

DOI:10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202604005

内置传力芯柱的钢管混凝土柱脚力学性能研究

薛红京¹,王啸辰^{2*},张国伟³,束伟农¹,蔡青¹,刘静洋¹

(1.北京建筑设计研究院股份有限公司,北京 100045;

2.中国建筑科学研究院有限公司,北京 100013;

3.北京建筑大学 土木与交通工程学院,北京 100044)

摘要:针对传统埋入式柱脚施工繁琐、经济性差及外露式柱脚抗震性能不足等问题,提出一种内置传力芯柱的钢管混凝土(concrete-filled steel tube,CFST)柱脚。该构造通过在钢管内部设置钢筋混凝土核心柱,并与内壁栓钉协同工作,从而形成高效组合传力机制。为系统评估CFST柱脚力学性能,采用1:4缩尺拟静力试验与精细化有限元模拟,研究了其破坏模式、滞回特性及抗震性能,并与同规格外露式及埋入式柱脚进行对比。结果表明:CFST柱脚的受力机制类似于钢筋混凝土结构,破坏过程呈现明显塑性发展特征,最终破坏模式为柱脚区域混凝土压溃及内部纵筋屈服,表现出典型的延性破坏特征。与外露式柱脚相比,CFST柱脚的承载力与延性显著提升,骨架曲线下降平缓,累计耗能能力增幅超过130%,刚度退化更为缓慢,综合抗震性能得到实质性改善。与埋入式柱脚相比,CFST柱脚的极限承载力基本相当,但在大变形阶段其承载力保持率达92%,有效避免了因局部屈曲引发的脆性破坏,展现出更优越的延性性能和抗倒塌能力。此外,CFST柱脚采用外露式构造,避免了深埋作业,在确保良好抗震能力的同时显著简化了施工流程,降低了工程造价。该研究为钢结构柱脚提供了一种兼具技术先进性与经济可行性的新型解决方案。

关键词:CFST柱脚;拟静力试验;有限元模拟;力学性能;破坏模式

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:2097-2741(2026)04-0071-13

钢结构凭借其高强度、自重轻及良好延性等优势,已成为大跨度建筑和高烈度抗震设防区的主流结构形式。柱脚作为上部结构与基础之间的关键传力节点,其力学性能直接影响整体结构的承载机制与抗震行为^[1]。根据受力特征,柱脚通常划分为刚接与铰接两类。刚接柱脚能够可靠传递弯矩、剪力及轴力,因而在对变形敏感的高层与大跨度结构中应用广泛。工程中常见的刚接柱脚主要以埋入式连接为典型构造。

《组合结构设计规范》JGJ 138—2016^[2]对埋入式柱脚的设计方法作出了系统规定,其中埋置深度

作为控制应力传递的关键参数,对保证承载性能与构造合理性至关重要。围绕该参数,王燕^[3]指出,当埋深达到2~3倍截面高度时可有效控制节点变形。杨建等^[4-5]发现柱脚抗侧刚度随埋深增加而提高,但当埋深比超过2.5后,刚度增益趋于平缓。金党耀等^[6]试验表明埋深达到2.5倍截面高度时可充分发挥节点传力机制。Grilli等^[7]重点分析了埋深对抗震性能的影响规律。王桢希等^[8]研究了埋深比与栓钉配置对柱脚滞回性能的影响,发现耗能能力随埋深比增大而提升。胡卫中等^[9]研究表明埋深比由1.0增加至1.5时,可有效提高极限承载力。鉴于

收稿日期:2026-01-28

修回日期:2026-02-26

录用日期:2026-04-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3801800);国家自然科学基金项目(52478166)

第一作者:薛红京(1973—),男,正高级工程师,主要从事建筑结构设计与研究。

*通信作者:王啸辰(2000—),男,硕士研究生,主要从事建筑结构设计与研究。

引用格式:薛红京,王啸辰,张国伟,等.内置传力芯柱的钢管混凝土柱脚力学性能研究[J].火箭军工程大学学报,2026,40(4):71-83.
XUE Hongjing, WANG Xiaochen, ZHANG Guowei, et al. Mechanical performance of concrete-filled steel tube column bases with a load-transfer core [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(4): 71-83.

埋入式柱脚的弊端,学者们对其进行了改进,Inamasu 等^[10-12]通过在埋入段设置截面削弱区并粘贴耗能材料,提高了埋入式柱脚的延性。Tan 等^[13]通过在钢管埋入段增加加强梁,提高了埋入式柱脚的抗剪性能。然而在实际施工中,埋深通常难以精确保证,尤其是位于核心区的深层地下交通枢纽,该问题尤为突出^[14],且该类柱脚存在工艺复杂、造价高及后期维护困难等问题^[15]。

随着工程实践对承载力和抗震性能要求的不断提高,钢-混组合埋入式柱脚诞生,多用于桥梁工程中^[16]。Chen 等^[17]研究结果表明,纤维材料及钢管共同对内部混凝土柱进行约束,可提高其极限承载力。Yang 等^[18]发现钢管壁厚对混凝土柱的约束呈正相关。Cai 等^[19]试验表明,加厚钢管可延缓刚度衰退和强度衰退。Liu 等^[20]发现,截面宽厚比与钢管约束效果呈负相关。综上所述,钢-混凝土组合柱脚在极限承载力与延性方面均有显著提升,但其本质上仍属于埋入式柱脚。因此,埋入深度对其抗震性能的影响依然是不可忽视的关键因素。

外露式柱脚作为铰接式柱脚,具有构造简单、施工便捷的优点。然而,其抗震性能高度依赖锚栓的力学行为,易出现局部破坏甚至诱发连续性倒塌^[21]。基于此,学者们提出摇摆柱脚,在外露式柱脚的基础上增设耗能单元,弥补其缺陷。崔瑶等^[22]对外露式柱脚增设保险丝,提高了柱脚的抗震性能及自复位能力。薛凯等^[23]通过增设两层底板实现了双屈服机制,结果表明底板厚度与柱脚耗能呈正相关。陈刚等^[24]将外露式柱脚中的锚栓与阻尼器结合,其抗变形及耗能能力得到提升。Li 等^[25]通过端板摩擦耗能代替外露式柱脚屈服耗能,可使柱脚达到无损耗能。李国强等^[26]提出一种可更换耗能摇摆钢柱柱脚节点,可提高柱脚的抗拔承载力和延性。上述研究表明,外露式柱脚的抗震机制与埋入式存在本质区别,如今多通过增设耗能单元、应用纤维增强材料、转变为可修复节点来弥补其缺点^[27-30],但其抗震性能仍普遍低于埋入式构造。

基于埋入式柱脚以及外露式柱脚的缺陷,多位学者综合两者优点,提出在减小埋置深度的基础上,保持柱脚的刚性连接。张素梅等^[31]以深圳岗厦北综合交通枢纽为工程实例对半埋入式柱脚进行了拟静力试验,结果表明该连接方式在 1.2 倍设计荷载工况下,其刚度未出现显著衰退,满足结构安全要求。宋志文^[32]的研究表明,半埋入式型钢混凝土柱柱脚刚度优良,极限承载力为设计承载力的

3.3 倍。Rehmat 等^[33]通过用超高性能混凝土代替埋入段钢管周边混凝土以达到减小埋置深度的目标。Khateeb 等^[34]通过在承台底部设置预埋钢管,与埋入段钢管进行机械连接的方式降低埋深。除结构形式研究以外,低埋深比柱脚受力计算方法也得到同步发展。赵宪忠等^[35]提出一种针对低埋深比柱脚的转动刚度预测模型,相较于传统模型,计算精度提高了 23%。张一爽等^[36]提出了外包式钢柱脚的压弯剪承载力计算方法及相关构造要求。综合而言,外包式柱脚作为半埋入式连接的主要构造形式应用于多项工程中^[37-38]。

钢结构柱脚的连接方式多样,学者们对其进行了对比研究。吴庆雄等^[39]研究结果表明,埋入式连接的柱脚具有优良的耗能能力,但延性较差,外露式及外包式耗能能力相较埋入式降低,但延性提高。蔡新江等^[40]发现刚性连接柱脚抗震性能最优但延性差,外露式柱脚变形能力强但抗震性能较差。综上所述,埋入式柱脚抗震性能最优但延性差且因埋深过大导致施工复杂、造价偏高;外露式柱脚虽施工便利但抗震性能不足;外包式柱脚介于两者之间表现出较好的综合性能。

针对上述传统柱脚各自存在的局限,提出一种内置传力芯柱的钢管混凝土(concrete-filled steel tube, CFST)柱脚。该构造融合埋入式柱脚的抗震性能与外露式柱脚的施工便利性,在简化施工、节约造价的同时,确保结构具备良好的抗震能力。其设计理念参考埋入式柱脚的传力机制,采用内部混凝土填充的连接方式,在柱身根部区域灌注混凝土,使承台与柱身内部混凝土形成整体连接,从而有效传递弯矩与剪力;同时,在内部浇筑混凝土中配置钢筋笼,将其下端锚固于承台,形成内置钢筋混凝土柱,进一步增强柱脚刚度。此外,在钢管内壁按一定环向与竖向间距焊接栓钉,使其与内部混凝土形成机械咬合,确保在地震作用下钢管与混凝土协同工作,提高连接强度与整体稳定性。CFST 柱脚的具体构造如图 1 所示。

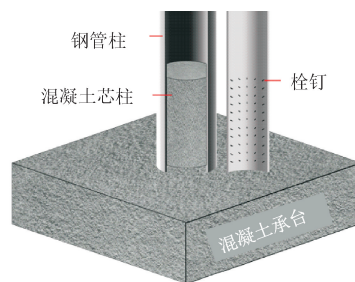


图 1 CFST 柱脚结构

Fig. 1 Structure of CFST column bases

图 1 中,在钢管内部绑扎钢筋笼,依据《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002^[41]相关要求,钢筋笼主筋需下插入混凝土承台 40 倍主筋直径距离,钢管内壁均匀排布栓钉。

本文通过试验研究、理论分析与数值模拟相结合的方法,系统评估 CFST 柱脚的抗震性能,并与同规格外露式、埋入式柱脚进行对比,为该新型柱脚的工程应用提供试验依据与理论支持。

1 CFST 柱脚试验设计

1.1 CFST 柱脚试件

CFST 柱脚试件以某机场航站楼过渡区分叉柱为原型结构,该柱由两根平行的空心钢管构成,直径为 1 500 mm,一级分叉柱高为 3 000 mm,采用 Q460 钢材制作,并通过埋入式柱脚与基础连接。分叉柱的结构示意如图 2 所示。

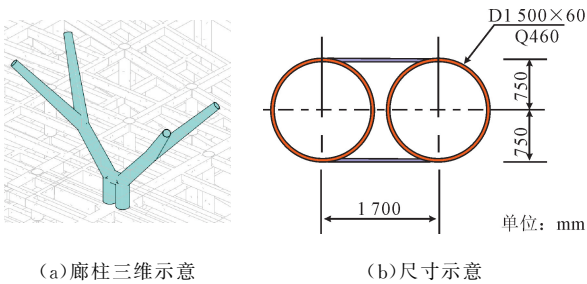


图 2 某机场廊柱示意
Fig. 2 Schematic of an airport corridor column

受试验条件限制,试件未完全复现原型廊式分叉柱构造,采用 1:4 缩尺比的独立钢管柱脚进行设计。试件承台尺寸为 2 050 mm×1 550 mm×1 000 mm,其长轴方向作为拟静力加载方向,以保证试验过程中的稳定性。钢管柱高度与直径分别缩尺为 750 mm 与 375 mm。

在混凝土浇筑工艺方面,承台浇筑阶段需控制混凝土在钢管内上返一定高度,以形成内置混凝土柱。依据《组合结构设计规范》JGJ 138—2016^[2],该上返高度不宜小于 1.5 倍柱截面尺寸。本设计取灌注高度为 637.5 mm,与钢管直径之比为 1.7,采用 C50 混凝土浇筑,以满足与埋入式柱脚相当的抗震性能要求。

缩尺前钢管内壁栓钉为 $\Phi 22$,长度 120 mm,竖向与环向间距均为 200 mm。缩尺试件栓钉以 $\Phi 6$ HRB400 型钢筋替代,在竖向与环向间形成间距为 50 mm 的等效栓钉群。最底排栓钉距管底 25 mm,

沿竖向均匀分布至混凝土顶面。为模拟栓钉的光圆界面特性,对钢筋表面进行了打磨处理,如图 3 所示。

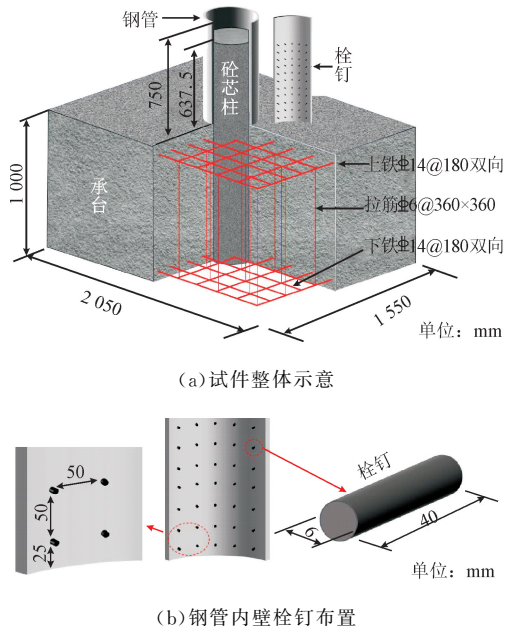


图 3 CFST 柱脚试件
Fig. 3 CFST column base specimens

底部承台配置双层双向钢筋网,并通过梅花形布置的拉结筋连接为整体。柱脚钢筋笼设置间距 50 mm 的约束箍筋,主筋下插深度为 640 mm,满足规范中对锚固长度不小于 40 倍主筋直径的要求;竖筋根部设有 50 mm 的水平弯折段,以增强锚固效果。

在承台埋入段设置 3 道固定箍筋,第 1 道箍筋距混凝土界面 50 mm,第 2 道与第 3 道箍筋分别设置于深度 320 mm 和 640 mm 位置。材料参数如表 1 所示,试件配筋构造如图 4 所示。

构件名称	材料强度	尺寸/mm
柱主筋	HRB400	16
柱箍筋	HRB400	6
承台钢筋网	HRB400	14
承台拉结筋	HRB400	6
钢管	Q460D	750×375×15
栓钉	HRB400	6×40
承台混凝土	C50	2 050×1 550×1 000
柱混凝土	C50	345×637.5

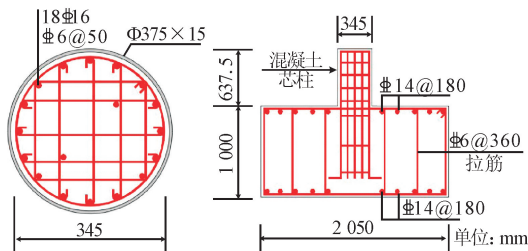


图 4 CFST 柱脚配筋示意

Fig. 4 Schematic of CFST column base reinforcement

1.2 加载制度及测量方案

试验加载程序依据《建筑抗震试验规程》JGJ/T 101—2015^[42]执行,分为预加载与正式加载两个阶段。预加载阶段对 CFST 试件施加层间位移角为 $1/800$ (对应侧向位移 $\Delta = 0.9375 \text{ mm}$) 的水平位移,以检验测试仪器工作状态及加载系统的可靠性。确认系统运行正常后,进入正式加载阶段。

正式加载阶段采用位移控制方式,层间位移角从 $1/400$ ($\Delta = 1.875 \text{ mm}$) 逐步增大至 $1/12$ ($\Delta = 62.5 \text{ mm}$)。加载制度具体设置为:当层间位移角不超过 $1/250$ ($\Delta \leq 3 \text{ mm}$) 时,每个位移幅值进行单次循环;超过该值后,每个位移幅值均进行 3 次循环加载。试验持续进行至达到最大设定位移角 $1/12$ 为止。具体加载制度如图 5 所示。

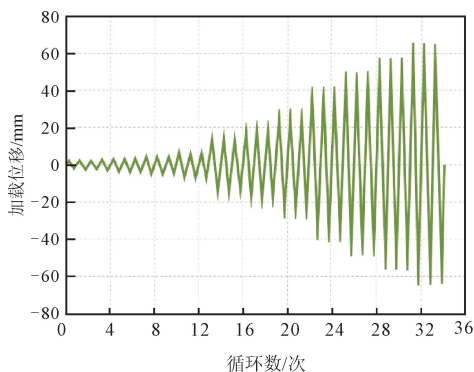


图 5 加载制度

Fig. 5 The loading system

试验过程中共布置 8 个位移计,用于监测 CFST 柱脚试件在荷载作用下的关键位移响应。承台部位设置 4 个位移计:CT-1 与 CT-2 分别布置于加载方向两侧,用于监测承台水平侧移;CT-3 与 CT-4 布置于承台边缘,用于监测混凝土可能出现的抬升现象。钢管侧共设置 4 个位移计,其中,GG-1 ~ GG-3 沿加载方向分别布置于钢管顶部、中部与底部,用于测量柱身整体侧移。根据预估位移范围,三者量程分别选用 200 mm 、 100 mm 与 50 mm ;

GG-4 则固定于顶部 T 型连接板表面,用于监测钢管在往复荷载作用下的潜在滑移或抬升趋势。位移计布置如图 6 所示。

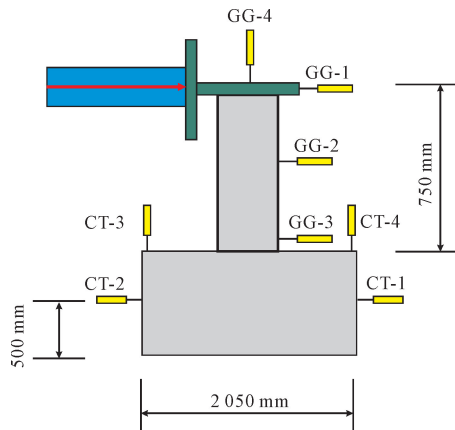


图 6 位移计布置

Fig. 6 Displacement transducer layout

2 CFST 柱脚试验现象

按照 1.2 节的加载制度对试件进行试验,试验破坏现象如图 7 所示。CFST 柱脚试件在拟静力循环荷载作用下的破坏过程表现出明显的阶段性发展特征。试验初期,当层间位移角小于 $1/200$ ($\Delta < 3.75 \text{ mm}$) 时,试件处于弹性工作阶段,未观察到任何可见损伤。随着位移幅值增大至 $1/150$ ($\Delta = 5 \text{ mm}$),钢筋笼中部首先进入屈服状态,标志着试件开始进入弹塑性工作阶段。当位移角达到 $1/100$ ($\Delta = 7.5 \text{ mm}$) 时,钢管底部混凝土保护层出现环向裂缝,但承台主体仍保持完好。位移继续增大至 $1/50$ ($\Delta = 15 \text{ mm}$) 时,钢管底部混凝土出现贯通环缝,表明钢管与承台开始产生分离趋势。这一阶段可观察到钢管轻微倾斜现象,并伴有混凝土压碎声响。在位移角达到 $1/40$ 至 $1/30$ ($\Delta = 18.75 \sim 25 \text{ mm}$) 范围内,试件破坏特征显著发展,钢管底部混凝土完全碎裂,内部连接区域出现明显滑移,呈现整体拔出的变形模式。当位移达到 $1/20$ ($\Delta = 37.5 \text{ mm}$) 时,钢管以受压侧为支点产生显著转动,受拉侧明显翘起,同时承台表面裂缝网络持续扩展。试验后期,位移角处于 $1/16 \sim 1/12$ ($\Delta = 46.875 \sim 62.5 \text{ mm}$) 时,试件破坏加剧钢管底部混凝土大面积剥落,钢筋陆续断裂,承台表层混凝土严重碎裂。最终,当位移角达到 $1/12$ 时,试件出现显著变形,承台表面出现大面积片状碎块。值得注意的是,在整个破坏过程中,钢管本体和顶部连

接件始终保持良好工作状态。



图 7 CFST 试件破坏现象

Fig. 7 Failure modes of CFST specimens

3 CFST 柱脚滞回性能分析

CFST 柱脚试件在拟静力循环加载作用下的滞回曲线如图 8 所示。在试验初期,当层间位移角不大于 $1/150$ 时,滞回曲线呈典型弓形,滞回环面积较小且对称性良好,表明试件处于弹性工作阶段。该阶段荷载主要由钢管底部承担,表现出较高的初始刚度,但耗能能力有限。

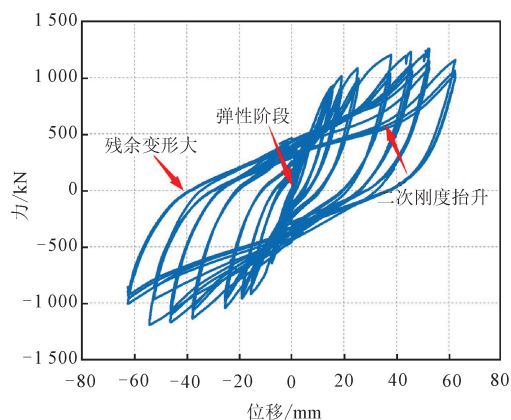


图 8 CFST 试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of CFST specimens

随着位移角增大至 $1/100$,柱脚钢筋笼开始屈服,滞回曲线出现明显捏拢现象,残余变形逐步累积,结构进入弹塑性工作状态。当位移达到 $1/50$ 时,滞回环面积显著增大,曲线呈现饱满的弓形,结构刚度有所退化而承载力持续上升,表现出良好的塑性变形能力和能量耗散性能。

在层间位移角为 $1/40 \sim 1/30$ 阶段,滞回曲线呈现明显的非对称发展特征,正向加载刚度基本稳定,而反向刚度显著退化,这与钢管底部钢筋的非对称屈服行为密切相关。当位移角达到 $1/20$ 时,曲线出现刚度二次强化现象,这源于钢管底部与承台接触面产生的附加约束效应,该现象与试件观测到的以受压侧为支点,受拉侧翘起的变形模式高度吻合。

在层间位移角为 $1/14$ ($\Delta = 53.6 \text{ mm}$) 时 CFST 柱脚试件达到峰值承载力,正向为 1256 kN ,反向为 1195 kN ,此时累积残余变形达 33 mm 。进入最终阶段(位移角 $1/12$),随着内部钢筋混凝土柱底部压溃及钢筋断裂,滞回环面积明显萎缩,承载力呈不对称退化趋势,正向承载力降至峰值的 92% ,反向降至 88.4% ,反映了试件在往复荷载作用下损伤累积的定向发展特征。

整个滞回过程表明,CFST 柱脚试件具备良好的塑性变形能力与稳定的耗能机制。根据试验数据绘制了 CFST 柱脚试件的骨架曲线,如图 9 所示。整体来看,骨架曲线变化连续、形态饱满,表现出良好的延性特征。在层间位移角不大于 $1/100$ 阶段,试件基本处于线弹性工作状态。当位移角增大至 $1/100 \sim 1/50$ 时,柱脚底部钢筋笼中部分钢筋开始屈服,试件进入塑性阶段,承载力仍保持较快增长。

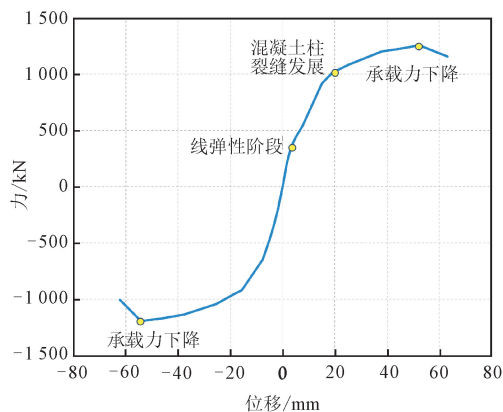


图 9 CFST 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curve of CFST specimens

随着位移进一步增大至 $1/50 \sim 1/20$,钢筋笼中多数钢筋相继屈服,同时钢管底部周边混凝土出现片状剥落,导致试件刚度进一步退化,骨架曲线斜率明显降低。在位移角为 $1/20 \sim 1/14$ 范围内,CFST 柱脚试件的承载力增长趋缓,并于位移角为 $1/14$ 时达到峰值承载力 1256 kN 。

当位移角继续增大至 $1/12$ 时,试件承载力开始

下降,由顶峰的 1 256 kN 降低至 1 155 kN,降幅约为 8%。值得指出的是,在达到最大弹塑性层间位移角之前,试件未出现承载力下降,且始终维持一定的刚度水平;在后续位移进一步增大过程中,承载力仍能继续提高,体现出良好的后期强化特性。

4 CFST 与传统柱脚力学性能对比

为系统评估 CFST 柱脚的力学性能,本节首先基于既有研究建立与之对应的外露式及埋入式柱脚有限元模型。通过将数值分析结果与对应试验数据进行对比,验证所采用建模方法的可靠性。在此基础上,进一步建立与 CFST 柱脚试件具有相同尺寸、材料属性及柱身构造的外露式及埋入式柱脚对比模型,从而对比分析 CFST 柱脚与传统柱脚在受力性能方面的本质差异。

4.1 传统柱脚模型验证

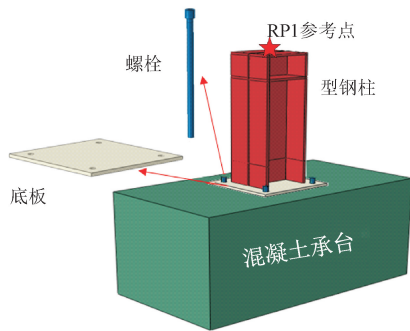


图 10 外露式钢柱脚验证模型部件

Fig. 10 Components of exposed steel column base verification model

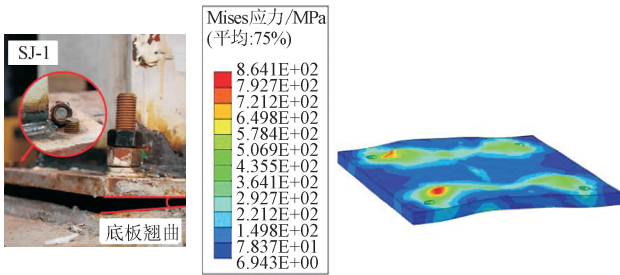
如图 10 所示为基于李彬等^[43]试验建立的外露式柱脚验证模型试件。该试件柱身采用轧制型钢,规格为 H250×250×9×14,焊接于尺寸为 400 mm×400 mm 的底板之上,并通过 4 根直径为 24 mm 的螺栓锚固于混凝土承台表面。基于这一实际构造,所建立的外露式柱脚验证模型主要由型钢柱、锚栓、底板及混凝土承台 4 部分组成。模型中所有部件均采用八节点六面体线性减缩积分单元(8-node linear hexahedron, reduced integration, C3D8R)进行模拟。材料本构方面,混凝土采用混凝土损伤塑性(concrete damaged plasticity, CDP)模型,以合理描述其在往复荷载作用下的非线性行为;型钢柱、螺栓及底板则采用理想弹塑性模型,忽略强化阶段,以简化分析并聚焦于整体受力机制。

为准确反映各构件间的相互作用,模型综合考

虑了型钢柱与底板、螺栓与底板、螺栓杆与混凝土承台之间的接触与约束关系,所采用的连接方式包括绑定约束、内置区域及耦合约束。具体而言,绑定约束用于模拟型钢柱底面与底板之间的焊接连接;内置区域用于模拟螺栓杆在混凝土承台内的嵌固作用;在型钢柱顶面设置参考点 RP1 并进行耦合约束,以便于施加往复荷载。由于底板与混凝土承台之间的压紧作用完全由螺栓提供,因此在螺栓螺母底面与底板之间引入法向行为的硬接触,以模拟二者之间的接触关系,确保界面无相互穿透。

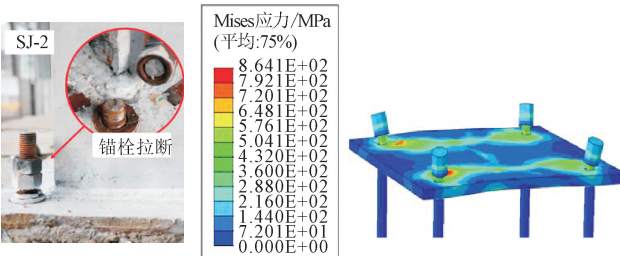
模型共设置两个分析步:第一步施加轴压力与螺栓预紧力,第二步施加往复荷载。在边界条件方面,考虑到混凝土承台高度较大,为避免仅约束底面导致的不合理受力状态,对承台整体施加完全固定约束。验证模型所采用的加载制度、螺栓预紧力及轴压力均与李彬等^[43]试验保持一致。模拟结果与试验数据的对比如图 11 所示。

试验中,随着荷载增大,外露式柱脚底板出现明显翘起,其主要原因为,在竖向荷载、水平荷载及弯矩共同作用下锚固系统的抗力不足。有限元模型通过合理定义接触关系、材料本构及荷载边界条件,准确再现了底板的翘起行为,其位置与程度与试验现象基本一致。试验中锚栓发生拉断破坏(图 11(c)),模拟中同样在相应位置出现应力集中及颈缩现象(图 11(d)),破坏形态与位置基本吻合。此外,试验中 H 型钢翼缘发生局部屈曲(图 11(e)),模拟结果(图 11(f))也成功再现了同类屈曲模式,表明模型能有效反映构件在复杂受力状态下的失稳行为。



(a) 底板试验结果

(b) 底板模拟分析结果



(c) 栓钉试验结果

(d) 栓钉模拟分析结果

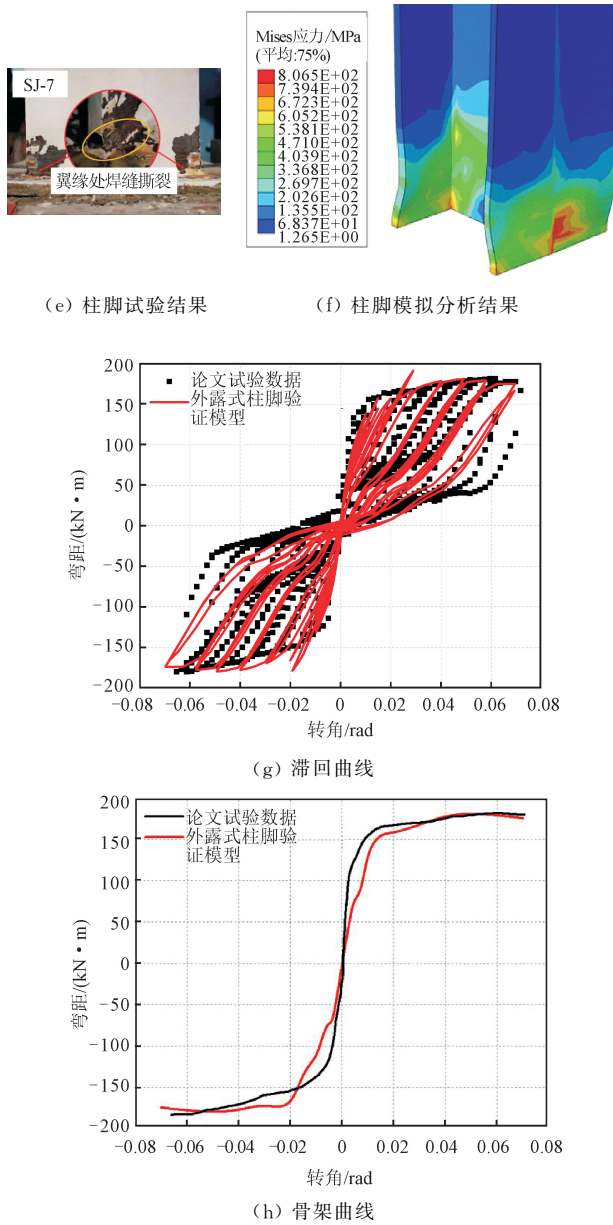


图 11 外露柱脚试验与模拟结果对比

Fig. 11 Comparison of experimental and simulation results for exposed steel column bases

滞回曲线与骨架曲线的对比如图 11(g)~(h)所示。两者均呈现典型的“旗帜形”特征,滞回环较为饱满,塑性变形较小。试验初始刚度略高于模拟值,原因在于实际试验中设置了垫层,而模型中对此进行了简化。当转角达到 0.015 rad 时,试验与模拟均进入屈服阶段,刚度显著下降,滞回环面积增大,表现出良好的耗能能力。卸载后曲线均基本回至原点,无明显残余变形。骨架曲线整体呈“Z”形分布,试验测得峰值弯矩为 183 kN·m,模拟值为 179 kN·m,误差仅为 2.2%。

通过对比可知,模拟得到的破坏模式、滞回曲线及骨架曲线与试验结果吻合良好,从而验证了建模方法的可靠性。

埋入式柱脚验证模型参照王桢希等^[8]所开展的关于埋入式钢柱脚抗震性能研究试验来建立。该试件由热轧 H 型钢(150 mm×150 mm×7 mm×10 mm)、栓钉(直径 16 mm,间距 120 mm)、承台钢筋笼、加固钢筋笼及混凝土承台构成。在建立验证模型时,H 型钢、栓钉及混凝土承台均采用 C3D8R 进行模拟,承台钢筋笼和加固钢筋笼则选用桁架单元(T3D2)予以表征。材料本构方面,混凝土采用 CDP 模型,钢材及钢筋均采用理想弹塑性模型,忽略强化阶段以简化分析。

相较于外露式柱脚模型,该模型在接触与约束设置上更为简化,主要考虑钢筋与混凝土承台、型钢柱与混凝土承台之间的共同工作。具体而言,通过内置区域将型钢柱和钢筋笼嵌入混凝土承台,以实现二者与混凝土的协同受力;栓钉与型钢柱之间采用绑定约束连接。为便于施加往复荷载,在型钢柱顶面设置参考点 RP1 并进行耦合约束。

模型分析步的设置与外露式柱脚模型一致,共包含两个分析步:第一步在 RP1 处施加轴向力,第二步施加往复荷载。边界条件方面,对混凝土承台整体施加完全固定约束,以确保模型底部在受力过程中保持稳定,各部件示意图如图 12 所示。

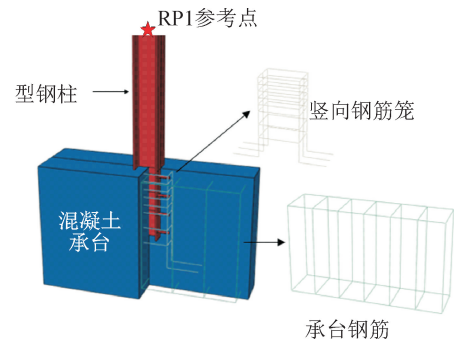
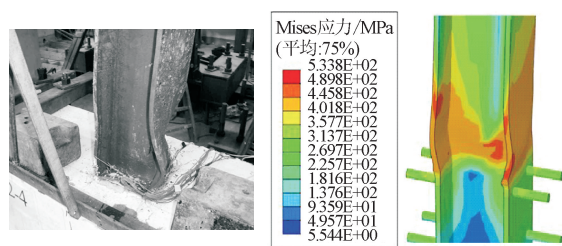


图 12 埋入式钢柱脚验证模型部件

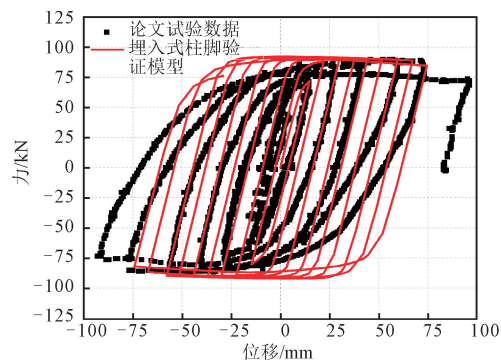
Fig. 12 Components of embedded steel column base verification model

埋入式柱脚验证模型与试验结果对比如图 13 所示。如图 13(a)~(b)所示,数值模拟准确再现了试验中柱脚根部翼缘鼓曲和腹板屈曲的破坏形态,塑性应变分布与试验观测一致。滞回曲线对比如图 13(c)所示,试验与模拟曲线均呈典型梭形,初始刚度匹配良好。模拟所得的饱满滞回环与试验曲线的变化趋势一致,共同验证了构件良好的耗能能力。骨架曲线对比如图 13(d)所示,两者曲线在弹性阶段完全吻合,弹塑性阶段的刚度退化规律一致,准确反映了试件的实际受力过程。

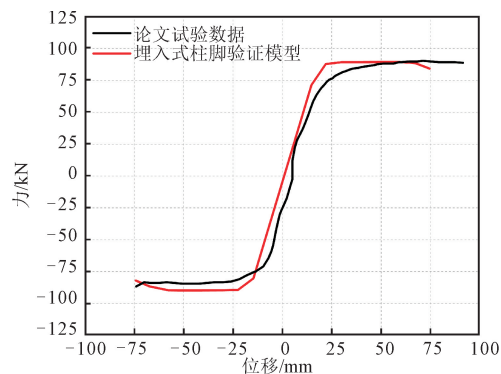


(a) 底板试验结构

(b) 底板模拟分析结果



(c) 滞回曲线对比



(d) 骨架曲线对比

图 13 埋入式钢柱脚试验结果与模拟结果对比

Fig. 13 Comparison of experimental and simulation results for embedded steel column bases

综上,有限元模型在曲线形态、屈服点识别、峰值承载力及破坏模式等方面均与试验结果吻合良好,验证了所选建模方法及参数设定的可靠性。

4.2 CFST 与外露式柱脚力学性能对比分析

基于已验证的建模方法,建立了外露式柱脚对比模型。柱身尺寸、规格及材料均与 CFST 试件保持一致,采用空心钢管构造,高度为 750 mm,直径为 375 mm,壁厚为 15 mm。

针对外露式柱脚特有的环形底板、加劲肋及锚栓等部件,其尺寸依据《组合结构设计规范》JGJ 138—2016^[2]的相关设计建议确定:环形底板尺寸为 288 mm×145 mm×30 mm,加劲肋尺寸为 200 mm×100 mm×20 mm,锚栓选用 M30 规格。各构件均采用 Q460 钢材,以保证连接区域的强度性能。作为外露式柱脚的对比模型,所有部件均采用 C3D8R 实体单

元进行模拟,其建模方法与外露式柱脚验证模型基本一致。主要区别在于分析步的设置:由于 CFST 柱脚试验中未施加轴向力,为确保变量一致性,本模型亦不施加轴向力。因此,模型共设置两个分析步,第一步仅施加螺栓预紧力,第二步施加往复荷载。外露式柱脚对比模型的具体组成如图 14 所示。

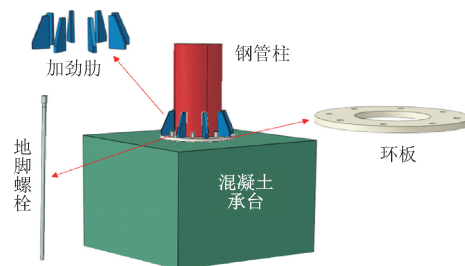
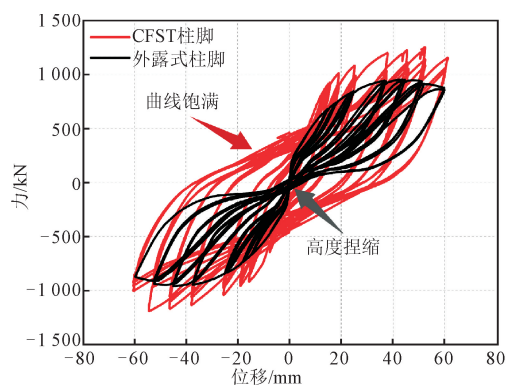


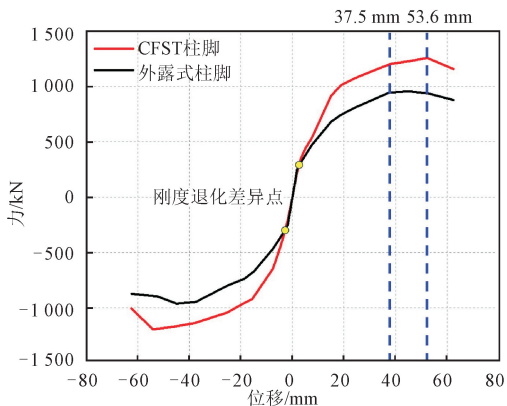
图 14 外露式柱脚对比模型部件

Fig. 14 Components of exposed column base comparative model

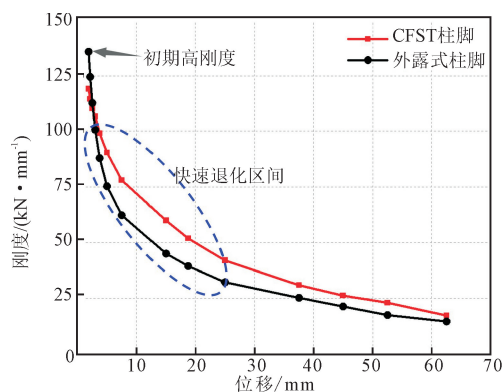
图 15 为外露式柱脚与 CFST 柱脚整体力学性能对比结果。从滞回曲线图 15(a)可见,外露式柱脚呈现典型的“旗帜形”滞回特征,曲线狭长、捏拢效应显著。其在弹性阶段近似线性上升,进入弹塑性阶段后刚度明显退化,滞回环面积增长有限,耗能能力较弱,多次循环后性能衰减迅速。相比之下,CFST 柱脚的滞回曲线形态饱满,弹塑性阶段滞回环面积大且发展稳定,表现出更优的耗能能力与抗震韧性。



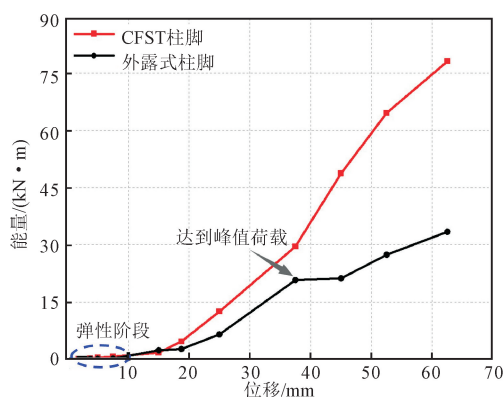
(a) 滞回曲线对比



(b) 骨架曲线对比



(c) 刚度退化曲线对比



(d) 耗能曲线对比

图 15 外露式与 CFST 柱脚力学性能对比

Fig. 15 Mechanical performance comparison between exposed and CFST column bases

骨架曲线图 15(b)表明,两者在弹性阶段刚度接近。当层间位移角达到 $1/100$ 时,外露式柱脚因锚栓屈服导致刚度急剧下降,在 $\Delta=37.5$ mm 时达到峰值荷载 955 kN,随后承载力迅速降低,延性较差;而 CFST 柱脚在塑性阶段仍维持较高的承载力增长,峰值荷载达 1 256 kN,下降段平缓,显示出更好的延性与安全储备。

刚度退化曲线图 15(c)显示,外露式柱脚虽初始刚度较高,但因锚栓连接区变形累积,刚度退化显著;CFST 柱脚则凭借钢管与混凝土的协同工作机制,刚度退化缓慢,整体性能更为稳定。

耗能能力对比图 15(d)进一步表明,当层间位移角超过 $1/50$ 后,CFST 柱脚因混凝土塑性裂缝充分发展,耗能增长显著加快。在极限位移角 $1/12$ 时,其单圈耗能较外露式柱脚提升约 136%,展现出卓越的能量耗散能力。外露式柱脚在 $\Delta=37.5$ mm 后耗能增长趋于停滞,最终因锚栓拔出与底板翘曲出现短暂抬升。

4.3 CFST 与埋入式柱脚力学性能对比分析

埋入式柱脚对比模型采用与验证模型一致的建模方法。柱身规格同 CFST 试件,采用外径

375 mm、壁厚 15 mm 的钢管,外露高度 750 mm。依据《组合结构设计规范》JGJ 138—2016^[2],钢管埋入深度取 2.5 倍管径,即 937.5 mm。承台设置三层钢筋网,首层与中层预留钢管孔洞,通过梅花形布置的拉结筋(间距 150 mm)与三层钢筋网绑固。钢筋直径分别为 16 mm 与 6 mm。为增强抗剪能力,在钢管埋入段与首层钢筋网齐平处焊接抗剪环板,抗剪环板采用 Q460 钢材,10 mm 厚、100 mm 宽。该模型作为埋入式柱脚的对比模型,其建模方法与埋入式柱脚验证模型保持一致。模型由钢管柱身、抗剪环板、承台钢筋网及混凝土承台组成。其中,钢管、环板与承台采用 C3D8R 实体单元模拟,钢筋网采用 T3D2 桁架单元。材料本构方面,混凝土选用 CDP 模型,钢材及钢筋采用理想弹塑性模型。在相互作用设置中,通过内置区域将钢管、环板及钢筋网嵌入混凝土承台,以模拟其嵌固作用;同时在钢管柱顶面设置参考点并进行耦合,以便于施加荷载。分析步设置分为两步:第一步根据试验工况施加轴向荷载,第二步施加往复荷载。边界条件对混凝土承台整体施加完全固定约束。值得注意的是,为兼顾模拟精度与计算效率,网格划分采用差异化策略:柱脚底部受力复杂区域网格较细,柱顶区域网格相对较大。埋入式钢柱脚对比模型部件具体组成如图 16 所示。

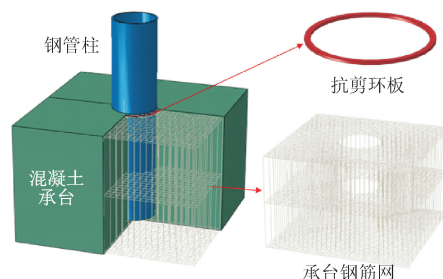


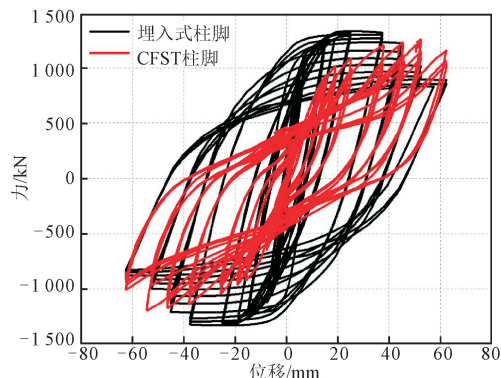
图 16 埋入式钢柱脚对比模型部件

Fig. 16 Components of embedded steel column base comparative model

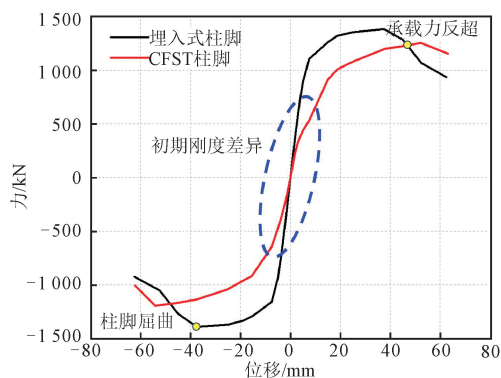
图 17 为埋入式柱脚与 CFST 柱脚整体力学性能对比。滞回曲线图 17(a)显示,埋入式柱脚呈梭形,CFST 柱脚为弓形。CFST 柱脚弹性阶段结束较早(层间位移角 $1/350$, $\Delta=2.143$ mm),较埋入式柱脚($1/200$, $\Delta=3.75$ mm)缩短 42.9%。进入塑性后,两者滞回环面积分别增长 4.8 倍和 3.2 倍。埋入式柱脚在层间位移角 $1/20$ 时达到峰值承载力 1 316 kN,之后因钢管局部屈曲急剧下降,至 $1/12$ 时降为 890 kN,降幅达 32.4%;CFST 柱脚在 $1/14$ 时达到 1 256 kN 峰值,随后以 9.2 kN/mm 速率缓慢下降,大变形下承载力保持率仍可达 92%,延性更优。

骨架曲线对比如图 17(b)所示。埋入式柱脚在加载初期表现出更高的初始刚度,承载力迅速上升,其弹性阶段延续至层间位移角 $1/100$,随后出现明显拐点进入塑性阶段。CFST 柱脚初始刚度较低,弹性阶段结束较早(层间位移角 $1/350$),但进入塑性后承载力仍保持稳定增长。至倾覆位移角 $1/12$ 时,CFST 柱脚的承载力仍维持在埋入式柱脚的 130% ,展现出更优异的延性性能和后期承载能力。

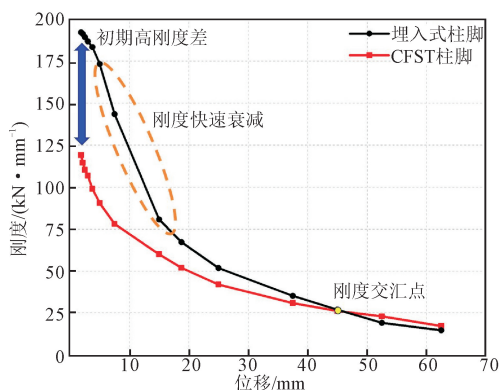
刚度退化曲线图 17(c)显示,埋入式柱脚初始刚度 192 kN/mm ,高于 CFST 柱脚的 120 kN/mm 。在 $1/150$ 进入塑性后,埋入式柱脚因钢管屈曲出现刚度骤降,至 $1/50$ 时降至 80 kN/mm ,与 CFST 柱脚的 60 kN/mm 接近;两者在 $1/20$ 后刚度曲线重合,共同退化至 25 kN/mm 。



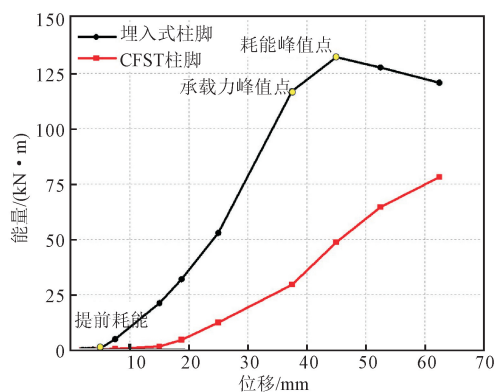
(a) 滞回曲线对比



(b) 骨架曲线对比



(c) 刚度退化曲线对比



(d) 耗能曲线对比

图 17 CFST 与埋入式柱脚力学性能对比

Fig. 17 Mechanical performance comparison between CFST and embedded column bases

耗能曲线图 17(d)反映出,前期两者耗能均较低;进入塑性后,埋入式柱脚增长更快,但在 $1/20$ 达到峰值后因屈曲变形而下降;CFST 柱脚因钢管-混凝土协同作用,耗能持续稳定增长,未出现回落,表现出更优的耗能持续性。

综上所述,CFST 柱脚在承载力、刚度保持、耗能能力与延性等方面均显著优于外露式柱脚,其协同工作机制有效提升了节点的整体抗震性能。而埋入式柱脚凭借较强的柱脚约束,在滞回饱满性、耗能能力及刚度方面具备一定优势,CFST 柱脚在最大承载力相近的基础上,具备较好的延性。

5 结论

本文提出了一种内置传力芯柱的钢管混凝土柱脚。通过系统的拟静力试验、有限元模拟与对比分析,对其破坏机理、滞回特性及抗震性能进行了深入研究,主要结论如下。

1) CFST 柱脚通过内部钢筋混凝土核心与钢管-栓钉系统的协同工作,形成了高效的组合传力机制。该构造虽采用钢柱身,但其破坏模式表现为典型的混凝土压溃与钢筋屈服,确保了节点的延性破坏特征,力学行为更接近于钢筋混凝土结构,具有明确的传力路径和良好的整体性。

2) 与外露式柱脚相比,CFST 柱脚展现出全面的抗震性能优势。其在保持较高初始刚度的同时,承载力与延性显著提升,骨架曲线下降平缓,耗能能力增强超过 130% ,且刚度退化更为缓慢,综合抗震性能得到实质性改善。

3) 与埋入式柱脚相比,CFST 柱脚极限承载力与其相近,但在大变形下,CFST 柱脚凭借钢-混凝土协同

工作机制,承载力保持率达 92%,有效避免了后者因局部屈曲引发的脆性破坏。此外埋入式柱脚在初始刚度与耗能效率上较优,但 CFST 柱脚凭借其更优越的延性和抗倒塌能力,展现出更为均衡的抗震性能。

4) CFST 柱脚成功兼顾了抗震安全性与施工便利。其外露式构造避免了深挖作业,显著简化了施工流程优化了结构性能,为钢结构柱脚提供了兼具技术先进性与经济可行性的新型解决方案。

参考文献

- [1] 王斌,唐懿,陈鹏.从第 18 届世界地震工程大会看钢柱脚节点的近期研究[J].世界地震工程,2025,41(1):90-98.
Wang Bin, Tang Yi, Chen Peng. Recent advances of steel column base connections from the 18th World Conference on Earthquake Engineering [J]. World Earthquake Engineering, 2025, 41(1): 90-98.
- [2] JGJ 138—2016 组合结构设计规范[S].
- [3] 王燕.高层建筑钢结构刚性柱脚的设计与研究[J].青岛建筑工程学院学报,1994,15(3):17-21.
Wang Yan. Design and study of rigid heels in steel structure for highrise buildings[J]. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering, 1994, 15(3): 17-21.
- [4] 杨建,殷志文,陈忠汉.埋入式钢柱脚单调加载试验研究[J].苏州科技学院学报(工程技术版),2009,22(2):8-12.
Yang Jian, Yin Zhiwen, Chen Zhonghan. Experimental study on embedded column base under monotonic loading [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2009, 22(2): 8-12.
- [5] 杨建.水平荷载下埋入式钢柱脚基础段受力性能研究[D].苏州:苏州科技学院,2009:29-30.
Yang Jian. The research on behavior of embedded column base under horizontal load[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2009: 29-30.
- [6] 金党耀,殷志文,陈忠汉.埋入式柱脚基础段受力性能的试验研究[J].江苏建筑,2009(5):32-35.
Jin Dangyao, Yin Zhiwen, Chen Zhonghan. Experimental study on behavior of embedded column-base [J]. Jiangsu Construction, 2009(5): 32-35.
- [7] Grilli D, Jone R, Kanvinde A. Seismic performance of embedded column base connections subjected to axial and lateral loads[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(5): 04017010.
- [8] 王桢希,殷志文,陈忠汉.埋入式钢柱脚抗震性能的试验研究[J].混凝土与水泥制品,2009(2):52-55.
- [9] 胡卫中,杨维国,王萌,等.低埋深比插入式柱脚抗震性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(10):101-111.
Hu Weizhong, Yang Weiguo, Wang Meng, et al. Experiment on seismic behavior of embedded column base with low embedment ratio[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(10): 101-111.
- [10] Inamasu H, Kanvinde A M, Lignos D G. Seismic stability of wide-flange steel columns interacting with embedded column base connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(12): 04019151.
- [11] Inamasu H, De Castro E, Sousa A, et al. Development and experimental validation of dissipative embedded column base connections for enhanced seismic performance of steel moment-resisting frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(3): 04021280.
- [12] Inamasu H, Lignos D G. Finite element modeling and behavior of dissipative embedded column base connections under cyclic loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 189: 107063.
- [13] Tan Shasha, Guo Lanhui, Jia Chen. Experimental and numerical investigation on punching shear behavior of an enhanced embedded column base for CFSTs [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23(3): 157.
- [14] 张海滨,王叶涵,张扬,等.不同埋深的地铁车站疏散效率研究[J].安全与环境学报,2023,23(4):1219-1224.
Zhang Haibin, Wang Yehan, Zhang Yang, et al. Evacuation efficiency of subway station considering the influence of depth [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(4): 1219-1224.
- [15] 李祖婷,杨婷连,王宁.浅析钢结构柱脚形式[J].四川建筑科学研究,2012,38(5):43-46.
- [16] Zhou Xuhong, Wang Xuanding, Gu Chao, et al. Seismic behavior of a novel prefabricated thin-walled CFST double-column pier system for simple on-site assembly [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 183: 110388.
- [17] Chen Zhihua, Dong Shaohua, Du Yansheng. Experimental study and numerical analysis on seismic performance of FRP confined high-strength rectangular concrete-filled steel tube columns [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 162: 107560.
- [18] Yang Shuanglong, Zhang Lei, Zhang Jiawei, et al. Seismic behavior of concrete-filled wide rectangular steel tubular (CFWRST) stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 196: 107402.
- [19] Cai Heng, Xu Lihua, Chi Yin, et al. Seismic performance of rectangular ultra-high performance concrete filled steel tube (UHPCFST) columns[J]. Composite Structures, 2021, 259: 113242.
- [20] Liu Jing, Zhang Tao, Yu Wenzhuo, et al. Behavior of multicell concrete-filled round-ended steel tubes under bending[J]. Structures, 2024, 67: 106984.

- [21] Tremblay R, Filiatrault A, Timler P, et al. Performance of steel structures during the 1994 Northridge earthquake[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(2): 338-360.
- [22] 崔瑶, 钟燕, 王枫智. 装配不同保险丝的重力式摇摆钢柱脚滞回行为分析[J]. 土木工程学报, 2025, 58(S1): 65-74.
Cui Yao, Zhong Yan, Wang Fengzhi. Hysteresis behavior of gravity rocking steel column base with different replaceable structural fuses[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(S1): 65-74.
- [23] 薛凯, 孟长虹, 葛爱欣. 双屈服机制的外露式柱脚抗震性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2024, 46(4): 36-40.
Xue Kai, Meng Changhong, Ge Aixin. Seismic behavior of exposed-type column bases with double yield mechanism[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2024, 46(4): 36-40.
- [24] 陈刚, 高玲, 张煜坤, 等. 锚栓屈服型可抬升柱脚节点抗震性能试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(2): 190-198.
Chen Gang, Gao Ling, Zhang Yukun, et al. Experimental study on seismic performance of anchor joint with bolt yield-type liftable column [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(2): 190-198.
- [25] Li Chengyu, Liu Qi, Li Gongwen. Seismic behavior of steel column base with slip-friction connections [J]. Materials, 2020, 13(18): 3986.
- [26] 李国强, 孙哲, 张贵鹏, 等. 一种可更换耗能摇摆钢柱脚节点性能研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(1): 10-20.
Li Guoqiang, Sun Zhe, Zhang Guipeng, et al. Investigation on behavior of a replaceable energy-dissipative rocking column-base joint[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(1): 10-20.
- [27] 姚怡帆, 王伟, 刘渊, 等. 粘滞人工可控塑性铰抗震性能分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(2): 89-101.
Yao Yifan, Wang Wei, Liu Yuan, et al. Seismic performance analysis of viscous artificial controllable plastic hinge[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(2): 89-101.
- [28] 管涛, 刘全秀, 郭方亮, 等. 短纤维增强复合材料热膨胀系数预测方法[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(6): 24-32.
Guan Tao, Liu Quanxiu, Guo Fangliang, et al. Prediction method of the coefficients of thermal expansion of short-fiber-reinforced composites[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(6): 24-32.
- [29] 杨正伟, 张敬业, 赵志彬, 等. T800 级碳纤维增强复合材料层压板冲击后的压缩失效机理与损伤容限表征[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(5): 23-35.
Yang Zhengwei, Zhang Jingye, Zhao Zhibin, et al. Compression failure mechanisms and damage tolerance characterizations of T800-grade carbon fiber reinforced polymer laminates after impact[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(5): 23-35.
- [30] 聂婷, 王焕春, 李瑞怡, 等. 热固性碳纤维复合材料回收技术研究进展[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(4): 108-118.
Nie Ting, Wang Huanchun, Li Ruiyi, et al. Research progress of thermosetting carbon fiber composites recycling technology[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(4): 108-118.
- [31] 张素梅, 罗贤志, 李爱东, 等. 深圳岗厦北综合交通枢纽大尺寸钢管混凝土半埋入式柱脚性能试验研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(8): 1-10, 90.
Zhang Sumei, Luo Xianzhi, Li Aidong, et al. Experimental study on mechanical properties of large-scale and semi-embedded concrete-filled steel tubular column base in Shenzhen Gangxia North comprehensive transportation hub[J]. Building Structure, 2024, 54(8): 1-10, 90.
- [32] 宋志文. 雄安站半埋入式型钢混凝土柱脚设计及其受力性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(24): 35-38, 50.
Song Zhiwen. Research on design and mechanical performance of semi-embedded steel reinforced concrete column foot of Xiong'an Railway Station[J]. Building Structure, 2021, 51(24): 35-38, 50.
- [33] Rehmat S, Sadeghnejad A, Mantawy I M, et al. Experimental study on concrete filled steel tubes to footing connection using ultra-high performance concrete[J]. Engineering Structures, 2021, 242: 112540.
- [34] Khateeb B M, Siddiqui N A, Almusallam T H, et al. Behavior of novel CFST circular column-to-foundation connections under cyclic loading [J]. Engineering Structures, 2020, 221: 111051.
- [35] 赵宪忠, 许晓旭, 闫仲. 考虑轴力与底板约束的埋入式钢柱脚刚度模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(2): 18-27.
Zhao Xianzhong, Xu Xiaoxu, Yan Shen. Stiffness model for embedded steel column bases considering the effects of axial force and constraint of base plate[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(2): 18-27.
- [36] 张一爽, 倪永松. 外包式钢柱脚的设计方法[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 1236-1240.
Zhang Yishuang, Ni Yongsong. Design method of wrapped steel column base [J]. Building Structure, 2022, 52(S1): 1236-1240.
- [37] 桂鹤阳, 潘映兵, 郑春艳, 等. 高烈度区某异形高耸钢结构雕塑的设计与分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 800-806.

- Gui Heyang, Pan Yingbing, Zheng Chunyan, et al. Design and analysis of a special-shaped high-rise steel structure sculpture in a high-intensity area[J]. *Building Structure*, 2021, 51(S2): 800-806.
- [38] 张艳军, 邢沛霖, 江申. 武汉某复杂造型钢结构塔冠结构设计[J]. *建筑结构*, 2022, 52(14): 59-64.
- Zhang Yanjun, Xing Peilin, Jiang Shen. Structural design and study of a steel tower crown with complex shape in Wuhan [J]. *Building Structure*, 2022, 52(14): 59-64.
- [39] 吴庆雄, 郑其鑫, 袁辉辉, 等. 柱脚形式不同的部分填充混凝土装配式钢桥墩抗震性能研究[J]. *土木工程学报*, 2026, 59(4): 122-138.
- Wu Qingxiong, Zheng Qixin, Yuan Huihui, et al. Research on seismic performance of prefabricated steel bridge piers with partially filled concrete in different forms of column base [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2026, 59(4): 122-138.
- [40] 蔡新江, 陈磊, 毛小勇, 等. 柱脚不同连接形式钢框架-摇摆墙结构抗震性能对比分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(5): 1062-1071.
- Cai Xinjiang, Chen Lei, Mao Xiaoyong, et al. Comparative analysis of seismic performance of steel frame-rocking wall structures with different connection forms of column foot [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(5): 1062-1071.
- [41] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
- [42] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程[S].
- [43] 李彬, 王湛, 范延静, 等. 不同锚栓布置的外露式柱脚弱轴方向力学性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(S2): 454-465.
- Li Bin, Wang Zhan, Fan Yanjing, et al. Analysis on mechanical properties of exposed column-base plate weak-axis connections with different anchor bolt layouts [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(S2): 454-465.

Mechanical Performance of Concrete-Filled Steel Tube Column Bases with a Load-Transfer Core

XUE Hongjing¹, WANG Xiaochen^{2*}, ZHANG Guowei³, SHU Weinong¹, CAI Qing¹, LIU Jingyang¹

(1. Beijing Institute of Architectural Design Co. Ltd., Beijing 100045, China;

2. China Academy of Building Research Co. Ltd., Beijing 100013, China;

3. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: To address the construction complexity and poor economic efficiency of traditional embedded column bases, as well as the insufficient seismic performance of exposed column bases, a novel concrete-filled steel tube (CFST) column base with a load-transfer core was proposed. This configuration incorporated a reinforced concrete core column inside a steel tube, which collaborated with inner-wall studs to establish an efficient composite load-transfer mechanism. To systematically evaluate the mechanical performance of CFST column bases, 1:4 scale quasi-static tests and refined finite element simulations were conducted to study the failure mode, hysteretic behavior, and seismic performance. The results were compared with those for exposed and embedded column bases with identical specifications. The force mechanism of the CFST column bases resembled that of reinforced concrete structures, with pronounced plastic development during the failure process. The final failure mode involved concrete crushing in the column base region and yielding of the internal longitudinal reinforcement, demonstrating typical ductile failure characteristics. Compared with exposed column bases, CFST column bases showed a significantly enhanced bearing capacity and ductility, with a gently declining skeleton curve, an increase in their cumulative energy dissipation capacity exceeding 130%, and slower stiffness degradation, representing a substantial improvement in comprehensive seismic performance. Compared with embedded column bases, CFST column bases achieved a comparable ultimate bearing capacity but maintained 92% of the capacity during large deformation stages, effectively avoiding the brittle failure caused by local buckling, exhibiting superior ductility and collapse resistance. Furthermore, the CFST column bases had an exposed configuration, which eliminated deep embedding requirements, significantly simplifying construction processes and reducing project costs, while ensuring robust seismic resistance. The result of this study provides a novel solution for steel column bases that combines technical advancement with economic feasibility.

KEYWORDS: CFST column base; quasi-static test; finite element simulation; mechanical performance; failure mode

(编辑:吴文冬)