

设分配梁巨型钢管混凝土柱轴压承载性能试验研究

罗金辉¹, 刘 匀¹, 张元植², 李元齐¹, 傅学怡^{1,3}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 四川省建筑科学研究院, 四川 成都 610081;
3. 悉地国际设计顾问(深圳)有限公司, 广东 深圳 518048)

摘要: 分 3 批次完成了设分配梁传力构造的巨型钢管混凝土柱轴压系列试件, 对 3 批试件的破坏模式、极限承载力、分配梁应变分布规律等进行综合对比分析。结果表明, 通过分配梁传递给核心混凝土的竖向荷载大小与分配梁的横截面面积成正比, 且远大于通过钢-混凝土黏结作用所传递的荷载, 表明采用分配梁传递竖向荷载是高效、可行的。3 批试件的分配梁均在梁端部区域形成了剪切屈服段, 且当梁端形成剪切塑性铰后, 分配梁传递给核心混凝土的竖向荷载基本维持不变, 达到极限荷载时, 分配梁两端发生剪切破坏。将内环板与分配梁结合设置, 显著提高了分配梁传递竖向荷载的能力及试件的轴压极限承载能力。因此, 在巨型钢管混凝土柱内设置分配梁传力构造, 可有效促进钢管与混凝土共同工作, 保障巨型钢管混凝土柱具有优越的轴压承载性能。

关键词: 巨型钢管混凝土柱; 传力构造; 分配梁; 缩尺模型试验; 荷载传递

中图分类号: TU392.1; TU317.1

文献标志码: A

Experimental Investigation on Behavior of Giant Concrete-Filled Steel Tubular Columns with Distributive Beam Under Axial Compression

LUO Jinhui¹, LIU Yun¹, ZHANG Yuanzhi², LI Yuanqi¹, FU Xueyi^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu 610081, China; 3. CCDI (Shenzhen), Shenzhen 518048, China)

Abstract: A series of specimens, including three batches, of giant concrete-filled steel tubular columns (called giant CFT columns hereinafter) with detailings of distributive beam under axial load were completed. The failure mode, the load-carrying capacity of specimens and the strain distribution on distributive beam of specimens were comprehensively compared and analyzed based on experimental results. It can

be observed from the test results that the load shared by core concrete is proportional to the cross-section area of distributive beam and is considerably larger than the load transmitted by the nature bond between steel tube and core concrete. Thereout, the conclusion could be drawn that the distributive beam set in giant CFT columns could transfer vertical load effectively and reliably. Meanwhile, the load transferred by distributive beam remained constant after shear plastic hinges at both ends of distributive beam were developed, and obvious plastic deformation from shear yielding to failure at the area of distributive beam ends could be observed. Finally, it could also be concluded from the results that giant CFT columns with both distributive beams and inner diaphragms gained much higher load-bearing capacity than those only with distributive beams by comparing the two kinds of specimens. Therefore, co-working performance between core concrete and steel tube could be effectively improved by distributive beam set in giant CFT columns, so that excellent axial load bearing behavior of giant CFT columns could be ensured.

Key words: giant concrete-filled steel tubular columns; load-transfer detailings; distributive beam; scaled experiment; load transferring

在超高层建筑中, 常采用伸臂桁架巨型框架-核心筒-伸臂桁架结构体系, 巨型钢管混凝土柱通常承担巨大的轴力, 其横截面尺寸也越来越大。例如, “京基金融中心”巨型钢管混凝土柱横截面尺寸达 3 900 mm×2 700 mm, “台北 101”巨型钢管混凝土柱最大横截面尺寸达 3 000 mm×2 400 mm, 在建的沈阳宝能环球金融中心巨型钢管混凝土柱最大横截面达 5 200 mm×3 500 mm。

与巨型钢管混凝土柱相比, 型钢混凝土巨型柱可直接将巨柱钢骨与伸臂桁架或大型转换梁(转换

收稿日期: 2017-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51208375)

第一作者: 罗金辉(1978—), 男, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为组合结构。E-mail: ljh@tongji.edu.cn

通信作者: 刘 匀(1971—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为施工技术。E-mail: liuyun@tongji.edu.cn

桁架)连接,使竖向荷载能够同时作用在外包混凝土及核心钢骨上,保证了组合柱钢-混凝土协同工作,而巨型钢管混凝土柱受到的外荷载通常首先作用于钢管壁,仅仅依靠钢管与核心混凝土的界面黏结强度及设置抗剪连接件不足以保证钢管与核心混凝土共同工作.此时,按现行规程^[1-7]中钢管和核心混凝土满足平截面假定的承载力设计方法将偏于不安全.因此,开展巨型钢管混凝土柱的竖向荷载传递性能方面的试验与理论研究,为其在超高层建筑中应用提供理论依据,显得尤为必要.

为此,本文提出了在巨型钢管混凝土柱内设置分配梁及分配梁加内环板传力两种传力构造措施,并针对这两种构造措施的作用机理和效率分 3 批次开展了一系列的缩尺模型试验及理论研究^[8-13].本文仅对轴压系列试验结果进行对比分析,为分配梁成套设计方法研究提供试验数据支撑.

1 试验装置与试件设计

以某实际工程中横截面为 2 250 mm×1 500 mm 的矩形钢管混凝土柱为原型,综合考虑试验室的加载能力和模型缩尺对分配梁传力原理的影响,确定按 5:1 的缩尺比例设计试件,即取尺寸为 450 mm×300 mm 的矩形钢管混凝土柱作为本文开展试验研究的试件.第 1 批轴压研究表明,由材料强度和缩尺模型引起的钢管混凝土柱截面尺寸效应等因素对分配梁传递竖向荷载的路径和作用机理影响较小,因此缩尺比例对本文的研究结论影响较小.试件采用 Q235B 钢,混凝土强度等级为 C40.

进行了 3 批轴压力学性能试验,共 15 根试件.所有轴压试件柱脚均为刚接,柱顶为铰接.其中,第 1 批 4 个试件的试验结果在文献^[10]中已有详细报道,本文主要针对第 2、3 批试件的试验结果进行分析,并与第 1 批试件的主要试验结果进行比较分析.

为了模拟工程中竖向荷载在巨型钢管混凝土柱截面中的实际传递路径,试验时通过加载“凳子”将竖向作动器的荷载直接作用于试件的管壁.第 1、2 批试件采用如图 1 所示的加载构造 A,即试件柱顶采用水平环板及周边竖向加劲肋,并通过“凳子”与竖向作动器连接.“凳子”顶板与柱顶混凝土表面留出 10 cm 高度的空隙,以免试验过程中“凳子”上的竖向荷载直接作用到核心混凝土.

第 1、2 批轴压试验结果表明,由竖向力产生的附加弯矩使钢-混凝土界面处产生法向压应力(“夹

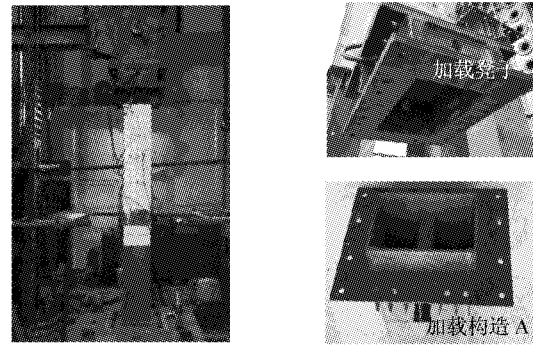


图 1 第 1、2 批试件试验装置

Fig. 1 Test setup for the 1st and 2nd batches of specimens

钳”效应),间接提高了钢-混凝土黏结作用对荷载传递的贡献,从而增加了分配梁传递竖向荷载机理分析的复杂程度,见图 2.

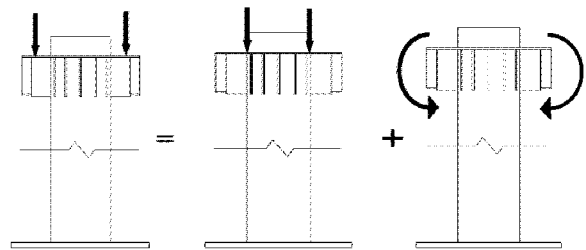


图 2 “夹钳”效应

Fig. 2 “Clamp” effect

为了尽量减小“夹钳”效应对竖向荷载传递机理分析的影响,第 3 批试件直接在在试件柱顶钢管壁两侧焊接工字型加载梁,通过加载“凳子”与竖向作动器连接(加载构造 B),并在钢管内壁涂隔离油脂,以忽略钢-混凝土之间的摩擦力对竖向荷载传递的贡献,见图 3a.同时,为了测得试验全过程中核心混凝土承担的竖向荷载,在第 3 批试件的底板处预开与混凝土面积相同的槽孔,并在核心混凝土下方放置压力传感器,见图 3b、3c.

通过设计特殊的加载构造,保障试验过程中轴向荷载的传递路径为:轴向荷载→加载“凳子”→加载构造 A/B→试件钢管.

轴压试件设计参数见表 1,典型试件设计图见图 4.

2 试验现象分析

图 5 给出了典型轴压试件的破坏图.图 6 为剖开钢管壁后核心混凝土的破坏情况.图 7 为分配梁构造及分配梁加环板破坏情况.表 2 给出了试件轴压承载力结果.

对比分析 3 批试验,结果表明:①管内未设置分

配梁或内环板传力构造的试件 LRCFT-6-1 和试件 LRCFT-6-2 的钢管沿试件高度形成了连续屈曲波,靠近柱顶加劲肋位置的管壁局部鼓曲最明显,最终破坏现象为钢管沿核心混凝土纵向脱离而发生鼓曲破坏,但核心混凝土本身仍保持完好,柱顶钢管与核心混凝土之间轴向变形明显,试验极限承载力接近但小于钢管全截面屈服承载力,表明轴向荷载基本由钢管承担,核心混凝土基本不承担竖向荷载,钢-核心混凝土共同工作性能差。②加载构造 A 的设分配梁试件,管壁局部鼓曲均发生在柱高中部以上位置,但位置具有随机性,核心混凝土破坏模式主要与分配梁截面的抗弯刚度有关,分配梁截面为 H200×100×10×10 的试件发生了混凝土压溃破坏,而分配梁截面为 H130×70×6×6 的试件核心混凝土未压碎。③加载构造 B 的设分配梁试件,均在加载梁下方钢管的较宽面发生局部屈曲破坏,核心混凝土均未压碎,与设分配梁截面 H200×100×10×10 但采用加载构造 A 的试件对比表明,“夹钳”效应对核心混凝土所承担的荷载有较大的影响。④设置分配梁加内环板的试件,钢管沿试件高度形成了连续屈曲波,且核心混凝土均发生压溃破坏。⑤仅设分配梁的试件,分配梁两端形成剪切屈服段,发生较大的塑性变形,部分试件的分配梁端部产生贯通的撕裂裂缝,而分配梁中间段变形不明显。⑥设置分配梁加内环板构造的试件,分配梁和内环板均未产生明显的塑性变形,见图 7d。

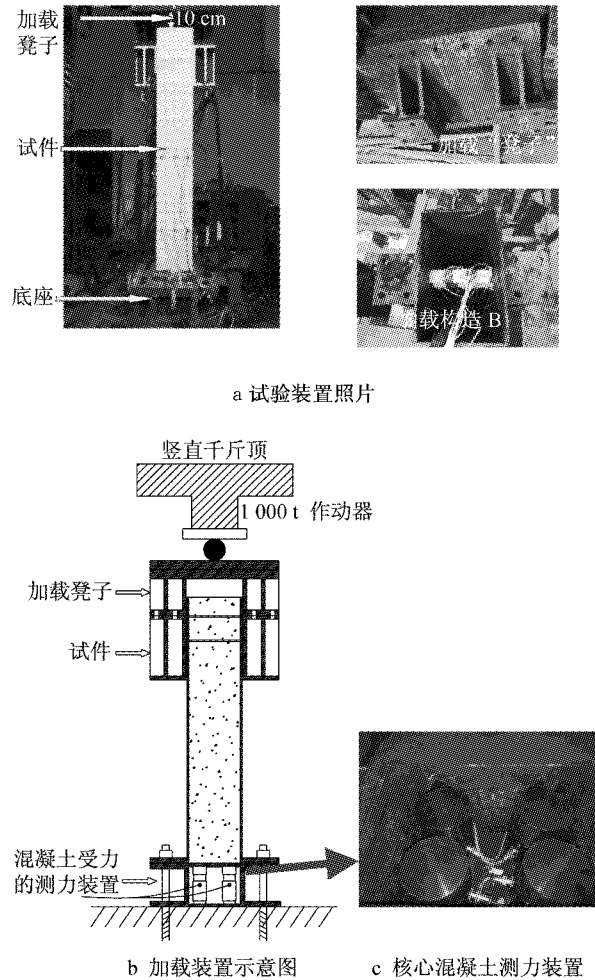


图 3 第 3 批试件试验装置

Fig. 3 Test setup for the 3rd batch of specimens

表 1 轴压试件设计参数表

Tab. 1 Parameters of specimens

批次	试件编号	钢管截面尺寸/ (mm×mm×mm)	分配梁截面尺寸/ (mm×mm×mm)	内环板截面尺寸/ (mm×mm)	钢管内壁是否 涂隔离油脂	试件高度/ mm	加载构造类型
第 1 批	LRCFT-6-1	450×300×6	无	无	是	2 700	加载构造 A
	LRCFT-6-2	450×300×6	无	无	否	2 700	加载构造 A
	LRCFT-6-H1	450×300×6	H200×100×10×10	无	否	2 700	加载构造 A
	LRCFT-6-H1+D1	450×300×6	H200×100×10×10	40×10	否	2 700	加载构造 A
第 2 批	LRCFT-6-H1+D1-S	450×300×6	H200×100×10×10	40×10	否	2 700	加载构造 A
	LRCFT-8-H1	450×300×8	H200×100×10×10	无	否	2 700	加载构造 A
	LRCFT-8-H2	450×300×8	H130×70×6×6	无	否	2 700	加载构造 A
	LRCFT-10-H1	450×300×10	H200×100×10×10	无	否	2 700	加载构造 A
	LRCFT-10-H2-1	450×300×10	H130×70×6×6	无	否	2 700	加载构造 A
第 3 批	LRCFT-10-H2-2	450×300×10	H130×70×6×6	无	否	2 100	加载构造 A
	LRCFT-10-H2-3	450×300×10	H130×70×6×6	无	是	2 100	加载构造 B
	LRCFT-10-H3-1	450×300×10	H150×100×6×8	无	是	2 100	加载构造 B
	LRCFT-10-H3-2	450×300×10	H150×100×6×8	无	是	2 100	加载构造 B
	LRCFT-10-H4	450×300×10	H100×50×6×6	无	是	2 100	加载构造 B
LRCFT-10-H5	450×300×10	H100×100×6×6	无	是	2 100	加载构造 B	

注:以典型试件 LRCFT-6-H1+D1-S 为例,6 代表管壁壁厚为 6 mm,H 代表分配梁截面类型,D 代表内环板,S 代表管壁内设纵向加劲肋。

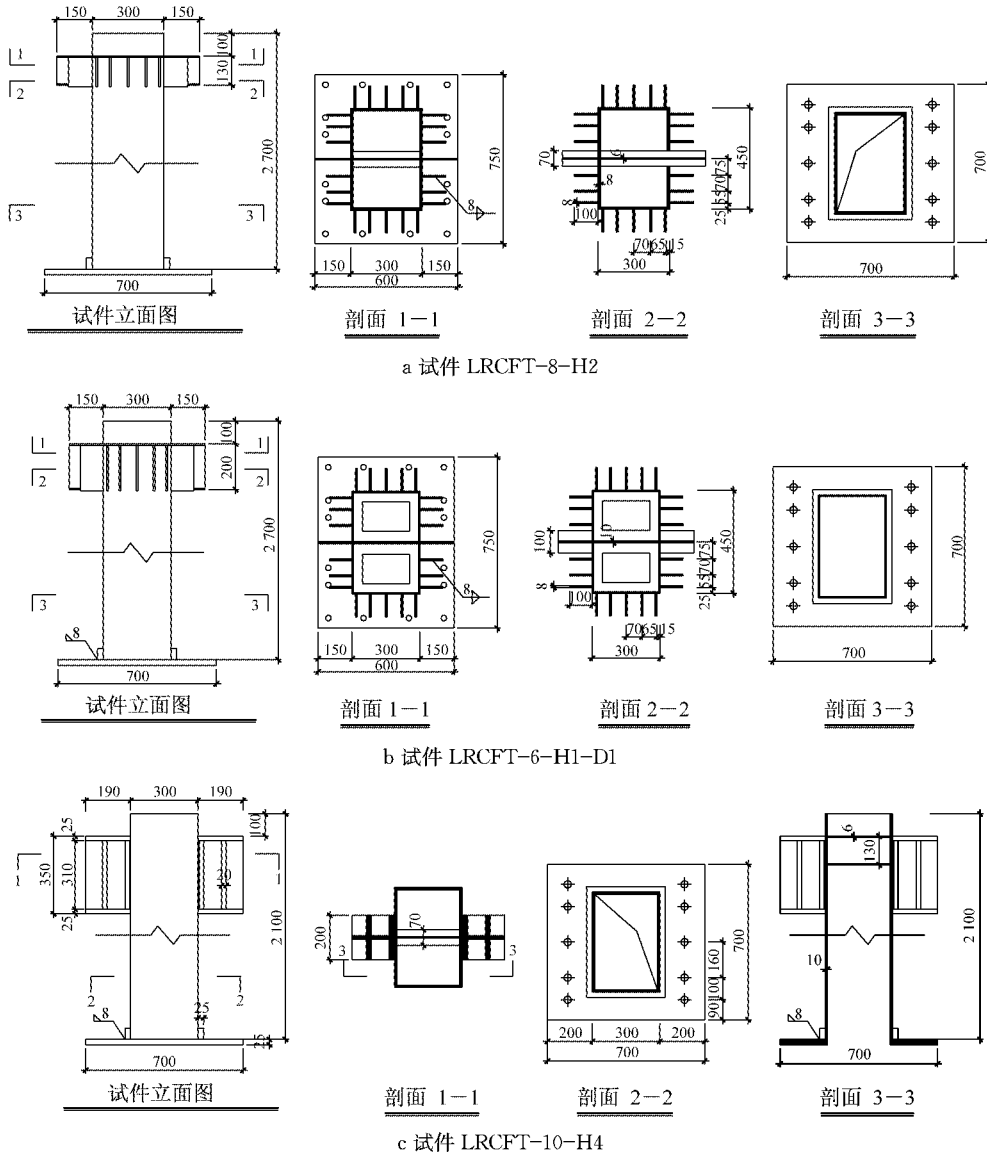


图 4 典型试件设计图 (单位:mm)

Fig. 4 Sizes of typical specimens (unit:mm)

3 分配梁受力分析

从分配梁破坏模式可以看出,分配梁均发生了剪切破坏,部分试件分配梁的上、下翼缘与钢管壁交界处发生了钢材撕裂破坏,分配梁腹板与管壁交界处观测到自底向上的撕裂裂缝.将分配梁与内环板结合设置后,混凝土发生了压溃破坏,而传力构造基本未产生变形.

为研究分配梁构造受力机理,第 3 批试件在分配梁腹板上布置埋入式应变片,根据三向应变片测量结果确定测点处的第 1、第 3 主应变及剪应变分布,三向应变片布置照片见图 8.

图 9 给出了第 3 批试件中典型试件的分配在

同轴压荷载阶段布置在梁腹板上应变花测量得到的第 1、第 3 主应变分布.分析图 9 中主应变发展规律可知,当轴压荷载达到 $0.3N_0$ 时,分配梁两端腹板逐渐进入塑性,轴向荷载为 $0.5N_0$ 时,分配梁两端腹板的第 1 主应变急剧增大,多处应变片失效,梁端进入剪切屈服.

图 10 根据第 3 批试件的分配梁腹板应变花测量结果,给出了轴向荷载 N 与腹板测点处的剪应变 γ 的关系和剪切屈服应变 γ_y ($\gamma_y = f_v/G = 0.58f_y/G$, 其中 f_v 为钢材抗剪强度, f_y 为钢材实测屈服强度, G 为钢材剪切模量, $G = 79 \times 10^3 \text{ Pa}$).由图 10 可知,随着轴向荷载 N 的施加,尽管各测点的剪应变差别较大,但曲线趋势基本一致,分配梁端腹板测点的 $N-\gamma$ 曲线有明显的拐点,剪应变 γ 逐渐增大,最终

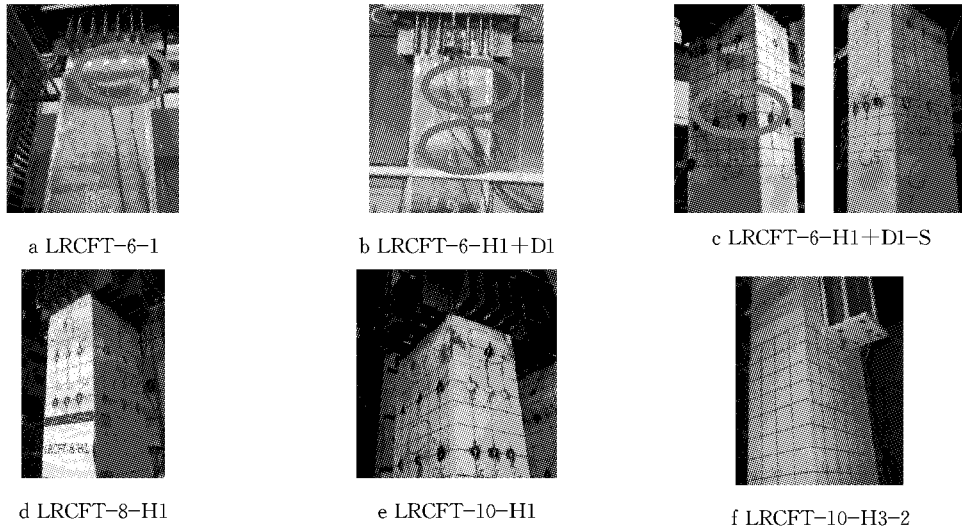


图 5 典型试件破坏模式

Fig. 5 Failure mode of typical specimens

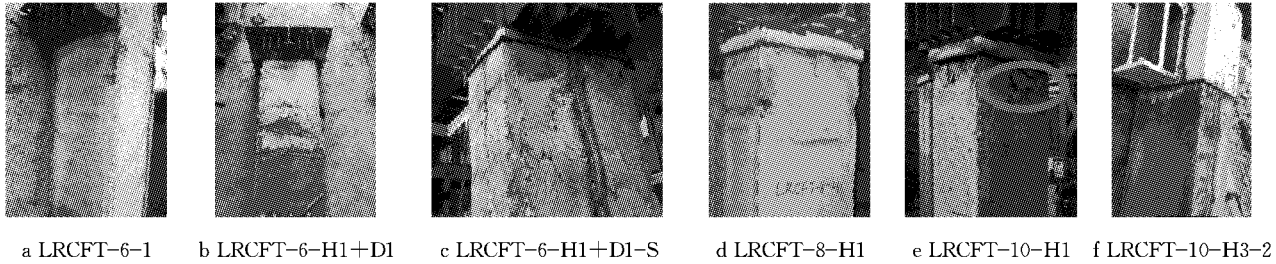


图 6 典型试件核心混凝土的破坏情况

Fig. 6 Failure mode of core concrete of typical specimens

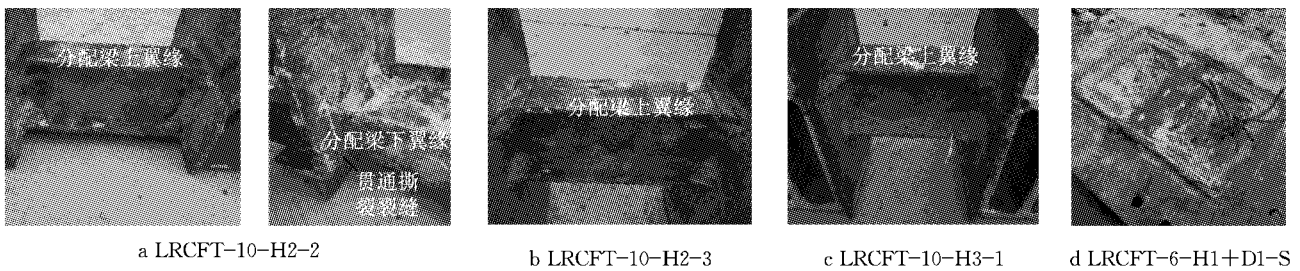
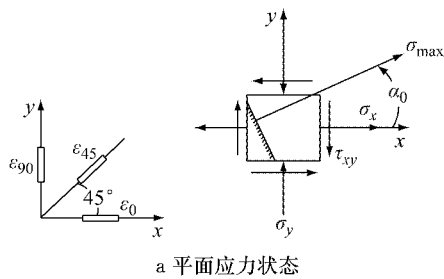
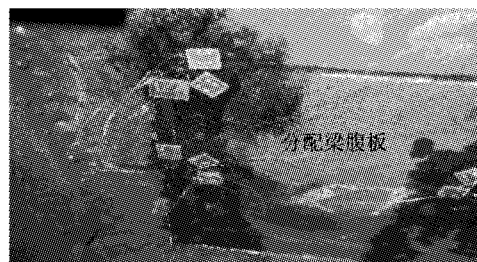


图 7 钢管内传力构造的破坏模式

Fig. 7 Failure mode of load transferring detailings



a 平面应力状态



b 应变花布置照片

图 8 三向应变片布置照片

Fig. 8 Arrangement of strain gauge

表 2 轴压承载力试验结果汇总

Tab. 2 Axial compression capacity of specimens

试件批次	试件编号	钢材屈服强度 f_y/MPa	混凝土轴心抗压强度 f_{ck}/MPa	首次鼓曲荷载/kN	试验极限承载力 N_u/kN	名义承载力 N_0/kN	分配梁破坏情况	混凝土是否压碎
第 1 批	LRCFT-6-1	380.3	43.9		3 274	8 905		否
	LRCFT-6-2	380.3	43.9		2 721	8 905		否
	LRCFT-6-H1	380.3	43.9		6 509	8 905	塑性破坏	否
	LRCFT-6-H1+D1	380.3	43.9		8 003	8 905	弹性,无变形	压碎
	LRCFT-6-H1+D1-S	286.8	33.2	8 367	8 507	7 072	弹性,无变形	压碎
第 2 批	LRCFT-8-H1	290.9	33.2	5 568	7 700	7 508	塑性破坏	出现压塑裂缝
	LRCFT-8-H2	290.9	33.2	4 978	6 628	7 508	塑性破坏	否
	LRCFT-10-H1	289.1	33.2	7 098	9 022	8 218	塑性破坏	压碎
	LRCFT-10-H2-1	289.1	33.2	6 892	8 009	8 218	塑性破坏	否
第 3 批	LRCFT-10-H2-2	355.5	33.0	7 319	7 873	9 163	塑性破坏	否
	LRCFT-10-H2-3	355.5	33.0	4 738	6 291	9 163	塑性破坏	否
	LRCFT-10-H3-1	355.5	33.0	4 953	7 035	9 163	塑性破坏	否
	LRCFT-10-H3-2	355.5	33.0	5 485	7 097	9 163	塑性破坏	否
	LRCFT-10-H4	355.5	33.0	4 878	5 790	9 163	塑性破坏	否
	LRCFT-10-H5	355.5	33.0	4 555	6 347	9 163	塑性破坏	否

注:根据我国规程^[6],定义名义承载力 $N_0=f_yA_s+f_{ck}A_c$, f_y 为钢材屈服强度实测值, A_s 为钢管截面积, f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度试验实测值, A_c 为核心混凝土截面积。

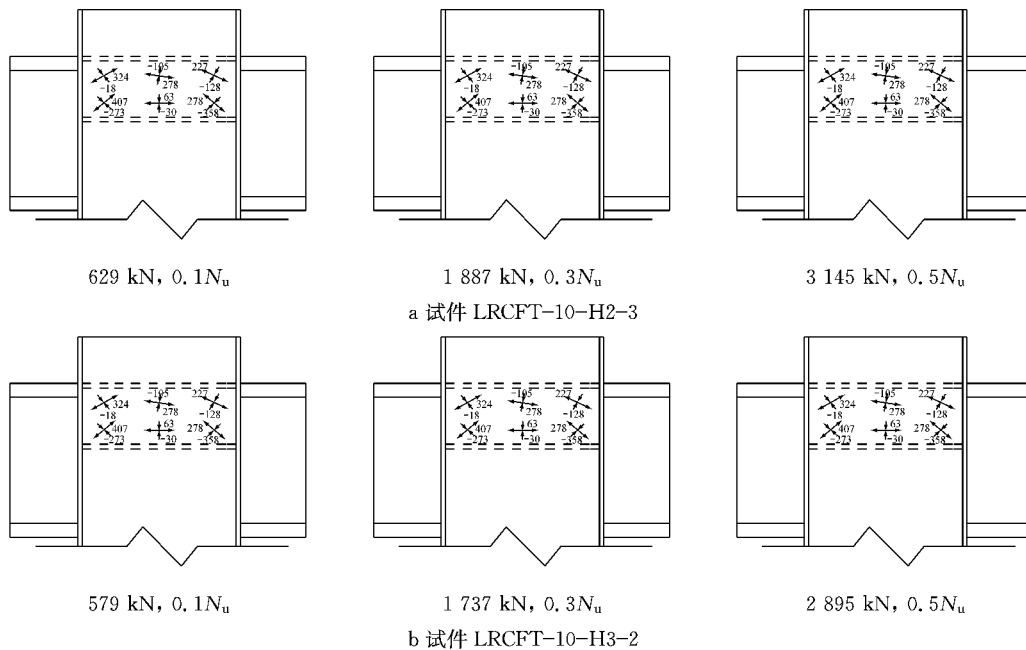


图 9 典型试件中分配梁腹板第 1、第 3 主应变(单位: 10^{-6})

Fig. 9 The first and third principal strain on the web of distributive beam set in specimens (unit: 10^{-6})

在梁端形成剪切塑性铰,而分配梁中间段基本保持在剪切弹性状态.图 10d、10e 因部分应变片失效,试件 LRCFT-10-H3-1 缺腹板左上和腹板左下的数据,试件 LRCFT-10-H3-2 缺腹板右下的数据.

4 巨型柱轴压承载性能影响因素分析

4.1 钢管-混凝土黏结作用的影响

为考察钢管-混凝土黏结作用对巨型钢管混凝土柱轴压承载性能的影响,在第 1 批试件中,设计了

试件 LRCFT-6-1 与 LRCFT-6-2,2 个试件唯一的差别是 LRCFT-6-1 在混凝土浇筑前,在钢管内壁涂油,以忽略黏结作用的影响,而 LRCFT-6-2 则不做任何处理,以考虑钢管-核心混凝土界面间自然黏结的影响,其他条件完全一致,且均不设置任何传力构造.图 11a 将 LRCFT-6-1 与 LRCFT-6-2 的轴向荷载位移($N-\Delta$)曲线进行了对比,因 LRCFT-6-2 出现了钢管焊缝撕裂的非正常破坏模式,导致其承载力比涂油的 LRCFT-6-1 试件承载力还低,但在曲线进入塑性阶段前, LRCFT-6-2 的弹性刚度高于

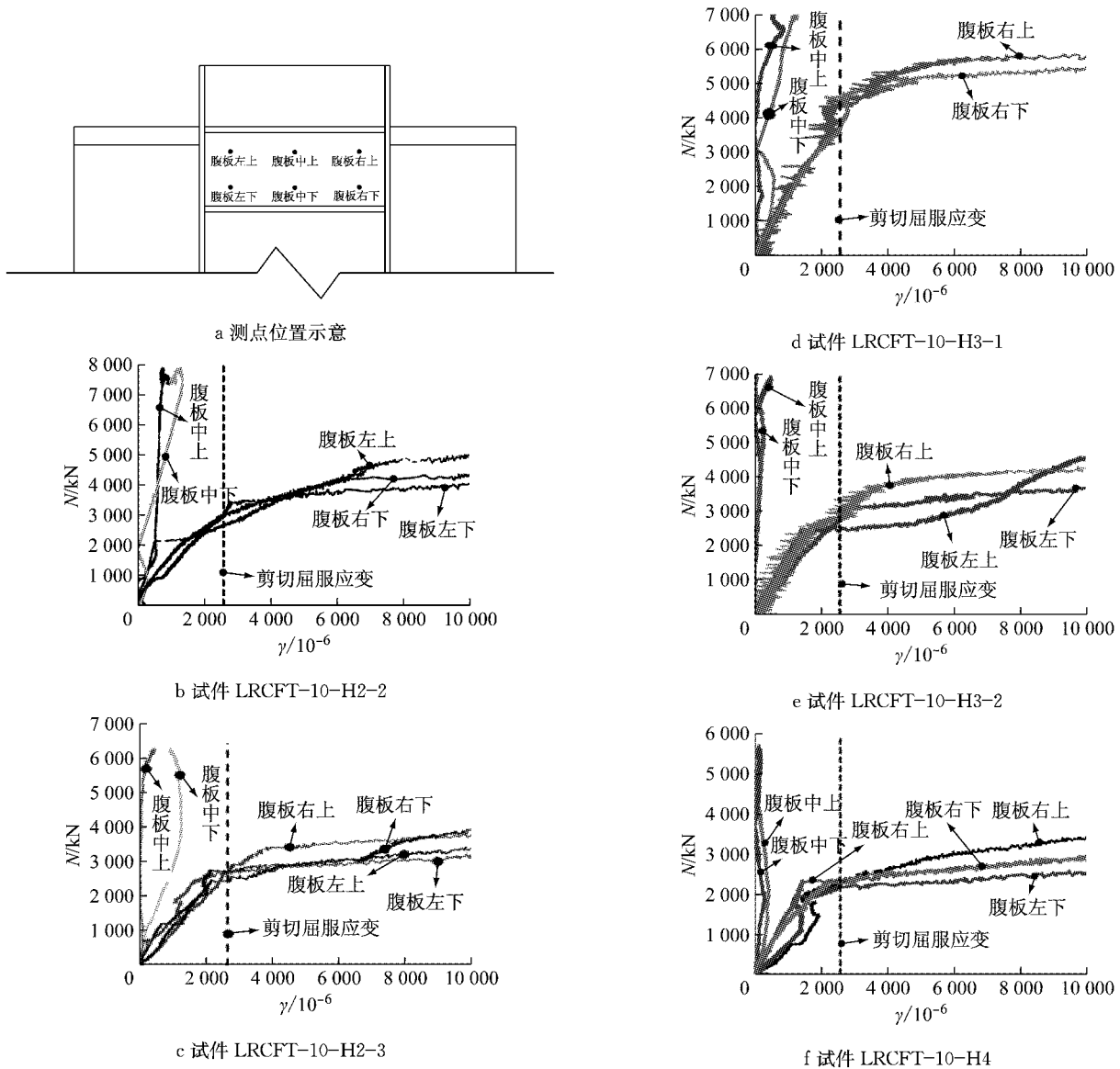


图 10 竖向荷载与分配梁腹板剪应变关系

Fig. 10 N versus γ

LRCFT-6-1,表明钢-混凝土黏结作用参与了轴向荷载传递.为进一步研究黏结作用对巨型钢管混凝土柱的轴压承载性能的影响,分别建立考虑和不考虑黏结作用的有限元模型进行计算,由图 11b 可知,黏结作用对巨型钢管混凝土柱轴压承载性能影响较小.

4.2 分配梁的影响

试件 LRCFT-6-1 与 LRCFT-6-H1 的唯一区别是前者不设分配梁而后者设分配梁.图 12 将 LRCFT-6-1 与 LRCFT-6-H1 的竖向荷载-位移曲线进行了对比.可以看出,2 个试件均表现出了良好的延性性能,钢管内设置分配梁的 LRCFT-6-H1 试件,极限承载力明显大于 LRCFT-6-1,表明分配梁可有效将作用在钢管壁上的力传递给核心混凝土,

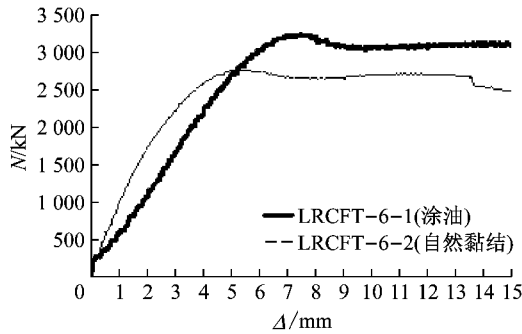
且远大于钢管-核心混凝土黏结作用的影响.

4.3 分配梁截面的影响

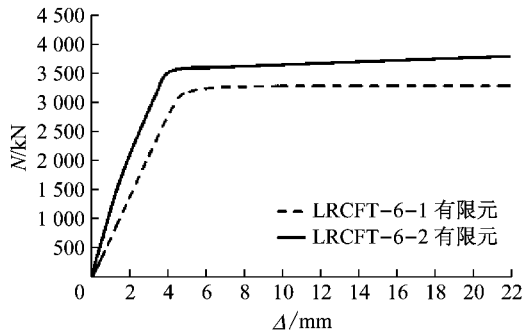
考虑到“夹钳”效应及黏结作用对混凝土承受内力的影响,同时考虑到第 1、2 批试件未直接测量混凝土承担的荷载,无法量化分配梁的荷载传递能力,因此,本小节仅对第 3 批设不同截面分配梁的试件进行对比分析.

第 3 批试件中除 LRCFT-10-H2-2 外,其余 5 根试件只是采用的分配梁截面不同,其余均相同.图 13 将第 3 批采用加载构造 B 的 5 根试件的试验竖向荷载-位移曲线、混凝土承担荷载-位移曲线、钢管承担荷载-位移曲线进行了汇总对比.图中,混凝土承担的荷载通过压力传感器测得,钢管承担荷载由试验机竖向力与压力传感器测力的差值得到.图中,试

件的名义承载力用虚线标出。



a LRCFT-6-1 与 LRCFT-6-2 试验荷载-位移曲线



b LRCFT-6-1 与 LRCFT-6-2 有限元荷载-位移曲线

图 11 LRCFT-6-1 与 LRCFT-6-2 轴压荷载-位移曲线对比
Fig. 11 Comparison of axial load-deformation curves between specimen LRCFT-6-1 and LRCFT-6-2

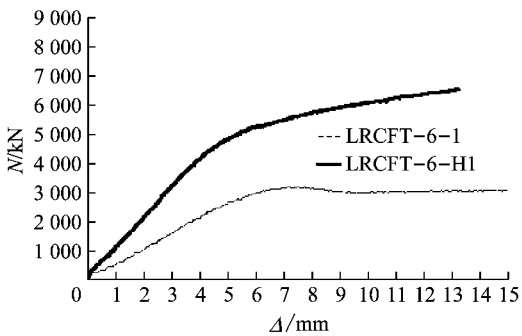
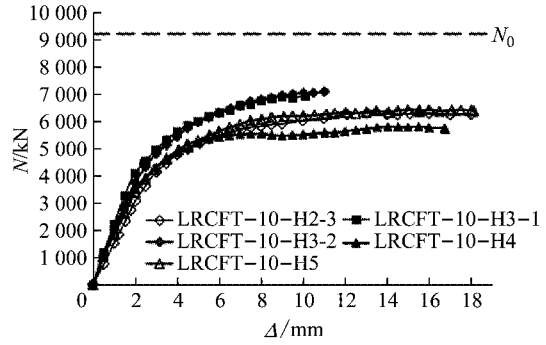
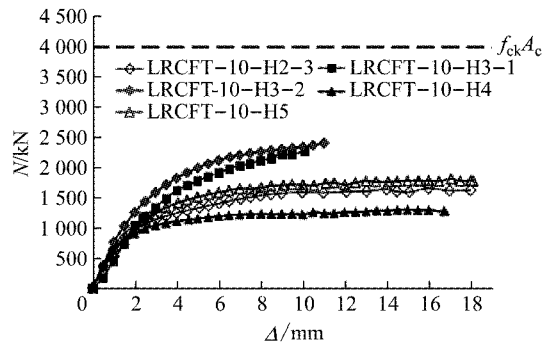


图 12 试件 LRCFT-6-2 与 LRCFT-6-H1 荷载-位移曲线
Fig. 12 Comparison of axial load-deformation curves between specimen LRCFT-6-2 and LRCFT-6-H1

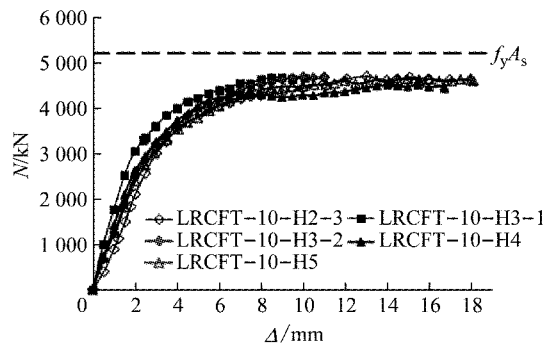
根据图 13 可以看出,①试件试验承载力均未达到轴压名义承载力.②为研究分配梁破坏模态及传力机制,第 3 批试件的分配梁特意取较小的截面,保证分配梁的塑性破坏发生在混凝土的压碎破坏之前.图中混凝土试验承担的荷载均未达到名义承载力,表明本文对分配梁截面尺寸的设计达到试验目的.③混凝土承担的荷载取决于分配梁横截面的大小.随着分配梁截面尺寸的增大,混凝土能够承担的荷载增大.分配梁塑性屈服后传递混凝土的荷载基



a 试验竖向荷载-位移曲线汇总



b 混凝土承担荷载-位移曲线汇总



c 钢管承担荷载-位移曲线汇总

图 13 第 3 批试件竖向荷载-竖向位移曲线汇总
Fig. 13 Axial load-deformation curves of the 3rd batches of specimens

本维持不变,因此在试验后期混凝土荷载-位移曲线呈现出水平段的特征.④设置加载构造 B 试件的钢管均未达到全截面屈服.主要原因是,加载梁下方的钢管实际上受到集中荷载作用,钢管非均匀受力导致其无法达到全截面屈服.⑤所有设置分配梁的试件均表现出良好的延性性能.通过前文对分配梁构造破坏模式的分析可知,在试验中分配梁的梁端产生明显的塑性变形.分配梁受力示意如图 14 所示,当竖向荷载施加在管壁上时,分配梁类似于“扁担”支撑在核心混凝土上.试验现象中试件顶部钢管与核心混凝土之间出现的相对滑移实质来源于分配梁在受力过程中产生的剪切塑性变形.本文试件良好的延性性能是基于分配梁在破坏之前较好的塑性变

形能力。

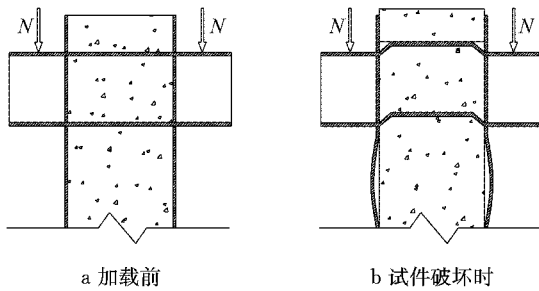


图 14 分配梁受力示意图

Fig. 14 Mechanism of distributive beam

4.4 不同传力构造的影响

试件 LRCFT-6-H1 与 LRCFT-6-H1+D1 的差别只是后者增设了内环板。图 15 将 LRCFT-6-H1 与 LRCFT-6-H1+D1 的竖向荷载-位移曲线进行了对比。由图 15 可以看出,与仅设置分配梁相比,将分配梁与内环板结合设置后,试件承载力显著增大。图 15 中,试件 LRCFT-6-H1+D1 荷载位移曲线出现了下降段,是由于核心混凝土发生了压溃破坏(根据试验现象确定,见图 6b)。

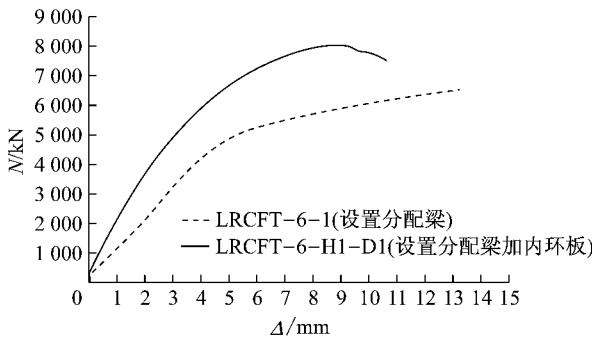


图 15 LRCFT-6-H1 与 LRCFT-6-H1+D1 荷载-位移曲线对比

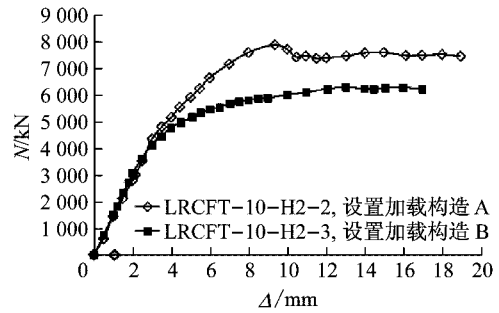
Fig. 15 Comparison of axial load-deformation curves between specimen LRCFT-6-H1 and LRCFT-6-H1+D1

4.5 “夹钳效应”的影响

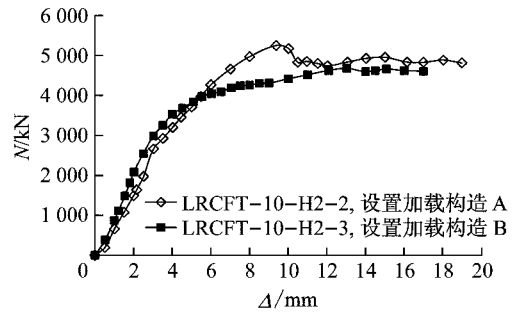
设置不同加载构造对混凝土承担力的影响主要取决于“夹钳”效应对混凝土承担荷载的影响。第 3 批试件特别针对这种情况进行了对比。图 17 分别将试件 LRCFT-10-H2-2 与试件 LRCFT-10-H2-3 竖向荷载-位移曲线、混凝土承担荷载-位移曲线以及钢管承担荷载-位移曲线进行了对比。图 16a、16b、16c 中的纵坐标 N 分别代表竖向总荷载、钢管承担的竖向荷载与核心混凝土承担的竖向荷载。

由图 16 可知,设置加载构造 A 的试件,混凝土承担的荷载明显高于设置加载构造 B 的试件,高出约 1 000 kN 左右。以上结果表明第 3 批试件采用

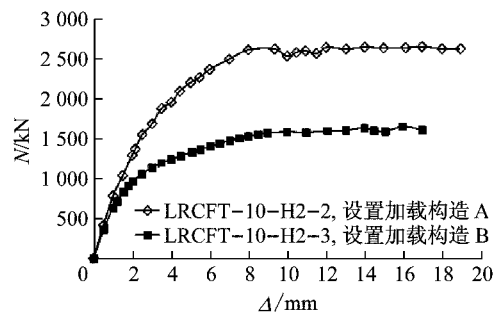
加载构造 B 及在钢管内壁涂油措施后明显减小了“夹钳”效应的不利影响,为量化分配梁传递竖向荷载的能力提供了可用的数据。设置加载构造 B 之后,钢管由于受到集中荷载导致无法达到全截面屈服。因此,试件 LRCFT-H2-3 的钢管极限承载力也小于试件 LRCFT-H2-2。



a 轴向荷载-位移曲线



b 钢管承担的轴向荷载-位移曲线



c 混凝土承担的竖向荷载-位移曲线

图 16 LRCFT-10-H2-2 与 LRCFT-10-H2-3 荷载-位移曲线对比

Fig. 16 Comparison of axial load-deformation curves between specimen LRCFT-10-H2-2 and LRCFT-10-H2-3

5 结论

(1) 轴压系列试验主要针对分配梁构造和分配梁加内环板构造两种传力措施展开。从试件破坏模式可以得出,分配梁发生剪切破坏,在梁端区域形成剪切屈服段,大部分塑性变形在剪切屈服段产生,分配梁剪切屈服段以外区域的塑性变形不明显;部分

试件分配梁梁端腹板及上、下翼缘出现贯通撕裂裂缝;分配梁加内环板构造未破坏。

(2) 对比自然黏结与设分配梁的试件,可知在钢管内设置分配梁构造后,试件的极限承载力显著增大,分配梁将作用在钢管壁上的力传一部分给核心混凝土,使核心混凝土也参与承担一部分工作。从比较中可以看出,分配梁所起的作用远大于黏结强度所起的作用,可以说明采用分配梁这种传力构造形式是十分有效的。

(3) 通过分析得出,当竖向荷载施加在管壁上时,分配梁类似于“扁担”支撑在核心混凝土上。试验现象中试件顶部钢管与核心混凝土之间出现的相对滑移实质来源于分配梁在受力过程中产生的剪切塑性变形。当仅考虑分配梁构造传力时,混凝土承担的荷载取决于分配梁传递荷载的能力与分配梁下方局部混凝土的承压能力。随着分配梁截面尺寸的增大,混凝土能够承担的荷载增大。

(4) 试件 LRCFT-6-H1 与 LRCFT-6-H1+D1 的差别只是后者增设了内环板。通过对比 LRCFT-6-H1 与 LRCFT-6-H1+D1 的竖向荷载-位移曲线可以看出,与仅设置分配梁相比,将分配梁与内环板结合设置后,试件承载力显著增大。

(5) 设置加载构造 A 的试件,混凝土承担的荷载明显高于设置加载构造 B 的试件,高出约大 1 000 kN 左右,表明第 3 批试件采用加载构造 B 及在钢管内壁涂油措施后明显减小了“夹钳”效应的不利影响,为量化分配梁传递竖向荷载的能力提供了可用的数据。

参考文献:

- [1] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete and commentary [R]. Detroit: American Concrete Institute, 2008.
- [2] American Institute of Steel Construction, INC. Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360 - 10 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [3] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [4] Architectural Institute of Japan. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures[R]. [S. l.]: Architectural Institute of Japan, 2008.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土结构技术规范:GB50936—2014 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014. The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code of concrete filled steel tubular structures:GB50936—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [6] 中国工程建设标准化协会. 矩形钢管混凝土结构技术规程:CECS159:2004 [S]. 北京:中国标准出版社,2004. China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tubular member: CECS159: 2004 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [7] 中国工程建设标准化协会. 钢管混凝土结构技术规程:CECS28:2012 [S]. 北京:中国计划出版社,2012. China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for concrete-filled steel tubular structures: CECS28: 2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [8] 傅学怡,李元齐,雷敏,等. 超大截面矩形钢管混凝土柱钢-混凝土共同工作合理构造措施试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46 (12):33. FU Xuanyi, LI Yuanqi, LEI Min, *et al.* Experiment study on reasonable detailing requirements to guarantee cooperating between steel tube and concrete in large rectangular section concrete-filled steel tubular columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(12):33.
- [9] 罗金辉,李元齐,沈祖炎,等. 巨型钢管混凝土柱钢-混凝土共同工作构造数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(10):1447. LUO Jinhui, LI Yuanqi, SHEN Zuyan, *et al.* Numerical simulation on reasonable detailing requirements to guarantee cooperating between steel tube and concrete in large rectangular section concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41 (10):1447.
- [10] 罗金辉,李元齐,张元植,等. 超大截面钢管混凝土柱分配梁构造节点下轴压荷载传递试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47 (10):50. LUO Jinhui, LI Yuanqi, ZHANG Yuanzhi, *et al.* Experimental research on axial compression load transfer of large rectangular-section CFT columns with distributive beam embedded in beam-column joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10):50.
- [11] 张元植,李元齐,罗金辉,等. 超大截面钢管混凝土柱分配梁构造节点下压弯构件承载试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47 (11):45. ZHANG Yuanzhi, LI Yuanqi, LUO Jinhui, *et al.* Experimental study on load-carrying behavior of large-section CFT columns with distributive beam and inner diaphragm detailing in joints under compressing and bending loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11):45.
- [12] 张元植,李元齐,罗金辉,等. 巨型钢管混凝土柱分配梁构造下竖向荷载传递机理研究 (I): 试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(11):1. ZHANG Yuanzhi, LI Yuanqi, LUO Jinhui, *et al.* Compression load transfer mechanism of distributive beam detailings in large-section CFT columns (I): experiment study [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(11):1.
- [13] 张元植,李元齐,罗金辉,等. 巨型钢管混凝土柱分配梁构造下竖向荷载传递机理研究 (II): 数值分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49 (12):16. ZHANG Yuanzhi, LI Yuanqi, LUO Jinhui, *et al.* Compression load transfer mechanism of distributive beam detailings in large-section CFT columns (II): numerical simulation [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(12):16.