

型钢混凝土梁受力性能研究综述

陈维雅

西南科技大学土木工程与建筑学院, 中国·四川 绵阳 621000

摘要: 型钢混凝土梁发挥型钢、钢筋与混凝土协同受力优势, 在承载力、延性和耐久性等方面表现出良好的工程应用潜力。随着研究不断深入, 其研究内容已由早期抗弯性能分析逐步拓展至抗剪、抗扭作用等方面。本文系统分析总结了型钢混凝土梁在抗剪、抗弯和抗扭性能方面的研究进展, 并对后续研究方向进行了展望。

关键词: 型钢混凝土梁; 抗剪性能; 抗弯性能; 抗扭性能; 研究综述

Review on the Mechanical Behavior of Steel-Reinforced Concrete Beams

Chen Weiya

School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, China Sichuan Mianyang 621000

Abstract: Steel-reinforced concrete beams exhibit excellent engineering application potential in terms of bearing capacity, ductility, and durability by leveraging the synergistic force advantages of steel, reinforcement, and concrete. With the continuous deepening of research, its research content has gradually expanded from early analysis of bending performance to the opposite of shear and torsion resistance. This article systematically analyzes and summarizes the research progress of steel-reinforced concrete beams in terms of shear, bending, and torsion performance, and looks forward to future research directions.

Keywords: Steel-reinforced concrete beam; Shear performance; Flexural performance; Torsional performance; Literature review

0 引言

型钢混凝土梁发挥型钢、钢筋和混凝土协同受力优势, 广泛应用于高层建筑、大跨度结构及重载结构^[1-2]。在实际结构中, 梁构件往往并非单独承受弯矩或剪力, 而是处于弯剪、弯扭、剪扭甚至弯剪扭共同作用状态。因此, 抗剪、抗弯和抗扭性能成为评价型钢混凝土梁受力性能的重要指标。

近年来, 国内外学者围绕型钢混凝土梁的受力性能开展了大量试验研究和理论分析, 研究内容和考察因素涵盖剪跨比、混凝土强度、含钢率、配箍率、型钢翼缘宽度、栓钉布置形式、高温作用、再生骨料取代率以及超高性能混凝土应用等多个方面。已有研究表明, 型钢与混凝土之间的协同工作机制、界面黏结性能以及连接构造措施对梁构件的承载能力、延性及破坏形态具有重要影响。本文系统梳理了型钢混凝土梁抗剪、抗弯和抗扭性能的研究进展, 总结现有研究中存在的问题, 并对未来的研究方向进行了展望。

1 型钢混凝土梁抗剪性能

郑山锁等^[3]通过抗剪试验揭示了型钢高强高性能混凝

土梁抗剪承载力的主要影响因素。梁的斜截面抗剪承载力主要由混凝土、箍筋和型钢腹板共同提供, 并建立了相应的抗剪承载力计算公式。

邓明科等^[4]考虑高强混凝土脆性导致的破坏形态转变问题, 提出了采用高延性纤维混凝土改善型钢高强混凝土短梁抗剪性能的设计思路, 对不同剪跨比型钢高延性纤维混凝土短梁的抗剪性能进行了系统研究。结果表明, 高延性纤维混凝土能显著提高型钢高强混凝土短梁的受剪承载力、变形能力及耐损伤能力, 使构件呈现延性剪切破坏特征, 在破坏后仍保持较高剩余承载力。

杨勇等^[5]对预制装配型钢混凝土梁的受剪性能进行了剪切试验。结果表明, 剪跨比显著影响试件的破坏形态和承载能力; 基于变形协调条件和 Nakamura 模型建立的受剪承载力计算模型可较好反映其剪切破坏机理, 试验值与计算值吻合良好。

张维国等^[6]将有限元模拟引入预制装配型钢混凝土梁的抗剪性能研究。结果表明, 界面粘结强度是影响试件承载能力的关键因素, 采用高强螺栓加固可避免粘结破坏并保证型钢充分屈服; 增加用钢量可显著提升试件初始刚度

和承载能力,而混凝土强度的影响较小;钢构规程计算结果与模拟值吻合较好,但因未考虑混凝土与型钢的组合作用,仍存在一定局限性。

刘坚等^[7]通过 BP 神经网络算法,建立了预制装配式型钢混凝土梁抗剪承载力的智能计算模型,研究了模型计算精度及影响抗剪承载力的主要参数。结果表明,智能模型具有良好的计算精度和泛化能力;钢筋间距、型钢屈服强度、箍筋屈服强度及型钢腹板含钢率对抗剪承载力影响较大,且随着试验数据的积累,模型可进一步优化完善。

从上述研究进展来看,对型钢混凝土梁抗剪性能的研究已从普通型钢混凝土梁逐步扩展至型钢高强高性能混凝土梁、高延性纤维混凝土梁、预制装配式梁等新型构件。但目前研究仍主要集中在构件层面的受剪承载力和破坏形态分析,关于型钢混凝土梁在复杂受力状态下的抗剪机理、不同参数间的耦合影响规律等方面研究还相对不足,这也是后续需要继续深入的方向。

2 型钢混凝土梁抗弯性能

随着型钢混凝土结构在高铁车站、大跨公共建筑等工程中的广泛应用,其抗弯性能逐渐受到关注。型钢混凝土梁在正常使用及极限状态下均面临复杂的受力情形,对其抗弯性能进行系统研究,对于完善其设计理论具有重要意义。

陈宗平等^[8]设计了多个高温后型钢再生混凝土梁试件,研究了高温温度和再生粗骨料取代率对梁受弯性能的影响。研究表明,高温作用会降低型钢再生混凝土梁的受弯承载能力,且承载力随温度升高总体呈下降趋势;当温度低于 400 ℃时,承载力下降较缓,而温度高于 400 ℃后下降趋势明显,600 ℃时强度退化最为显著;再生粗骨料取代率对梁极限承载力的影响相对较小。

刘祖强等^[9]采用试验方法研究了高强型钢超高性能混凝土梁的受弯性能,分析了配钢率、型钢强度、钢纤维掺量、型钢位置及混凝土强度等因素对梁受弯性能的影响。研究表明,高强型钢超高性能混凝土梁受弯过程依次经历未开裂、带裂缝工作和破坏三个阶段,整体表现为适筋破坏;提高配钢率和型钢强度可提高梁的受弯承载力和变形能力,增加钢纤维掺量可改善梁的抗裂性能和变形能力,提高超高性能混凝土抗压强度及下移型钢位置均可提高梁的受弯承载力,但可能降低构件的变形能力。

林上顺等^[10]通过抗弯极限承载力试验和理论推导,对矩形截面型钢超高性能混凝土梁的抗弯性能进行了研究。

结果表明,含钢率、型钢类型以及纵筋配筋率,都会对构件的破坏模式、抗弯刚度和承载力产生明显影响。

郑山锁等^[11]通过抗弯试验,对型钢高强高性能混凝土梁的受弯性能进行了研究,分析了试件的破坏过程、裂缝开展模式及破坏形态,得到了典型荷载-挠度曲线及混凝土、型钢沿截面高度的应变分布规律,并探讨了混凝土强度等级、含钢率、翼缘宽度比及剪切连接方式对梁抗弯性能的影响规律。

李俞谕等^[12]采用试验方法研究了双型钢混凝土梁的正截面抗弯性能,分析了箍筋率、型钢翼缘尺寸、纵筋配筋率、销钉布置、混凝土强度及双型钢间距等因素对梁受弯性能的影响。研究表明,双型钢混凝土梁具有较高的承载能力和良好的延性;提高箍筋率、加大型钢翼缘尺寸、增加纵筋配筋率以及在受拉区和受压区布置销钉,均可提高梁的开裂荷载和极限荷载;提高混凝土强度和增大两单肢型钢间距,也有利于提升梁的极限承载能力。

任重等^[13]通过四点弯曲试验,对薄壁型钢混凝土梁试件的抗弯性能进行了研究。结果表明,抗剪螺杆布置方式、截面形式、剪跨比以及混凝土保护层厚度,都会对试件的破坏模式、裂缝发展和极限承载力产生明显影响。

韩博文等^[14]采用力学试验和有限元数值模拟方法,研究了内置不同角钢骨架的型钢混凝土梁的受力性能,分析了角钢布置形式、布置位置、材料强度及剪跨比等因素对极限承载力、延性和破坏机理的影响,并基于试验与模拟结果提出了优化后的承载力及刚度计算公式,计算结果与试验值吻合良好。

年璐^[15]通过有限元数值模拟,对型钢混凝土梁的抗弯承载力进行了研究。结果表明,型钢的加入可有效降低混凝土梁在荷载作用下的受压和受拉损伤,阻止裂缝进一步发展;型钢混凝土梁的抗弯极限承载力较普通混凝土梁最大可提高约 1.5 倍,且提升幅度随含钢率增加而增大。

从上述研究进展来看,型钢混凝土梁抗弯性能的研究已从普通型钢混凝土梁逐步扩展至高温后再生混凝土梁、超高性能混凝土梁、双型钢梁及薄壁型钢梁等新型构件。研究内容也由传统的承载力分析和破坏形态观察,逐渐向多参数耦合影响、破坏机理揭示以及精细化数值模拟方法等方面延伸。但目前研究仍主要集中在构件抗弯性能,对于疲劳荷载、振动荷载作用下型钢混凝土梁的受力性能研究仍显不足,后续需要强化研究。

3 型钢混凝土梁抗扭性能

目前,关于型钢混凝土构件的研究主要集中于轴力、

弯矩、剪力或其组合作用下的受力性能,以及构件抗震性能、节点受力机理和构造措施等方面。然而在实际工程中,型钢混凝土构件常处于弯剪、弯扭或弯剪扭等复合受力状态。相较于抗弯和抗剪性能,针对型钢混凝土梁抗扭性能,尤其是复合受力状态下抗扭性能的研究起步较晚,相关试验数据和理论分析尚不够系统。由于扭矩作用下构件截面产生剪应力流,其传力路径和破坏机制与弯矩、剪力作用存在本质差异,开展型钢混凝土梁抗扭性能研究对于完善组合结构设计理论具有重要意义。

宋志刚等^[16]对 6 根型钢混凝土构件和 2 根钢筋混凝土构件开展了纯扭加载试验,研究了型钢混凝土构件的抗扭刚度,分析了截面尺寸、配钢率、型钢保护层厚度、配筋率和混凝土强度等因素对构件抗扭性能的影响。研究表明,型钢混凝土构件在纯扭作用下的受力过程可分为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段,且具有一定的延性;增大截面尺寸可明显提高构件的抗扭刚度,配置型钢能够提高构件的抗扭刚度和变形能力;配筋率主要影响开裂后的抗扭刚度,而混凝土强度对弹性阶段抗扭刚度的影响更为显著。

陈宇良等^[17]对 7 个焊接栓钉型钢混凝土试件开展纯扭试验研究,分析了栓钉间距、栓钉直径、栓钉长度和栓钉布置位置等因素对构件抗扭性能的影响。研究表明,适当增大栓钉间距可提高试件的抗扭强度,而增大栓钉直径会降低其抗扭承载力;交错焊接栓钉可有效提高试件的抗裂性能和抗扭承载力,在型钢翼缘和腹板同时焊接栓钉可进一步改善试件的延性和抗扭性能。

丁海军等^[18]通过纯扭试验,对箱形型钢混凝土梁的受扭性能进行了研究。结果表明,加载过程中型钢与混凝土能协同工作;箱形型钢抗扭刚度和配箍率对试件的抗扭承载力影响显著。吴见丰等^[19]通过纯扭试验,对中空箱型型钢混凝土梁的抗扭性能进行了研究,分析了试件的破坏特征,并推导了极限扭矩及开裂扭矩的计算公式。

陈宇良等^[20]对 12 根型钢混凝土 T 形梁开展了纯扭和弯扭静载试验,研究了 T 形梁在纯扭和弯扭作用下的受力性能,分析了翼缘宽度、型钢含钢率、配箍率、翼缘纵筋直径和弯扭比等因素对梁抗扭性能的影响。研究表明,型钢混凝土 T 形梁表现出较好的延性破坏特征,翼缘、型钢和混凝土之间的相互约束作用能够显著提高试件的抗扭强度和延性;增大型钢含钢率和弯扭比均可提高试件的极限扭矩,并提出了型钢混凝土 T 形梁开裂扭矩和极限扭矩计算方法,计算结果与试验结果吻合较好。

范新宇等^[21]通过单调加载试验,研究了型钢混凝土梁

在弯扭作用下的受力性能。结果表明,扭弯比、配筋率、混凝土强度及型钢规格等因素均会对试件的破坏形态、裂缝发展及损伤演变产生明显影响;试件经历弹性、弹塑性和破坏三个阶段,开裂前抗扭能力由混凝土抗拉强度和型钢抗扭刚度共同决定;钢筋混凝土梁的损伤程度大于型钢混凝土梁,且工字钢规格越大,对混凝土约束作用越小,越不利于受扭。

严舒云等^[22]通过有限元模拟,对倒 L 形型钢混凝土梁的受扭性能进行了研究,分析了混凝土强度、箍筋间距、纵筋配筋率、型钢型号及黏结滑移建模方法对构件抗扭性能的影响。结果表明,提高混凝土强度等级可显著提升试件极限承载力,但对延性和耗能能力影响较小;纵筋配筋率对抗扭能力几乎没有影响;减小箍筋间距和采用更大规格型钢可提升试件的延性和承载力;型钢-混凝土界面采用内聚力模型的计算精度高于摩擦接触模型,但计算成本较大且参数获取复杂。

从上述研究进展来看,型钢混凝土梁抗扭性能的研究已从普通型钢混凝土构件逐步扩展至焊接栓钉构件、T 形梁、中空箱型梁及倒 L 形梁等不同类型。研究方法也由早期的单一荷载试验逐步向复合受力试验与精细化数值模拟相结合的方向发展。但目前研究仍主要集中在构件层面的纯扭承载性能,关于复杂受力状态下型钢与混凝土的协同抗扭机理、不同参数间的耦合影响机制以及统一的设计计算方法等的研究仍显薄弱,这也是后续需要继续深入研究的方向。

4 结语与展望

型钢混凝土梁能够充分发挥型钢、钢筋与混凝土的协同受力作用,在抗剪、抗弯和抗扭等方面表现出良好的力学性能,具有广阔的工程应用前景。近年来,相关研究已由抗剪、抗弯等基本力学性能逐步扩展到高温作用、高性能材料应用等领域。已有研究表明,剪跨比、混凝土强度、含钢率、配箍率、型钢翼缘尺寸、栓钉布置形式及材料类型等因素,对型钢混凝土梁的承载能力、变形能力和破坏形态均具有显著影响。

但从整体上看,目前研究仍以构件层面的单一静力性能为主,对复杂受力状态下的统一力学模型、极端环境下的界面性能退化规律、结构体系层面的抗震性能、精细化数值模拟方法等方面研究还不够。后续有必要进一步加强弯剪扭复合受力理论模型、疲劳荷载、振动荷载作用下受力性能与累积损伤演化规律等方面研究,关注高温后、腐蚀环境下构件性能评估和界面粘结退化机制,同时结合高

性能材料应用和先进数值模拟手段,推动型钢混凝土梁研究向更系统、更深入、更贴近工程实际应用的方向发展。

参考文献:

- [1] 陈琦. 大跨度型钢混凝土梁的有限元分析[J]. 安徽建筑, 2024, 31(3): 59-61.
- [2] 刘茜. 型钢混凝土梁设计方法及承载性能的分析研究[J]. 黄山学院学报, 2023, 25(05): 76-79.
- [3] 郑山锁, 胡义, 车顺利等. 型钢高强高性能混凝土梁抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(03): 129-135.
- [4] 邓明科, 卢化松, 杨开屏等. 型钢高延性混凝土短梁抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 73-80.
- [5] 杨勇, 薛亦聪, 于云龙. 预制装配型钢混凝土梁受剪承载力试验与计算方法研究[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 92-100.
- [6] 张维国, 王俊毅. 预制装配型钢混凝土梁抗剪性能研究[J]. 建筑机械, 2024(4): 147-151.
- [7] 刘坚, 招渝, 刘长江等. 预制装配式型钢混凝土梁抗剪承载力的智能模型研究[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(3): 12-20.
- [8] 陈宗平, 郑巍, 薛建阳等. 高温后型钢再生混凝土梁受弯试验及承载力计算[J]. 工业建筑, 2014, 44(11): 45-50.
- [9] 刘祖强, 任甬优, 薛建阳. 高强型钢超高性能混凝土梁受弯性能试验研究及有限元分析[J]. 工程力学, 2023, 40(04): 102-115.
- [10] 李俞谕, 肖岩, 刘涛等. 双型钢混凝土梁正截面受弯性能的研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(5): 125-131.
- [11] 郑山锁, 陶清林, 胡义等. 型钢高强高性能混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 140-145.
- [12] 林上顺, 暨邦冲, 刘君平等. 矩形截面型钢超高性能混凝土梁抗弯承载力[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(3): 94-109.
- [13] 任重, 张志鹏, 何逸鸣等. 薄壁型钢混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 29(8): 19-27+39.
- [14] 韩博文, 高华国, 尤季旺等. 内置不同角钢骨架的型钢混凝土梁受力性能研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(14): 75-82+125.
- [15] 年璐. 型钢混凝土梁抗弯承载力有限元分析[J]. 石材, 2025(8): 58-60.
- [16] 宋志刚, 李红远, 邓波等. 型钢混凝土梁抗扭刚度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(S2): 182-190.
- [17] 陈宇良, 钟铭, 陈宗平. 焊接栓钉型钢混凝土梁纯扭试验及损伤分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(4): 110-117+97.
- [18] 丁海军, 梁书亭, 朱筱俊等. 箱形型钢混凝土梁纯扭性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41(1): 19-22+29.
- [19] 吴见丰, 郝娟. 中空箱型钢混凝土梁的抗扭性能研究[J]. 工程建设与设计, 2016(15): 31-33+35.
- [20] 陈宇良, 张绍松, 陈宗平. 型钢混凝土 T 形梁纯扭及弯扭性能试验研究[J]. 工程力学, 2024, 41(04): 116-127.
- [21] 范新宇, 邵永健, 杭子彦等. 型钢混凝土梁弯扭性能试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(2): 90-97.
- [22] 严舒云, 邵永健, 谢强. 基于 ABAQUS 的倒 L 形型钢混凝土梁受扭性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(4): 68-73+80.

作者简介: 陈维雅 (2005.05-), 女, 汉族, 四川省中江县, 本科生, 研究方向: 钢-混凝土组合结构。