

钢管混凝土外加强环式节点研究及应用综述

邬蒙¹, 黄志^{1,2}

¹湖南科技大学土木工程学院/建筑工程系, 湖南 湘潭

²湖南省智慧建造装配式被动房工程技术研究中心, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年1月29日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月29日

摘要

钢管混凝土外加强环节点是指通过采用外加强环板将钢管混凝土柱与梁结合形成一个整体的连接部位, 是确保结构安全性和耐久性的关键部位。本文首先对国内外关于钢管混凝土外加强环节点构造形式的研究进行了梳理和分析, 加强环板与梁柱连接多采用焊接, 随着装配式结构的普及, 高强螺栓也逐渐被应用于加强环板与梁的连接中。通过进一步对比国内外钢管混凝土节点抗震性能的研究, 总结发现此类节点表现出良好的工作和抗震性能, 具有广泛的应用前景。最后对该类节点抗剪承载能力的计算公式进行了总结与分析, 国内外已有相关规范提供了数学计算公式, 但随着节点构造形式和加工材料的不断变化, 现有公式可能存在一定的局限性。学术研究和工程实际均显示, 钢管混凝土外加强环板具有较好的刚性、延性和抗震性能。因此, 通过梳理和归纳现有的最新研究成果, 为后续研究钢管混凝土外加强环节点的新型构造及其性能提供可靠的经验。

关键词

钢管混凝土, 外加强环式节点, 构造形式, 抗震性能, 抗剪承载力

Research and Application Review of Concrete-Filled Steel Tube Outer Reinforced Ring Joints

Meng Wu¹, Zhi Huang^{1,2}

¹School of Civil Engineering/Department of Architectural Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Hunan Engineering Research Center for Intelligently Prefabricate Passive House, Xiangtan Hunan

Received: Jan. 29th, 2024; accepted: Mar. 21st, 2024; published: Mar. 29th, 2024

Abstract

The Concrete-Filled Steel Tube (CFST) outer reinforced ring joints refer to the joint part of the CFST column and beam to form a whole through the use of outer reinforced ring plates, which is the key part to ensure the safety and durability of the structure. Firstly, in this paper, the research on the structural forms of Concrete-Filled Steel Tube (CFST) outer reinforced ring joints at home and abroad is analyzed. Welding is often used to strengthen the connection between ring plate and beam column. With the popularity of prefabricated structures, high-strength bolts are gradually applied to strengthen the connection between reinforced ring plate and beam. By further comparing the studies of seismic performance of concrete-filled steel tube joints at home and abroad, it is concluded that such joints show good working and seismic performance, and have a wide application prospect. Finally, the calculation formula of the shear-bearing capacity of this kind of node is summarized and analyzed. Relevant norms at home and abroad have provided mathematical calculation formulas, but with the constant change in the structural form of the joint and the processing material, the existing formulas may have some limitations. Academic research and engineering practice show that CFST outer reinforced ring plate has good rigidity, ductility and seismic performance. Therefore, by sorting out and summarizing the latest research results, the reliable experience is provided for the subsequent research on the new structures and properties of CFST outer reinforced ring joints.

Keywords

Concrete-Filled Steel Tube, Outer Reinforced Ring Joints, Structural Form, Seismic Performance, Shear-Bearing Capacity

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢管混凝土是一种复合结构材料,由钢管和混凝土这两种性能截然不同的材料组成。这种材料在土木工程领域已历经百年的应用历史,在我国也已走过60多年的研发与应用历程。钢管混凝土充分发挥了钢管和混凝土各自的优点,有效提升了混凝土的抗压强度,同时也弥补了钢管抗弯能力的不足。其具有优越的力学性能,例如具有较高的承载力、良好的延性、较强的耐疲劳能力、优秀的抗冲击性能以及良好的抗震性能[1]-[11]。钢管混凝土的优势不仅在于其力学性能,在施工方面,由于其自重较轻、便于运输,且无需模板,使施工过程更为便捷,大大缩短了施工周期[12][13][14][15][16]。在环保和可持续发展方面,相比传统的建筑材料,钢管混凝土在生成和使用过程中能够减少对资源的消耗,减少对环境的影响。此外,钢管混凝土的维护成本低,使用寿命长,能够有效降低建筑物的维护费用,符合现代社会对于可持续发展和节约能源的要求[17]-[28]。因此,钢管混凝土被广泛应用于单层和多层厂房建筑、高层建筑、大跨度桥梁等工程项目中,具有广阔的应用前景和发展潜力[29]。

节点在整体结构中扮演着至关重要的角色,它的主要功能是将梁柱紧密地连接为一个统一的整体。同时,节点也充当着传递梁柱的弯矩和剪力的中介角色,因此,节点的可靠性对于整体结构的稳固性有着不可或缺的影响。在进行钢管混凝土构件设计时,应根据实际情况选择合适的节点形式来保证节点强度和刚度,以充分发挥材料性能。在《钢管混凝土结构设计与施工规程(CECS28:90)》中,外加强环节点

被列为推荐的三种节点方式之一,并在钢管混凝土结构中被广泛采用。这种节点通常在钢管柱核心区柱壁上焊接两块加强环板,外环板有同心圆弧型、直线型、折线型、内凹圆弧型等多种形式。这类节点的传力路径明确,承载力高,抗震性能良好。目前国内外对外加强环节点的理论研究和实际应用都非常丰富,从20世纪80年代起,该类节点就被广泛应用于日本的高层建筑中,在我国的相关设计规定中,外环板的形态和对应的宽度设计公式都有明确的条文规定。

本文主要围绕钢管混凝土外加强环的构造形式、力学性能、抗震性能及其抗剪承载力计算方法等方面展开研究,对国内外相关研究成果进行了总结和归纳。对目前外加强环节点存在的一些问题进行了探讨,为后续外加强环节点的理论研究及在实际工程的应用提供参考。

2. 构造形式研究

钢管混凝土外加强环连接的发展是工程领域广泛研究的课题。通过研究发现,钢管混凝土和空心钢柱中的外加强环板,不仅可以提高抗震性能,确保结构稳定性,还能优化塑性铰的位置,进一步增强结构的抗震性能。此外,对于工字钢梁与方钢管混凝土柱的连接,通过调整加强环尺寸和在钢管柱内填充混凝土,可以有效提升连接的极限弯矩,显著增强结构的承载能力和稳定性。这些发现为工程实际提供了有益的参考,对于优化结构的安全性和耐久性具有重要的指导意义。

Rezaifar等(2017) [30]对4个空钢管截面试件和6个钢管混凝土截面试件进行了试验研究。结果表明,由于加强环板几何尺寸的特殊性,使塑性铰远离柱面。此外,作者提出一种新的由梯形外加劲肋和条形垫连接的梁-箱柱连接,经试验研究发现,使用所提出的外部加劲肋是连续板的良好替代品,可以在建筑物的设计中加以考虑,并且具有商业化的能力。吴东平等(2022) [31]针对传统钢管混凝土-钢梁外加强环节点连接易损坏的问题,提出了一种新的装配式螺栓连接节点。经过拟静力荷载试验,该节点展现出良好的工作性能和稳定性。同时发现,外环板的形状对塑性损伤具有影响,为进一步提升节点的耗能性能,可在钢梁翼缘与外环板的螺栓连接处增设盖板。吴海亮等(2022) [32]为了深入研究方钢管混凝土柱-H型钢梁外环板节点的抗剪特性,进行了一系列的低周往复荷载实验。试验数据显示,改变轴压比对节点的抗剪能力、延展性和能量消耗几乎没有太大影响,但它确实会增加节点的起始刚度,并加速节点刚度的下降。戎贤等(2022) [33]对方钢管混凝土柱梁下栓上焊节点进行了拟静力试验,根据得到的数据和试件滞回曲线,分析了不同类型焊接接头对下栓上焊柱梁和钢框架梁柱连接性能的影响。试验数据显示,焊缝对构件的损坏位置有着显著的影响。与全螺栓节点核心区相比,下栓上焊节点的变形更为微小,更接近“强柱弱梁”的标准,但全螺栓节点的延展性明显优于下栓上焊节点。杨红等(2022) [34]对法兰连接的钢管混凝土柱-钢梁的外部加强环节点进行了低周往复荷载的试验研究。发现该节点展现出了出色的抗震特性,并且通过扩大加强环板的宽度,其受力性能得到了进一步的提升。丁发兴等(2022) [35]对高轴压比的方型钢管混凝土柱与组合梁单边栓接刚接节点进行了抗震性能的试验性研究。研究发现,调整轴压比并不会改变节点的损坏模式,但通过增加“强梁”结构,可以有效提高节点的能量消耗和初始转动刚度。

上述的研究结果表明,通过在钢管混凝土柱的四周添加外部加强环板来连接梁柱,这种设计不仅确保了柱体结构的完整性,方便了混凝土的浇筑工作,还能显著提高节点的承载能力,从而进一步优化了整体的工作性能。另外,通过选择合适的环板设计,可以确保塑性铰在连接板上远离柱面,从而显著增强节点的力学性能与抗震能力。

3. 力学与抗震性能研究

随着城市化进程的加速,高层建筑和大型基础设施的数量不断增加,这些结构的抗震性能直接关系到人民生命财产安全和社会稳定。在地震作用下,节点容易发生破坏,节点作为结构中的关键部位,其

抗震性能的优劣对整个结构的稳定性具有决定性影响。对节点抗震性能进行深入研究, 提高节点的抗震能力, 是保障结构安全的重要手段。目前结构抗震试验方法主要有静力试验方法(低周往复加载静力试验)、地震模拟震动台试验方法和拟动力试验方法三种。

Eom 等(2019) [36]的研究中, 为了深入了解钢管混凝土柱-钢梁组合节点的力学特性, 进行了拟静力试验, 并构建了有限元数值模拟仿真模型, 通过改变不同参数下试件的加载方式和破坏模式, 研究该类节点在单调荷载作用下的滞回曲线、骨架曲线及延性系数等受力特点。Ma 等[37] (2022)、Li 等(2022) [38]、Ma (2023) [39]构建了一个在循环荷载影响下的钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的有限元数值模拟仿真模型。该模型全面分析了节点的应力和应变发展过程, 研究了在不同破坏模式下各构件的内力和变形分布, 并确定了影响节点失效模式的关键参数和相应的参数范围。该模型在破坏模式、延迟关系以及应变分布等多个方面的准确性得到了验证, 并据此构建了一个用于预测节点强度的模型。Li 等(2022) [40]为了深入了解十字形钢管混凝土柱与钢梁组合节点在地震中的损伤特性, 进行了一系列试验。试验数据显示, 此类节点的主要破坏方式是节理板区的剪切破坏和梁端的断裂, 而滞回曲线并没有明显的捏缩现象, 表明此类节点具有出色的能量消耗能力。余玉洁等(2022) [41]为了深入研究钢管混凝土柱与钢梁下栓上焊节点的抗震特性及其工作原理, 进行了一系列的低周往复荷载实验。通过对该试件破坏形态、滞回特性、承载力以及刚度退化过程进行分析研究, 得到此类组合构件的受力特征和耗能机制。

上述的研究结果表明, 外加强环节点在抗震性能、抗变形能力、转动能力等方面表现不俗, 且探寻到增强其抗震性能、抗变形的办法, 为提高其抗震、抗变形能力提供了宝贵经验, 揭示了外加强环节点拥有卓越的能量耗散特性, 这有助于增强建筑物的抗震性能, 并在维护人民财产安全上起到了不可或缺的角色。

4. 外加强环节点抗剪承载力计算方法研究

日本规范 AIJ (1987) [42]指出, 加强环式节点的抗剪承载能力是由钢管和核心混凝土共同提供的。基于叠加原理, 该规范提出了用于计算外加强环式节点抗剪承载力的数学计算公式, 具体如下:

$$V_{pu} = (F_{js}\beta V_c + 1.2V_s f_y / \sqrt{3}) / d_{sb} \quad (1)$$

$$F_{js} = \min(0.12f_{ck}, 1.8 + 3.6f_{ck}/100) \quad (2)$$

式中: F_{js} 为核心区混凝土抗剪强度; F_{js} 为核心区混凝土抗剪强度; β 为钢管混凝土约束系数; $V_c = A_c d_{sb}$, $V_s = A_s d_{sb} / 2$; A_c 为节点核心区混凝土的截面面积; A_s 为节点核心区钢管柱截面面积; d_{sb} 为钢梁腹板高度; f_y 为钢管的屈服强度。

《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS159:2004) [43]进一步提出了用于计算外加强环节点核心区抗剪承载力的数学计算公式, 具体如下:

$$\beta_v V \leq \frac{1}{\gamma} V_u^j \quad (3)$$

$$V_u^j = (2N_y h_c + 4M_{uw} + 4M_{uj} + 0.5N_{cv} h_c) / h_b \quad (4)$$

$$M_{uw} = \frac{1}{6} h_b^2 t [1 - \cos(\sqrt{3} h_c / h_b)] f \quad (5)$$

$$M_{uj} = \frac{1}{4} b_c t_j^2 f_j \quad (6)$$

$$N_{cv} = \frac{2b_c h_c f_c}{4 + (h_c / h_b)^2} \quad (7)$$

$$V = \frac{2M_c - V_b h_c}{h_b} \quad (8)$$

式中: V 为节点的承受的剪力设计值; β_v 为剪力放大系数, 考虑抗震时取 1.3, 不考虑时取 1.0; V_u^j 为节点抗剪强度设计值; b_c 为混凝土截面宽度; h_c 为混凝土截面高度; h_b 为钢梁截面高度。 t 和 t_j 分别为核心区钢管壁厚和内隔板厚度; M_c 为上、下柱弯矩设计值的平均值; V_b 为左右梁端剪力设计平均值; f 、 f_w 和 f_j 分别为钢管柱、焊缝和隔板材料的抗拉强度设计值。

基于上述规范, 结合当下最新研究, 马旭(2018) [44]提出了矩形钢管柱-H 型钢梁外加加强环节点核心区抗剪承载力主要由核心区钢管腹板、核心区钢管翼缘和外环板提供的思路并建立了其抗剪承载力的数学计算公式, 其抗剪承载力公式如下:

$$V = V_s + V_r = V_w + V_f + V_r \quad (9)$$

$$V_{wy} = A_w \tau_x = \frac{A_s}{2} \tau_x = \frac{2t_c (B_c - t_c) \sqrt{f_{wu}^2 - \sigma_n^2}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

$$V_{fy} = \frac{4M_{fy}}{H_b - t_r} = \frac{t_c^2 (B_c - 2t_c) f_{fy}}{H_b - t_r} \quad (11)$$

$$V_{ry} = \frac{8M_{ry}}{H_b - t_r} = \frac{2L_r t_r^2 f_{ry}}{H_b - t_r} \quad (12)$$

式中: V 、 V_s 、 V_r 、 V_w 、 V_f 分别为节点核心区抗剪承载力、核心区钢管的抗剪承载力、外环板的抗剪承载力、核心区钢腹板的抗剪承载力、钢管翼缘的抗剪承载力; A_s 为核心区钢管的截面面积; τ_x 为核心区钢管腹板的剪切屈服强度; B_c 为核心区钢管宽度; t_c 为核心区钢管厚度; f_{wu} 为核心区钢管腹板钢材的抗拉强度; σ_n 为核心区钢管腹板受到的竖向压应力; f_{fy} 为核心区钢管翼缘钢材的屈服强度; f_{ry} 为外环板材料的抗拉强度; L_r 为外环板单条屈服线的长度; t_r 为外环板厚度。

以上研究成果不仅大幅度减少了计算外加加强环节点抗剪承载力所需的时间, 且提升了计算的准确度, 还为制定其他类型节点的抗剪承载力计算公式和相关规范提供了有价值的参考经验。

5. 结论

- 1) 通过改变外加加强环板的厚度可以有效提高节点的强度和刚度; 合理改变环板的形状和设置盖板可以使塑性较远离柱面, 提高节点的延性和刚度; 锚固腹板加筋板可提高节点的承载力。
- 2) 在低周往复荷载试验中, 节点容易因应力集中而发生破坏, 其破坏形式主要表现为加强环板与梁的连接处的破坏, 在加强环与钢梁翼缘连接处设加强板可有效减缓应力集中, 使塑性较外移。
- 3) 目前对应用新型材料的钢管混凝土外加加强节点的研究仍然较少, 然而, 随着新材料技术的不断发展和进步, 越来越多的新材料开始展现出优异的性能, 这为钢管混凝土外加加强节点的应用提供了新的可能性, 因此, 为了更好地利用这些新型材料的优势, 进行相关研究显得尤为重要。
- 4) 钢管混凝土外加加强节点的抗弯承载力和抗剪承载力计算公式, 尽管已有相关研究, 然而在实际应用中, 由于节点在材料和构造上的差异, 计算结果往往存在一定的差异。因此, 现有的各种屈服机制和计算模型仍需进一步验证和优化。
- 5) 钢管混凝土外加加强节点在空间性能方面的研究还较少, 而地震的影响却是多方面的, 仍需进一步进行研究。

参考文献

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

- [2] 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.
- [3] 胡曙光, 丁庆军. 钢管混凝土[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [4] Han, L.H., Li, W. and Bjorhovde R. (2014) Developments and Advanced Applications of Concrete-Filled Steel Tubular (CFST) Structures: Members. *Journal of Constructional Steel Research*, **100**, 211-228. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.016>
- [5] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 50-61.
- [6] 周绪红, 刘永健, 姜磊, 等. PBL 加肋型矩形钢管混凝土结构力学性能研究综述[J]. 中国公路学报, 2017, 30(11): 45-62.
- [7] 刘君平, 陈津凯, 陈宝春. 钢管混凝土桁肋内栓钉相贯节点受力行为试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 150-157.
- [8] Xu, C.Z., Yang, Y.L., Tang, X., et al. (2019) Experimental Research on Static Behavior of Stiffened T-Shaped Concrete-Filled Steel Tubular Stubs Subjected to Concentric Axial Loading. *International Journal for Steel Structures*, **19**, 1591-1602. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0145-4>
- [9] Alatshan, F., Osman, S.A. and Hamid, R. (2020) Stiffened Concrete-Filled Steel Tubes: A Systematic Review. *Thin-Walled Structures*, **148**, Article ID: 106590. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106590>
- [10] 黎翔, 周绪红, 刘界鹏, 等. 圆钢管约束型钢管混凝土柱-钢梁框架结构体系分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2): 31-40.
- [11] 周政, 甘丹, 周绪红, 等. 斜拉肋加劲薄壁方钢管混凝土柱的滞回性能研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(6): 14-25.
- [12] 聂建国. 钢-混凝土组合结构原理与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [13] 蒋丽忠, 黄志, 陈善, 等. 钢管混凝土格构柱-组合箱梁节点抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(18): 156-163.
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [15] 韩林海, 牟廷敏, 王法承, 等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 1-24.
- [16] 王维. 钢-混凝土组合结构施工技术研究[J]. 建筑科技, 2021, 5(2): 55-57.
- [17] 陈宗平, 徐金俊, 薛建阳. 取代率对钢管再生混凝土短柱轴压性能退化的影响分析[J]. 实验力学, 2014, 29(2): 207-214.
- [18] 梁炯丰, 陈浩, 吴华英, 等. 方钢管约束再生塑料混凝土中长柱轴压力学性能研究[J]. 混凝土, 2017(1): 14-16.
- [19] 高屹, 黄静. 钢管珊瑚混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2017, 33(3): 9-13.
- [20] 王增亮, 陈士军, 鹿庆蕊, 等. 圆钢管约束再生塑料混凝土短柱轴压性能退化研究[J]. 混凝土, 2018(12): 15-17.
- [21] Liu, J.M., Ou, Z.W., Peng, W., et al. (2018) Literature Review of Coral Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **43**, 1529-1541. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2705-x>
- [22] Wang, Y.L., Chen, G.P., Wang, B.L., et al. (2018) Behavior of Innovative Circular Ice Filled Steel Tubular Stub Columns under Axial Compression. *Construction and Building Materials*, **171**, 680-689. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.208>
- [23] Fu, Z.Q., Ji, B.H., Wu, D.Y., et al. (2019) Behaviour of Light-Wight Aggregate Concrete-Filled Steel Tube under Horizontal Cyclic Load. *Steel and Composite Structures*, **32**, 717-729.
- [24] 王元熙, 杜喜凯, 刘京红. 方钢管自密实铁尾矿混凝土短柱偏压力学性能[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2020, 40(4): 351-359.
- [25] Gao, S. and Guo, L. (2021) Utilization of Coal Gangue as Coarse Aggregate in Structural Concrete. *Construction and Building Materials*, **268**, Article ID 121212. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121212>
- [26] 何春锋, 刘大为, 梁炯丰, 等. 圆钢管约束再生塑料混凝土中长柱轴压力学性能研究[J]. 混凝土, 2021(6): 53-54, 59.
- [27] 杜颜胜, 李佳岐, 陈志华, 等. 矩形截面钢管尾矿砂再生混凝土柱抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11): 63-73.
- [28] 吕晶, 姚少楠, 赵欢, 等. 新型内填材料在钢管混凝土结构中的应用研究综述[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 54-68.
- [29] 赵均海, 樊军超, 胡壹, 等. 复式钢管混凝土结构研究现状与发展趋势[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022,

- 42(1): 1-15.
- [30] Rezaifar, O. and Younesi, A. (2017) Experimental Study Discussion of the Seismic Behavior on New Types of Internal/External Stiffeners in Rigid Beam-to-CFST/HSS Column Connections. *Construction and Building Materials*, **136**, 574-589. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.032>
- [31] 吴东平, 李伟, 陈焰周, 等. 钢管混凝土柱-钢梁边柱外加强环螺栓连接节点抗震性能[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(1): 75-79.
- [32] 吴海亮, 李腾, 孙佚良, 等. 方钢管钢管混凝土柱-H 型钢梁外环板节点抗剪性能研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(6): 97-103.
- [33] 戎贤, 石晓娜, 陈磊, 等. 方钢管钢管混凝土柱梁下栓上焊节点受力性能研究[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(11): 13-24.
- [34] 杨红, 余依瑾, 康乐, 等. 法兰连接钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(2): 157-172.
- [35] 丁发兴, 卫心怡, 潘志成, 等. 高轴压比方形钢管混凝土柱-组合梁单边栓接刚接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(7): 105-115.
- [36] Eom, S.S., Vu, Q.V., Choi, J.H., et al. (2019) Behavior of Composite CFST Beam-Steel Column Joints. *Steel and Composite Structures*, **32**, 583-594.
- [37] Ma, D.Y., Han, L.H., Zhao, X.L., et al. (2020) Seismic Performance of the Concrete-Encased CFST Column to RC Beam Joints: Analytical Study. *Steel and Composite Structures*, **36**, 533-551.
- [38] Li, W., Ma, D.Y., Xu, L.F., et al. (2022) Performance of the Concrete-Encased CFST Column-to-Beam 3-D Joints under Seismic Loading: Analysis. *Engineering Structures*, **252**, Article 113661. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113661>
- [39] Ma, D.Y. (2023) Seismic Performance of the Concrete-Encased CFST Column to RC Beam Joints: A Practical Model. *Journal of Building Engineering*, **78**, Article ID: 107567. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107567>
- [40] Li, H.C., Xue, J.Y., Chen, X., et al. (2022) Experimental Research on Seismic Damage of Cross-Shaped CFST Column to Steel Beam Joints. *Engineering Structures*, **256**, Article ID: 113901. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113901>
- [41] 余玉洁, 林思文, 张超, 等. 钢管混凝土柱-钢梁下栓上焊隔板贯通节点抗震试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(6): 2143-2154.
- [42] Architectural Institute of Japan (AIJ) (1997) Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures. Architectural Institute of Japan, Tokyo.
- [43] 中国工程建设标准化学会. CECS 159:2004. 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [44] 马旭. 矩形钢管柱-H 型钢梁外加强环节点核心区抗剪性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.