文章编号:1000-4750(2005)06-0117-05

RC 环梁连接的钢管混凝土柱 - RC 梁框架 计算模型研究

*周栋梁¹, 钱稼茹¹, 方小丹²

(1. 清华大学,北京 100084; 2. 华南理工大学,广州 510641)

摘 要:RC环梁连接的钢管混凝土柱-**RC**梁框架在竖向荷载和水平荷载作用下,在环梁一定高度范围内,环梁 与柱之间会有很窄的缝隙。通过有限元分析研究了环梁连接的转角刚度和环梁区域框架梁等效宽度以及它们的影 响因素,结果表明环梁宽度和框架梁宽度对转角刚度和等效宽度影响较大。框架内力、位移计算以及两层两跨框 架结构的静力试验和拟动力试验表明,环梁连接的钢管混凝土柱-**RC**梁框架可以采用梁柱直接刚性连接的模型 进行弹性分析。

关键词:钢管混凝土柱;环梁;转角刚度;等效宽度;计算模型 中图分类号:TU375 文献标识码:A

ANALYSIS MODEL OF STEEL-TUBE CONFINED CONCRETE COLUMN AND RC BEAM FRAME CONNECTED BY RC RING BEAM

^{*}ZHOU Dong-liang¹, QIAN Jia-ru¹, FANG Xiao-dan²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. South-China Polytechnic University, Guangzhou 510641, China)

Abstract: For the steel tube confined concrete (STCC) column-RC beam frame connected by reinforced concrete (RC) ring beam subjected to combined vertical and horizontal loads, there may be a very narrow gap between the ring beam and the column at certain height. The gap has influence on the frame stiffness. By finite element analysis (FEA) of the beam-column joints, the rotation stiffness and the equivalent beam width of the ring beam connector are examined, and the influence factors are investigated. It is found that the ring beam and the frame beam width have significant influence on the rotation stiffness and the equivalent width. Static and pseudo-dynamic tests on a two bay-two story STCC column-RC beam space frame with RC ring beam connectors have been performed. The test results are compared with the analysis results of a 3-bay 10-story frame. It is shown that treating the STCC column-RC beam as rigid joint is reasonable during the analysis of STCC column-RC beam frame connected by RC ring beam.

Key words: steel tube confined concrete (STCC) column; ring beam; rotation stiffness; equivalent width; analysis model

钢管混凝土(steel tube confined concrete, STCC) 柱尤其是钢管高强混凝土柱由于其理想的受力性 能和良好的经济效益,已越来越多地用于高层和超 高层建筑^[1~3]。我国高层建筑主要采用钢筋混凝土 (RC)梁板楼盖,解决 STCC 柱与 RC 梁的连接是推 广应用 STCC 柱的关键之一。RC 环梁是近几年开

收稿日期: 2003-11-27; 修改日期: 2004-03-05

作者简介:*周栋梁(1977),男,山东高密人,博士生,从事混合结构及工程结构抗震研究(E-mail:zhoudongliang00@mails.tsinghua.edu.cn); 钱稼茹(1946),男,江苏无锡人,教授,从事结构抗震、混凝土结构耐久性设计及结构健康监测研究; 方小丹(1951),男,广东普宁人,教授级高级工程师,从事钢管混凝土结构研究以及建筑结构工程设计.

发的一种 RC 梁和 STCC 柱的连接构件^[4~6],具有如 下优点:钢管内外无加劲环,无穿心构件,不影响 管内混凝土浇注;环梁钢筋笼无方向性,在地面绑 扎后吊装,高空就位方便;除钢管接长外无现场焊 接;造价相对较低等。RC 环梁连接已经应用于 7 度和 8 度抗震设防的 20 多幢高层和超高层建筑^[7]。

图1所示为采用 RC 环梁连接的 STCC 柱—RC 梁节点。在钢管周圈贴焊一道或两道钢筋作为抗剪 环,通过抗剪环,环梁将框架梁端剪力传递至钢管; RC 环梁围绕钢管,与钢管紧密箍抱,将梁端弯矩 传递给框架柱。抗剪环的截面尺寸应通过抗剪验算 确定;环梁承载力应符合"强连接弱构件"的设计 概念。



图1 钢筋混凝土环梁连接节点

Fig.1 Details of RC ring beam connected STCC column-RC

beam joint

在框架梁端弯矩和剪力作用下,环梁和 STCC 柱之间产生缝隙,环梁与柱之间存在相对转动,使 结构刚度降低;另一方面,在环梁区域内环梁加宽 了框架梁的截面宽度,提高了梁刚度。如何考虑这 两个因素,建立合理、简单的结构计算模型,对于 RC环梁连接的 STCC 柱—RC 梁框架的计算分析十 分重要。

本文通过有限元分析和结构计算,提出采用等 截面 RC 框架梁与 STCC 柱直接刚性连接的计算模 型;两层两跨用 RC 环梁连接的 STCC 柱—RC 梁框 架结构的试验结果验证了计算模型。

1 环梁连接转角刚度

RC 环梁与 **STCC** 柱之间的相对转动用环梁连接转角刚度度量。通过有限元分析,研究环梁连接转角刚度及其影响因素。

1.1 有限元分析模型

用 Ansys^[8]计算了 16 个 RC 环梁连接的 STCC 柱—RC 梁节点,节点算例尺寸见表 1。表中,r为 柱半径; h_r 和 b_r 分别为环梁高度和环梁宽度; h_b 和 b_b 分别为框架梁高度和宽度;L为从柱边到框架梁 端长度。用两个模型模拟环梁与 STCC 柱的连接界 面:模型 1(Set1)为环梁与 STCC 柱之间刚接;模型 2(Set2)考虑环梁与 STCC 柱之间有相对转动,环梁 与柱之间采用接触单元(采用 Ansys 中 TARGE170 和 CONTA174 接触对,混凝土和钢管间摩擦系数取 0.2)连接。有限元模型如图 2 所示,由于对称,取 1/2 节点建模。STCC 柱、环梁以及框架梁采用线弹 性材料,弹性模量 30GPa、泊松比 0.21。Set 1 采用 Solid 185 单元; Set 2 的柱采用 Solid 95 单元,环梁 和框架梁采用 Solid185 单元。位移约束条件为:柱 上下表面约束 x、y、z 三个方向的位移;对称面约 束 y 方向位移;同时 Set 2 约束环梁下表面与柱表 面交线 z 方向位移。加载方式为:在框架梁端中间 四个节点施加 z 方向节点荷载,单调加载和往复加 载。

表1 节点算例几何尺寸及计算结果

Tabel 1 Dimensions and analytical results of joint samples

	几何尺寸					计算	[结果		
节点算例	r	h_r	b_r	h_b	b_b	L	k ø	0	b_e
序号	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/m	/kN•m	p	/mm
1	500	700	350	650	350	3	9.64E+05	64.2	410
2	500	700	500	650	350	3	1.85E+06	122.8	531
3	500	700	400	650	350	3	1.20E+06	79.8	450
4	500	700	400	650	250	3	1.15E+06	106.9	386
5	500	700	400	650	500	3	1.47E+06	68.7	539
6	500	700	400	650	600	3	2.08E+06	80.6	600
7	500	700	400	650	400	3	1.30E+06	75.5	480
8	500	750	400	700	400	3	1.59E+06	74.1	458
9	500	800	400	750	400	3	2.01E+06	76.1	438
10	500	850	400	800	400	3	2.47E+06	77.1	420
11	500	900	400	850	400	3	2.85E+06	74.3	404
12	250	400	150	350	200	2	1.29E+05	48.0	246
13	250	400	200	350	200	2	2.06E+05	76.7	296
14	250	400	250	350	200	2	3.15E+05	117.5	343
15	250	400	300	350	200	2	4.17E+05	155.4	392
16	250	400	350	350	200	2	5.38E+05	200.9	440

1.2 有限元分析结果

图 3 所示为节点算例 3 采用模型 2 计算、梁端 荷载 *P* 为 800kN 时, RC 环梁与 STCC 柱之间的最 大相对位移 *d*_r沿环梁高度分布曲线。可以看出,环 梁受负弯矩作用时,环梁下部与 STCC 柱挤紧,环 梁上部与 STCC 柱产生缝隙,该缝隙引起环梁与 STCC 柱间相对转角。





图 4 不同计算模型梁端荷载-位移(P-△)关系曲线

Fig.4 Load-deflection curves by different analysis models

有限元分析结果表明,同一节点算例采用两个 不同计算模型得到的梁端荷载一位移关系非常接 近,采用刚接计算模型的节点刚度略大些。图4为 节点算例 7 两个计算模型得到的梁端荷载一位移 (*P*-Δ)关系;图中 Set3 为等截面框架梁与 STCC 柱刚接时梁端荷载一位移计算曲线,界于 Set 1 和 Set 2 的计算曲线之间。计算模型 Set 1 和 Set 2 的梁 端位移分别记为 Δ_1 和 Δ_2 ,位移之差即为环梁与 STCC 柱之间的相对转角在梁端产生的位移,相对 转角 $\theta = (\Delta_2 - \Delta_1)/L$,则环梁连接转角刚度 $k_{\theta} = M/\theta$, *M*为梁端荷载对柱边取矩。

图 5 为节点算例 3 在梁端往复荷载作用下的 *M*~θ曲线,该曲线为滞回曲线。由热力学定律可 知,存在滑动摩擦情况下,该滞回曲线是合理的。 环梁与 STCC 柱之间的滑动摩擦具有耗能能力。



图 5 算例 3 环梁弯矩-转角(M-θ)关系曲线

Fig.5 Moment-rotation hysteresis loops of the ring beam

connector of sample 3

对 $M \sim \theta$ 曲线进行直线拟合可以得到环梁连接转角 刚度 k_{θ} ,图 5 中虚线即为拟合结果。记 k_{θ} 与框架 梁线刚度比为 β 。通过分析计算可以得到:

$$\beta \propto \left(\frac{h_r}{h_b}\right)^2 \frac{l_b}{b_b} \frac{b_r}{r + b_r / 2} \frac{b_r^2}{0.44b_r^2 + (r + b_r / 2)^2}$$
(1)

式中, l_b为框架梁计算长度。

16 个节点算例的 k_{θ} 和 β 值列于表 1。计算 β 时,取 STCC 柱半径r分别为 500mm 和 250mm 的 节点,梁长 l_b 分别取 8m 和 4m。计算结果表明,环 梁连接转角刚度远大于梁的线刚度。在 STCC 柱半 径r相同情况下,影响 β 的因素有 b_r 、 h_b 和 b_b (工 程中为施工方便, h_r 一般比 h_b 大 50mm)。当 b_r 增 大时, β 增长较快; h_b 对 β 的影响不大;当 b_b 较 小时, b_b 增大则 β 减小。上述结果与式(2)一致。当 b_b 较大时, b_b 增大则 β 也增大,与式(2)不一致。 原因是此时框架梁较宽,框架梁端的等效拉力分布 在一定宽度上,在环梁内引起的拉应力流可以直接 绕过 STCC 柱传递,有利于环梁受力,提高环梁连 接转角刚度。

2 环梁区域框架梁等效宽度

将环梁作为框架梁的一部分,等效宽度为b_e, 框架梁为分段变截面梁,如图 6 所示。通过对比图 6 所示悬臂梁梁端挠度和 Set1 的有限元分析结果, 可以得到点算例的等效宽度 b_e, b_e 列于表 1。



图 6 框架梁作为分段变截面梁计算模型

Fig.6 Multi-segment model of the frame beam

结果表明,在 STCC 柱半径 r 相同的情况下, 影响 b_e 的因素有 b_r 、 h_b 和 b_b 。当 b_r 增大时, b_e 增 长较快; h_b 对 b_e 的影响不大;当 b_b 较小时, b_e/b_b 较大,当 b_b 较大时, b_e/b_b 趋向于 1。

3 计算模型对结构内力和位移的影响

计算采用 RC 环梁连接的 10 层 3 跨 STCC 柱框架在 竖向荷载作用下的内力和倒三角分布水平荷载作 用下的内力和位移。框架层高4m,柱距8m,STCC 柱直径 1m,框架梁宽 350mm、高 650mm。采用三 种计算模型。模型 1, 框架梁为等截面, 与 STCC 柱刚接;模型2,框架梁为等截面,与 STCC 柱之 间有相对转动,连接转角刚度与梁线刚度之比 B 分 别为 25 和 50; 模型 3, 环梁宽度为 400mm(即表 1 节点算例 3), 框架梁为分段变截面梁, 在环梁宽度 范围内框架梁宽度为 450mm, 框架梁与 STCC 柱之 间有相对转动, β为79.8。以模型3的计算结果为 基准,模型1、模型2与模型3的计算结果误差列 于表 2, 内力的误差为构件内力的最大误差。计算 结果表明,综合考虑环梁与 STCC 柱之间的转动和 环梁宽度,工程设计中可以采用等截面框架梁与 STCC 柱刚接的计算模型进行 RC 环梁连接的 STCC 柱框架的弹性分析。

表 2 内力最大误差和水平荷载作用下顶点位移误差

Table 2 Errors of internal forces and top lateral displacement

计算模型		重力荷载作	水平荷载作	水平荷载作用	
		用下内力	用下内力	下顶点位移	
模型1		1.2%	0.6%	0.7%	
模型 2	$\beta = 25$	8.3%	10.5%	17.4%	
	$\beta = 50$	4.3%	4.9%	6.3%	

4 试验验证

为了研究采用 RC 环梁连接的 STCC 柱框架的 抗震性能,进行了两层两跨空间框架的拟动力试 验^[9]。试验模型层高 3.5m,柱距一个方向为 4.5m, 另一方向为 3.0m,沿柱距 4.5m 的方向加载,钢管 直径 500mm。图 7 所示为试验模型平面图和剖面图 以及部分测点布置图。在拟动力试验前施加配重和 水平静力荷载;拟动力试验采用 1940 El Centro NS 地震记录,弹性阶段地震波的峰值加速度 *a_p*分别为







表 3 施加配重后梁跨中挠度(单位:mm)

 Table 3
 Beam deflections under the vertical load

	测点1	测点 2	测点 3	测点4
实测挠度	0.20	0.27	0.14	0.38
计算挠度	0.21	0.29	0.15	0.41

表 4 静力水平加载位移及拟动力试验最大位移(单位: mm)

Table 4 The maximum lateral displacement under different

	•	
and	1100	00000
020	IIIV.	CASES
louu		cabeb

	一层正方向		一层反方向		二层正方向		二层反方向	
荷载工况	位移		位移		位移		位移	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
静力水平荷载	0.45	0.44	-0.47	-0.44	0.88	1.03	-0.89	-1.01
$a_p = 0.034 \text{g}$	0.84	0.73	-0.71	-0.67	1.51	1.69	-1.46	-1.54
$a_p = 0.07 g$	1.63	1.52	-1.52	-1.37	3.01	3.54	-2.83	-3.22



图 8 位移时程曲线



表4列出了施加静力水平荷载时的位移和拟动 力试验最大位移的实测值与计算结果。动力时程分 析采用 Drain2D 动力分析通用软件^[10]。图 8 比较了 *a_p*为0.07g时一层和二层位移时程实测曲线与计算曲线。结构实测位移与采用梁一柱刚节模型计算的位移吻合,验证了弹性计算模型的合理性。

5 结论

(1)有限元分析表明,环梁宽度和框架梁宽度 是影响环梁连接转角刚度与框架梁线刚度比β以 及影响环梁等效为框架梁时等效宽度的主要因素;

(2) 环梁连接的 STCC 柱框架的计算表明,考 虑环梁的宽度和环梁与 STCC 柱之间有相对转动的 计算模型的计算结果,与框架梁与 STCC 柱为刚性 连接的计算模型的计算结果吻合较好;

(3) 可以采用等截面框架梁与 STCC 柱刚性连接的计算模型对 RC 环梁连接的 STCC 柱-RC 梁框架进行弹性分析,弹性静力试验和拟动力试验结果表明,这一计算模型是合理的。

参考文献:

- 蔡绍怀. 我国钢管混凝土结构的有效新进展[J]. 土木 工程学报, 1999, 32(4): 16~26.
 Cai Shaohuai. Latest development of steel tube confined concrete structures in China [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(4): 16~26. (in Chinese)
 钟善桐. 钢管混凝土在高层建筑中的发展[J]. 建筑钢
 - 结构进展, 2000, 2(4): 4~15. Zhong Shantong. The development of concrete filled steel tube (CFST) in tall buildings [J]. Progress in Steel Building Structures, 2000, 2(4): 4~15. (in Chinese)
- [3] Shams M, Saadeghvaziri M A. State of the art of concrete-filled steel tubular columns [J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(5): 558~571.
- [4] 方小丹,李少云,陈爱军. 新型钢管混凝土柱节点的 试验研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(5): 2~15.
 Fang Xiaodan, Li Shaoyun, Chen Aijun. Experimental research on a new type of steel tube confined concrete column joint [J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(5): 2~15. (in Chinese)
- [5] 李少云,方小丹,杨润强.广州市翠湖山庄工程钢管 混凝土柱节点足尺静载试验研究[J].土木工程学报, 2001,34(6):11~16.

Li Shaoyun, Fang Xiaodan, Yang Runqiang. A static test of joints between STCC column and encircle-beam [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 11~16. (in Chinese)

(参考文献[6]~[10]转第 240 页)

态横摇时的横摇周期基本一致,仍主要由波浪的周期决定,但横摇角幅值受恢复力矩和阻尼的非线性以及同步滑动重载荷数量的影响较为明显,特别是众多载荷同步滑动时这种影响更为突出,甚至可能导致滚装船出现倾覆现象。

(4)本文仅仅考虑了非线性恢复力矩和非线性 阻尼对由滚装船和滑动重载荷组成的浮基系统横 摇运动的影响,如果再考虑附加惯性矩和波浪扰动 力矩的非线性以及各自由度之间的耦合影响的非 线性等因素,船舶的摇摆响应将变得更加复杂。另 外,滑动重载荷与滚装船甲板之间的摩擦、滑动重 载荷之间的相互碰撞、众多重载荷滑动的不同步效 应、众多重载荷滑动由不同步到同步所需的时间过 程等一系列问题都还有待于进一步研究探讨。

参考文献:

- Kral R, Kreuzer E, Wilmers C. Nonlinear oscillations of a crane ship [A]. Kreuzer E., Mahrenholtz O. Proceedings of the 3rd international conference on industrial and applied mathematics 1995, Suppl. 4 [C]. Berlin: Akademie Verlag, 1996. 5~8.
- [2] Schellin T E, Jiang T, Ostergaard C. Response analysis and operating limits of crane ships [J]. Journal of Ship Research, 1993, 37: 225~238.
- [3] Ellermann K, Kreuzer E, Markiewicz M. Nonlinear dynamics of floating cranes [J]. Nonlinear Dynamics, 2002, 27: 107~183.
- [4] 周光坰, 严宗毅, 许世雄, 章克本. 流体力学(下册)[M].
 北京: 高等教育出版社, 1993.
 Zhou Guangjiong, Yan Zongyi, Xu Shixiong, Zhang

(上接第 121 页)

- [6] 方小丹,李少云,钱稼茹,杨润强.钢管混凝土柱-环梁节点抗震性能的试验研究[J].建筑结构学报,2002,23(6):10~18.
 Fang Xiaodan, Li Shaoyun, Qian Jiaru, Yang Runqiang. Experimental research of seismic behavior of concrete filled steel tubular column-ring beam joint under cyclic loading [J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(6):10~18. (in Chinese)
 [7] 钱稼茹,周栋梁,方小丹.钢管混凝土柱—RC 环梁节
 - 点及其应用[J]. 建筑结构, 2003, 33(9): 60~62. Qian Jiaru, Zhou Dongliang, Fang Xiaodan. Steel tube confined concrete column – RC ring beam joint and its application [J]. Building Structures, 2003, 33(9): 60~62.

Keben. Fluid Mechanics () [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993. (in Chinese)

- [5] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
 Liu Yingzhong, Miao Guoping. Motion theory of ship in waves [M]. Shanghai: Publishing House of Shanghai Jiao Tong University, 1987. (in Chinese)
- [6] 彭英声. 舰船耐波性基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.

Peng Yingsheng. Fundamentals for Ship Seakeeping Ability [M]. Beijing: National Defence Industry Publishing House, 1989. (in Chinese)

 [7] 朱军. 舰船静力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
 Zhu Jun. Ship Statics [M]. Changsha: Publishing House of National University of Defence Technology 2002 (in

of National University of Defence Technology, 2002. (in Chinese)

- [8] Shen Q, Li Y, Chen X J. Dynamic analysis of multibodies system with a floating base for rolling of ro-ro ship caused by wave and slip of heavy load [J]. Journal of Marine Science and Application, 2003, 2(2): 17~24.
- [9] 休斯敦, 刘又午. 多体系统动力学[M]. 天津: 天津大 学出版社, 1987.
 Houston R L, Liu Youwu. Multibodies System Dynamics
 [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1987. (in Chinese)
- [10] 林明锦. 海峡车/客渡船——紫荆壹号的总体设计[J]. 武汉造船, 1998, 1: 1~5.
 Lin Mingjin. Overall design of strait vehicle / passenger ferrying ship—Zijing No.1 [J]. Wuhan Ship Building, 1998, 1: 1~5. (in Chinese)

(in Chinese)

- [8] ANSYS Inc. ANSYS user's manual for revision 5.5 [R]. 1998.
- [9] 周栋梁,钱稼茹,方小丹,江毅.钢管混凝土柱—RC
 环梁节点框架试验研究[J].土木工程学报,2004,37(5):
 7~15.

Zhou Dongliang, Qian Jiaru, Fang Xiaodan, Jiang Yi. Experimental study of a frame with steel tube confined concrete column-ring beam joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5): 7~15. (in Chinese)

[10] Powell G H. DRAIN-2D user's guide [R]. Report EERC No.73-23, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, 1973.