

文章编号:1671-4229(2023)03-0026-07

基于轴压刚度等效的“柱中柱”(CIC) 系统等代设计方法研究

房晓俊

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为克服传统钢管混凝土柱作为竖向承载构件功能单一的不足,使其兼具结构减振(震)控制的作用,文章基于TMD系统振动控制的概念,对钢管混凝土柱进行改进,提出一种具有“承载-减振(震)”双功能的“柱中柱”系统,以进一步增强结构的抗震性能。文章主要介绍了“柱中柱”系统的组成和控制机理,并基于钢管混凝土统一理论,采用叠加原理推导“柱中柱”系统的截面轴压组合刚度和轴压极限承载力的理论公式,最终建立该系统基于轴压刚度等效的等代设计方法;同时,根据等代设计流程,选取典型的钢管混凝土构件进行算例分析,以检验等代设计方法的准确性。结果表明,采用叠加原理便于建立“柱中柱”系统的截面轴压组合刚度和轴压极限承载力理论公式,提出的等代设计方法具有良好的准确性,可为今后的工程设计与分析提供参考。

关键词: “柱中柱”系统; 钢管混凝土; 轴压刚度; 等代设计方法

中图分类号: TU 318, TU 398 **文献标志码:** A

Equivalent design method of column-in-column (CIC) system based on the equivalence of axial compressive stiffness

FANG Xiao-jun

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Considering that the concrete filled steel tubular (CFST) is mainly used as the vertical load-bearing member, in this paper the concept of the tuned mass damper (TMD) system for structural vibration control is introduced to extend the functions of the CFST. In other words, the CFST is converted into a new column-in-column (CIC) system with dual-functions of load-bearing capacity and vibration mitigation, so as to further enhance the seismic performance of structures. The CIC system and its control strategy are introduced, then based on the “Unified theory” of the CFST, the theoretical formulae for calculating the cross-sectional composite stiffness of the CIC system under compression and its ultimate axial loading capacity are derived by using the superposition principle. The equivalent design method of the CIC system is also proposed by keeping the axial compressive stiffness of the CIC system equal to that of the original CFST. Moreover, following the proposed design procedure, the typical CFST members are selected and theoretically “divided” into two columns to form the CIC system so as to verify the accuracy of the proposed method. Results show that, the derived formulae for determining the cross-sectional composite stiffness and the ultimate axial loading capacity of the CIC system can be conveniently developed via the superposition principle, the proposed equivalent de-

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2022-03-10

基金项目: 广东省青年优秀人才国际培养计划博士后资助项目

作者简介: 房晓俊(1993—),男,博士。E-mail:fangxiaojun@e.gzhu.edu.cn

引文格式: 房晓俊. 基于轴压刚度等效的“柱中柱”(CIC)系统等代设计方法研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(3):

sign method of the CIC system has good accuracy, which can be used in the design and analysis of the CIC system for future engineering practices.

Key words: CIC system; CFST; axial compressive stiffness; equivalent design method

钢管混凝土(Concrete Filled Steel Tubular, CFST)因其强度高、延性好、耗能能力强及施工便捷等优点,在高层建筑^[1-2]、大跨桥梁^[3-4]、海上平台^[5-6]和输电塔^[7-8]等领域得到了广泛应用。此外,随着建造技术和新材料的快速发展,高性能混凝土^[2,9-10]和高性能钢材^[11-12]也越来越多地被用于CFST构件承载能力的提升和耐久性能的改善。目前,对CFST构件的研究仍然集中于应用新材料和新构造来提升其力学性能。然而钢管混凝土柱作为高层组合结构中重要的竖向承载力构件存在功能单一的不足,在强烈地震作用下面临被破坏的风险,可能对结构安全造成严重的不利影响,甚至导致结构的倒塌。

近年来,城市抗震韧性研究成为国际防震减灾领域的前沿^[13-15],为实现城市的震后可恢复,美国、日本和中国等相继部署了韧性城乡建设规划^[16-17]。高层建筑作为城市建筑的重要组成部分,保证其足够的抗震韧性,是建设韧性城市的重要支撑之一。而被动控制技术是在结构局部安装离散耗能散件,根据结构类型和特点选择合理的控制方案,控制元件易修复、易更换,是提升结构韧性的有效手段^[15]。鉴于此,笔者基于被动控制的概念,提出应用于高层结构巨柱的新型组合柱系统,即“柱中柱”(Column-in-Column, CIC)系统^[18-19]。CIC系统的提出旨在克服结构柱作为竖向承载构件功能单一的不足,使其兼具结构减振(震)控制的作用,以期解决

以弯曲变形为主的高层结构阻尼比增加困难的问题。CIC系统通过增加结构的质量比,为高层结构的振动控制提供了一种有效的实施途径,从而增强高层结构的抗震韧性,助力韧性城市的建设与发展。本文主要介绍CIC系统的组成和控制机理,基于钢管混凝土统一理论,采用叠加原理推导CIC系统的截面轴压组合刚度和轴压极限承载力的理论公式,最终建立该系统基于轴压刚度等效的等代设计方法。

1 “柱中柱”系统

具有承载-减振(震)双功能CIC系统的结构示意图见图1。该系统针对广泛应用于高层结构中的钢管混凝土柱,取其部分质量当作CIC系统的CFST内柱,剩余部分作为中空夹层钢管混凝土(Concrete Filled Double Skin Tubular, CFDST)外柱,内柱和外柱通过滑动装置与柱端连接板形成一体,内、外柱之间预留有空间,用于沿CIC系统高度方向均匀布置一系列的弹簧和消能器。由于常用的柱截面形式有圆形、方形和矩形,组成CIC系统的内、外柱可采用不同的截面形式,因此,可以组合出多种截面形式的CIC系统。图1(b)列出CIC系统的典型截面形式,主要包括双圆型、内圆外方型、内方外圆型和双方型。

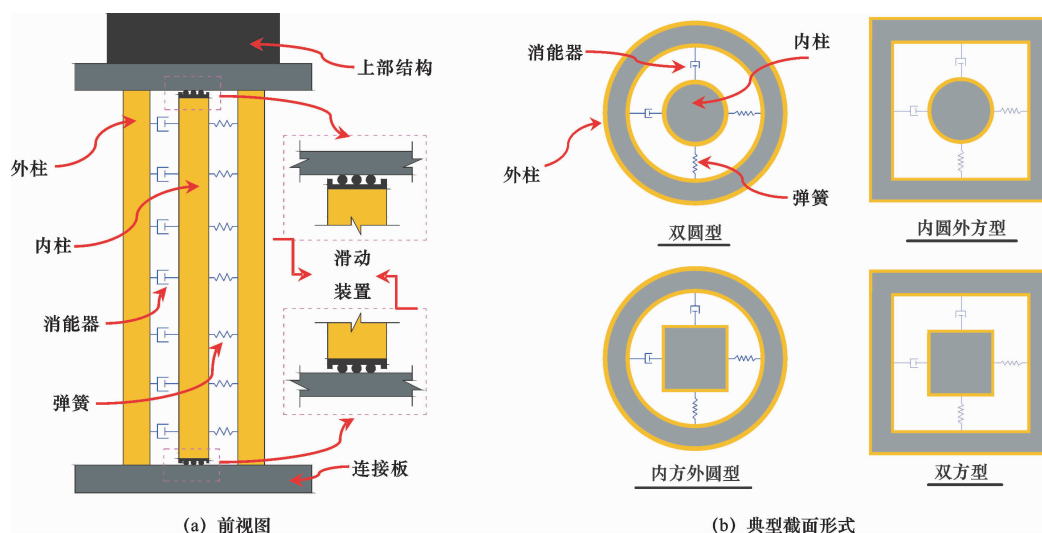


图1 CIC系统的结构示意图和典型截面形式

Fig. 1 The proposed CIC system and typical cross section forms

CIC 系统的振(震)动控制策略为在静荷载(恒载和活载)作用下,该系统具备与传统结构柱等同的竖向承载能力,即组成 CIC 系统的内柱和外柱共同承受竖向荷载。而在横向动荷载(风、地震等)作用下,CIC 系统中的内柱与弹簧和消能器共同组成调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)系统,通过调谐子结构(内柱)的动力特性,实现结构“调频谐振”的作用。与传统的 TMD 系统相比,CIC 系统具有以下 4 个特点:

(1)承载力相当。将原结构柱一分为二形成 CIC 系统,内柱与外柱共同提供与原结构柱等同的竖向承载能力。由于外柱因截面的减小会导致抗剪能力和抗弯能力有所下降,但可通过适当的设计调整(如材料强度、配筋率等)得以弥补。

(2)不需要附加额外的质量。以结构自身的部分质量作为振动响应控制的“附加质量”,可避免或减少传统 TMD-结构系统由于额外质量的附加对结构设计和建筑使用功能产生的影响。

(3)大质量比。内柱自身作为 TMD 系统中的质量块,可为结构提供非常可观的质量比。前期研究表明^[19-20],CIC 系统的质量比可超过 25%,远大于传统 TMD-结构系统的质量比(通常小于 5%^[21-22])。

(4)宽频带控制。子结构本身具有多个振型,因此,可以拓宽结构振动响应控制的频带,且对系统的优化参数不敏感,表现出良好的鲁棒性能。

2 刚度和承载力计算

本节基于钢管混凝土统一理论^[23],采用叠加原理推导建立 CIC 系统的截面轴压组合刚度和轴压极限承载力的理论计算公式。考虑到 CIC 系统内部的连接弹簧和消能器主要用于结构动力响应的控制,因此,在推导其刚度和承载力时,忽略弹簧刚度和消能器阻尼效应的影响,但是轴压作用下构件的偏心率和长细比等因素对 CIC 系统静力性能的影响不可忽略。由于篇幅所限,本节简要介绍 CIC 系统的截面轴压组合刚度 $(EA)_{CIC}$ 和轴压极限承载力 (N_{CIC}) 的计算公式,详细的推导见文献^[18]和文献^[24]。

2.1 轴压组合刚度

根据叠加原理,CIC 系统的截面轴压组合刚度 $(EA)_{CIC}$ 可将外柱和内柱的截面轴压刚度相加得到,按式(1)计算:

$$(EA)_{CIC} = (EA)_o + (EA)_i, \quad (1)$$

式中, $(EA)_o$ 和 $(EA)_i$ 分别为外柱和内柱的截面轴压刚

度,分别根据《中空夹层钢管混凝土结构技术规程(T/CCES 7-2020)》^[25]和《钢管混凝土结构技术规范(GB 50936-2014)》^[26]计算。

2.2 轴压极限承载力

类似地,CIC 系统的极限轴压承载力 N_{CIC} 可按照外柱和内柱分别考虑承载力折减后的极限值叠加得到,如式(2):

$$N_{CIC} = \varphi_o N_o + \varphi_i N_i, \quad (2)$$

式中, N_o 和 φ_o 为外柱的极限轴压承载力及其考虑偏心率和长细比影响的承载力折减系数,根据 T/CCES 7-2020^[25]计算; N_i 和 φ_i 为内柱的极限轴压承载力及其承载力折减系数,根据 GB 50936-2014^[26]计算。

3 等代设计方法

3.1 等代准则

以 CFST 柱为例,根据其实际尺寸和材料参数,将其等代设计成为轴压刚度等效的 CIC 系统(图 2),使得等代前后结构的整体尺寸和承载能力相当,从而便于实现对结构振动响应的控制。图 2 所示的几何参数分别表示对应的钢管直径($D, D_{oso}, D_{osi}, D_{is}$)、厚度($t, t_{oso}, t_{osi}, t_{is}$)和面积(A_s, A_{oso}, A_{osi}),后续推导不再赘述。

为实现等代设计,首先给出如下基本准则:

准则 1 等代前后不改变原结构的整体外观尺寸,即 CFST 的直径(D)与 CIC 系统外柱外钢管的直径(D_{oso})相等,满足式(3):

$$D = D_{oso}. \quad (3)$$

准则 2 为不过多改变原结构的设计,除了保证等代后的 CIC 系统具有等同的截面受压刚度外,仍需确保 CIC 外柱的轴心抗拉承载力与原柱基本相当。钢管混凝土构件中,混凝土作为受压材料,抗拉承载力仅考虑钢材的贡献^[23,27],因此,在使用相同钢管材料的条件下,仅需满足钢管的截面面积相等,即满足式(4):

$$A_s = A_{oso} + A_{osi}, \quad (4)$$

式中, A_s, A_{oso} 和 A_{osi} 分别为 CFST 和 CIC 系统相应钢管的截面面积。

准则 3 实际工程中,CFDST 外柱的内、外钢管厚度往往相等,因此,CIC 系统外柱的内、外钢管厚度亦相等,即满足式(5):

$$t_{oso} = t_{osi}. \quad (5)$$

准则 4 由第 1 节可知,CIC 系统以结构自身的部分质量作为振动响应控制的“附加质量”,不需要附加额外的质量,需要保证等代前后的总质量相等,即满足

式(6):

$$m_{CFST} = m_{CIC,o} + m_{CIC,i}, \quad (6)$$

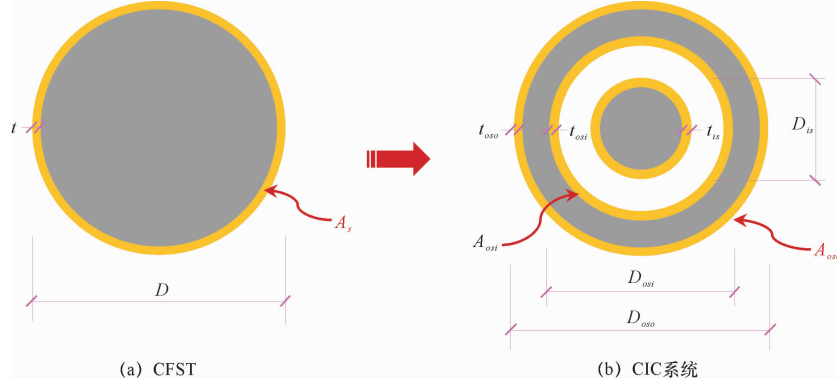


图2 CFST与CIC等代图示

Fig.2 Schematic diagram of the equivalence from CFST to CIC system

3.2 等代设计

3.2.1 t_{oso} 、 D_{osi} 和 t_{osi} 的计算

根据准则2,由图2所示的几何尺寸参数,式(4)可进一步改写为式(7):

$$\pi t(D-t) = \pi t_{oso}(D_{oso} - t_{oso}) + \pi t_{osi}(D_{osi} - t_{osi}). \quad (7)$$

根据准则1和准则3,将式(3)和式(5)代入式(7),消去 D_{osi} 和 t_{osi} ,化简得到式(8):

$$t(D-t) = t_{oso}(D + D_{osi} - 2t_{oso}). \quad (8)$$

对于CFST柱,其总质量 m_{CFST} 可按式(9)计算:

$$m_{CFST} = \pi t(D-t)h\rho_s + \frac{1}{4}\pi(D-2t)^2h\rho_c, \quad (9)$$

式中, h 、 ρ_s 和 ρ_c 分别为柱高(等代前后柱高不变)、钢管密度和混凝土密度。

假设CIC系统内柱与外柱质量比 μ 为已知,则由式(6)可得式(10):

$$m_{CIC,o} = \frac{1}{(1+\mu)}m_{CFST}. \quad (10)$$

此外,CIC系统的外柱质量 $m_{CIC,o}$ 还可根据构件的尺寸和材料按式(11)计算:

$$m_{CIC,o} = [\pi t_{oso}(D_{oso} - t_{oso}) + \pi t_{osi}(D_{osi} - t_{osi})]h\rho_s + \frac{1}{4}\pi(D_{oso} - D_{osi} - 2t_{oso})(D_{oso} + D_{osi} - 2t_{oso})h\rho_c. \quad (11)$$

将式(3)和式(7)代入式(11),可化简得到式(12):

$$m_{CIC,o} = \pi t(D-t)h\rho_s + \frac{1}{4}\pi h\rho_c(D - D_{osi} - 2t_{oso})(D + D_{osi} - 2t_{oso}). \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)可进一步化简得到式(13):

$$\frac{1}{4}\pi h\rho_c(D - D_{osi} - 2t_{oso})(D + D_{osi} - 2t_{oso}) = \frac{m_{CFST}}{(1+\mu)} - \pi t(D-t)h\rho_s. \quad (13)$$

式中, m_{CFST} 为CFST柱的总质量, $m_{CIC,o}$ 和 $m_{CIC,i}$ 分别为CIC系统外柱和内柱的质量。

显然,式(13)中 m_{CFST} 可由式(9)确定,因此,可通过联立式(8)和式(13),求解一元二次方程组顺利得到未知参数 t_{oso} 和 D_{osi} ,进而求得 $t_{osi} = t_{oso}$ 。

3.2.2 t_{is} 和 D_{is} 的计算

CIC系统内柱的质量可由式(14)或式(15)计算:

$$m_{CIC,i} = \frac{\mu}{(1+\mu)}m_{CFST}, \quad (14)$$

$$m_{CIC,i} = \pi t_{is}(D_{is} - t_{is})h\rho_s + \frac{1}{4}\pi(D_{is} - 2t_{is})^2h\rho_c. \quad (15)$$

令 $t_{is} = \varphi t_{oso}$,其中, φ 为内柱钢管壁厚调整系数,可根据实际的设计需要调整 φ 的大小,以满足 t_{is} 的取值需求。由式(14)和式(15),令两式相等化简得到式(16):

$$\frac{1}{4}\rho_c D_{is}^2 + (\rho_s - \rho_c)\varphi t_{oso} D_{is} - (\rho_s - \rho_c)\varphi^2 t_{oso}^2 - \frac{\mu}{\pi h(1+\mu)}m_{CFST} = 0, \quad (16)$$

显然,式(16)为关于 D_{is} 的一元二次方程,其正值解为

$$D_{is} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (17)$$

$$\text{式中,} \begin{cases} a = \frac{1}{4}\rho_c, \\ b = (\rho_s - \rho_c)\varphi t_{oso}, \\ c = -(\rho_s - \rho_c)\varphi^2 t_{oso}^2 - \frac{\mu}{\pi h(1+\mu)}m_{CFST}. \end{cases} \quad (18)$$

经过上述求解,便可确定图2(b)所示的CIC系统各参数的取值。类似地,对于中空夹层钢管混凝土柱(CFDST)的等代设计,仅需将上述公式中涉及的与CFST相关的计算参数替换成相对应的CFDST的计算参数即可,此处不再赘述。CIC系统的等代设计流程如图3所示,具体可归纳如下:

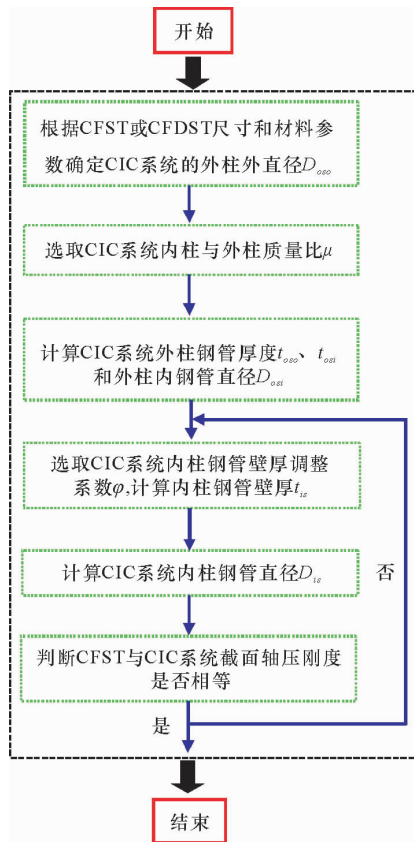


图 3 CIC 系统等代设计流程
Fig. 3 Design flow of the CIC system

第一步:根据原结构的尺寸确定 CIC 系统的外柱外直径 D_{oso} 。

第二步:根据结构设计的实际需求,给定 CIC 系统

内柱与外柱的质量比 μ ,由式(8)和式(13),代入原 CFST 柱的尺寸和材料参数,求得 CIC 系统外柱外钢管的厚度 t_{oso} 、外柱内钢管的直径 D_{osi} 和厚度 t_{osi} ;

第三步:选取合适的内柱钢管壁厚调整系数 φ 计算内柱钢管的厚度 t_{is} ,最后根据式(17)和式(18)确定内柱钢管的直径 D_{is} ,并判断 CIC 系统各尺寸参数是否满足规范 T/CCES 7-2020^[25]和 GB 50936-2014^[26]的基本要求;

第四步:根据式(1)计算 CIC 系统的截面轴压组合刚度是否与原 CFST 柱等效,若满足,则完成等代设计,否则重复第二步至第四步,直至等代完成。

4 算例分析

为检验本文提出的基于截面轴压刚度等效的 CIC 系统等代设计方法,本节分别选取 Huang 等^[28]试验中的 CFST 试件和 Tao 等^[29]试验中的 CFDST 试件为例,参照图 3 所示的等代设计流程,对这两种类型(实心 and 空心)的试件采用第 3 节的等代设计方法进行设计,以检验所提方法的准确性和可靠性。试件的基本尺寸和材料信息见表 1。为方便计算,等代设计过程中钢材和混凝土的密度分别取为 $\rho_s = 7\ 800\text{ kg/m}^3$ 和 $\rho_c = 2\ 400\text{ kg/m}^3$ 。根据表 1 中试件的信息,取质量比 $\mu = 0.55$,内柱钢管壁厚调整系数 $\varphi = 1$,经过等代设计,计算得到的 CIC 系统尺寸参数如表 2 所示。表 2 中,构件编号的数字表示 CIC 系统外柱外钢管的径厚比。

表 1 CFST 和 CFDST 试件尺寸和材料信息

Table 1 Dimensions and material information of the CFST and CFDST specimens

构件编号/名称	h /mm	D /mm	t /mm	f_s /MPa	f_c /MPa	E_s /GPa	E_c /GPa	ρ_s /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ_c /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	参考文献
1 CFST-40	840	200	5	265.8	27.15	200	24.65	7 800	2 500	文献[28]
2 CFST-70	840	280	4	272.6	31.15	200	26.40	7 800	2 500	
3 CFST-150	840	300	2	341.7	27.23	200	24.68	7 800	2 500	
4 CFDST-60	540	180	3	275.9	47.40	200	33.30	7 800	2 400	文献[29]

表 2 CIC 系统尺寸表

Table 2 Dimensions of the CIC system

构件编号/名称	h	D_{oso}	D_{osi}	D_{is}	t_{oso}	t_{osi}	t_{is}
1 CIC-40	840	200	140	118	3.0	3.0	3.0
2 CIC-70	840	280	182	166	2.5	2.5	2.5
3 CIC-150	840	300	187	178	1.2	1.2	1.2
4 CIC-60	540	180	119	108	1.8	1.8	1.8

根据表 1 和表 2,由第 2 节和第 3 节给出的计算理论,可计算得到每个 CFST 和 CFDST 试件以及等代设计

后 CIC 系统的质量、截面受压组合刚度和轴压极限承载力,具体结果见图 4。同时,对所得结果进行误差分析,

计算得到 CIC 系统与原件之间的误差百分比 E_p 。误差百分比按 $E_p = \frac{|CIC - CFST|}{CFST} \times 100\%$ 或 $E_p =$

$$\frac{|CIC - CFDST|}{CFDST} \times 100\% \text{ 计算。}$$

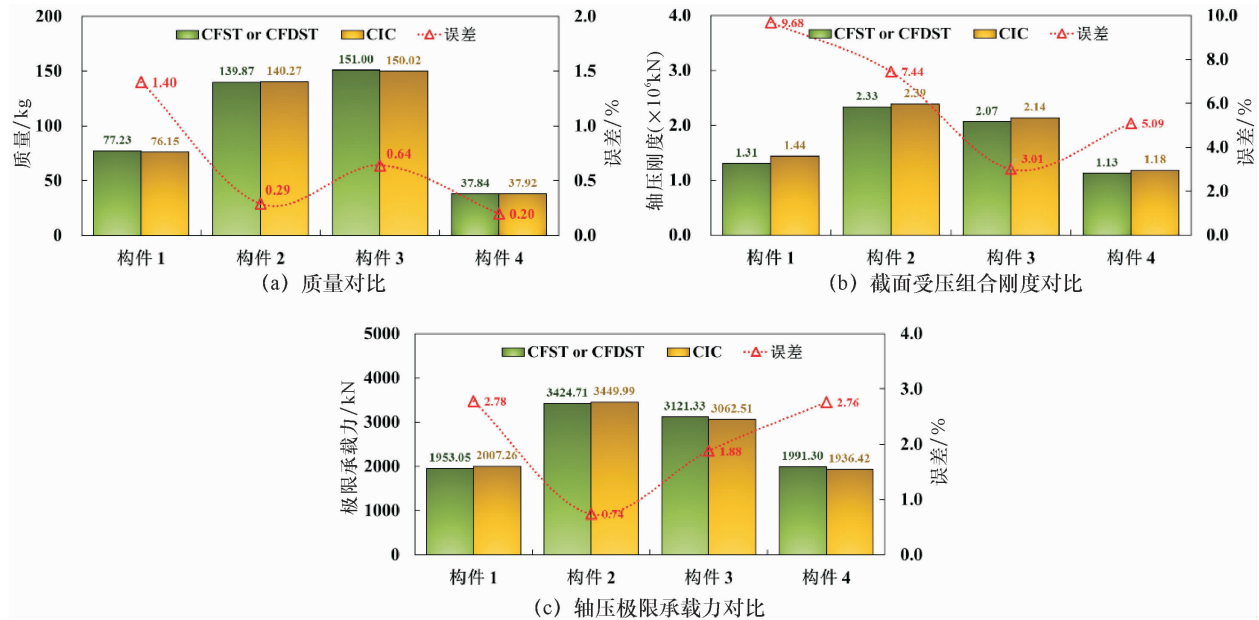


图 4 等代设计结果对比

Fig. 4 Comparisons between the CFST/CFDST and the CIC system

由图 4 可知,计算得到的 CIC 系统的截面轴压刚度与原 CFST 或 CFDST 试件相比误差最大值为 9.68%,均值为 6.31%,相应的质量误差非常小 ($< 1.5\%$),具有良好的等代效果,检验了所提出等代设计方法的准确性和可靠性。同时,采用本文提出的基于截面轴压刚度等效的 CIC 系统等代设计方法,计算得到的轴压极限承载力之间的偏差小于 3%,表明经过等代设计得到的 CIC 系统具有与原结构基本等同的竖向承载能力,进一步说明基于叠加原理建立的 CIC 系统的理论计算公式在实现轴压刚度等效的同时可保证结构具有可靠的承载能力。

5 结论

本文提出一种具有“承载 - 减振(震)”双功能的“柱中柱”(CIC)系统以增强高层组合结构的抗震性能。采用钢管混凝土“统一理论”的叠加原理推导 CIC 系统

的截面轴压组合刚度和轴压极限承载能力的计算公式,在此基础上建立基于截面轴压刚度等效的 CIC 系统等代设计方法并检验了该方法的准确性。主要得到以下结论:

(1) 根据钢管混凝土“统一理论”,采用“叠加”原理,便于建立 CIC 系统的截面轴压组合刚度和轴压极限承载力的理论计算公式。

(2) 经等代设计,CIC 系统与原结构柱具有基本相当的截面轴压刚度,且两者之间的质量和轴压极限承载力基本等同。其中,等代前后截面轴压刚度误差小于 10%,质量和轴压极限承载力误差均小于 3%,表明提出的等代设计方法具有良好的准确性和可靠性。

(3) 提出的基于轴压刚度等效的 CIC 系统等代设计方法可同时适用于 CFST 和 CFDST 结构柱的等代设计,该方法简明直接,契合我国现行规范要求,可为今后的工程设计与分析提供参考。

参考文献:

- [1] Han L H, Li W, Yang Y F. Seismic behaviour of concrete-filled steel tubular frame to RC shear wall high-rise mixed structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(5): 1249-1260.
- [2] Liew J Y R, Xiong M X, Xiong D X. Design of high strength concrete filled tubular columns for tall buildings[J]. International Journal of High-Rise Buildings, 2014, 3(3): 215-221.
- [3] Wu Q X, Yoshimura M, Takahashi K, et al. Nonlinear seismic properties of the Second Saikai Bridge: A concrete filled tu-

- bular (CFT) arch bridge[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(2): 163-182.
- [4] Nakamura S I, Tanaka H, Kato K. Static analysis of cable-stayed bridge with CFT arch ribs[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(4): 776-783.
- [5] Huang Y, Sun J Q, Wan J, et al. Experimental observations on the ice pile-up in the conductor array of a jacket platform in Bohai Sea[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 140: 334-351.
- [6] Zhang D Y, Wang G J, Yue Q J. Evaluation of ice-induced fatigue life for a vertical offshore structure in the Bohai Sea[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 154: 103-110.
- [7] Li W, Han L H. Behaviour of tapered concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns[C]//10th International Conference on Advances in Steel Concrete Composite and Hybrid Structures. Singapore: Research Publishing Services, 2012, doi:10.3850/978-981-07-2615-7_139.
- [8] Li W, Han L H, Zhao X L. Axial strength of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns with preload on steel tubes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2012, 56: 9-20.
- [9] Lu H, Han L H, Zhao X L. Fire performance of self-consolidating concrete filled double skin steel tubular columns: Experiments[J]. *Fire Safety Journal*, 2010, 45(2): 106-115.
- [10] Xiong M X, Liew J Y R. Fire resistance of high-strength steel tubes infilled with ultra-high-strength concrete under compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 176: 106410.
- [11] Du Y S, Chen Z H, Liew J Y R, et al. Rectangular concrete-filled steel tubular beam-columns using high-strength steel: Experiments and design[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 131: 1-18.
- [12] Han L H, Xu C Y, Tao Z. Performance of concrete filled stainless steel tubular (CFSST) columns and joints: Summary of recent research[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 152: 117-131.
- [13] 陆新征, 曾翔, 许镇, 等. 建设地震韧性城市所面临的挑战[J]. *城市与减灾*, 2017(4): 29-34.
- [14] 翟长海, 刘文, 谢礼立. 城市抗震韧性评估研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(9): 1-9.
- [15] 杨静, 李大鹏, 翟长海, 等. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题[J]. *中国科学基金*, 2019, 33(5): 525-532.
- [16] National Research Council. National earthquake resilience: Research, implementation and outreach[M]. Washington DC: The National Academies Press, 2011.
- [17] Edge B, Ramirez J, Peek L, et al. Multi-hazard research to make a more resilient world[R]. Alexandria: Natural Hazards Engineering Research Infrastructure, 2020.
- [18] 房晓俊. 基于“柱中柱”(CIC)概念的结构振动控制研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [19] Fang X J, Hao H, Bi K M. Passive vibration control of engineering structures based on an innovative column-in-column (CIC) concept[J]. *Engineering Structures*, 2021, 242(1): 112599.
- [20] Fang X, Hao H, Bi K M. An innovative pendulum-type column-in-column (PCIC) system for structural vibration control induced by seismic ground excitations[J]. *Engineering Structures*, 2022, 256: 113990.
- [21] Soong T T, Dargush G F. Passive energy dissipation systems in structural engineering[M]. Chichester: Wiley, 1997.
- [22] Sladek J R, Klinger R E. Effect of tuned-mass dampers on seismic response[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(8): 2004-2009.
- [23] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论: 研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [24] Fang X J, Ji J J, Hao H, et al. Behaviours of column-in-column (CIC) system under axial compression: Experimental and theoretical studies[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 192(5): 107217.
- [25] 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.
- [26] 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: GB 50936-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [27] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 中国科学出版社, 2004.
- [28] Huang C S, Yeh Y K, Liu G Y, et al. Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(9): 1222-1230.
- [29] Tao Z, Han L H, Zhao X L. Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(8): 1129-1158.

【责任编辑: 卓祯雨】