轴压比为设计变量,具体试件参数如表1所示。表1列出试件的具体设计参数,其中, D 、 D_n 和 D_0 分别为主管外管外径、主管内管外径和支管外径; L 、 L_n 和 L_0 分别为主

管外管长度、主管内管长度和支管长度; T 、 T_n 和 t 分别为主管外管壁厚、主管内管壁厚和支管壁厚,单位均为mm; $\chi=D_n/(D-2T)$ 为主管空心率, $\beta=D_0/D$ 为支主管直径比, n 为主管轴压比。

表1 试件设计参数

Tab. 1 Parameters of specimens

| 序号 | 试件编号 | $(D \times L \times T)/\text{mm}^3$ | $(D_n \times L_n \times T_n)/\text{mm}^3$ | $(D_0 \times L_0 \times t)/\text{mm}^3$ | χ | β | n |
|----|----------|-------------------------------------|---|---|--------|---------|------|
| 1 | CT5-68-1 | 168×900×4 | 80×900×3 | 114×400×4 | 0.50 | 0.68 | 0.10 |
| 2 | ST5-68-1 | 168×900×4 | 80×900×3 | 114×400×4 | 0.50 | 0.68 | 0.10 |
| 3 | ST3-68-1 | 168×900×4 | 50×900×3 | 114×400×4 | 0.30 | 0.68 | 0.10 |
| 4 | ST5-40-1 | 168×900×4 | 80×900×3 | 68×400×4 | 0.50 | 0.40 | 0.10 |
| 5 | ST5-68-2 | 168×900×4 | 80×900×3 | 114×400×4 | 0.50 | 0.68 | 0.20 |

注:字母S代表掺钢渣混凝土,字母C代表掺普通混凝土;字母T代表T形节点,紧连T的数字代表空心率,空心率后续数字依次代表支主管直径比和轴压比。例如:ST5-68-2代表空心率为0.5、支主管直径比为0.68和轴压比为0.20的中空夹层钢管钢渣混凝土T形试件。

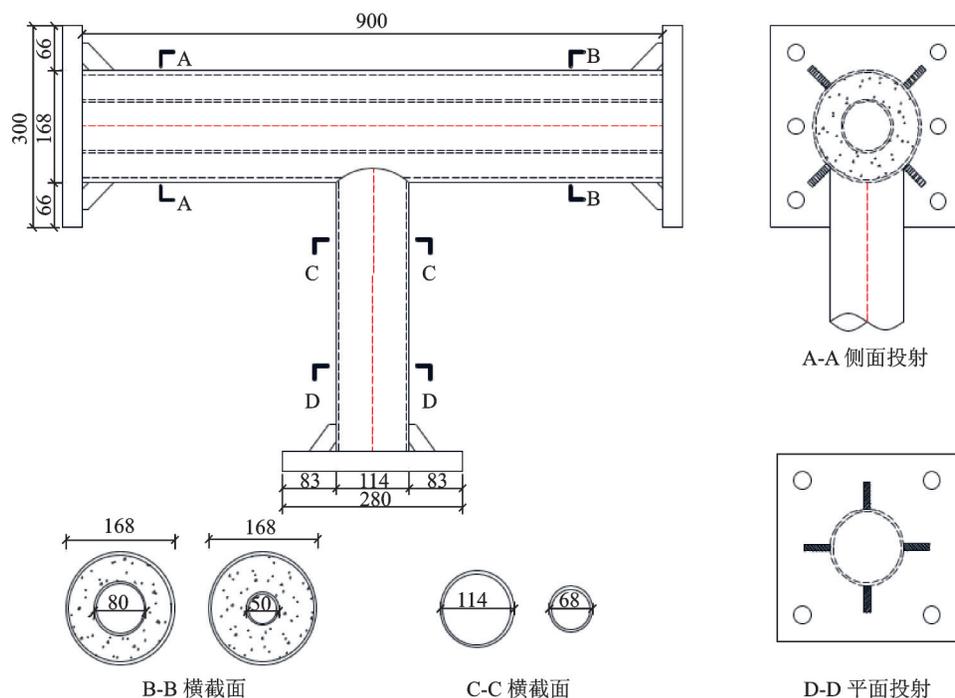


图1 试件构造和尺寸(单位:mm)

Fig. 1 The structure and dimension of specimens (Unit: mm)

1.2 材料性能

试件主管和支管管材采用牌号为Q235的直缝焊管,材料性能试件截取自预留的支管和主管管材。依照《金属材料温室拉伸试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[16]规程,测得钢材的基本力学性能如表2所示。表2中, f_y 为钢材屈服强度, F_u 为钢材极限强度, E_s 为钢材弹性模量, ν 为泊松比, δ 为延伸率。

表3给出了灌注混凝土试件的配合比和性能。表3中, E_c 为混凝土弹性模量, $f_{cu,t}$ 为混凝土立方体抗压强度。其中,水泥选用标号为P.I42.5的硅酸盐基准水泥;粉煤灰为铂润耐火材料有限公司生产的高活性粉煤灰;细骨料选用厦门艾思欧标准砂,粗骨料

表2 钢材材料性能实验结果

Tab. 2 Properties of steel material

| $(D \times t)/\text{mm}^2$ | f_y/MPa | F_u/MPa | E_s/GPa | ν | $\delta/\%$ |
|----------------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------------|
| 168×4 | 268 | 355 | 166.30 | 0.315 | 35.20 |
| 114×4 | 328 | 494 | 197.70 | 0.332 | 23.70 |
| 80×3 | 283 | 386 | 193.20 | 0.308 | 24.60 |
| 68×4 | 360 | 570 | 220.10 | 0.296 | 31.00 |
| 50×3 | 372 | 507 | 208.60 | 0.326 | 23.20 |

采用5~15 mm粒径范围内的玄武岩碎石;减水剂为聚羧酸盐混凝土减水剂;所用钢渣粉为福建省三钢(集团)有限责任公司生产,钢渣粉替代其余胶凝材料含量的10%。

表 3 混凝土配合比和性能指标

Tab. 3 Mix proportions and properties of concrete

| 混凝土类型 | 配合比/(kg·m ⁻³) | | | | | | | 基本性能指标 | | |
|-------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|--------|---------------------|------------------------|
| | 水 | 水泥 | 钢渣粉 | 粉煤灰 | 砂 | 石 | 减水剂 | 坍落度/mm | E _c /GPa | f _{cu,1} /MPa |
| 普通混凝土 | 181 | 450 | 0 | 170 | 815 | 815 | 6.30 | 280 | 30.61 | 51.20 |
| 钢渣混凝土 | 181 | 405 | 63 | 153 | 815 | 815 | 6.30 | 285 | 31.11 | 54.70 |

试验用混凝土的弹性模量与立方体抗压强度力学性能指标通过国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[17]所述静力受压弹性模量试验方法(相应试块尺寸:150 mm×150 mm×300 mm)和抗压强度试验方法(相应试块尺寸:100 mm×100 mm×100 mm)测得,结果如表 3 所示。

1.3 加载及测量方案

试验加载装置如图 2 所示。试验模拟的边界条件为铰接,主管两端端板与平板铰连接,一侧平板铰连接支承座滑杆,滑杆另一侧连接侧向布置的作动器,以实现轴向荷载的传递;另一侧平板铰连接侧向连接支座,侧向连接支座将力传递给反力架。加载前,首先根据各试件的轴压比施加预定轴压力,然后在加载点施加低周往复荷载。试件在达到屈服强度之前,以荷载控制加载。屈服后以屈服位移的倍数进行加载。试验满足下列条件之一时停止加载:主

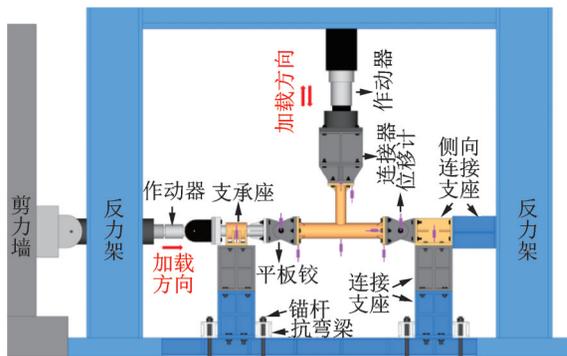
管或支管撕裂、加载至荷载下降至峰值荷载的 85%;节点区域压弯破坏或结构出现明显的拉伸、压缩或弯曲等形式的塑性变形^[18]。

试件的荷载-位移关系曲线通过对比校核数据采集系统所得作动器时程数据、主管跨中底部位移时程数据和支管端板竖向位移计时程数据确定。试验共布设 11 个位移计于试件和边界装置上,如图 2(b)所示。

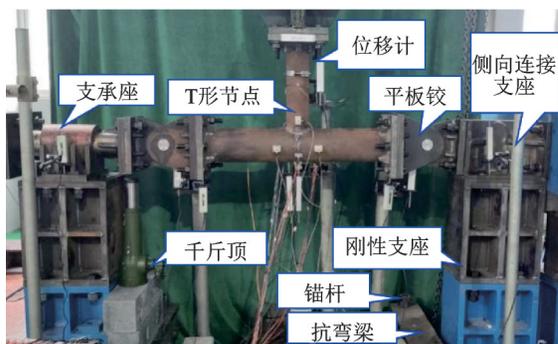
2 试验结果及分析

2.1 破坏过程与破坏模式

试件的破坏过程如图 3 所示。具体破坏过程与特征如下:加载初期,未见支主管有明显的变化;位移加载至 3Δ_y~5Δ_y(Δ_y为屈服位移)时,冠点附近主管外管管壁开始出现轻微鼓曲,冠趾处出现裂痕;位移加载至 5Δ_y~7Δ_y时,鼓曲范围增大,裂痕扩展也呈现相同趋势;位移加载至最终破坏时,鼓曲范围发展迅猛,节点区域下凹严重,焊趾管壁表面被拉裂,主管呈现压弯破坏。图 4 显示了各试件的典型破坏形态。可以看出,在拟静力荷载作用下,节点区域发生了明显的压弯塑性变形,表明其破坏模式为主管压弯破坏。分析其原因,中空夹层内外钢管及支管有效约束了填充混凝土,提高了节点的强度与刚度,随着位移的增



(a) 加载装置示意图
(a) Sketch diagrams of loading device



(b) 试验装置实景图
(b) Real scenario view of the test setup

图 2 拟静力试验加载装置

Fig. 2 Loading device of pseudo static test

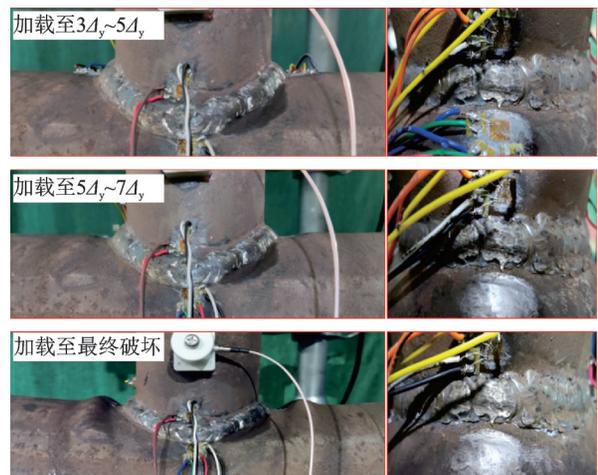


图 3 试件破坏过程

Fig. 3 Failure process of specimens



图4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure patterns of specimens

加,夹层混凝土发生破坏,主管外管缺少夹层混凝土支撑,破坏模式变为主管外管的屈曲。

2.2 力与位移关系曲线

图5为5个试件实测的力-位移关系曲线。由图5可见,各试件具有梭形的滞回曲线,曲线整体饱满,正反方向对称,没有明显捏缩现象,表明试件具

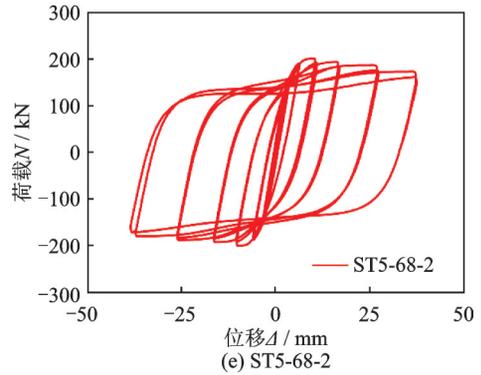
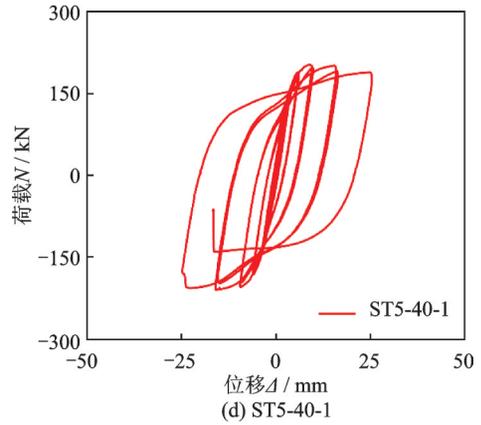
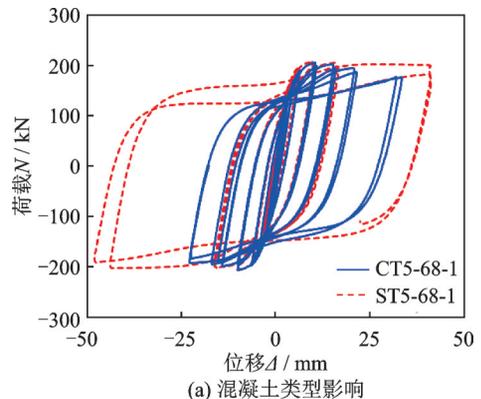
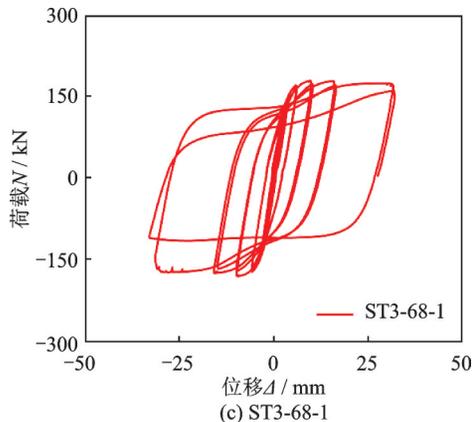
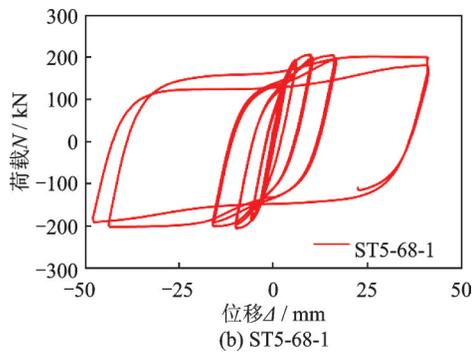
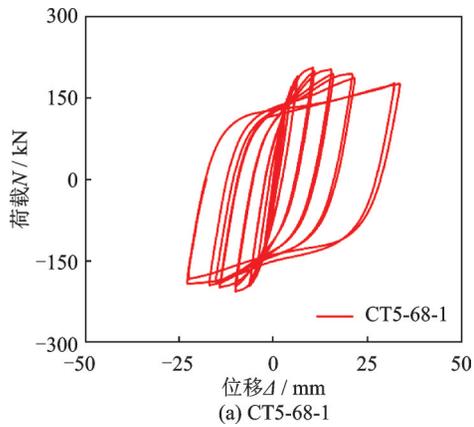


图5 试件滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of specimens

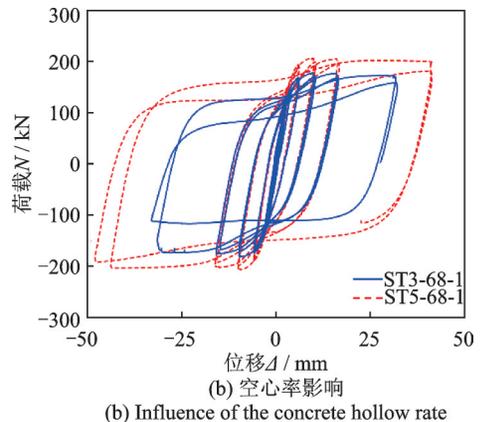
有良好耗能能力。

图6(a)对比了不同混凝土类型(普通混凝土和钢渣混凝土)对试件滞回曲线的影响。可以看出,内填钢渣混凝土的试件滞回曲线更饱满,耗能能力更



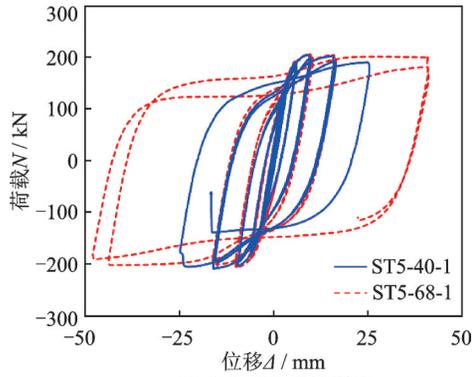
(a) 混凝土类型影响

(a) Influence of the concrete type

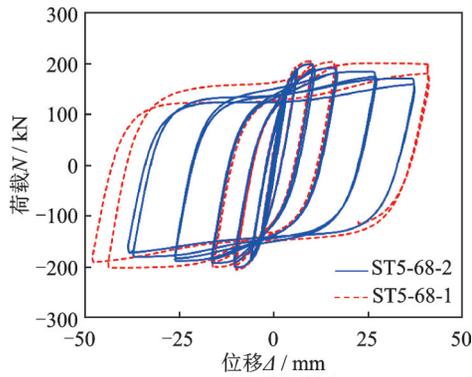


(b) 空心率影响

(b) Influence of the concrete hollow rate



(c) 支主管直径比影响
(c) Influence of the branch diameter ratio



(d) 轴压比影响
(d) Influence of the axial compression ratio

图 6 不同参数对滞回曲线的影响

Fig. 6 Influence of different parameters on hysteretic curves

强,极限位移更大,延性更好,表明以钢渣粉替代部分胶凝材料制作钢渣混凝土,抗震性能得到提高。抗震能力提高的原因有:(1)钢渣粉的粒径范围不同于其他胶凝材料粒径范围,填充了微观空隙,混凝土更密实;(2)钢渣膨胀性能与钢管约束相互作用,增加了构件的延性。

图 6(b)对比了不同空心率对试件滞回曲线的影响。可以看出,空心率由 0.3 增加到 0.5 时,试件滞回曲线更为饱满,极限位移和极限承载力提高。表明在合适的空心率条件下,内钢管的尺寸增加可充分发挥其力学性能优势。

图 6(c)对比了不同支主管直径比对试件滞回曲线的影响。可以看出,随着支主管直径比的增大,试件滞回环面积和极限位移均增大,表明耗能能力和位移延性均有提升。分析其原因,支管尺寸增大有利于增加节点区域主管约束,延迟主管外管屈曲

破坏现象的出现。

图 6(d)对比了不同轴压比对试件滞回曲线的影响,可以看出,随着轴压比的增大,试件极限承载力略微下降,滞回环包络面积缩小,试件耗能能力减弱,延性降低。试验结果表明轴压比与试件延性呈负相关,这与其他研究结果一致。

2.3 抗震性能指标

图 7 给出各试件实测的骨架曲线。其中,屈服位移 Δ_y 采用等效弹塑性屈服法计算,屈服位移 Δ_y 取为骨架线弹性段延伸线与极限荷载值 N_u 切线交点对应于骨架线的位移,骨架线中相对应的荷载值定义为屈服荷载 N_y ,极限位移 Δ_u 定义为当试件承载力下降至极限荷载值 N_u 的 85% 时对应的位移^[19]。

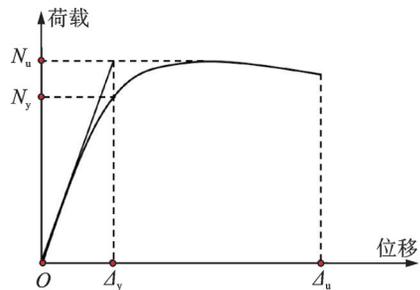


图 7 试件骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of joints

采用位移延性系数 μ 来评价节点的变形能力,计算公式如下^[19]:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{1}$$

式中 Δ_u 为极限位移; Δ_y 为屈服位移。

采用累积耗能系数 η_a 来评价节点的耗能能力,计算公式如下^[20]:

$$\eta_a = \frac{\sum_{i=1}^N (U_i^+ + U_i^-)}{U_y} \tag{2}$$

式中 N 为计数圈数; U_i^+ 和 U_i^- 分别为受拉半循环和受压半循环的耗能面积; U_y 为名义弹性势能, $U_y = N_y \Delta_y / 2$ 。

表 4 列出各试件的主要试验结果,可以发现,对比灌注普通混凝土,灌注钢渣混凝土试件极限承载

表 4 试件主要试验阶段结果

Tab. 4 Major test results of specimens

| 试件编号 | N_y /kN | Δ_y /mm | N_u /kN | Δ_u /mm | μ | η_a |
|----------|-----------|----------------|-----------|----------------|-------|----------|
| CT5-68-1 | 151.60 | 3.71 | 205.50 | 27.45 | 7.40 | 190.71 |
| ST5-68-1 | 144.50 | 3.37 | 206.40 | 42.30 | 12.57 | 282.65 |
| ST5-40-1 | 144.71 | 3.45 | 206.20 | 23.75 | 6.89 | 129.85 |
| ST5-68-2 | 151.60 | 3.57 | 200.35 | 36.75 | 10.31 | 219.41 |
| ST3-68-1 | 120.42 | 2.56 | 180.15 | 29.35 | 11.46 | 285.15 |

力仅提高 0.44%，基本可忽略不计，而位移延性系数和累计耗能系数分别增大了 69.46% 和 48.20%；支主管直径比从 0.40 增大到 0.68，试件极限承载力仅提高 0.10%，影响可忽略不计，而位移延性系数和累计耗能系数分别提高 82.44% 和 117.67%；轴压比从 0.1 增大到 0.2，试件极限承载力仅减小 2.93%，影响也可忽略不计，而位移延性系数和累计耗能系数则分别降低 17.98% 和 22.37%；空心率从 0.3 增大到 0.5，试件极限承载力提高 14.57%，而位移延性系数提高 9.69%，累计耗能系数变化可忽略不计。

3 有限元分析

3.1 有限元建模

采用有限元软件 ABAQUS 对试件在低周往复荷载作用下的动力性能进行分析。试件各构成部分的单元类型均选用实体单元 (C3D8R)，模拟焊缝时不考虑其材料的损伤，实体单元的本构模型均采用双折线模型，单元的分析精度受扭曲变形的影响较小，并且在载荷下不易发生剪切自锁，适合滞回性能的模拟分析；通过允许接触后分离的“通用接触”模拟主管内外钢管与夹层混凝土间、支管与主管外管间的相互作用关系，以摩擦系数为 0.6 的“罚摩擦”模拟其切向行为，以“硬”接触考虑接触面法向压力的传递；主管内外管、支管与各端板通过“Tie”连接^[9]。通过建立耦合点与两侧端板耦合来模拟铰接，耦合点自端板中心偏移，偏移量为平板铰轴销中心至端板的水平距离。图 8 为试件的有限元分析模型。

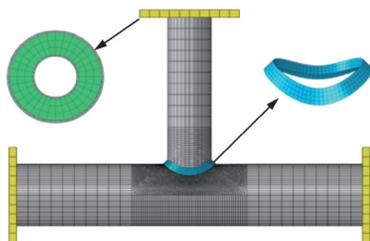


图 8 试件有限元模型

Fig. 8 FEA model of specimens

3.2 有限元模型验证

图 9 为有限元分析得到的试件的破坏形态。可以看出，支管在往复荷载作用下，主管外管管壁屈服开始累积塑性变形，冠点附近外管管壁鼓曲，应力进一步集中在鼓曲管壁，直至达到钢材的极限抗拉强度，节点区域发生了明显的压弯塑性变形。这与

图 4 中试验得到的主管破坏形态相同。

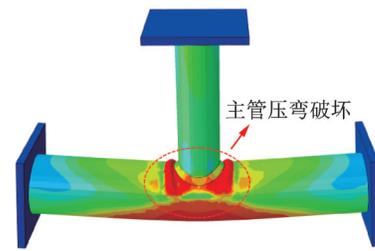
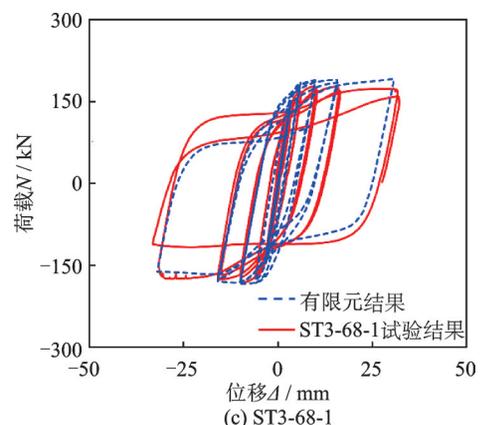
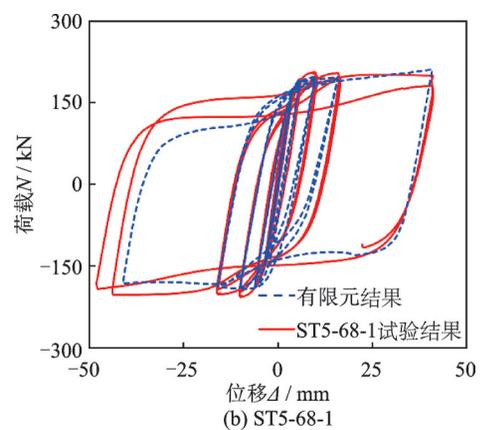
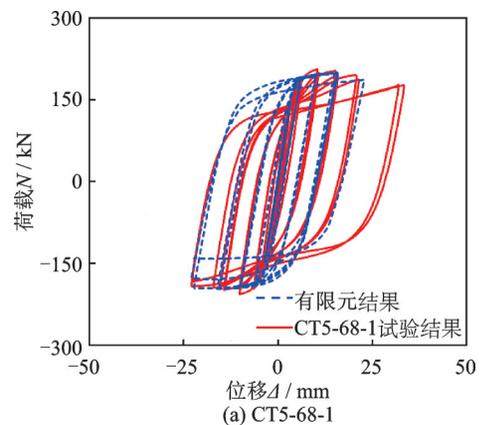


图 9 有限元分析得到的试件破坏特征

Fig. 9 Failure modes of specimens by FEA analysis

图 10 为试验结果和有限元分析结果的对比。可以看出，有限元分析与拟静力试验得到的滞回曲线吻合较好，说明本文所建立的有限元模型具有足够的精度，可用于参数分析。



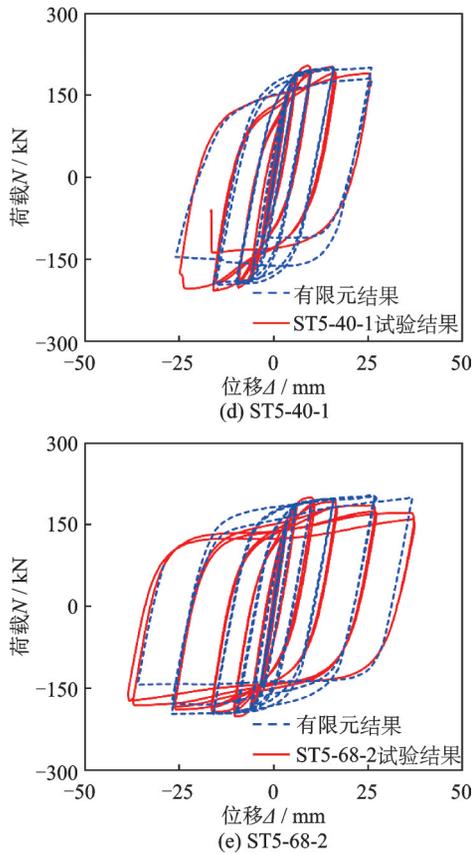


图 10 试验与有限元分析滞回曲线对比

Fig. 10 Hysteresis curves comparison between FEA and test

4 影响参数分析

采用验证的有限元模型进行参数分析,研究主管空心率、支主管直径比、轴压比、支管径厚比、钢材屈服强度、混凝土强度等 6 个参数对中空夹层钢管钢渣混凝土 T形节点承载力的影响规律。采用的基准模型主要设计尺寸为:主管内管直径 $D_n=144$ mm (空心率 $\chi=50\%$)、主管内管壁厚 $T_n=4$ mm、主管内管长度 $L_n=2000$ mm。根据《中空夹层钢管混凝土结构技术规程》(T/CCES 7—2020)^[8],参数取值覆盖参数常用范围,其中,空心率 χ 分别为 0, 30%, 50%, 70% 和 80%,支主管直径比 β 分别为 0.4, 0.5 和 0.6,轴压比 n 分别为 0.1, 0.3 和 0.5,主管径厚比 γ 分别为 40, 50 和 60,钢材屈服强度 f_y 分别为 235, 355 和 460 MPa,混凝土强度 f_{cu} 分别为 30, 50 和 70 MPa。

图 11 为支主管直径比 β 对试件承载力的影响。由图 11 可见,随着支管直径增大,试件极限承载力略微增大,不同支主管直径比 β 下空心率对结构的总体影响趋势相同; $\beta=0.4$ 时,大空心率($\chi=80\%$)对构件承载力的不利影响最为明显。因此,支主管直径比较小时,应当避免过高的空心率。图 12 为主管径厚比对试件承载力系数的影响。由图 12 可见,相同空心率下,构件承载力随着主管径厚的增大而

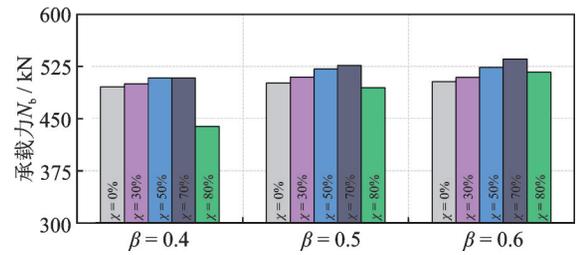


图 11 支主管直径比对试件承载力的影响

Fig. 11 Influence of the branch diameter ratio on bearing capacity of specimens

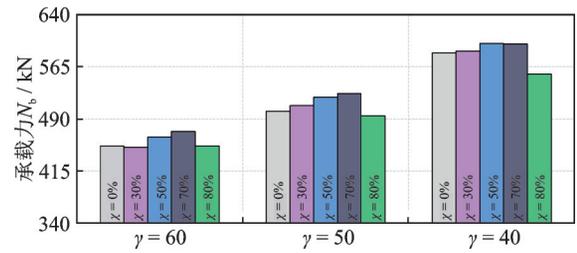


图 12 主管径厚比对试件承载力的影响

Fig. 12 Influence of the radius thickness ratio on bearing capacity of specimens

增大,即主管径厚比与试件承载力正相关;不同主管径厚下,节点承载力随空心率增大先增大后减小的趋势不变。图 13 为轴压比对试件承载力系数的影响。由图 13 可见,轴压比增大会降低构件的极限承载力,但其影响程度在 1% 以内,可忽略不计;轴压比增大也不会影响空心率对构件承载力的影响规律。图 14 为混凝土强度对试件承载力系数的影响。由图 14 可见,混凝土强度提高,构件极限承载力提高,提高一个等级的混凝土强度,构件承载力提高幅

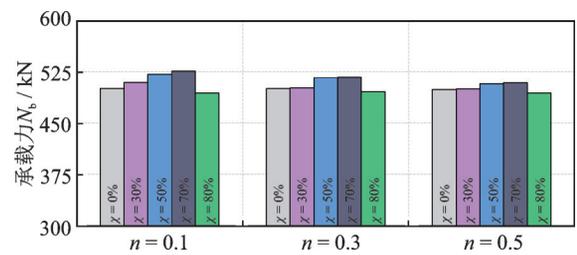


图 13 轴压比对试件承载力的影响

Fig. 13 Influence of the axial compression ratio on bearing capacity of specimens

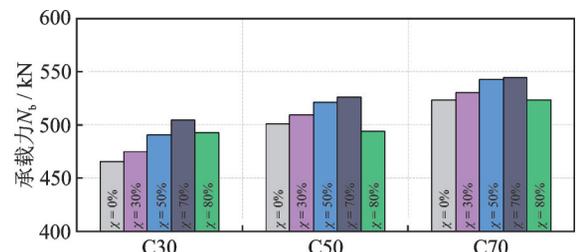


图 14 混凝土强度对试件承载力的影响

Fig. 14 Influence of the concrete strength on bearing capacity of specimens

度在 8% 左右,这与参数分析中考虑的荷载作用方式有关;在混凝土强度较低时,空心率对构件承载力的影响增大,这是因为混凝土强度降低后,内管的存在弥补了混凝土强度的不足。图 15 为钢材屈服强度对试件承载力系数的影响。由图 15 可见,主管外管强度是影响构件承载力大小的最主要因素,提高一个等级的钢材屈服强度,构件承载力提高 20% 以上;当主管外管强度较低时,空心率对构件承载力的影响增大,这是因为外管强度降低后,内管发挥的作用增大,因而在大空心率下,构件承载力仍高于实心构件承载力。

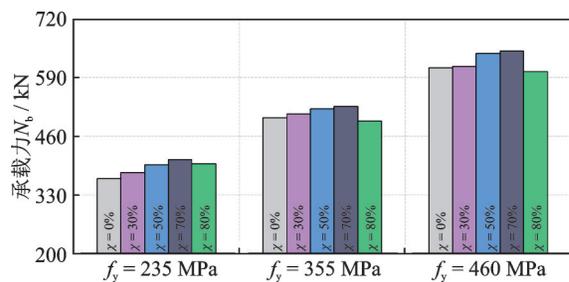


图 15 外管钢材强度对试件承载力的影响

Fig. 15 Influence of the outer tube steel strength on bearing capacity of specimens

5 结 论

(1) 5 组试件均发生主管压弯破坏。与灌注普通混凝土相比,灌注钢渣混凝土对试件节点承载力影响不大,但位移延性和耗能能力明显增加,分别提高 69.46% 和 48.20%。

(2) 当空心率从 0.3 增大到 0.5 时,试件极限承载力提高 14.57%,而位移延性系数提高 9.69%;当支主管直径比从 0.4 增大到 0.68 时,位移延性系数提高 82.44%,累计耗能系数提高 117.67%;空心率增大和支主管直径比增大对提高试件滞回性能都是有效的。

(3) 当构件轴压比从 0.1 增大到 0.2 时,试件位移延性系数降低 17.98%,累计耗能系数降低 22.37%;轴压比增大会降低试件滞回性能。

(4) 在空心率不大于 70% 时,构件承载力逐级递增,大于 70% 时构件承载力开始降低,甚至低于实心试件。各参数变化不会改变空心率对构件承载力的影响规律。

(5) 混凝土强度、主管钢材屈服强度和主管壁厚均与构件承载力呈现正相关关系,三者中主管钢材屈服强度的影响最大,主管壁厚次之,混凝土强度

影响最小。

(6) 钢渣的使用大幅提高节点抗震性能,可广泛应用于 T 形、K 形和 X 形等节点,在格构式中空夹层钢管混凝土墩柱装配式结构中大量推广应用,具有巨大经济价值与重要现实意义。

参考文献:

- [1] 吴跃东,彭霖,吴龙,等.国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状综述[J].环境工程,2021,39(1):161-165.
WU Yuedong, PENG Ben, WU Long, et al. Review on global development of treatment and utilization of steel slag[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(1): 161-165.
- [2] 张浩,司乐琦,王林,等.钢渣基功能填料的高附加值非建材领域应用研究进展[J].材料工程,2023,51(9):52-59.
ZHANG Hao, SI Leqi, WANG Lin, et al. Research progress in steel slag-based functional fillers with high added value in non-building materials field[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(9): 52-59.
- [3] 唐咸远,马杰灵,罗杰,等.钢渣微粉生态型超高性能混凝土力学性能影响因素分析[J].硅酸盐通报,2023,42(2):607-617.
TANG Xianyuan, MA Jieling, LUO Jie, et al. Analysis of influencing factors on mechanical properties of steel slag powder ecological ultra-high performance concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(2): 607-617.
- [4] 韩世旺,王鲁元,张兴宇,等.钢渣与污泥协同资源化研究进展[J].化学通报,2023,86(1):83-90.
HAN Shiwang, WANG Luyuan, ZHANG Xingyu, et al. Synergetic resource utilization of steel slag and sludge and it's research progress[J]. Chemistry, 2023, 86(1): 83-90.
- [5] 王成刚,汪陈林,张泽阳,等.高轴压比下圆钢管钢渣混凝土柱抗震性能试验研究[J].世界地震工程,2022,38(4):103-112.
WANG Chenggang, WANG Chenlin, ZHANG Zeyang, et al. Experimental analysis on seismic behavior of steel slag concrete filled circular steel tubular columns under high axial compression ratio[J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(4): 103-112.
- [6] LU Linhan, ZHANG Tianhe, Liang Tao, et al. Axial compressive behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns with steel slag coarse aggregate[J]. Structures, 2023, 51:1893-1905.
- [7] 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 cular sections[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(10): 41-51.
- [8] 中国土木工程学会. 中空夹层钢管混凝土结构技术规程:T/CCES 7—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- China Civil Engineering Society. Technical specification for concrete-filled double skin tubular structures: T/CCES 7—2020[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2020.
- [9] 黄亮, 郭磊, 陆斐, 等. 中空夹层钢管混凝土组合框架的拟动力试验[J]. 振动工程学报, 2022, 35(6): 1501-1510.
- HUANG Liang, GUO Le, LU Fei, et al. Pseudo-dynamic test on CFDST composite frame[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(6): 1501-1510.
- [10] 王静峰, 王翰澜, 王涛, 等. 装配式中空夹层钢管混凝土组合框架混合动力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(4): 237-246.
- WANG Jingfeng, WANG Hanlan, WANG Tao, et al. Experimental study on hybrid dynamic test of assembled CFDST composite moment resisting frame[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(4): 237-246.
- [11] 王宇航, 曹锋, 周绪红, 等. 风电混合塔筒中空夹层钢管混凝土转接结构轴压性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(4): 25-36.
- WANG Yuhang, CAO Feng, ZHOU Xuhong, et al. Experimental study on the axial compression performance of concrete-filled double skin steel tubular transfer structure in wind turbine mixed tower[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(4): 25-36.
- [12] 商文翰, 张纪刚, 吴书义, 等. 船舶碰撞中空夹层钢管混凝土导管架平台损伤分析[J]. 海洋工程, 2023, 41(2): 22-30.
- SHANG Wenhan, ZHANG Jigang, WU Shuyi, et al. Analysis of damage to concrete-filled double skin steel tube jacket platform by ship collision[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(2): 22-30.
- [13] 左勇, 黄宏, 王伊, 等. 圆中空夹层钢管再生陶瓷混凝土压弯构件力学性能研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(9): 185-194.
- ZUO Yong, HUANG Hong, WANG Yi, et al. Research on mechanical behavior of recycled ceramics concrete-filled double skin circular steel tubular members under eccentric compression[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(9): 185-194.
- [14] WANG Facheng, ZHAO Huayang. Experimental investigation on blast furnace slag aggregate concrete filled double skin tubular (CFDST) stub columns under sustained loading[J]. Structures, 2020, 27: 352-360.
- [15] 熊明祥, 胡琪东, 刘博元, 等. 高强中空夹层钢管混凝土柱的耐火性能试验研究[J]. 工程力学, 2022, 39(11): 177-185.
- XIONG Mingxiang, HU Qidong, LIU Boyuan, et al. Experimental study on fire behavior of high strength double-skin concrete-filled steel tubular columns[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(11): 177-185.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metal materials—tensile testing—part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019.
- [18] 颜桂云, 陈亚辉, 吴应雄, 等. 震损可修复的钢制连接装配式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(6): 1579-1589.
- YAN Guiyun, CHEN Yahui, WU Yingxiong, et al. Experimental study on seismic performance of steel-connection precast shear walls with earthquake-damage reparability[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(6): 1579-1589.
- [19] 陈宗平, 苏炜炜, 杨阳. 压弯剪扭钢筋混凝土T形截面柱抗震性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(2): 413-427.
- CHEN Zongping, SU Weiwei, YANG Yang. Seismic Behavior of reinforced concrete T-shaped columns under compression-flexure-shear and torsion combined action[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(2): 413-427.
- [20] 李虎, 杜永峰, 李芳玉. 采用格构式组合钢节点连接的PC柱抗震性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(1): 101-113.
- LI Hu, DU Yongfeng, LI Fangyu. Experimental study on seismic behavior of PC columns with latticed steel joint[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(1): 101-113.

Experimental and analytical studies on seismic performance of a steel slag CFDST T-joint

ZENG Wu-hua^{1,2}, WANG Wei^{1,3}, CHEN Qing-yi², WANG Jun-fang^{1,2},
WU Ying-xiong⁴, ZHUO Wei-dong⁴

(1. School of Civil Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Construction and Monitoring of Engineering Structures in Fujian Province College, Sanming 365004, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Concrete filled double-skin tubular structures (CFDST) that reuse waste steel slag demonstrate advantages in sustainable resource use. The interaction and coordination between steel tube and concrete make CFDST an effective solution to the stability issues, considering the expansion characteristic of steel slag. The expansion performance of the steel slag concrete can enhance the bond between the steel tube and its sandwich concrete. This paper presents a series of tests on a steel slag CFDST T-Joint under pseudo-static loading conditions to investigate its seismic performance. Five specimens were tested, including one ordinary concrete test specimen and four steel slag concrete test specimens. The variables tested were concrete type, hollow ratio, diameter ratio, and axial compression ratio. The results show that while the bearing capacity of steel slag concrete specimens is slightly lower than that of ordinary concrete, the displacement ductility and energy dissipation capacity significantly increased, by 69.46% and 48.20% respectively. As the hollow ratio increases from 0.3 to 0.5, the displacement ductility coefficient of the specimen increases by 9.69%. When the diameter ratio of branch main increases from 0.40 to 0.68, the displacement ductility coefficient increases by 82.44%. However, when the axial compression ratio increases from 0.1 to 0.2, the displacement ductility coefficient of the specimen decreases by 17.98%. A finite element model was established to simulate the hysteretic properties of the specimen. The simulation results are in agreement with the test results, verifying the validity of the finite element model. Based on the verified finite model, the parameters of influencing factors on the bearing capacity of the specimen were analyzed, and the optimum hollow ratio of the specimen was found to be about 70%. The use of steel slag greatly improves the seismic performance of the CFDST T-joint and can be widely used in concrete-filled steel tube engineering structures.

Key words: seismic performance; CFDST; steel slag concrete; hysteretic characteristics; quasi-static test

作者简介: 曾武华(1986—),男,博士,副教授。E-mail: zwhua@fjsmu.edu.cn。

通讯作者: 吴应雄(1969—),男,博士,教授。E-mail: wyxfz2006@163.com。