

带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件在压弯扭复合受力作用下的滞回性能研究

廖飞宇¹ 韩浩¹ 王宇航²

(1. 福建农林大学, 福建福州 350108; 2. 重庆大学, 重庆 400045)

摘要: 为研究环向脱空缺陷对钢管混凝土试件在压弯扭复合受力作用下抗震性能的影响, 进行了12个钢管混凝土试件(包括8个带缺陷试件、2个无脱空试件以及2个空钢管对比试件)在恒定轴压力和反复弯扭耦合荷载作用下的滞回性能试验。试验主要参数为: 脱空率、弯扭比和轴压比。基于试验结果考察了带脱空缺陷的钢管混凝土试件在压弯扭复合受力作用下的破坏模态, 并分析了脱空对试件滞回曲线、骨架曲线、刚度和耗能等力学指标的影响规律, 结果表明: 环向脱空缺陷的存在会改变钢管混凝土构件的破坏模态, 并使试件的承载力、刚度和耗能能力有不同程度的降低。同时, 建立钢管混凝土压弯扭构件的有限元模型, 分析环向脱空对构件承载力系数, 以及钢管与核心混凝土接触时刻的影响规律, 在此基础上提出相关工程建议。

关键词: 钢管混凝土; 脱空缺陷; 压弯扭复合受力; 滞回性能; 耗能

中图分类号: TU398.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)07-0057-13

Cyclic behaviour of concrete-filled steel tubular (CFST) members with circumferential gap under combined compression-bending-torsion load

Liao Feiyu¹ Han Hao¹ Wang Yuhang²

(1. Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the effects of circumferential gap on the seismic behaviour of concrete-filled steel tubular (CFST) members subjected to combined compression-bending-torsion load, a total of 12 specimens including 8 CFST specimens with circumferential gap, 2 CFST specimens without gap and 2 hollow steel sections, were tested under constant axial compressive load and cyclically combined actions of bending and torsion. The testing parameters included gap ratio, bending-torsion ratio and axial load level. Based on the test results, the failure mode of the CFST with circumferential gap was investigated, and the influences of gap on the hysteretic curve, skeleton curve, stiffness and energy dissipation capacity were experimentally analyzed. It was evident that the existence of circumferential gap could change the failure mode of a CFST specimen, and decrease its ultimate strength, stiffness and dissipated energy. Meanwhile, a finite element model was also established, and the effects of circumferential gap on the strength index and the contact time between outer steel tube and core concrete were investigated by the numerical model. According to the experimental and numerical studies, some suggestions were proposed for the practical CFST structures.

Keywords: concrete-filled steel tube (CFST); circumferential gap; combined compression-bending-torsion load; cyclic behaviour; dissipated energy

E-mail: feiyu.liao@fafu.edu.cn

引 言

钢管混凝土结构具有承载力高、塑性和韧性好、抗震性能好以及施工方便等优点,因此已经广泛应用于高层建筑和桥梁等结构中^[1-3]。然而,实际结构构件往往存在着初始缺陷,例如钢结构中的初始几何缺陷等。钢管混凝土的主要缺陷形式为“脱空缺陷”,对于竖向承载的钢管混凝土构件(如钢管混凝土桥墩等)由于管内混凝土的径向收缩,以及户外服役环境下的温差导致钢管和核心混凝土之间的膨胀变形差异均可能使二者之间产生“环向脱空缺陷”^[4],如图1所示。由于钢管混凝土桥墩普遍轴压比较小,其受荷后混凝土的横向膨胀有限,因此很难填补外钢管和混凝土之间的间隙。

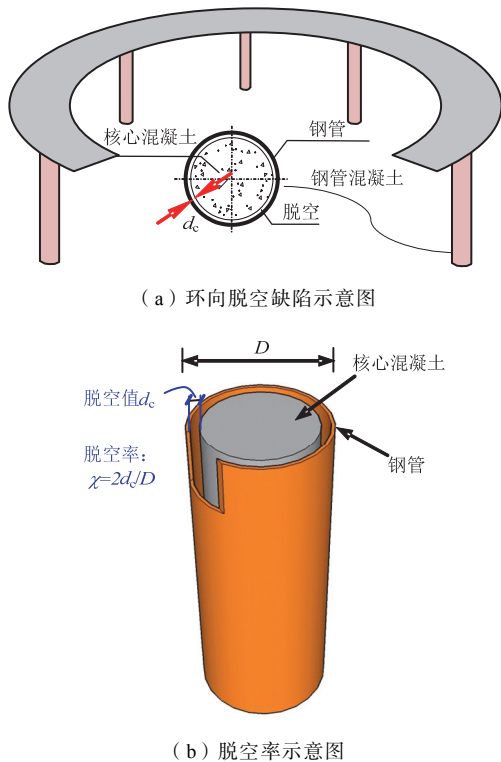


图1 钢管混凝土环向脱空缺陷示意图

Fig.1 Schematic diagram of CFST with circumferential gap

众所周知,钢管混凝土的力学性能优势源于钢管和核心混凝土间的相互作用和协同互补,即受荷过程中核心混凝土对钢管的支撑作用可以有效地延缓甚至避免钢管局部屈曲的发生,而钢管对混凝土的约束作用可以较好地改善混凝土的脆性,提高其塑性和韧性能。然而,脱空缺陷的存在却导致钢管和混凝土在界面上发生分离,削弱了二者之间的相互作用,因此对钢管混凝土构件的力学性能将产

生较为显著的影响。Liao等^[4-5]对带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件受压和受弯性能的试验和理论研究结果表明:过大的脱空缺陷将导致混凝土在不受约束的情况下被压碎,从而使钢管混凝土的极限承载力和刚度都有所降低。对于带环向脱空缺陷的构件而言,其脱空率大小将影响钢管和混凝土的接触时刻,如果二者在构件达到峰值荷载前发生接触,则环向脱空对构件整体力学性能的影响并不显著。在参数分析的基础上,Liao^[5]提出了钢管混凝土环向脱空率的限值为0.05%。

但是上述研究仅仅局限在钢管混凝土承受压、弯荷载作用,而实际工程中的钢管混凝土则可能处于复杂受力状态中。例如,弯桥中的钢管混凝土高墩(如图1所示)受到恒定轴压力的同时,在地震作用下还将产生弯矩和扭矩的耦合作用,使其承受压弯扭复合作用。为研究钢管混凝土构件在压弯扭复合受力作用下的抗震性能,Nie等^[6]采用力-位移混合控制的加载方式,完成了8根钢管混凝土压弯扭试件的拟静力试验研究,其中弯矩和扭矩荷载呈一定比例施加,并分别分析了截面类型为圆形和方形的钢管混凝土柱的力学行为。Wang等^[7-8]在此基础上,利用钢管混凝土压弯扭构件的“壳-实体”精细有限元模型分析了钢管混凝土中钢管和混凝土材料在纯扭、弯扭、压扭以及压弯扭受力状态下的应力-应变关系状态,揭示了钢管混凝土构件在复杂受力状态下钢管和混凝土的应力和应变发展趋势,此外,王宇航^[9]基于“壳-实体”多尺度有限元模型对水平地震荷载作用下弯桥的时程反应进行了模拟和分析。

但是,目前有关于环向脱空缺陷对钢管混凝土构件在压弯扭复合受力作用下抗震性能影响的研究报道尚十分有限。因此,本文对带环向脱空缺陷的钢管混凝土压弯扭构件开展了滞回试验研究,重点考察了脱空率、轴压比以及弯扭比对此类构件抗震性能的影响,基于试验结果分析了脱空缺陷对于构件破坏模态和力学性能的影响机理,并建立了带缺陷构件的有限元模型,分析了脱空对钢管与混凝土的接触时刻以及构件承载力的影响规律,在此基础上提出了相关工程建议。

1 试验概况

1.1 试件设计和制作

以弯桥中的钢管混凝土高墩承受恒定轴压荷

载时在地震作用下产生弯矩和扭矩的情况为典型工程背景,进行了 12 个试件在恒定轴压力和弯扭耦合反复荷载作用下的滞回试验,其中包括 8 个带脱空缺陷的钢管混凝土试件、2 个无脱空试件以及 2 个空钢管对比试件。试验参数包括脱空率、弯扭比和轴压比。试件参数如表 1 所示,其中, D 为钢管混凝土横截面外直径, t_s 为钢管壁厚, H 为试件高度, $n(=N_0/N_u$,其中 N_0 为施加在试件上的恒定轴压力, N_u 为试件的轴压承载力)为轴压比, γ 为弯扭比, f_y 和 f_{cu} 分别为钢材的屈服强度和混凝土立方体抗压强度, χ 为脱空率 $[\chi=2d_c/D$,其中 d_c 为脱空值,如图 1(b)所示]^[4]。

试验设计的脱空率为 2.2%和 4.4%,其主要原因:首先,该脱空率涵盖了工程中的极端情况,本试验的目的在于考察脱空的最不利影响;其次,脱空率较小的试件其在构件制作时难以精确的控制预先设定的脱空值,而对于脱空率较大的试件则易于实现。对于弯扭比和轴压比则分别选取了 $\gamma=0.9$ 和 1.8, $n=0.25$ 和 0.5,目的在于考察压、弯、扭不同比例组合下缺陷对钢管混凝土试件力学性能的影响规律。

试件制作时,首先按要求的长度加工空钢管,保证钢管两端平整,并仔细去除钢管中的铁锈和油污。对应每个试件加工两个板厚 16mm 的圆钢板作为试件的端板。对于带缺陷构件需在其中一个端板上焊接 $\Phi 10$ 栓钉(焊接栓钉的目的是加强混凝土和

端板之间的固定,以期保证试件制作完成后钢管、核心混凝土和脱空部分还能保持同心),并将有栓钉的端板焊接在空钢管上,而无栓钉端板则等到混凝土浇筑完成后焊接。对于带缺陷的试件,为了精确地制造环向脱空缺陷,采用精细加工的不锈钢管作为制造缺陷的模具并在其内、外表面均涂抹专用脱模剂以减小其与混凝土之间的黏结强度。在混凝土浇筑前将模具置于钢管内并临时固定以获得设计的脱空值,待混凝土初凝后用机械千斤顶小心地将模具从构件中抽出,以形成环向脱空缺陷。抽出模具后采用游标卡尺对脱空缺陷的尺寸均进行了量测,结果表明实际脱空值和设计脱空值误差较小(不超过 0.1mm)。对于无脱空的钢管混凝土试件则正常进行混凝土浇筑,待混凝土达到养护时间后焊接上端板。

通过拉伸试验实测得到钢管的屈服强度(f_y)、抗拉强度(f_u)、弹性模量(E_s)、泊松比和延伸率分别为:361.6MPa、434.2MPa、199607N/mm²、0.27 和 30.0%。核心混凝土采用自密实混凝土,混凝土的组成材料为:42.5 级普通硅酸盐水泥;II 级粉煤灰;花岗岩碎石,最大粒径 20mm;中砂;TW-3 早强高效减水剂;普通自来水。每立方米混凝土的材料用量:水泥:粉煤灰:砂:石:水:减水剂=264kg:176kg:760kg:1013kg:187kg:4.4kg。试验时,实测混凝土立方体(150mm×150mm×150mm)抗压强度 f_{cu} 为 36.4MPa,弹性模量 E_c 为 26342.4N/mm²,混凝土的坍

表 1 试件参数表

Table 1 Parameters of specimens

序号	试件编号	$D \times H$ (mm)	t_s (mm)	χ (%)	d_c (mm)	γ	f_y (MPa)	f_{cu} (MPa)	N_0 (kN)	n
1	CTA	180×900	4.80	0	0	0.9	361.6	—	150	0.25
2	CTB	180×900	4.80	0	0	0.9	361.6	—	150	0.25
3	CN011A	180×900	4.80	0	0	0.9	361.6	36.4	357	0.25
4	CN011B	180×900	4.80	0	0	0.9	361.6	36.4	357	0.25
5	CC211A	180×900	4.80	2.2	2	0.9	361.6	36.4	329	0.25
6	CC211B	180×900	4.80	2.2	2	0.9	361.6	36.4	329	0.25
7	CC411A	180×900	4.80	4.4	4	0.9	361.6	36.4	316	0.25
8	CC411B	180×900	4.80	4.4	4	0.9	361.6	36.4	316	0.25
9	CC221A	180×900	4.80	2.2	2	0.9	361.6	36.4	631	0.50
10	CC221B	180×900	4.80	2.2	2	0.9	361.6	36.4	631	0.50
11	CC212A	180×900	4.80	2.2	2	1.8	361.6	36.4	316	0.25
12	CC212B	180×900	4.8	2.2	2	1.8	361.6	36.4	316	0.25

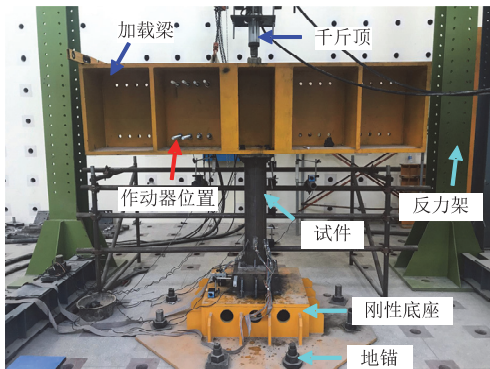
注:表中试件编号的第一个字母 C 代表钢管混凝土试件,第二个字母中的 C 代表环向脱空, N 代表无脱空;第一个数字为脱空率,2 代表脱空率为 2.2%,4 代表脱空率为 4.4%;第二个数字代表轴压比取值,1 代表取 0.25,2 代表取 0.50;第三个数字代表弯扭比,1 代表取弯扭比为 1.8,2 代表取弯扭比为 0.9;第三个字母代表试件标号,A 代表同组的第 1 根试件,B 代表同组的第 2 根试件。

落度和水平铺展度分别为 265mm 和 650mm。

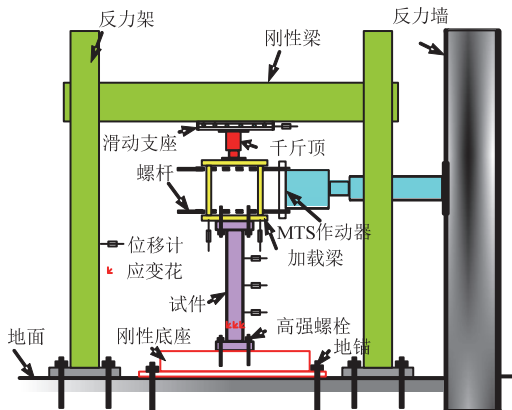
1.2 加载装置与量测方案

试验过程中将试件垂直放置，其底端与刚性底座固接，顶端与加载梁通过高强螺栓进行锚固。轴力由自带半球铰的 100t 液压千斤顶施加，其上端固定在可单方向运动的滑动小车上，以实现千斤顶可随着试件侧向变形而运动，从而保证轴力始终施加在柱顶中心的位置。试验过程中千斤顶使用油泵装置控制，随时进行补载以保持轴力恒定。往复荷载由 MTS 伺服作动器施加在与之相连的加载梁上，试件与加载梁刚接，通过 MTS 伺服作动器的推拉力对构件施加成比例的弯矩和扭矩。试验装置如图 2 所示。

荷载-位移关系数据由 MTS 系统自动采集，轴向变形和往复荷载作用方向的纵向位移利用位移计进行测量，其中轴向变形采用两个位移计架设在加载梁底端进行测量，其作用主要在于观测在加载过程中，加载梁是否发生倾斜；纵向位移由架设在滑动小车一侧的两个位移计进行测量。此外，在构件的 1/4 处、1/2 处和 3/4 处各架设一个位移计量测试件的侧向位移。试件的横向应变、纵向应变和剪切



(a) 试验装置照片



(b) 试验装置侧视示意图

图 2 试验装置

Fig.2 Test setup

应变由粘贴在距离试件底端板 200mm 高度位置的三向应变花进行测量，此外，在底座下端布置两个位移计分别测量底座两个方向的位移，避免底座发生移动对试验结果造成的误差，如图 3 所示。

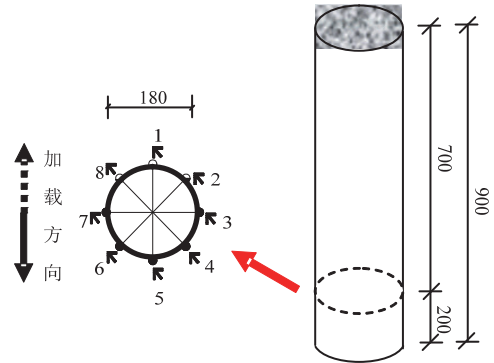


图 3 应变布置 (单位: mm)

Fig.3 Arrangements of strain gauges (unit:mm)

1.3 加载制度

试验加载制度采用荷载-位移双控制方法^[1]: 在试件达到屈服强度前采用荷载分级控制加载，分别按 $0.25P_{max}$ 、 $0.5P_{max}$ 、 $0.7P_{max}$ 进行加载，其中 P_{max} 为采用有限元计算的承载力^[10]；试件达到屈服强度 (Δ_y) 后，采用位移控制加载，按 $1\Delta_y$ 、 $1.5\Delta_y$ 、 $2.0\Delta_y$ 、 $3.0\Delta_y$ 、 $5.0\Delta_y$ 、 $7.0\Delta_y$ 、 $8.0\Delta_y$ 进行加载，其中 Δ_y 为试件的屈服位移，由 $0.7P_{max}$ 来确定： $\Delta_y=0.7P_{max}/K_{sec}$ ， K_{sec} 为荷载达到 $0.7P_{max}$ 时荷载-变形曲线的割线刚度。由荷载控制加载时，每级荷载循环 2 圈，当位移控制加载时，前 3 级荷载 ($1\Delta_y$ 、 $1.5\Delta_y$ 、 $2.0\Delta_y$) 均循环 3 圈，其余分别循环 2 圈，如图 4 所示。停机条件为：加载直至荷载下降超过了峰值荷载的 15%，或者水平荷载加载位移即将超出 MTS 伺服作动器的最大运行范围。

试验的加载方法原理如图 5 所示，将作动施加的集中力对柱底截面进行简化可以得到柱底截面弯矩和扭矩：

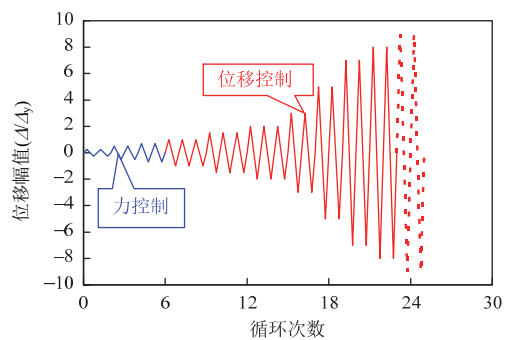


图 4 加载制度示意图

Fig.4 Loading program

$$M = FH \quad (1)$$

$$T = FL \sin \beta \quad (2)$$

式中： H 为柱高； L 为加载点与试件几何中心距离； β 为 MTS 作动器与加载梁的夹角。在试验过程中 β 值基本保持在 90° ，因而 $\sin \beta$ 值均保持在 1.0 左右，由此可得试件弯扭比（弯矩 M 与扭矩 T 的比值） γ 的表达式为：

$$\gamma = M/T = H/L \quad (3)$$

由式（3）可以看到，不同弯扭比加载可以通过变化 H/L 的值来实现。试验中通过改变加载位置可实现不同弯扭比组合，在弯扭比 γ 为 0.9 和 1.8 时，对应的加载点距离（ L ）分别为 1000mm 和 500mm。试件的扭转角（ θ ）与 MTS 作动器加载点位移以及试件柱顶位移的关系如下式所示：

$$\theta = \arcsin[(\Delta_1 - \Delta_2)/L] \quad (4)$$

式中： θ 为构件的扭转角， Δ_1 为 MTS 作动器加载点位移， Δ_2 构件柱顶位移，如图 5（b）所示。

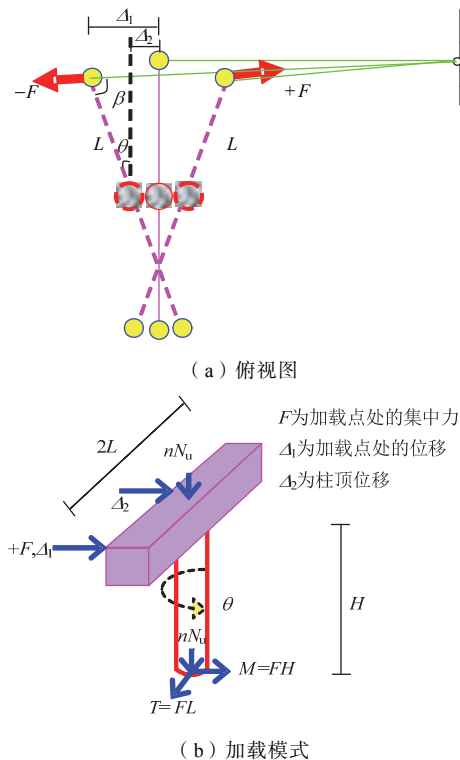


图 5 构件受荷示意图

Fig.5 Schematic diagram of loading

2 试验结果与分析

2.1 破坏模式

试验停机时，无脱空试件主要表现为试件整体变形，由于核心混凝土的支撑作用，外钢管并未观

察到有明显的局部破坏现象。而带环向脱空试件其破坏模态和空钢管试件较为接近，二者都由于缺乏混凝土对钢管的有效支撑作用而导致钢管底部出现了较为明显的斜向局部鼓屈，如图 6 所示。而当脱空率增大至 4.4% 时，其鼓屈现象则更加显著。

2.2 滞回关系曲线

试件实测的侧向荷载（ P ）-侧向位移（ Δ ）滞回关系曲线如图 7 所示，扭矩（ T ）-扭转角（ θ ）滞回关系曲线如图 8 所示。由图 7 和图 8 可见，同组两根试件的荷载-位移滞回关系曲线均较为接近。所有试件的滞回关系曲线均较为饱满，未出现“捏拢”现象，卸载段刚度与弹性刚度基本一致，表明了钢管混凝土试件在压弯扭复合作用下具有很好的耗能能力。相较而言，小弯扭比作用下的试件其滞回关系曲线较大弯扭比的情况更为饱满，而脱空缺陷对试件滞回关系曲线形状的影响并不明显。

在整个加载过程中，无脱空试件的荷载一直保持上升的趋势，其滞回关系曲线未出现下降段。对于空钢管和带环向脱空试件，其在加载后期钢管底部出现鼓屈现象，因此荷载则随之趋于平缓。

2.3 滞回关系曲线骨架线

图 9 所示为试件实测的侧向荷载（ P ）-侧向位移（ Δ ）滞回关系曲线骨架线。可见，试件在压弯扭复合作用下都经历了弹性段、弹塑性段和强化（平缓）段三个受力阶段。无脱空试件由于钢管和核心混凝土之间的“组合作用”其 $P-\Delta$ 曲线在弹塑性阶段之后有明显的强化特征，侧向荷载稳定上升直至试验停止。而空钢管试件其在钢管屈服后则 $P-\Delta$ 曲线表现为平缓阶段，荷载保持稳定而变形迅速增大，直至钢管底部发生明显鼓屈后试件荷载突然急剧下降。对于带缺陷的试件，其 $P-\Delta$ 曲线发展规律介于无脱空试件和空钢管试件之间，其在钢管屈服后曲线仍有强化现象，侧向荷载有平缓上升的趋势，反映了在受荷后期钢管可能与核心混凝土发生了接触，二者之间产生部分的相互作用。但带缺陷试件的后期承载力和刚度均略低于无脱空试件，和空钢管试件较为接近。此外，由图 9（a）还可看到：当脱空率由 2.2% 增大至 4.4% 时，试件承载力降低的幅度并不明显。以往 Liao 等^[4-5]的研究结果表明环向脱空缺陷会对钢管混凝土受压构件的荷载-变形关系曲线的形状有较大影响，而本文的试件主要以承受弯扭作用为主，钢管混凝土构件在受弯或受扭作用下其钢管对抗弯承载力或抗扭承载力的贡献占据了主要部分^[1]，因此脱空缺陷对压弯扭试件的荷

载-变形关系曲线的形状并无显著影响。

由图 9 (b) 可见, 轴压比对带缺陷试件 $P-\Delta$ 曲线的影响较小, 这是由于本文试件的破坏机制主要为弯扭耦合破坏, 因此试件的受压程度对其力学性能的影响并不显著。

由图 9 (c) 可见, 随着弯扭比 (γ) 由 0.9 增大到 1.8, 试件的刚度和承载力都有所提升。这是由于: 如式 (3) 所示, 试件的弯扭比 (γ) 取决于试

件高度 (H) 和加载点水平力臂 (L) 的比值, 而在试件高度一定的情况下, 提高弯扭比即意味着减小力臂 (L) 值, 因此试件底部所承受的弯矩和扭矩的耦合作用则相应较小, 所以大弯扭的试件其承载力较高。根据各试件的骨架曲线, 可以提取出试件的屈服荷载、屈服位移、极限荷载、极限位移等关键受力特征点数据, 如表 2 所示。其中试件的屈服点根据唐九如^[11]提供的方法确定。

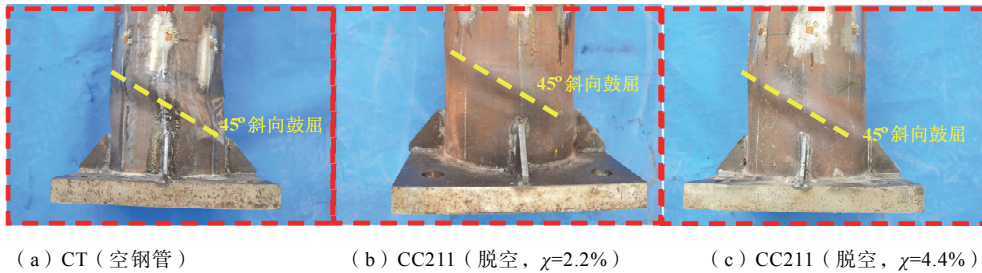


图 6 试件破坏模式对比

Fig.6 Comparison of failure modes of the specimens

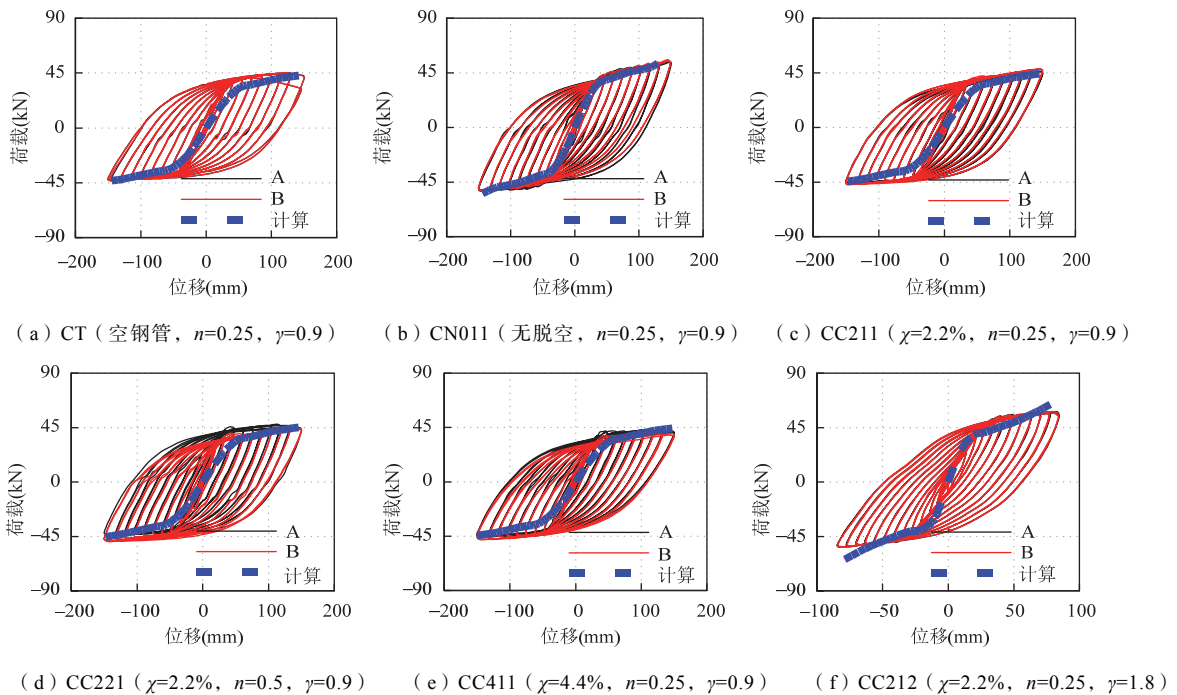
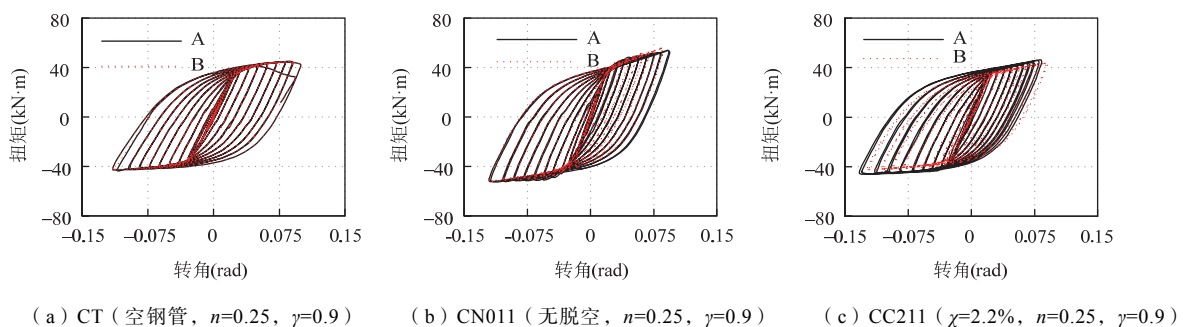


图 7 侧向荷载 (P)-侧向位移 (Δ) 滞回关系曲线

Fig.7 Lateral load (P)-Lateral displacement (Δ) hysteretic curves



(a) CT (空钢管, $n=0.25, \gamma=0.9$) (b) CN011 (无脱空, $n=0.25, \gamma=0.9$) (c) CC211 ($\chi=2.2\%, n=0.25, \gamma=0.9$)

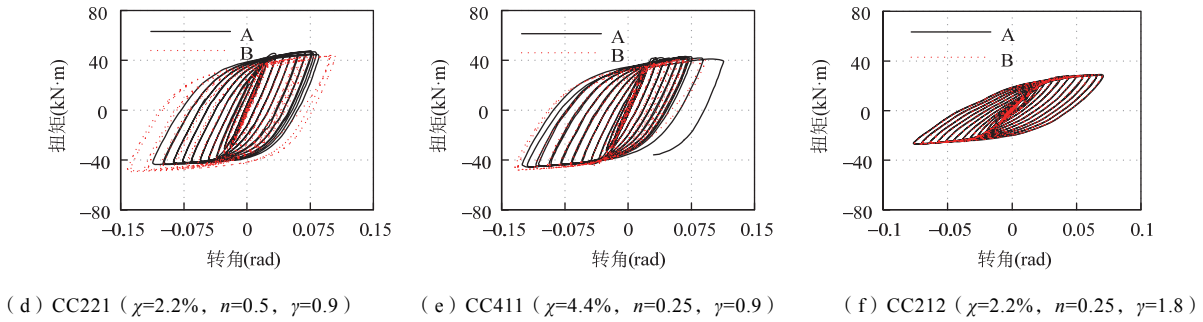


图 8 扭矩 (T) - 扭转角 (θ) 滞回关系曲线

Fig.8 Torsion moment (T) -torsion angle (θ) hysteretic curves

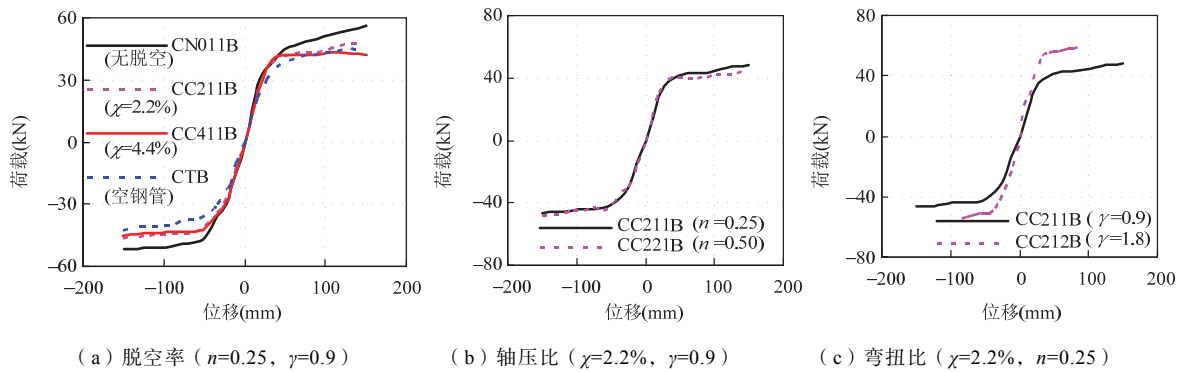


图 9 侧向荷载 (P) -侧向位移 (Δ) 关系骨架线比较

Fig.9 Comparisons of P- Δ skeleton curves

表 2 实测的特征荷载和变形值

Table 2 Measured characteristic loads and deformations

序号	编号	屈服荷载 P_y (kN)		屈服位移 Δ_y (mm)		极限荷载 P_{max} (kN)		极限位移 Δ_{max} (mm)		侧向承载力 P_u (kN)	平均
		正向	反向	正向	反向	正向	反向	正向	反向		
1	CTA	35.1	-28.2	33.9	-30.9	45.3	-42.8	150	-150	40.1	40.1
2	CTB	34.9	-28.4	32.8	-31.2	44.8	-43.4	150	-150	40.0	
3	CN011A	33.1	-33	26	-28.5	54.2	-52.8	150	-150	46.9	46.9
4	CN011B	30.5	-31.3	25.1	-27.7	56.3	-51.9	150	-150	46.8	
5	CC211A	32.6	-32.8	29.2	-31.8	46.5	-46.2	150	-150	41.3	41.5
6	CC211B	34.5	-31	29.3	-32.9	48.6	-47.2	150	-150	41.7	
7	CC221A	33.4	-27.9	22	-22.5	47.7	-43.8	150	-150	43.9	42.7
8	CC221B	31.2	-28.3	23.2	-25	44.6	-49.3	150	-150	41.5	
9	CC411A	36.2	-30	29.9	-30.4	43.6	-45.7	150	-150	39.8	38.9
10	CC411B	31.6	-33.5	29.8	-33.5	41.6	-48	150	-150	38.0	
11	CC212A	40.7	-36.5	21.9	-21.4	58.8	-54.3	84	-84	52.0	51.9
12	CC212B	40.3	-35.7	21.8	-20.8	58.4	-24.4	84	-84	51.9	

2.4 抗侧和抗扭承载力比较

由于本文试验的钢管混凝土试件的荷载-位移关系曲线均没有出现下降段，因此根据尧国皇^[12]和韩林海^[1]中的建议，取试件的极限承载力为各钢

管混凝土试件 1 号应变花（如图 3 所示）剪应变在分别达到+10000 $\mu\epsilon$ 、-10000 $\mu\epsilon$ 时的荷载平均值。这是由于：根据尧国皇^[12]和韩林海^[1]对大量钢管混凝土受扭构件的全过程分析结果表明，当构件边缘剪应变达 10000 $\mu\epsilon$ 后，构件的扭矩—扭转角关系曲线变化趋于平缓，扭矩值增长不大，但构件变形则急剧增大。剪应变计算公式如下：

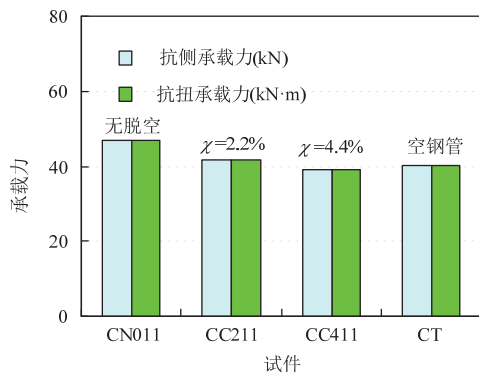
$$\epsilon_r = \epsilon_a + \epsilon_b - 2\epsilon_c \tag{5}$$

式中： ϵ_a 为测点的竖向应变； ϵ_b 为测点的横向应变； ϵ_c 为测点的斜向 45°应变。试件的抗扭承载力 (T_{ue}) 可由抗侧承载力 (P_{ue}) 通过式 (2) 计算得到。

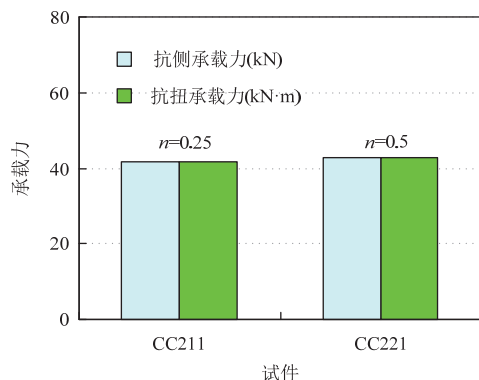
图 10 所示为试件的抗侧承载力和抗扭承载力比较。由图 10 (a) 可见，在弯扭比为 0.9 时各试件的抗侧承载力和抗扭承载力均较为接近，表明弯矩作用和扭矩作用基本相当。环向脱空缺陷的存在使钢管混凝土试件的抗侧承载力和抗扭承载力都有所降低，且降幅随脱空率增大而增大。对于无脱空的钢管混凝土试件，在弯矩或扭矩作用下钢管通过与核心混凝土之间的黏结力将内力传递给混凝土，二者共同工作抵抗外荷载，而脱空缺陷的存在则使钢管与混凝土之间的传力途径中断，严重削弱了二者

之间的共同工作性能，使试件主要依靠钢管来提供抗弯和抗扭能力。当脱空率增大至 4.4% 时，试件的抗侧承载力和抗扭承载力和空钢管试件基本相同，表明钢管和混凝土之间的组合作用已经完全消失。

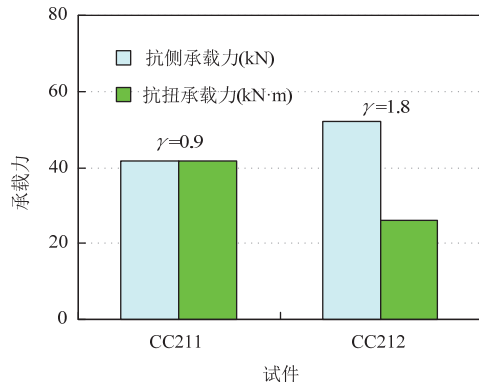
由图 10 (b) 可见，轴压比的增大使带缺陷试件的抗侧承载力和抗扭承载力都略有提高。由图 10 (c) 可见，随着弯扭比的增大，试件的抗侧承载力有所增大，而抗扭承载力则有所降低。在弯扭比由 0.9 变化为 1.8 时，由于扭转力臂减小，因此扭矩作用有所降低，而弯矩作用则相应有所提高。



(a) 脱空率 (n=0.25, gamma=0.9)



(b) 轴压比 (gamma=2.2%, n=0.25)



(c) 弯扭比 (gamma=2.2%, n=0.25)

图 10 承载力对比

Fig.10 Comparison of bearing capacity

2.5 承载力系数 (SI) 比较

为了便于量化比较脱空缺陷对钢管混凝土压弯扭试件极限承载力的影响，定义承载力系数 (SI) 如下：

$$SI = \frac{P_{ue}}{P_{ue-无脱空}} \quad (6)$$

式中： P_{ue} 为试件实测的承载力； $P_{ue-无脱空}$ 为无脱空试件的承载力。

图 11 所示为试件承载力系数 SI 比较。可见，当脱空率为 2.2% 时，承载力系数较无脱空试件降低了约 11.5%，脱空率增大到 4.4% 时，承载力系数降低了约 17.1%。Liao 等^[4]的试验结果表明在脱空率为 2.2% 时，环向脱空缺陷使钢管混凝土轴压承载力降低了约 29%。相较而言，脱空缺陷对本文钢管混凝土压弯扭承载力的影响较受压承载力小，这是由于：在受压破坏时，核心混凝土对试件承载力的贡献占据了主要部分，在达到极限荷载时脱空缺陷的存在使混凝土在缺乏钢管约束的情况被压碎，因此显著降低了混凝土抗压强度，从而导致试件整体抗压承载力明显下降。而对于弯扭构件，外钢管对试件承载力的贡献占据了主要部分，因此脱空缺陷的影响相应较小。

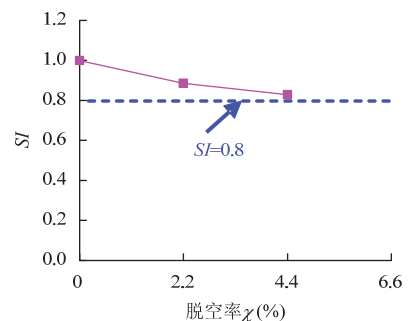


图 11 脱空率对承载力系数 (SI) 的影响

Fig.11 Effect of gap ratio on the strength index (SI)

2.6 刚度退化

试件的刚度退化可以用滞回环峰值点等效刚度 (割线刚度) 来反映^[1]：

$$K_i = \frac{P_i}{\Delta_i} \quad (7)$$

式中： K_i 为试件加载至第 i 级循环的割线刚度； P_i 为试件加载至到第 i 级时的峰值荷载； Δ_i 为试件加载至第 i 级达到峰值荷载时对应的位移。

试件的刚度退化曲线对比如图 12 所示，所有试件等效刚度均随位移增大而减小，加载初期试件

刚度退化速度较快，到加载后期其刚度退化速度有趋于平缓的趋势。环向脱空缺陷的存在使试件的等效刚度值有所下降。试验停机时，脱空率为 2.2% 试件的等效刚度值较无脱空对比试件降低了约 8.5%，当脱空率增大至 4.4% 时，试件等效刚度值降幅达到 17.9%。而空钢管试件在试验停机时其等效刚度值较无脱空钢管混凝土试件降低了约 21.0%。

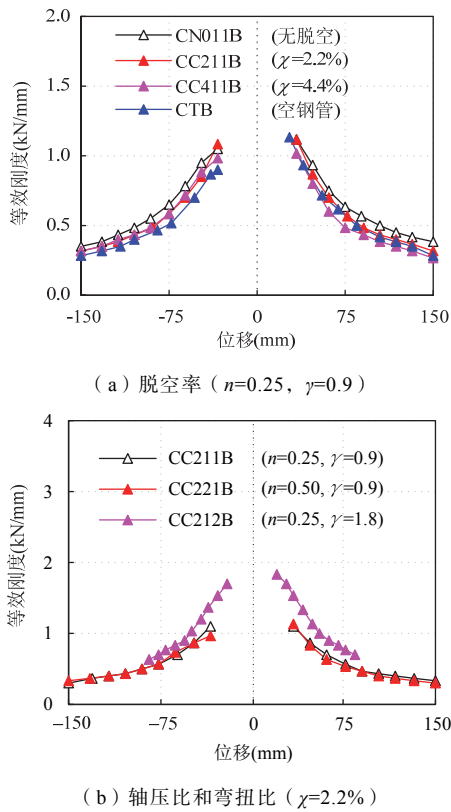


图 12 试件等效刚度比较

在本文试验参数范围内，轴压比对带缺陷试件的等效刚度值并无显著影响，而增大弯扭比则使钢管混凝土试件的等效刚度值有所提高。

2.7 累积耗能

结构构件的耗能能力可用 $P-\Delta$ 滞回关系曲线所包围的面积反映。图 13 为不同参数下试件累积耗能的比较。可见，带缺陷的试件其累积耗能较无脱空试件有所降低，例如脱空率 2.2% 的试件其总耗能较无脱空试件降低约 3.0%，脱空率 4.4% 的试件其总耗能则降低约 8.5%。随着弯扭比的增大，试件的累积耗能有所降低。

在现代工程抗震中，经常用到 1930 年由 Jaobson 提出的等效黏滞阻尼概念^[11]，使用等效黏滞阻尼系数作为判别建筑结构在地震中耗能能力的参数之一。如图 14 所示，等效黏滞阻尼系数 h_c 可

根据滞回环 ABCD 的面积进行计算：

$$h_c = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ADC} + S_{ABC}}{S_{DOF} + S_{BOE}} \quad (8)$$

式中： h_c 为等效黏滞阻尼系数； S_{ADC} 和 S_{ABC} 分别为弧线 ADC 和 ABC 与坐标轴所围成的面积，二者之和为滞回环包含的实际面积； S_{DOF} 和 S_{BOE} 分别为三角形（如图 14 所示阴影区域）面积，代表试件的弹性。

图 15 所示为实测的等效黏滞阻尼系数随加载级数的变化情况。带环向脱空缺陷的试件其等效黏滞阻尼系数在受荷全过程中均低于相应的无脱空试件，而与空钢管试件较为接近。轴压比对带缺陷试件的等效黏滞阻尼系数影响不大，而弯扭比的增大则导致等效黏滞阻尼系数有所减小。

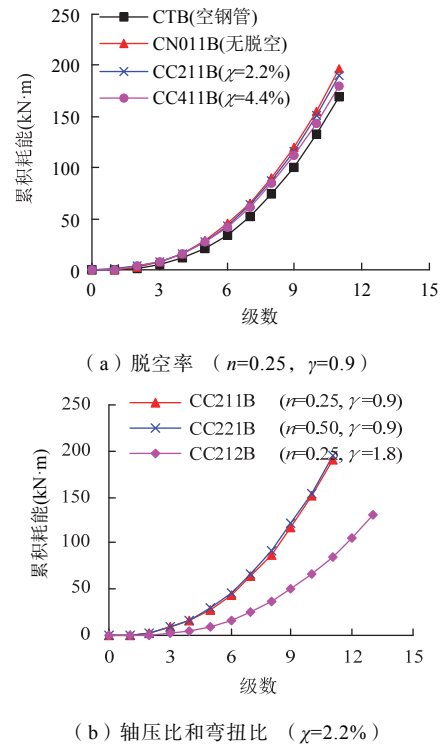


图 13 累积耗能比较

Fig.13 Comparison of the accumulative energy dissipated

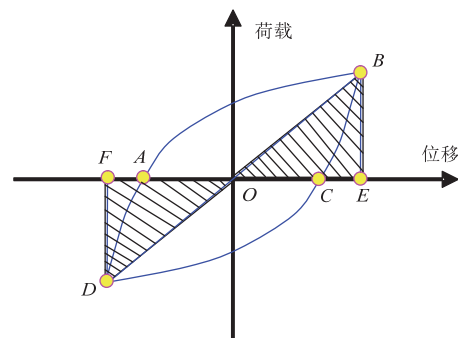


图 14 荷载-位移滞回环

Fig.14 $P-\Delta$ hysteretic cycle

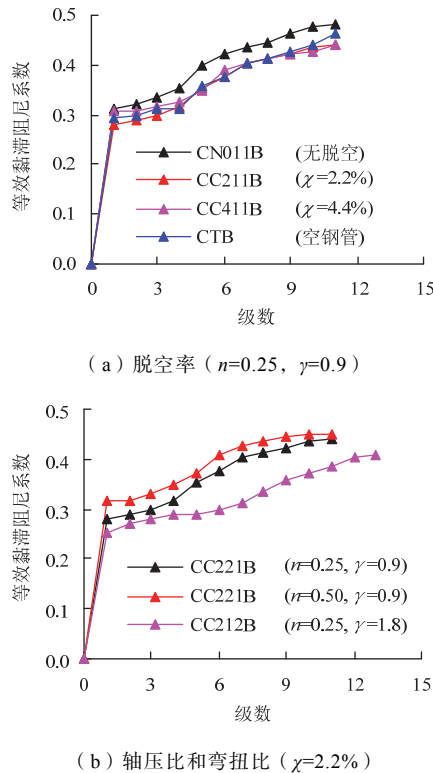


图 15 等效黏滞阻尼系数比较

Fig.15 Comparison of the equivalent viscous damping coefficient

3 有限元分析

3.1 有限元模型建立与验证

为了剖析脱空缺陷对钢管混凝土压弯扭构件受力性能的影响机理,建立了带缺陷构件的有限元分析模型。钢材采用等向弹塑性模型,其在循环荷载作用下的应力-应变关系采用双线性随动强化模型,并考虑包辛格效应,弹性阶段的弹性模量 E_s 为 206,000MPa,泊松比为 0.3,强化模量取 $0.01E_s$ ^[1]。

混凝土采用塑性损伤模型,通过定义损伤系数来描述混凝土内部微裂缝开展导致的影响。对于无脱空的钢管混凝土构件,核心混凝土在受荷过程中受到外钢管的约束,混凝土单轴受压的应力-应变关系模型采用韩林海^[1]提供的模型,其塑性能主要取决于“约束效应系数” $\xi (=a \cdot f_y / f_{ck})$,其中 $a=A_s/A_c$ 为截面含钢率; A_s 和 A_c 分别为钢管和混凝土的横截面面积; f_y 为钢管屈服强度; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值)。而对于带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件,由上述试验结果可见其钢管和核心混凝土之间的相互作用由于环向脱空的存在而大大削弱甚至消失,因此采用 Attard 和 Setunge^[13]提供的无约束混凝土模型来模拟其力学性能。混凝土受拉性能采

用沈聚敏等^[14]提出的单轴受拉应力-应变关系。

为了模拟循环荷载下混凝土的刚度损伤,引入了损伤变量 d 来定义混凝土在多轴应力状态下的损伤演化,卸载和再加载的模量矩阵由采用受压损伤系数 (d_c) 和受拉损伤系数 (d_t) 对初始模量矩阵进行修正的方法得到。此外,模型中还引入拉、压刚度恢复系数 (w_t 和 w_c) 来描述混凝土由压转拉的刚度恢复和由拉转压的“裂面效应”。对于损伤系数 d_t 和 d_c 采用滕志明等^[15]简化后的“焦点法模型”计算得到^[1]。

钢管采用在厚度方向采用 9 点 Simpson 积分的四节点完全积分格式的壳单元 (S4),混凝土、端板以及加载板单元均采用八节点减缩积分格式的三维实体单元 (C3D8R) 进行模拟。对于无脱空的钢管混凝土构件,钢管和核心混凝土法向接触采用硬接触“Hard”模型来定义,假设法向接触压应力在钢管和混凝土之间可以完全传递,并允许钢管和核心混凝土在受荷过程中分离。切向接触采用库仑摩擦 (Friction) 模型,钢管与混凝土界面摩擦系数取 0.6^[16]。对于带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件也采用上述模型来模拟脱空处钢管和混凝土的接触状态,但其参数取值和上述无脱空构件的接触模型略有区别,主要表现在:首先,对于法向接触模型,无脱空构件的接触模型允许钢管和混凝土之间出现少量拉应力,以模拟混凝土和钢管之间的黏聚力;而混凝土和钢管脱空处并无此黏聚力,二者一开始是分离的,因此其接触参数设定为钢管和混凝土之间无初始拉应力。这样在初始位置时,钢管和混凝土之间无任何法向应力,而当二者一旦开始接触后则自动地完全传递法向接触压应力。其次,对于切向接触模型,由于带缺陷构件的钢管和混凝土在受荷初期并未接触,因此需将二者之间的初始黏结应力设置为零,而在受力过程中如果钢管和混凝土发生接触,二者之间的界面黏结应力则自动根据接触压应力确定。

基于上述方法建立的有限元分析模型如图 16 所示,模型的荷载和边界条件均施加在耦合点 (RP1、RP2、RP3) 上。钢管混凝土构件底部采用固接的边界条件,限制耦合点 RP2 的所有自由度。轴压力通过耦合点 RP1 施加,而反复扭矩则通过耦合点 RP3 施加。利用该模型计算得到的侧向荷载 (P)-侧向位移 (Δ) 滞回关系曲线与试验结果比较如图 17 所示,计算的骨架曲线和试验结果比较如图 7 所示。可见,本文有限元模型的计算结果和试

验结果总体上吻合较好。

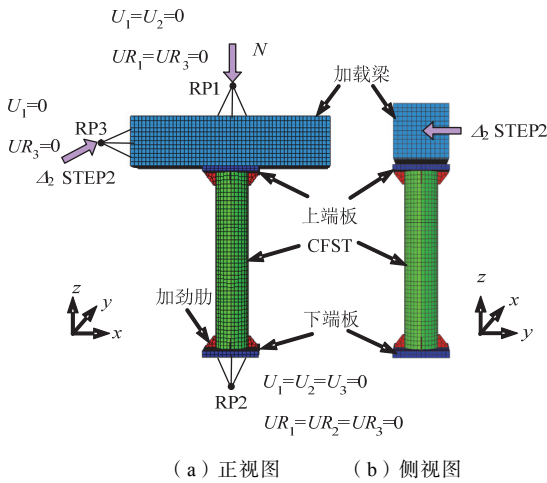


图 16 有限元模型示意图

Fig.16 Schematic diagram of finite element model

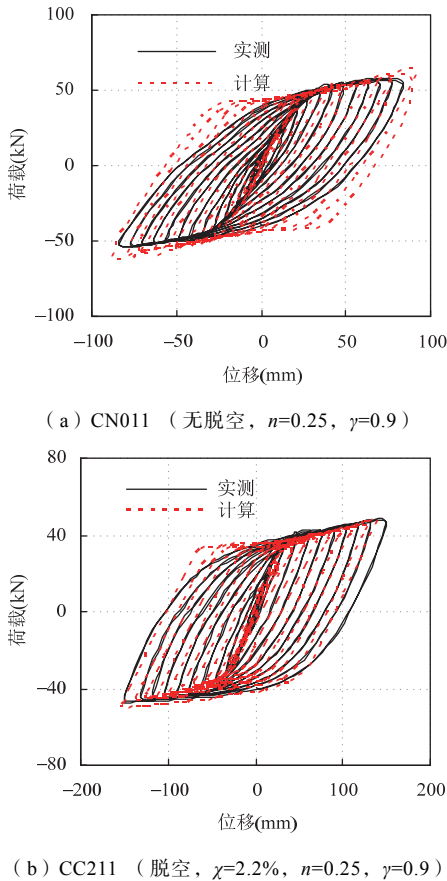


图 17 有限元计算的荷载-位移滞回关系曲线和试验结果比较
Fig.17 Comparison of the predicted load-displacement hysteretic curves and the tested results

3.2 受力分析

采用上述有限元模型对带脱空缺陷的钢管混凝土压弯扭构件的力学性能进行分析。参考弯桥中钢管混凝土高墩的实际工程尺寸，选用典型算例参

数如下：钢管混凝土横截面外直径 $D=800\text{mm}$ 、构件长度 $L=8000\text{mm}$ 、截面含钢率 $\alpha=0.1$ 、混凝土抗压强度 $f_{cu}=60\text{MPa}$ ，轴压比 $n=0.4$ ，弯扭比 $\gamma=1.0$ 。由于试验受到客观条件限制无法考察小脱空率的情况，而事实上实际工程中的脱空率大多比本文试验小，因此本节将利用有限元模型分析在脱空率较小的条件下环向脱空对钢管混凝土压弯扭承载力的影响。

Liao 等^[4-5]的研究指出：对于带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件，受荷过程中钢管与混凝土之间的接触时刻是影响其力学性能的关键因素。在受压状态下，如果混凝土在构件达到峰值荷载前与钢管发生接触，则脱空对构件极限承载力不会有显著影响。由此，Liao 等^[5]提出了环向脱空率限值为 0.05%，在此限值以内可保证构件达到峰值荷载前混凝土与钢管发生接触，混凝土被压碎时受到钢管的约束作用，同时因缺陷导致的轴压承载力下降幅度在 5% 以内。图 17 所示为本文压弯扭构件的脱空率与接触时刻的关系曲线。需要说明的是：对于轴压构件，混凝土受荷后沿径向均匀膨胀而与钢管发生接触，而对于弯扭构件其钢管和混凝土在扭转作用下将沿着周长方向发生错动，因此本文在混凝土截面上沿半周长取了多个特征点，一旦钢管特征点（红色）与任一混凝土特征点（黑色）发生接触，则表明钢管与核心混凝土有了局部的相互作用。图 18 中的 $\epsilon_{\text{contact}}$ 为所选混凝土的各特征点与外钢管发生接触时钢管剪应变值， ϵ_u 为极限承载力对应的剪应变（ $10000\mu\epsilon$ ），当 $\epsilon_{\text{contact}}$ 与 ϵ_u 的比值小于 1 时即意味着在构件达到极限承载力前混凝土与外钢管发生接触。由图可知，当脱空率不大于 0.05% 时，钢管与混凝土在构件达到极限承载力时二者已经局部发生接触，而在脱空率增大为 0.06% 时，二者在极限荷载时仍处于完全脱离的状态。

图 19 为计算所得的承载力系数 (SI) 比较，其中 SI 为带缺陷构件的承载力和无脱空构件的承载力比值，由式 (6) 计算。可见，一旦存在环向脱空构件承载力即有较为明显的降低。当脱空率为 0.01% 时，构件承载力降低了 6.52%，而之后随着脱空率的增大则承载力下降幅度有趋于平缓的趋势，当脱空率增大至 0.05% 时，构件承载力降低了 9.55%，而脱空率为 0.06% 时，承载力降低了 10.77%。和带缺陷构件在受压作用^[4-5]下比较可知，在小脱空率的情况下（如 0.05% 以内）环向脱空对压弯扭承载力的影响程度较轴压承载力大，前者在脱空率为

0.05%时承载力下降 9.55%，而后者则只下降了 3.5%。但是，在脱空率超过了 0.05%以后，环向脱空对轴压承载力的影响程度陡然增大，而其对压弯扭承载力的影响随脱空率增大而增大的趋势则较为平缓，如在脱空率为 2.2%时，压弯扭承载力下降 11.5%，而轴压承载力则下降了 29.0%。

导致上述现象的原因在于：对于钢管混凝土轴压构件，混凝土对构件承载力的贡献占据主要部分，而钢管对其的约束作用又对混凝土抗压承载能力影响较大，因此脱空率在一定限值内时，混凝土在受压状态下的横向体积膨胀将使钢管和混凝土在构件达到极限承载力前发生接触，钢管对混凝土的约束作用依然有效，脱空对承载力的影响也就相应较小，而一旦脱空率超过这个限值，则导致混凝土在无约束的情况下被压碎，脱空的影响则非常显著；而对于压弯扭构件，钢管对构件承载力的贡献占据了主要部分，而环向脱空缺陷一旦存在，钢管与核心混凝土之间就失去了有效的荷载传递机制，混凝土对于构件抗扭承载力的贡献则大大减小，从而导致构件承载力有较为明显的下降。

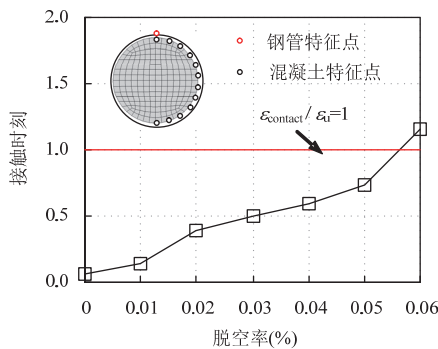


图 18 脱空率 (χ) 与接触时刻 ($\epsilon_{\text{contact}}/\epsilon_u$) 关系
Fig.18 Gap ratio (χ) versus contact time ($\epsilon_{\text{contact}}/\epsilon_u$) relations

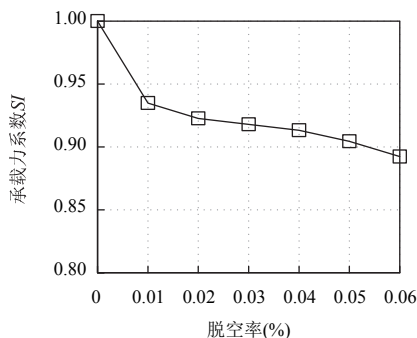


图 19 脱空率 (χ) 与承载力系数 (SI) 关系
Fig.19 Gap ratio (χ) versus strength index (SI) relations

因此，在实际工程中的钢管混凝土构件如果承受压弯扭复合作用时要严格控制混凝土浇筑质量，避免环向脱空的产生。而一旦检测发现有环向脱空缺陷存在，则需对构件承载力进行折减后验算其是否满足安全要求。为了便于设计人员使用，基于有限元分析结果给出了承载力折减系数设计表格，如表 3 所示。

表 3 承载力折减系数设计表

Table 3 Design table for strength reduction factor						
脱空率	0.01%	0.02%	0.03%	0.04%	0.05%	0.06%
折减系数	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.88

4 结论

在本文研究参数范围内可得到如下结论：

(1) 环向脱空缺陷的存在会改变钢管混凝土构件在压弯扭复合作用下的破坏模式，由于缺乏核心混凝土的支撑作用，钢管底部在扭矩和弯矩的耦合作用下出现斜向鼓屈，而无脱空的钢管混凝土试件则未观察到有明显的破坏现象。

(2) 带缺陷的钢管混凝土试件和无脱空试件的侧向荷载-侧向位移、扭矩-扭转角滞回关系曲线均未出现捏缩现象，滞回环饱满，在受荷后期依然保持荷载平缓上升，未见有下降段。

(3) 在脱空率为 2.2%时，钢管混凝土压弯扭试件的极限承载力、等效刚度和累积耗能分别下降了 11.5%、8.5%和 3.0%；在脱空率为 4.4%时，试件极限承载力、等效刚度和累积耗能分别下降了 17.1%、17.95%和 8.5%。

(4) 本文建立的有限元模型可以较好的模拟带缺陷的钢管混凝土构件在压弯扭复合作用下的力学性能。有限元分析结果表明：当脱空率不大于 0.05%时，钢管与混凝土在构件达到极限荷载前能局部发生接触。当脱空率为 0.01%，构件承载力降低了 6.52%，当脱空率增大至 0.05%和 0.06%时，构件承载力分别降低了 9.55%和 10.77%。基于有限元分析结果给出了承载力折减系数设计表格，可供钢管混凝土结构的安全评估和验算时使用。

参 考 文 献

[1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2016
[2] Han L H, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced application of concrete-filled steel tubular

- [7] 王连广, 李立新. 国外型钢混凝土(SRC)结构设计规范基础介绍[J]. 建筑结构, 2001, 31(2): 23-24
- [8] Soliman M T M, Tu C W. The flexural stress-strain relationship of concrete confined by rectangular transverse reinforcement [J]. Magazine of Concrete Research, 1967, 19(61): 223-238
- [9] Ahmad S H, Shah S P. Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement [J]. ACI Journal, 1982, 79(6): 484-490
- [10] Martinez S, Nilson A H. Spirally reinforced high-strength concrete columns [J]. Journal Proceedings. 1984, 81(5): 431-442

陈宗平 (1975—), 男, 博士, 教授。主要从事钢-混凝土组合结构、再生混凝土结构、异型柱结构及轻质节能墙板等方面的研究。

周春恒 (1987—), 男, 博士, 讲师。主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。

蒋香山 (1991—), 男, 硕士, 工程师。主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。

(上接第 68 页)

- (CFST) structures: Members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 100: 211-228
- [3] Han L H, Li W, Ren Q X. Tests on inclined, tapered and STS concrete-filled steel tubular (CFST) stub columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(10): 1186-1195
- [4] Liao F Y, Han L H, He S H. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: Experiments [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12): 1922-1935
- [5] Liao F Y, Han L H, Tao Z. Behavior of CFST stub columns with initial concrete imperfection: Analysis and calculations [J]. Thin-walled Structures, 2013, 70: 57-69
- [6] Nie J G, Wang Y H, Fan J S. Experimental research on concrete filled steel tube columns under combined compression-bending-torsion cyclic load [J]. Thin-Walled Structures, 2013, 67: 1-14
- [7] Wang Y H, Zhou X H. Non-linear torsion behaviour of concrete filled steel tube columns [J]. Materials & Structures, 2016, 49(12): 5227-5241
- [8] Wang Y H, Nie J G, Fan J S. Fiber beam-column element for circular concrete filled steel tube under axial-flexure-torsion combined load [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 95: 10-21
- [9] 王宇航. 曲线梁桥钢管混凝土桥墩的扭转效应研究[D]. 北京: 清华大学, 2013 (Wang Yuhang. Study on torsion effect in concrete filled steel tube piers of curved girder bridges [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013 (in Chinese))
- [10] 韩浩, 廖飞宇, 李永进. 反复荷载下带脱空缺陷的钢管混凝土压弯构件的有限元模拟[C]//第 25 届全国结构工程学术会议论文集, 包头. 北京: 工程力学, 2016 (Han Hao, Liao Feiyu, Li Yongjin. Finite element modelling of concrete-filled steel tubular beam-columns with initial concrete imperfection under cyclic loading [C]//Proceedings of the 25th National Conference of Structural Engineering, Baotou. Beijing: Engineering Mechanics, 2016 (in Chinese))
- [11] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989 (Tang Jiuru. Seismic resistance of joints in reinforced concrete frames [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989 (in Chinese))
- [12] 尧国皇. 钢管混凝土构件在复杂受力状态下的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2006 (Yao Guohuang. Research on behaviour of concrete-filled steel tubes subjected to complicated loading states [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006 (in Chinese))
- [13] Attard M M, Setunge S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(5): 432-442
- [14] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993
- [15] 滕智明, 邹离湘. 往复荷载下钢筋混凝土构件的非线性有限元分析[J]. 土木工程学报, 1996, 29(2): 19-26 (Teng Zhiming, Zou Lixiang. Nonlinear finite element analysis of RC members under reversed cyclic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(2): 19-26 (in Chinese))
- [16] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005 (Liu Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006 (in Chinese))

廖飞宇 (1978—), 男, 博士, 教授。主要从事钢-混凝土组合结构等方面的研究。

韩浩 (1993—), 男, 硕士研究生。主要从事钢-混凝土组合结构等方面的研究。

王宇航 (1985—), 男, 博士, 教授。主要从事钢结构和组合结构等方面的研究。